



ISSN: 2658–5782

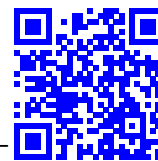
Номер 1

2023

# МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

[mfs.uimech.org](https://mfs.uimech.org)





## Динамика давления жидкости в трещине гидроразрыва пласта при изменяющемся режиме работы скважины<sup>1</sup>

Шагапов В.Ш.<sup>\*</sup>, Башмаков Р.А.<sup>\*\*</sup>, Фокеева Н.О.<sup>\*,\*\*\*</sup>, Шамматова А.А.<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

<sup>\*\*</sup>Уфимский университет науки и технологий, Уфа

<sup>\*\*\*</sup>ООО РН-БашНИПНефть, Уфа

<sup>\*\*\*\*</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

Гидроразрыв пласта является одним из наиболее эффективных методов интенсификации добычи углеводородов, способствующим повышению продуктивности скважин за счет формирования трещин высокой проводимости. В настоящей статье устанавливается связь между изменяющимся расходом жидкости скважины и давлением в трещине и пласте при переменном режиме ее работы. С этой целью решается интегро-дифференциальное уравнение, описывающее динамику давления в трещине гидроразрыва пласта при известном изменении давления в скважине или по заданному дебиту. По данным изменения давления на забое при непродолжительном включении насосов, поддерживающих постоянный дебит, и последующего их выключения (П-образное изменение дебита) удобно определять характеристики трещины гидроразрыва пласта по формулам, предлагаемым в данной работе. Результаты могут быть использованы при интерпретации гидродинамических исследований скважин. В работе показано применение полученных уравнений для определения забойного давления при решении практической задачи с реальными промысловыми данными, а также представлена формула, позволяющая без учета проницаемости и ширины трещины ГРП вычислить ее проводимость.

**Ключевые слова:** гидроразрыв пласта, нефтяная скважина, динамика давления в трещине ГРП, переменные режимы работы скважины

### 1. Введение

Настоящая статья посвящается памяти выдающегося ученого, доктора физико-математических наук, профессора, член-корреспондента Академии наук РБ и нашего научного руководителя Владислава Шайхулагзамовича Шагапова. Здесь приведены результаты одной из последних совместных работ.

<sup>1</sup>Исследование выполнено за счет средств гранта РНФ № 21-11-00207 (<https://rscf.ru/project/21-11-00207/>)

В 2023 году планируется тестирование первого отечественного флота гидравлического разрыва пласта (ГРП) на месторождении в ХМАО [1]. Опытный образец состоит из 12 агрегатов и разрабатывался при участии госкорпорации «Роскосмос», что подтверждает востребованность технологии ГРП. Возникшие или расширившиеся существующие трещины при закачке расклинивающей жидкости соединяясь между собой становятся проводниками флюидов. Трещины связывают скважину с удаленными зонами пласта, расширяя доступную территорию и облегчая транспортировку нефти к скважине при извлечении жидкости или увеличивая отток флюида от скважины при нагнетании. Созданные трещины закрепляются проппантом с целью предотвращения их смыкания. Моделиро-

вание процесса гидроразрыва и фильтрации жидкости в окрестности скважины с ГРП достаточно сложный процесс. Развитие вычислительной техники позволяет совершенствовать модели, однако современный уровень пока не позволяет отказаться от приближенного описания процессов.

Множество исследований посвящено трещинам в нефтяных пластах. В работе [2] Gringarten A.C., Ramey H.J. Jr., а также в статье Heber Cinco L., F. Samaniego V., N. Dominguez A. [3] выделяются различные периоды фильтрации по характеру изменения забойного давления, предлагается система дифференциальных уравнений, описывающая фильтрацию флюида в трещине ГРП и пласте вокруг трещины. В статьях [3–7] показана работа скважины с вертикальной трещиной ГРП в режимах постоянного расхода или постоянного давления на скважине.

В настоящей работе изучается распределение давления в вертикальной трещине ГРП при различных режимах работы скважины: при изменяющемся давлении на скважине и при изменяющемся дебите скважины; установлена связь между динамикой расхода жидкости на скважине и давлением. Найдены точное аналитическое и приближенное аналитическое решения системы уравнений, описывающих фильтрацию флюида в трещине ГРП. Результаты работы сопоставлены с практически данными, полученными на реальных скважинах. По данным изменения давления на забое при непродолжительном включении насосов, поддерживающих постоянный дебит, и последующего выключения насосов (П-образное изменение дебита) удобно определять характеристики трещины ГРП по формулам, предлагаемым в работе.

## 2. Основные уравнения

В работах [3–7] приведена математическая модель, описывающая фильтрацию флюида из скважины в трещину ГРП и далее в пласт или из него в трещину, а затем в скважину.

Постановка задачи следующая. Рассматривается скважина с вертикальной трещиной ГРП. Считается, что трещина симметрична, закреплена пропантом, препятствующим смыканию. Проницаемость ее существенно выше проницаемости пласта.

В силу симметричности данной задачи достаточно рассматривать одно крыло трещины. Направим ось  $Ox$  вдоль направления трещины, ось  $Oy$  определим перпендикулярно плоскости трещины (рис. 1). Отсчет ведется от стенки трещины.

Пласт однородный, высота трещины  $h_f$  существенно больше ее ширины  $d_f$ , давление в

трещине слабо изменяется с глубиной. Такая упрощенная модель позволяет отказаться от введения третьей пространственной координаты — глубины. Нижние индексы  $f$ ,  $p$  при переменных означают, что рассматриваются значения, относящиеся к трещине и пласту соответственно, а индекс «0» используется для начального «невозмущенного» значения.

Пусть начальное давление в пласте и трещине равно  $P_0$ , давление в трещине  $P_f$ , в пласте —  $P_p$ :

$$\Delta P_i = P_i - P_0 \quad (i = f, p).$$

Заметим, что  $P_p$  есть функция координат  $x, y$  и времени  $t$ ,  $P_f$  — функция от  $x$  и  $t$ .

Система уравнений описывает распределения давления в пласте и трещине (см. [4–7]):

$$\frac{\partial \Delta P_f}{\partial t} = \alpha_f \frac{\partial^2 \Delta P_f}{\partial x^2} + 2 \frac{m_p \alpha_p}{m_f d_f} \left( \frac{\partial \Delta P_p}{\partial y} \right) \Big|_{y=0}, \quad (1)$$

$$(0 < x < l_f).$$

$$\frac{\partial \Delta P_p}{\partial t} = \alpha_p \frac{\partial^2 \Delta P_p}{\partial y^2}, \quad (2)$$

$$(0 < x < l_f, 0 < y < \infty)$$

где  $\alpha_i = \frac{k_i \rho_0 C^2}{m_i \mu}$  — коэффициент пьезопроводности;  $k_i$  — коэффициент проницаемости;  $\rho_0$  — плотность жидкости;  $C$  — скорость звука для флюида;  $m_i$  — пористость ( $i = p, f$ );  $\mu$  — вязкость флюида;  $l_f$  — длина;  $d_f$  — ширина трещины.

Уравнение (1), описывающее фильтрацию флюида в трещине, отличается от классического уравнения пьезопроводности последним слагаемым, отвечающим за переток жидкости между пластом и трещиной ГРП.

Запишем краевые условия:

$$\Delta P_p \Big|_{y=0} = \Delta P_f, \quad \Delta P_p \Big|_{y \rightarrow \infty} = \Delta P_f \Big|_{y \rightarrow \infty} = 0.$$

Система (1)–(2) в работе [5] сводится к одному

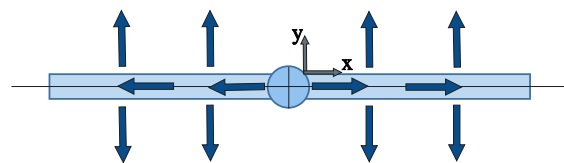


Рис. 1. Билинейная схема течения жидкости

интегро-дифференциальному уравнению:

$$\frac{\partial \Delta P_f}{\partial t} = \alpha_f \frac{\partial^2 \Delta P_f}{\partial x^2} - \frac{2m_p \alpha_p}{m_f d_f} \int_{-\infty}^t \frac{\partial \Delta P_f(\tau, x)}{\partial \tau} \frac{d\tau}{\sqrt{\pi \alpha_p (t - \tau)}}. \quad (3)$$

Здесь считаем, что при  $t \rightarrow -\infty$  система находится в покое, то есть

$$\Delta P_f \Big|_{t=-\infty} = \Delta P_p \Big|_{t=-\infty} = 0.$$

Левая часть уравнения (3), отвечающая за упругость флюида в трещине, несущественна (см. [6]). Поэтому вместо (3) будем использовать упрощенное уравнение

$$\frac{\partial^2 \Delta P_f}{\partial x^2} = \chi \int_{-\infty}^t \frac{\partial \Delta P_f(\tau, x)}{\partial \tau} \frac{d\tau}{\sqrt{\pi(t - \tau)}}, \quad (4)$$

где  $\chi = \frac{2}{d_f} \frac{m_p}{m_f} \frac{\sqrt{\alpha_p}}{\alpha_f}$ .

### 3. Точные аналитические решения для трещины бесконечной длины

В работе [6] приведено решение уравнения (4) для случая резкого изменения давления на фиксированную величину  $\Delta P_{(w)} = \text{const}$  в некоторый момент времени  $\tau$ .

Пусть до момента времени  $\tau$  нефть в трещине и пласте находилась в покое:

$$\Delta P_f = 0 \quad (t < \tau, x > 0),$$

$$\Delta P_f = \Delta P_{(w)} \quad (t \geq \tau, x = 0).$$

Рассмотрим решение (4) в предположении, что длина трещины бесконечна ( $l_f = \infty$ ) и скважина нагнетательная  $\Delta P_{(w)} > 0$ .

Решение уравнения (4), описывающего распределение давления в трещине ГРП при приведенных условиях и удовлетворяющего условию  $\Delta P_f \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow \infty$ , можно представить, согласно результатам работы [8], в следующем виде:

$$\Delta P_f = \Delta P_{f(w)} \text{Gil} \left( \sqrt{\chi/2} \cdot x(t - \tau)^{-1/4} \right),$$

где

$$\text{Gil}(z) = 1 - \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(z\eta^{1/4})}{\eta} e^{-\eta - z\eta^{1/4}} d\eta.$$

Отсюда определим формулу для объемного расхода флюида в одном крыле трещины на единицу высоты трещины:

$$q = -\frac{3.6}{\pi} \sqrt{\frac{\chi}{2}} \frac{d_f k_f}{\mu} \frac{P_{f(w)}}{(t - \tau)^{1/4}}, \quad t > \tau.$$

Рассмотрим случай, когда давление на забое изменяется в моменты времени  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ . Считаем, что до момента времени  $\tau_1$  скорости течения жидкости и перепады давления в трещине и пласте равны нулю  $v_f \Big|_{t < \tau_1} = 0, v_p \Big|_{t < \tau_1} = 0, \Delta P_f \Big|_{t < \tau_1} = \Delta P_{(w)0} = 0, P_p \Big|_{t < \tau_1} = 0$ . В момент времени  $\tau_1$  начинается работа скважины и давление  $\Delta P_{(w)1}$  поддерживается постоянным до момента времени  $\tau_2$ . С момента времени  $\tau_2$  до  $\tau_3$  давление скважины  $\Delta P_{(w)2}$  и т.д.

Тогда решение, описывающее изменение давления в трещине, может быть записано в виде:

$$\Delta P_f(t, x) = \sum_{i=1}^n H(t - \tau_i) (\Delta P_{(w)i} - \Delta P_{(w)i-1}) \times \text{Gil} \left( \sqrt{\chi/2} x (t - \tau_i)^{-1/4} \right). \quad (5)$$

Здесь функция Хевисайда

$$H(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0. \end{cases}$$

Учитывая закон Дарси, получим

$$q = -\frac{3.6}{\pi} \frac{d_f}{k_f} \mu \sqrt{\chi/2} \sum_{i=1}^n H(t - \tau_i) \times (\Delta P_{(w)i} - \Delta P_{(w)i-1}) (t - \tau_i)^{-1/4}. \quad (6)$$

Таким образом, динамику давления в трещине ГРП и расход жидкости на скважине можно описать через (5)–(6).

Пусть теперь до момента времени  $\tau$  скважина и пласт находились в состоянии покоя. В момент времени  $\tau$  начинается работа скважины в режиме поддержания постоянного расхода жидкости ( $q = \text{const}$ ). В работе [6] приведено аналитическое решение уравнения (4) для данного случая:

$$\Delta P_f = -\frac{qu(t - \tau)^{1/4}}{d_f k_f \sqrt{\chi/2}} \cdot \text{Zil}(z), \quad (7)$$

$$z = \sqrt{\chi/2} \cdot x(t - \tau)^{-1/4} \quad (t \geq \tau),$$

где специальная функция  $\text{Zil}(z)$  определяется как

$$\text{Zil}(z) = \int_z^{+\infty} \text{Gil}(\xi) d\xi.$$

Подставляя в выражение (7)  $x = 0$ , получим закон изменения перепада давления на скважине:

$$\Delta P_{(w)} = \frac{Zil(0)q\mu}{d_f k_f \sqrt{\chi/2}} (t - \tau)^{1/4}.$$

Используя линейность уравнения (4), обобщим полученные выражения для  $\Delta P_f$  и  $\Delta P_{f(w)}$  на случай, когда дебит принимает постоянные значения  $q_1, q_2, \dots, q_n$  в промежутках времени  $[\tau_1, \tau_2), [\tau_2, \tau_3), \dots, [\tau_n, \infty)$ :

$$\begin{aligned} \Delta P_f(t, x) = & -\frac{\mu}{d_f k_f \sqrt{\chi/2}} \times \\ & \times \left( \sum_{i=1}^n H(t - \tau_i) (q_i - q_{i-1}) (t - \tau_i)^{1/4} \times \right. \\ & \left. \times Zil\left(\sqrt{\frac{\chi}{2}} x (t - \tau_i)^{-1/4}\right) \right), \end{aligned}$$

где  $\Delta P_f(t, x)$  — давление в трещине ГРП;  $q_0 = 0$ . Для практических целей можно брать значение  $Zil(0) = 0.78$  (см. [5, 6]).

Для перепада давления между значениями забоя скважины и пластом ( $\Delta P_{f(w)} = \Delta P_f(t, 0)$ ) получим

$$\begin{aligned} \Delta P_{f(w)} = & \frac{-\mu Zil(0)}{d_f k_f \sqrt{\chi/2}} \times \\ & \times \left( \sum_{i=1}^n (t - \tau_i)^{1/4} H(t - \tau_i) (q_i - q_{i-1}) \right). \end{aligned} \quad (8)$$

#### 4. Приближенные аналитические решения, полученные с помощью метода ПССС для трещины бесконечной длины

Согласно методу последовательной смены стационарных состояний (ПССС) [9] уравнение (2) решается приближенно в предположении, что пласт в каждый момент времени условно разделен на «возмущенную» и «невозмущенную» зоны. В невозмущенной зоне давление считается равным первоначальному. Расстояние  $l$  от трещины до границы невозмущенной зоны определяется количеством жидкости, перетекшей из трещины в пласт,  $t > \tau$ , где  $\tau$  — время начала работы скважины.

$$l_p = \sqrt{2\alpha_p(t - \tau)}.$$

При этом в невозмущенной зоне решается уравнение установившейся фильтрации, т.е. считаем что давление в пласте определяется линейной функцией по координате  $y$ :

$$\Delta P_p = -\Delta P_f \frac{y}{l_p}, \quad t \geq \tau. \quad (9)$$

Здесь время  $t$  входит как параметр.

В уравнении (1) для задач, имеющих наибольший практический интерес, можно пренебречь слагаемым в левой части, отвечающим за упругоэластичность жидкости в трещине, также, как сделано в разделе 2. То есть вместо (1) будем рассматривать уравнение

$$\frac{\partial^2 \Delta P_f}{\partial x^2} = -\frac{2}{d_f} \frac{m_p \alpha_p}{m_f \alpha_f} \left( \frac{\partial \Delta P_p}{\partial y} \right) \Big|_{y=0}.$$

Откуда, учитывая (9), запишем уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Delta P_f}{\partial x^2} = & \frac{\chi}{\sqrt{2(t - \tau)}} \Delta P_f, \\ \chi = & \frac{2}{d_f} \frac{m_p \sqrt{\alpha_p}}{m_f \alpha_f}, \quad t \geq \tau. \end{aligned} \quad (10)$$

Решая (4), получим

$$\begin{aligned} \Delta P_f = & C_1 \exp\left(-x \sqrt{\chi / \sqrt{2(t - \tau)}}\right) + \\ & + C_2 \exp\left(x \sqrt{\chi / \sqrt{2(t - \tau)}}\right), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $t \geq \tau$ ,  $0 < x < l_f$ ,  $l_f$  — длина трещины;  $C_1$  и  $C_2$  — произвольные константы.

Рассмотрим решение (11) в предположении, что длина трещины бесконечна ( $l_f = \infty$ ). Сравнение полученных в работе приближенных формул с полевыми испытаниями показывает, что предположение о бесконечной длине трещины для большинства реальных ГРП вполне допустимо и дает хорошо согласующиеся с практикой результаты.

Пусть до момента времени  $\tau$  нефть в трещине и пласте находилась в покое ( $v_p = v_f = 0$ ,  $P_p = 0$ ,  $P_f = 0$ ). Здесь  $P_{f(w)}$  — значение давления на скважине, установившееся в момент времени  $\tau$ .

Рассмотрим работу нагнетательной скважины в режиме постоянного расхода. Исходное состояние пласта и трещины такое же, как и в предыдущем случае, расход жидкости при  $t < \tau$  нулевой. Требуется определить эволюцию распределения давления в трещине  $P_f$  и закон изменения давления в скважине  $\Delta P_{f(w)}$ . Воспользуемся решением (11) для уравнения (10). Так как  $\Delta P_f \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow \infty$ , получаем, что  $C_2 = 0$ , используя (9) и линейность системы уравнений (1)–(2) можем обобщить полученные выражения для  $P_f$  и  $P_{f(w)}$  на случай, когда дебит принимает постоянные значения  $q_1, q_2, \dots, q_n$  в промежутках времени

$[\tau_1, \tau_2), [\tau_2, \tau_3), \dots, [\tau_n, \infty)$ :

$$\Delta P_f = \frac{-\mu}{2^{1/4} d_f k_f \sqrt{\chi/2}} \times \left( \sum_{i=1}^n H(t - \tau_i) (q_i - q_{i-1}) (t - \tau_i)^{1/4} \times \exp \left( -x \sqrt{\chi} / \sqrt{2(t - \tau_i)} \right) \right). \quad (12)$$

Для перепада давления между значениями забоя скважины и пластом ( $\Delta P_{f(w)} = \Delta P_f(t, 0)$ ) запишем

$$\Delta P_{f(w)} = \frac{-\mu}{2^{1/4} d_f k_f \sqrt{\chi/2}} \times \left( \sum_{i=1}^n (t - \tau_i)^{1/4} H(t - \tau_i) (q_i - q_{i-1}) \right). \quad (13)$$

Для проведения расчетов используются следующие значения параметров:  $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $m_f = 0.3$ ;  $\mu = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $C = 1500 \text{ м/с}$ ;  $k_p = 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $m_p = 0.1$ ;  $k_f = 10^{-10} \text{ м}^2$ ;  $d_f = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

На рис. 2 показано давление скважины при П-образном изменении дебита (рис. 3) до величины  $q = Q/h = 1 \text{ м}^2/\text{сут}$  в начальный момент  $t = 0$  и падение до 0 через одни сутки. При П-образном изменении дебита образуется характерный зубец на кривой изменения давления. На рис. 4 показана эволюция давления в трещине ГРП при П-образном изменении дебита скважины, соответствующему рис. 3. Кривая 1 соответствует моменту времени  $\tau = 1/4 \text{ сут.}$ ; кривая 2 – 1 сут.; кривая 3 – 1 сут. 2 часа.; кривая 4 – 2 суток.

При П-образном изменении дебита скважины исходя из формулы (12) и подставляя выражения для  $\chi$  и коэффициентов пьезопроводности, можно определить проводимость трещины ГРП:

$$d_f k_f = \frac{0.6084 \cdot q^2 \sqrt{\tau} \cdot \mu^{3/2} \cdot C \sqrt{\rho}}{(\Delta P_{(w)}(\tau))^2 \cdot \sqrt{k_p} \cdot \sqrt{m_p}}. \quad (14)$$

### 5. Работа с промышленными данными

Рассмотрим фактические данные работы двух скважин. На рис. 5 представлена кривая изменения промышленного дебита первой скважины [8].

На рис. 6 приведено сопоставление исходного давления (красная кривая), результатов вычислений по точным аналитическим формулам (8) (зеленый пунктир) и приближенным методом ПССС (13) (синие точки) [10]. На рис. 7 и 8 аналогично показаны результаты анализа работы второй скважины.

Величины всех параметров в формулах, кроме проводимости трещины  $d_f \cdot k_f$ , известны. Значение

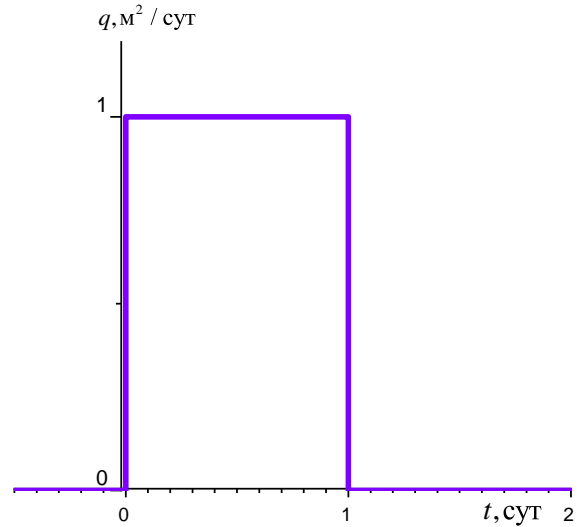


Рис. 2. Изменение давления на скважине при двухступенчатом изменении расхода жидкости

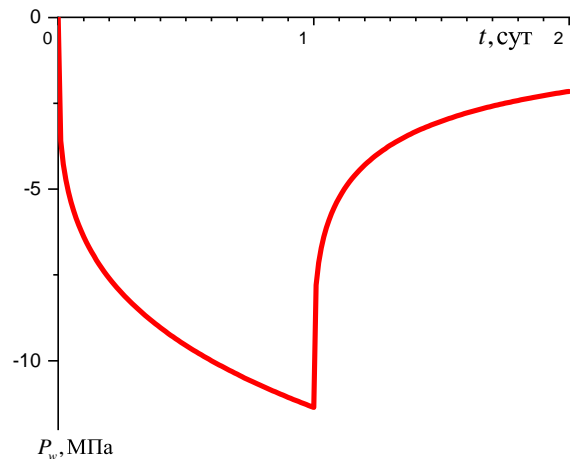


Рис. 3. Двухступенчатое изменение расхода жидкости

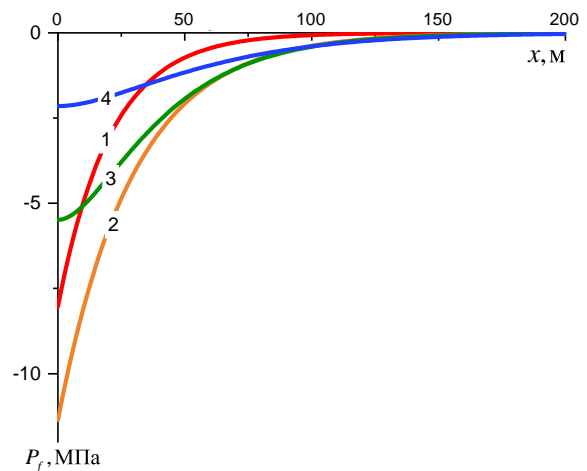


Рис. 4. Эволюция давления в трещине ГРП при двухступенчатом изменении расхода жидкости

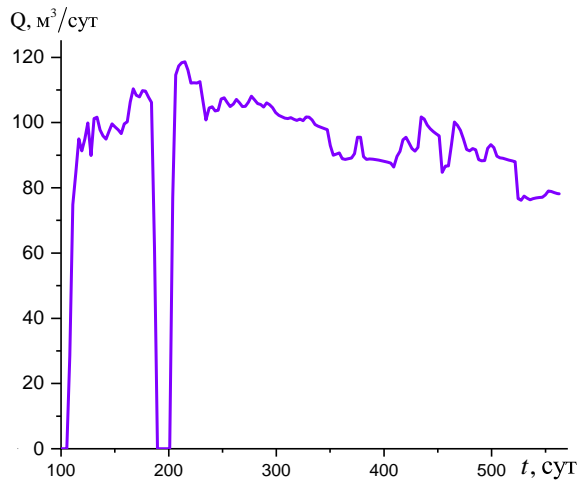


Рис. 5. Промысловый дебит первой скважины

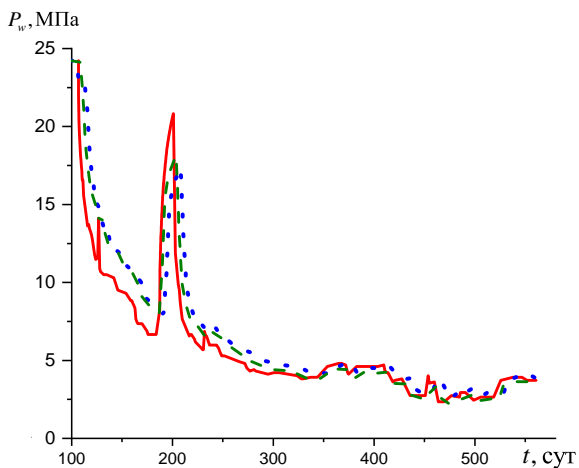


Рис. 6. Сопоставление давления первой скважины: исходных промысловых данных (красный цвет), точные аналитические решения (зеленый), приближенные решения методом ПССС (синий)

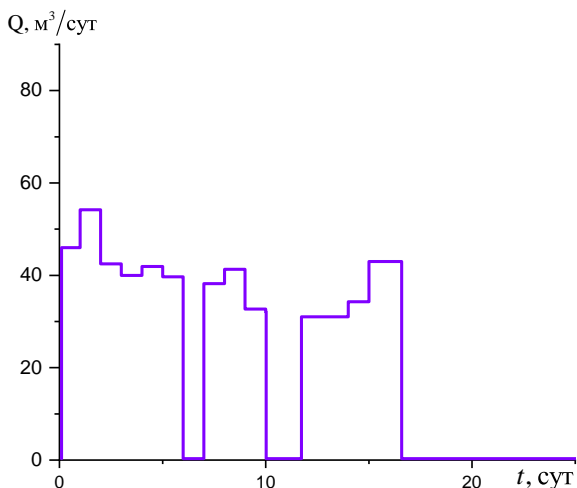


Рис. 7. Промысловый дебит второй скважины

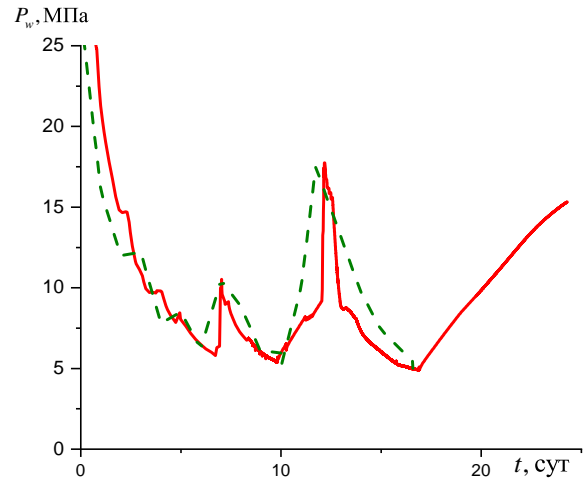


Рис. 8. Сопоставление давления второй скважины: исходных промысловых данных (красный цвет), точные аналитические решения (зеленый)

этого параметра можно определить из П-образного закона изменения дебита и соответствующего изменения давления на забое скважины. По первым значениям скачков дебита и соответствующим значениям реального давления на скважине предварительно была определена проводимость трещины по формуле (14). Проводимость для первой и второй скважины составила  $d_f \cdot k_f = 1308$  и  $1616$  мД·м соответственно.

## 6. Заключение

В результате проведенной работы получены точные и приближенные аналитические решения системы уравнений, мало отличающиеся от точных, но более удобные для применения на практике. На основе этих выражений появляется возможность определить дебит или забойное давление при заданном законе изменения давления на забое или дебита скважины и эволюцию давления в трещине ГРП. Решения сопоставлены с промысловыми данными реальных скважин. Результаты работы могут быть применены для интерпретации гидродинамических исследований скважин и определения проводимости трещины ГРП.

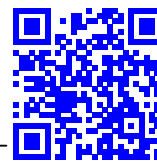
## Список литературы

- [1] И «нефтянка» по плечу. Диверсификация в космической отрасли // Журнал «Русский космос». 2022. № 04(38). С. 64–67. <https://www.roscosmos.ru/34908/>
- [2] Gringarten A.C., Ramey H.J. Jr. Unsteady-State Pressure Distributions Created by a Well With a Single Horizontal Fracture, Partial Penetration, or Restricted Entry // SPE J. 1974. V. 14. Pp. 413–426. DOI: 10.2118/3819-PA



- [3] Heber Cinco L., F. Samaniego V., N. Dominguez A. Transient Pressure Behavior for a Well With a Finite-Conductivity Vertical Fracture // SPE J. 1978. V. 18. Pp. 253–264.  
DOI: [10.2118/6014-PA](https://doi.org/10.2118/6014-PA)
- [4] Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. Нестационарная фильтрация в пласте с трещиной гидроразрыва // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2019. № 5. С. 6–14.  
DOI: [10.1134/S0568528119050050](https://doi.org/10.1134/S0568528119050050)
- [5] Шагапов В.Ш., Нагаева З.М. К теории фильтрационных волн давления в трещине, находящейся в пористой проницаемой среде // Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т. 58, № 5. С. 121–130.  
DOI: [10.15372/PMTF20170512](https://doi.org/10.15372/PMTF20170512)
- [6] Нагаева З.М., Шагапов В.Ш. Об упругом режиме фильтрации в трещине, расположенной в нефтяном или газовом пласте // Прикладная математика и механика. 2017. Т. 81, № 3. С. 319–329.  
EDN: [29364383](https://www.edn.net/29364383)
- [7] Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. Моделирование неустановившейся фильтрации жидкости в пласте с трещиной гидроразрыва // Прикладная механика и техническая физика. 2022. № 4. С. 116–125.  
DOI: [10.15372/PMTF20220412](https://doi.org/10.15372/PMTF20220412)
- [8] Башмаков Р.А., Фокеева Н.О., Шагапов В.Ш. Давление и дебит при переходных режимах работы скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва // Прикладная математика и механика. 2022. Т. 86, вып. 6. С. 998–1012.  
DOI: [10.31857/S0032823522060017](https://doi.org/10.31857/S0032823522060017)
- [9] Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. Гостоптехиздат, Москва, 1963. 397 с.
- [10] Шагапов В.Ш., Нагаева З.М. Приближенное решение задачи об упругом режиме фильтрации в трещине, находящейся в нефтяном пласте // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93, № 1. С. 206–215.  
EDN: [42335233](https://www.edn.net/42335233)





## Fluid pressure dynamics in a hydraulic fracture during transient-well-operation mode

Shagapov V.Sh. \*, Bashmakov R.A. \*\*, Fokeeva N.O.\*\*\*\*, Shammatova A.A. \*\*\*\*

\*Mavlyutov Institute of Mechanics of UFRC RAS, Ufa, Russia

\*\*Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

\*\*\*RN-BashNIPIneft, Ufa, Russia

\*\*\*\*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Hydraulic fracturing is one of the most effective methods for intensifying hydrocarbon production. The paper describes the transient-well-operation modes of the well, establishes a connection between the changing fluid flow in the well and the pressure in the fracture and reservoir. With this purpose, a solution is found to the integro-differential equation that describes the change in pressure in the hydraulic fracture with a known change in pressure in the well or at a given flow rate. Based on the bottomhole pressure change data for a short-term pump operation that maintains a constant flow rate and subsequent pump shutdown (II-shaped flow rate change), it is convenient to determine the characteristics of a hydraulic fracture using the formulae proposed in the paper. The results of the work can be used in hydrodynamic studies of wells. The article shows the application of the obtained equations for determining bottomhole pressure when solving a practical problem with field data, and also presents a formula that allows calculating its conductivity without taking into account the permeability and width of the hydraulic fracture.

**Keywords:** hydraulic fracturing, oil well, hydraulic fracture pressure dynamics, transient-well-operation modes

### References

- [1] [And the «oil» on the shoulder. Diversification in the space industry] *I neftejnika po plechu. Diversifikazija v kosmicheskoy otrasli*. Russian Space Magazine. 2022. No. 04(38). Pp. 64–67 (in Russian).  
<https://www.roskosmos.ru/34908/>
- [2] Gringarten A.C., Ramey H.J. Jr. Unsteady-State Pressure Distributions Created by a Well With a Single Horizontal Fracture, Partial Penetration, or Restricted Entry // *SPE J.* 1974. V. 14. Pp. 413–426.  
DOI: 10.2118/3819-PA
- [3] Heber Cinco L., F. Samaniego V., N. Dominguez A. Transient Pressure Behavior for a Well With a Finite-Conductivity Vertical Fracture // *SPE J.* 1978. V. 18. Pp. 253–264.  
DOI: 10.2118/6014-PA
- [4] Khabibullin I.L., Khisamov A.A. Unsteady Flow through a Porous Stratum with Hydraulic Fracture // *Fluid Dynamics*. 2019. V. 54. Pp. 594–602.  
DOI: 10.1134/S0015462819050057
- [5] Shagapov V.S., Nagaeva Z.M. On the theory of seepage waves of pressure in a fracture in a porous permeable medium // *J. Appl. Mech. Tech. Phy.* 2017. V. 58. Pp. 862–870.  
DOI: 10.1134/S0021894417050121
- [6] Nagaeva Z.M., Shagapov V.Sh. Elastic seepage in a fracture located in an oil or gas reservoir // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2017. V. 81, issue 3. Pp. 214–222.  
DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2017.08.013
- [7] Khabibullin I.L., Khisamov A.A. Modeling of unsteady fluid filtration in a reservoir with a hydraulic fracture // *J. Appl. Mech. Tech. Phy.* 2022. V. 63. Pp. 652–660.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894422040125>
- [8] Bashmakov R.A., Fokeeva N.O., Shagapov V.Sh. Some features of fluid filtration in a hydraulic fracture under transient well operation conditions // *Mechanics of Solids*. 2022. V. 57, No. 8. Pp. 1923–1935.  
DOI: 10.3103/S0025654422080040
- [9] Charnyi I.A. [Underground Hydrogasdynamics] *Podzemnaya gidrogazodinamika*. Moscow, Gostoptekhizdat. 1963. P. 397 (in Russian).
- [10] Shagapov V.S., Nagaeva Z.M. Approximate Solution of the Problem on Elastic-Liquid Filtration in a Fracture Formed in an Oil Stratum // *J. Eng. Phys. Thermophy.* 2020. V. 93. Pp. 201–209.  
DOI: 10.1007/s10891-020-02109-4