

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Филиус Фанизович ДАВЛЕТШИН¹
Рамиль Фаизырович ШАРАФУТДИНОВ²

УДК 532.546

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПЛАСТЕ С ТРЕЩИНОЙ ГИДРОРАЗРЫВА НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ*

¹ аспирант кафедры геофизики,
Башкирский государственный университет (г. Уфа)
felix8047@mail.ru

² доктор физико-математических наук,
профессор кафедры геофизики,
Башкирский государственный университет (г. Уфа)
gframil@inbox.ru

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования по теме «Создание интеллектуальной комплексной технологии исследования и интерпретации данных промыслово-геофизических исследований скважин, включая оптоволоконные измерения для контроля за разработкой нефтегазовых месторождений и экологического мониторинга состояния недр, на основе использования математического моделирования, машинного обучения, алгоритмов обработки и роботизированной аппаратуры индукционного воздействия», соглашение № 075-11-2021-061 от 25 июня 2021 г.

Цитирование: Давлетшин Ф. Ф. Исследование нестационарного температурного поля в пласте с трещиной гидроразрыва на основе аналитической модели / Ф. Ф. Давлетшин, Р. Ф. Шарафутдинов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 3 (27). С. 8-24.
DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-3-8-24

Аннотация

В настоящее время температурные исследования в скважинах получили широкое распространение для решения различных задач контроля и мониторинга гидравлического разрыва пласта. Температурные данные, измеренные в стволе добывающих скважин в процессе и после гидроразрыва, несут важную информацию о нестационарных фильтрационных и тепловых процессах, чувствительных к параметрам трещин — положению и ориентации, геометрии и фильтрационным характеристикам. Математические модели, разработанные для расчета нестационарных полей давления и температуры при известной геометрии и фильтрационно-емкостных свойствах трещины и пласта, в общем случае могут быть численными и аналитическими. При количественной интерпретации температурных замеров и решении обратных задач по оценке параметров трещины важное значение имеет скорость расчетов температурного поля, в связи с чем актуальной является разработка аналитических математических моделей неизотермической фильтрации в пласте с трещиной гидроразрыва.

В работе представлены результаты исследования формирования нестационарного поля температуры в пласте с трещиной гидроразрыва на основе аналитической модели. Разработанная аналитическая модель учитывает конвективный теплоперенос, теплообмен между трещиной и пластом, термодинамические (адиабатический и Джоуля — Томсона) эффекты. Для контроля корректности и адекватности расчета поля температуры выполнено сравнение аналитического решения с численными расчетами в программном пакете Ansys Fluent.

Исследованы особенности формирования нестационарной температуры жидкости, притекающей в скважину в режиме постоянного отбора, при различных параметрах трещины (ширине и проницаемости). Установлено, что температура притекающей в скважину жидкости возрастает обратно пропорционально ширине и проницаемости трещины, причем в первый час после пуска скважины в работу наблюдается отрицательная динамика температуры притекающей жидкости, длительность которой увеличивается по мере роста ширины трещины.

Ключевые слова

Трещина гидроразрыва, аналитическая модель, метод характеристик, нестационарное температурное поле, теплообмен, эффект Джоуля — Томсона, ширина трещины.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-3-8-24

Введение

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является широко применяемым методом стимуляции добывающих скважин. Инициация одиночных и множественных гидроразрывов вдоль стволов вертикальных и горизонтальных скважин делает возможной эксплуатацию нетрадиционных и трудноизвлекаемых запасов. Однако процесс разрыва продуктивных пластов является достаточно сложным и неопределенным с точки зрения прогнозирования положения и ориентации созданных

трещин, а также параметров их геометрии и фильтрационных характеристик — длины и ширины, высоты, проницаемости (проводимости). В настоящее время активно развиваемым направлением при диагностике параметров гидроразрыва в скважинах различного профиля является нестационарная термометрия; опубликован ряд работ, посвященных различным аспектам качественной и количественной интерпретации температурных данных с точки зрения оценки параметров трещин ГРП. В работе [12] предложена численная математическая модель для расчета температурного поля в процессе гидроразрыва пласта и после остановки закачки. Уравнения для расчета температуры в пласте и трещине записываются с учетом конвективной (при закачке) и теплопроводной (в пласте при закачке и восстановлении температуры) составляющих, учитывается также теплообмен между пластом и трещиной, обусловленный проводимостью и конвекцией, утечки между пластом и трещиной рассчитываются согласно формуле Картера [4]. Показано, что решения численной модели могут быть использованы для интерпретации полевых данных распределенных датчиков температуры (DTS) при гидроразрыве пласта, для оценки длины трещины и в сочетании с моделью ствола скважины для количественной оценки общего объема жидкости для гидроразрыва, закачиваемой в интервал.

Результаты моделирования и анализа температурных данных во время и после создания множественных трещин вдоль горизонтальной скважины представлены в работе [10]. Модель учитывает рост и закрытие трещин, взаимодействие между несколькими трещинами и скважинные эффекты. Учтены две основные конфигурации: последовательное образование трещин вдоль горизонтального ствола скважины и одновременный рост множественных трещин. Анализ распределения температуры вдоль ствола скважины показал информативность анализа непрерывных распределенных данных температуры с точки зрения выявления наличия множественных трещин и их локализации, выявления взаимовлияния трещин и поперечного перетока между ними, количественной оценки скорости притока. Исследовано влияние неоднородности проницаемости пласта на характер формирования температурного поля, установлено, что наибольшее охлаждение при закачке наблюдается для интервалов с повышенной локальной проницаемостью.

Работа [6] посвящена применению полуаналитической модели для прогнозирования поведения температуры и давления в горизонтальных скважинах с множественными трещинами во время добычи. Изменение температуры в стволе скважины вызвано конвективной теплопередачей за счет притока, теплообменом между пластом и стволом скважины и эффектом Джоуля — Томсона за счет падения давления внутри ствола скважины. В пласте и трещине рассматривается совокупность перпендикулярных друг другу линейных потоков, уравнение баланса энергии записывается с учетом конвекции, теплопроводности и эффекта Джоуля — Томсона, причем влиянием теплопроводности в трещине пренебрегается. Результаты моделирования показали, что переходное температурное поведение достаточно чувствительно для оценки местоположения трещин, их количества и профиля

потока вдоль ствола скважины. Для иллюстрации применения температурной модели с целью оценки распределения трещин и профиля притока рассмотрены полевые случаи и выполнена оценка длины трещины.

В работе [13] представлен подход к решению обратных задач для количественной интерпретации измерения температуры при диагностике трещин гидроразрыва в горизонтальных скважинах. Для оптимизации скорости вычислений при решении прямой задачи использован метод FMM (Fast Marching Method) [7]. Уравнение теплового баланса записано в предположении однофазной фильтрации газа в одномерном приближении и включает, кроме конвективного и кондуктивного, слагаемые, описывающие эффект адиабатического охлаждения и Джоуля — Томсона. В ходе исследования чувствительности установлено, что наиболее влиятельными параметрами при интерпретации температуры являются длина трещины и ее проводимость. Продемонстрировано применение разработанной процедуры на полевых данных, причем показано, что совместное определение полудлины и проводимости трещины не является единственным и однозначным. Применение обратных задач для интерпретации данных температурных исследований в газовых горизонтальных скважинах с множественными трещинами ГРП рассмотрено также в работах [8, 9].

В работе [5] представлена математическая модель распространения трещины при закачке жидкости в процессе кислотного гидроразрыва, исследовано влияние температурных эффектов на динамику распространения трещины. На первом этапе решается нестационарное уравнение конвекции и диффузии кислотного раствора и вычисляется профиль ширины трещины, на втором решается температурная задача на базе модели, учитывающей конвекцию, теплопроводность и теплоту реакции химического взаимодействия раствора и горных пород, которая существенным образом влияет на характер температурного поля. Установлено, что профиль ширины трещины зависит от числа Пекле, причем наиболее равномерный профиль и постепенное снижение ширины трещины наблюдаются при высоких числах Пекле; показано также, что распределение ширины и длина образующей в ходе ГРП трещины чувствительны к температуре.

В работе [11] исследуется влияние особенностей заканчивания скважин на интерпретацию распределенных датчиков температуры в горизонтальных скважинах с ГРП. Показано, что неоднородный температурный профиль вдоль ствола скважины обусловлен эффектами завершения скважины: наличием эксплуатационной колонны, качеством цемента, расположением кабеля в цементе. Соответственно, локальные минимумы температуры вдоль ствола могут быть связаны не только большим объемом закачки холодной жидкости в эти интервалы по трещинам, но и вариациями коэффициента теплопередачи между пластом и скважиной, что необходимо учитывать для корректной интерпретации температурных данных.

Таким образом, результаты литературного обзора, а также успешность применения разработанных моделей и методов при интерпретации промысловых данных, в особенности при интерпретации замеров распределенных датчиков температуры в горизонтальных скважинах, показывают актуальность рассматриваемой тематики исследований. Для количественной оценки параметров

трещин в процессе решения прямой и обратной задач ключевое значение имеет скорость расчетов температурного поля. Для ускорения вычислений применяют оптимизированные численные (например, рассмотренный выше метод быстрого перехода FMM), полуаналитические и аналитические методы. В данной работе представлена аналитическая модель для расчета температурного поля в одиночной вертикальной трещине гидроразрыва при однофазной фильтрации, которая может быть использована в качестве эффективного инструмента для количественной диагностики параметров трещины продуктивного пласта.

Аналитическая модель неизотермической фильтрации

Разработанная модель неизотермической однофазной фильтрации с учетом сжимаемости породы и флюида записывается в приближении линейных плоскопараллельных потоков в пласте и трещине (рис. 1). Решение задачи для поля давления в пласте P_r и трещине P_f запишем в наиболее общем виде:

$$P_r = P_r(x, y, t), P_f = P_f(x, t). \quad (1)$$

Поле температуры в трещине рассчитывается с учетом конвективного теплопереноса, тепломассообмена трещины с пластом и тепловых эффектов при фильтрации (Джоуля — Томсона и адиабатического):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(C_f T_f)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho c v_f T_f) = -\rho c v_f \varepsilon \nabla P_f + \\ + m_f \rho c \eta \frac{\partial P_f}{\partial t} + \frac{\rho c v_{r0} T_{r0}}{w_f} + \alpha(T_{r0} - T_f), \end{aligned} \quad (2)$$

где T — температура; C и c — объемная и удельная теплоемкость соответственно; ρ , v — плотность и скорость фильтрации флюида соответственно; ε — коэффициент Джоуля — Томсона; η — адиабатический коэффициент; m — коэффициент пористости; индекс f соответствует трещине; w_f — половина ширины трещины;

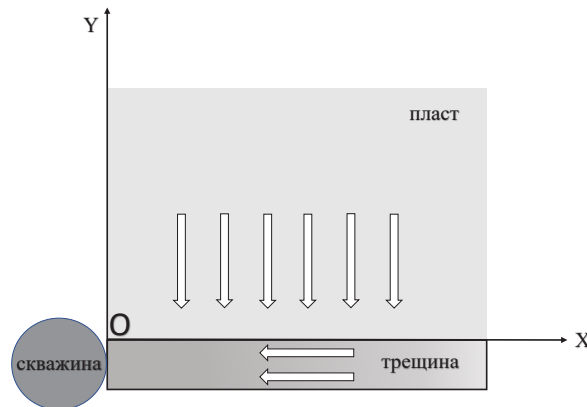


Рис. 1. Геометрия задачи

Fig. 1. Geometry of the problem

α — переменный коэффициент теплообмена, который рассчитывается согласно аналитической зависимости [14]; v_{r0} , T_{r0} — скорость и температура притекающей из пласта в трещину жидкости. Два крайних слагаемых в правой части уравнения теплового баланса для трещины описывают конвективный приток тепла из пласта в трещину и теплообмен между пластом и трещиной соответственно. Далее уравнение (2) приводится к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_f}{\partial t} + u_f(x, t) \frac{\partial T_f}{\partial x} + \frac{\left(u_{r0} + \frac{\alpha}{\rho c}\right) T_f}{w_f} = \\ = -\varepsilon u_f(x, t) \frac{\partial P_f}{\partial x} + \eta_f^* \frac{\partial P_f}{\partial t} + \frac{\left(u_{r0} + \frac{\alpha}{\rho c}\right) T_{r0}}{w_f}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $u = \frac{\rho c}{C_f} v$ — скорость конвективного переноса тепла; $\eta_f^* = \eta \frac{m_f \rho c}{C_f}$.

Для решения уравнения (3) используется метод характеристик. Характеристики в трещине $x_t(x_1, t)$ рассчитываются решением уравнения

$$\frac{dx_t}{dt} = u_f(x, t), \quad x_t|_{t=0} = x_1, \quad (4)$$

где x_1 — начальная координата характеристики вдоль трещины. С учетом (4) уравнение (3) перепишем в виде

$$\frac{dT_f}{dt} + f(x_1, t) T_f = g(x_1, t), \quad (5)$$

где функции f и g включают следующие слагаемые:

$$\begin{aligned} f(x_1, t) &= \frac{\left(u_{r0}(x_t(x_1, t), t) + \frac{\alpha(t)}{\rho c}\right)}{w_f}, \\ g(x_1, t) &= \varepsilon u_f \frac{\partial P_f}{\partial x}(x_t(x_1, t)) + \\ &+ \eta_f^* \frac{\partial P_f}{\partial t}(x_t(x_1, t)) + f(x_1, t) T_{r0}(x_t(x_1, t), t). \end{aligned} \quad (6)$$

Пусть в начальный момент времени температура в пласте и трещине всюду постоянна и равна пластовой. В этом случае решение (5) имеет вид:

$$T_f(x_1, t) = \left[\int_0^t g(x_1, \tau) \exp\left(-\int_0^\tau f(x_1, \zeta) d\zeta\right) d\tau \right] \exp\left(-\int_0^t f(x_1, \tau) d\tau\right). \quad (7)$$

Поле температуры в пласте рассчитывается аналогичным образом [2, 3]. При пренебрежении теплопроводным слагаемым в сравнении с конвективным аналитическое решение для температурного поля запишется в следующем виде:

$$T_r(x, y, t) = \varepsilon(P_r(x, y_1, t) - P_r(x, y, t)) - \eta_f^*(P_0 - P_r(x, y_1, t)), \quad (8)$$

где P_0 — пластовое давление.

Результаты и их обсуждение

На базе представленной математической модели рассмотрим особенности формирования нестационарных полей давления и температуры в пласте с трещиной в режиме постоянного дебита ($Q = const$). Аналитическое решение для поля давления в предположении неограниченности пласта и трещины получено в работе [1] и имеет следующий вид:

$$P_r(\bar{x}, \bar{y}, \bar{t}) = P_0 - \frac{Q\mu 2b\sqrt{\bar{t}}}{k_r h_r \sqrt{\pi a}} \int_0^1 \exp\left(-\frac{\bar{x}^2}{4a\bar{t}\rho^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\rho^2 b\bar{t} + \bar{y}}{2\sqrt{\bar{t}}(1-\rho^2)}\right) d\rho, \quad (9)$$

$$P_f(\bar{x}, \bar{t}) = P_0 - \frac{Q\mu 2b\sqrt{\bar{t}}}{k_r h_r \sqrt{\pi a}} \int_0^1 \exp\left(-\frac{\bar{x}^2}{4a\bar{t}\rho^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\rho^2 b\sqrt{\bar{t}}}{2\sqrt{(1-\rho^2)}}\right) d\rho,$$

где Q — объемный расход жидкости, поступающей в скважину из рассматриваемой части пласта (1/4); h_r — мощность пласта; $a = \frac{\chi_f}{\chi_r}$; $b = a \frac{k_r x_f}{k_f w_f}$; χ , k — коэффициенты пьезопроводности и проницаемости соответственно; x_f — полудлина трещины; \bar{x} , \bar{y} , \bar{t} — безразмерные координаты и время; индексы f и r относятся к области трещины и пласта соответственно.

Поле давления (9) используется для расчета скорости конвективного теплопереноса в уравнении (3) и характеристик в пласте $y_i(x, y, t)$ и трещине $x_i(x, t)$ (4). Скорости конвективного теплопереноса запишутся в виде:

$$u_r = -\frac{\rho c k_r}{\mu C_r} \frac{\partial P_r}{\partial y} = -\frac{Q\rho c b}{h_r C_r x_f \sqrt{\pi a}} \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{(1-\rho^2)}} \exp\left(-\frac{\bar{x}^2}{4a\bar{t}\rho^2} - \frac{(\rho^2 b\bar{t} + \bar{y})^2}{4\bar{t}(1-\rho^2)}\right) d\rho, \quad (10)$$

$$u_f = -\frac{\rho c k_f}{\mu C_f} \frac{\partial P_f}{\partial x} = -\frac{Q\rho c \bar{x} b}{h_r C_f x_f \sqrt{\pi a^3 \bar{t}}} \int_0^1 \frac{1}{\rho^2} \exp\left(-\frac{\bar{x}^2}{4a\bar{t}\rho^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\rho^2 b\sqrt{\bar{t}}}{2\sqrt{(1-\rho^2)}}\right) d\rho,$$

Параметры модели, для которых проводился расчет температурного поля, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры пласта и флюида

Table 1

Reservoir and fluid parameters

Параметр	Значение
Проницаемость пласта $\cdot 10^{-15}$, м ² (мД)	10
Проницаемость трещины $\cdot 10^{-15}$, м ² (мД)	10 000
Пористость пласта, д. ед.	0,2
Пористость трещины, д. ед.	0,2
Сжимаемость скелета $\cdot 10^{-12}$, Па ⁻¹	1
Сжимаемость флюида $\cdot 10^{-12}$, Па ⁻¹	20
Плотность скелета, кг/м ³	2 700
Плотность жидкости (нефть), кг/м ³	800
Вязкость жидкости, мПа \cdot с	2
Теплоемкость скелета, Дж/(кг \cdot К)	1 000
Теплоемкость флюида, Дж/(кг \cdot К)	2 000
Коэффициент Джоуля — Томсона, К/МПа	0,4
Адиабатический коэффициент, К/МПа	0,14
Пластовое давление, МПа	10
Дебит жидкости на единицу мощности пласта, м ² /сут	4
Ширина трещины, мм	10

Динамика распределения давления в пласте (вдоль координаты y при $x = 0$) и трещине (вдоль координаты x) после пуска скважины показана на рис. 2. В пласте и трещине формируется нестационарное распределение давления, причем за время $t = 10$ ч возмущение давления по пласту и трещине распространяется на расстояние порядка 50 и 80 м соответственно, что обусловлено низкой пьезопроводностью пласта. Депрессия на пласт в процессе постоянного отбора увеличивается за 10 ч до 5 МПа.

Соответствующая динамика распределения температуры жидкости вдоль трещины показана на рис. 3. На первом этапе после начала отбора в трещине возникает небольшая аномалия адиабатического охлаждения (величиной порядка 0,008 К), в дальнейшем преобладающим является вклад эффекта Джоуля — Томсона, в результате действия которого температура жидкости на границе трещины со скважиной возрастает до 0,16 К за 10 ч отбора.

Характер распределения температуры в трещине в значительной степени определяется теплообменом между пластом и трещиной, что обусловлено небольшой шириной трещины и значительной площадью контакта областей

трещины и пласта. На графиках (рис. 4) показано влияние коэффициента теплообмена α на особенности распределения температуры в трещине и температуру притекающей в скважину жидкости (при $x = 0$). При значительном коэффициенте теплообмена (линия 5 на рис. 4) температура в трещине в основном определяется температурой пласта, в котором, в свою очередь, формируется температурная аномалия охлаждения за счет адиабатического эффекта. Незначительный вклад эффекта Джоуля — Томсона в пласте связан с низкой скорости фильтрующегося потока (порядка 10^{-6} м/с). В результате интенсивного теплообмена с пластом в трещине формируется отрицательная температурная аномалия порядка 0,09 К.

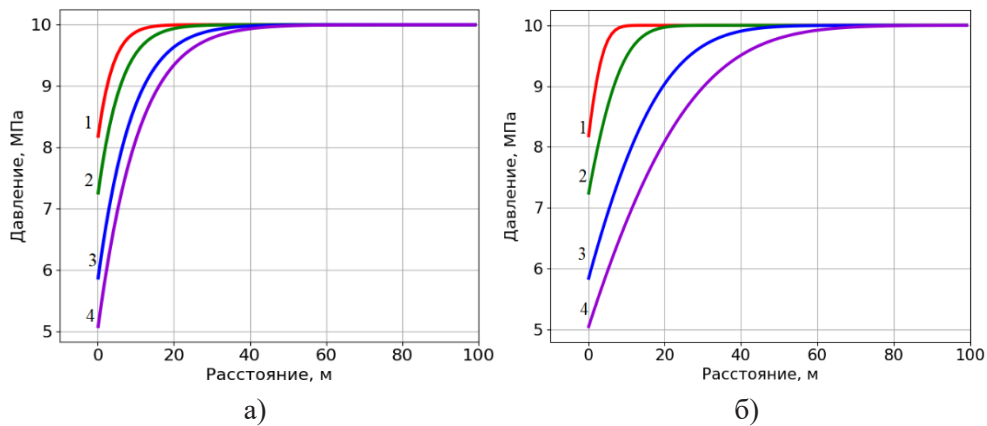


Рис. 2. Распределение давления в трещине (а) и пласте (б) (1 — 0,2 ч после пуска скважины, 2 — 1 ч, 3 — 5 ч, 4 — 10 ч)

Fig. 2. Pressure distribution in the fracture (а) and the reservoir (б) (1 — 0.2 h after starting the well, 2 — 1 h, 3 — 5 h, 4 — 10 h)

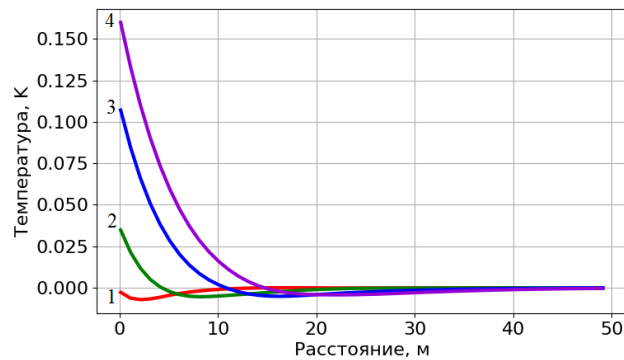


Рис. 3. Распределение температуры в трещине в процессе отбора (1 — 0,2 ч после пуска скважины, 2 — 1 ч, 3 — 5 ч, 4 — 10 ч)

Fig. 3. Temperature distribution in the fracture during the sampling process (1 — 0.2 h after starting the well, 2 — 1 h, 3 — 5 h, 4 — 10 h)

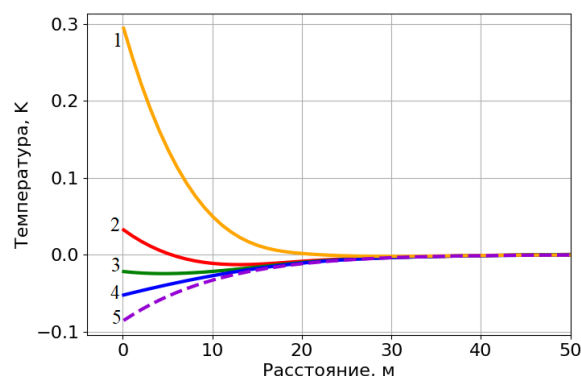


Рис. 4. Распределение температуры в трещине через 10 ч отбора в зависимости от коэффициента теплообмена α (1 — $\alpha = 5$, 2 — $\alpha = 25$, 3 — $\alpha = 50$, 4 — $\alpha = 100$, 5 — $\alpha = 150$)

Fig. 4. Temperature distribution in the fracture after 10 hours of sampling, depending on the heat transfer coefficient α (1 — $\alpha = 5$, 2 — $\alpha = 25$, 3 — $\alpha = 50$, 4 — $\alpha = 100$, 5 — $\alpha = 150$)

Напротив, при малом коэффициенте теплообмена (линия 1 на рис. 4) температура в трещине определяется, главным образом, фильтрационными процессами в ней, и за счет высокой скорости потока (порядка 10^{-3} м/с) в трещине формируется значительная температурная аномалия разогрева (около 0,3 К) за счет эффекта Джоуля — Томсона. В действительности же, в соответствии с [14], коэффициент теплообмена является переменной немонотонно снижающейся во времени функцией, обратно пропорциональной квадратному корню из времени.

С целью контроля корректности решения и верификации разработанной аналитической модели для рассматриваемой геометрии задачи (рис. 1) построена численная модель в программном пакете Ansys Fluent. Сравнение результатов расчетов поля давления (рис. 5а) и температуры (рис. 5б) показало хорошее согласие между полученными данными: относительная погрешность расчета поля давления составляет около 0,2%, неточность расчета температурного поля не превышает 0,01 К (5,8%). Следует отметить, что в численной 2D (двумерной) модели трещина смоделирована как прямоугольная область постоянной ширины, а расчетная температура в трещине (рис. 5б) соответствует среднеинтегральной температуре по сечению трещины. Таким образом, рассмотрение трещины в одномерном приближении позволяет с достаточной для практического применения точностью рассчитывать нестационарные поля давления и температуры в пласте с трещиной.

Исследование влияния ширины (рис. 6) и проницаемости (рис. 7) трещины на формирование температуры жидкости, притекающей в скважину (т. е. температуры на границе скважина — трещина), показало, что температура притекающей жидкости чувствительна к параметрам трещины. При увеличении ширины трещины с 5 до 20 мм температура жидкости, притекающей в скважину, снижается обратно пропорционально росту ширины, за 10 часов отбора формируемые температурные аномалии составляют 0,33 и 0,08 К соответственно (рис. 6а).

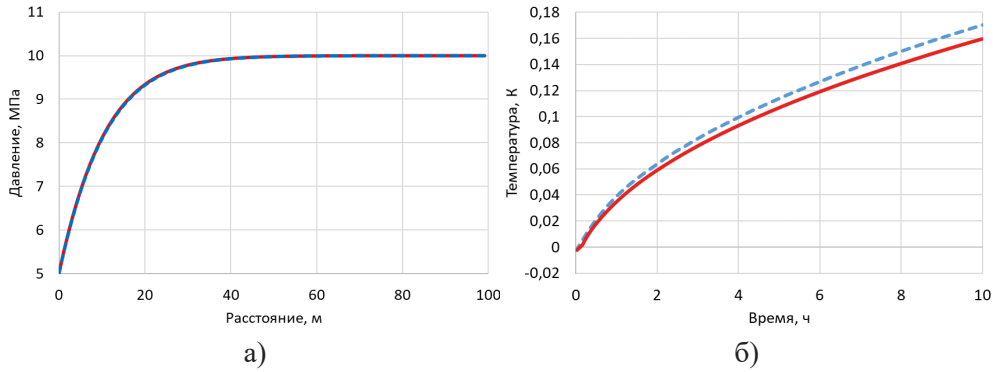


Рис. 5. а — распределения давления в трещине через 10 ч после начала отбора (сплошная линия — аналитическая модель, штриховая — численный расчет); б — динамика температуры жидкости, притекающей в скважину (сплошная линия — аналитическая модель, штриховая — численный расчет)

Fig. 5. a — pressure distribution in the fracture 10 h after the start of sampling (solid line — analytical model, dashed-numerical calculation); б — dynamics of the temperature of the liquid flowing into the well (solid line — model, dashed-numerical calculation)

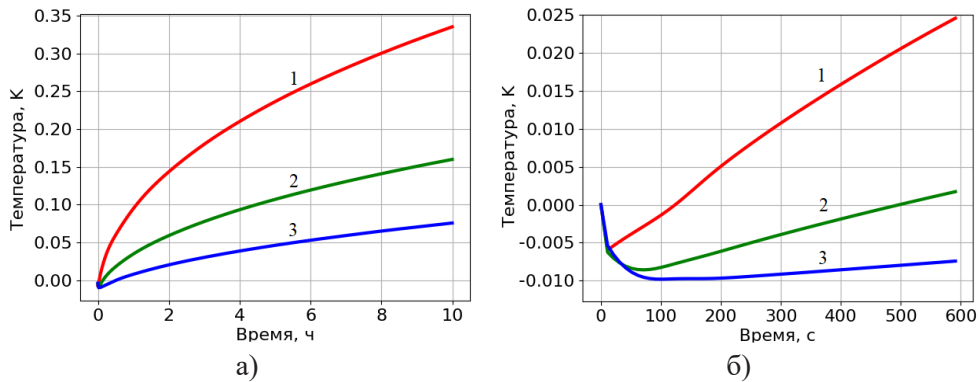


Рис. 6. Динамика температуры притекающей в скважину жидкости при различной ширине трещины (1 — 5 мм, 2 — 10 мм, 3 — 20 мм; а — в течение 10 часов отбора, б — в первые 10 минут после пуска скважины)

Fig. 6. Dynamics of the temperature of the liquid flowing into the well at different fracture widths (1 — 5 mm, 2 — 10 mm, 3 — 20 mm; а — during 10 hours of sampling, б — in the first 10 minutes after starting the well)

В первоначальные моменты времени после пуска скважины формируются отрицательные температурные аномалии притекающей в скважину жидкости, причем продолжительность отрицательной динамики температуры возрастает по мере увеличения ширины трещины (рис. 6б). Величина температурной аномалии притекающей жидкости возрастает также по мере снижения проницаемости трещины (рис. 7).

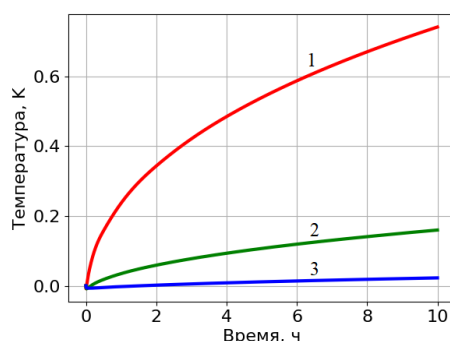


Рис. 7. Динамика температуры притекающей в скважину жидкости при различной проницаемости трещины (1 — 2 Д, 2 — 10 Д, 3 — 50 Д)

Fig. 7. Dynamics of the temperature of the liquid flowing into the well at different fracture permeability (1 — 2 D, 2 — 10 D, 3 — 50 D)

При увеличении проницаемости (линия 3 на рис. 7) градиент давления в трещине снижается, и аномалия разогрева за счет эффекта Джоуля — Томсона также падает; при проницаемости 50 Д температура притекающей в скважину жидкости за время отбора возрастает до 0,03 К; при проницаемости 2 Д (линия 1 на рис. 7) температура притекающей жидкости существенно возрастает — до 0,74 К. Таким образом, согласно результатам выполненного исследования, температура жидкости, притекающей в скважину, снижается по близкой к обратно пропорциональной зависимости относительно ширины и проницаемости трещины. Чувствительность температуры к параметрам трещины позволяет использовать разработанную модель при оценке параметров трещины гидроразрыва по данным замеров нестационарной температуры в стволе добывающих скважин с гидроразрывом пласта.

Заключение

Разработана аналитическая модель неизотермической однофазной фильтрации вязкой сжимаемой жидкости в упругом пласте с трещиной гидроразрыва. Разработанная модель учитывает конвективный перенос тепла, теплоперенос в системе пласт — трещина, тепловые эффекты при фильтрации пластовой жидкости (адиабатический и Джоуля — Томсона). Для контроля корректности и верификации предложенного метода выполнено сравнение аналитических расчетов с результатами численного моделирования в программном пакете Ansys Fluent. Показано, что разработанная модель позволяет с достаточной для практики точностью рассчитывать нестационарные поля давления и температуры в пласте с трещиной, причем рассмотрение трещины в одномерном приближении является допустимым с точки зрения обеспечения точности расчетов температуры притекающей в скважину жидкости.

В рамках предложенной модели проанализированы особенности формирования нестационарных полей давления и температуры и исследовано влияние

параметров трещины на динамику температуры жидкости, притекающей в ствол скважины. Показана чувствительность температурного поля к параметрам трещины и установлено, что температура притекающей в скважину жидкости снижается по близкой к обратно пропорциональной зависимости относительно ширины и проницаемости трещины. В первоначальные моменты времени после пуска скважины формируется отрицательная температурная аномалия притекающей в скважину жидкости, причем показано, что продолжительность отрицательной динамики температуры возрастает по мере увеличения ширины трещины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабибуллин И. Л. Нестационарная фильтрация в пласте с трещиной гидроразрыва / И. Л. Хабибуллин, А. А. Хисамов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2019. № 5. С. 6-14. DOI: 10.1134/S0568528119050050
2. Шарафутдинов Р. Ф. Аналитическая модель нестационарного температурного поля в пласте с трещиной гидроразрыва / Р. Ф. Шарафутдинов, Ф. Ф. Давлетшин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 2 (26). С. 75-94. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-75-94
3. Шарафутдинов Р. Ф. Численное исследование неизотермической фильтрации сжимаемого флюида в низкопроницаемом пласте с трещиной гидроразрыва / Р. Ф. Шарафутдинов, Ф. Ф. Давлетшин // Прикладная механика и техническая физика. 2021. Том 62. № 2. С. 160-173. DOI: 10.15372/PMTF20210216
4. Шляпкин А. С. О проведении экспресс-оценки геометрических параметров закрепленной на проппанте трещины гидроразрыва пласта методами математического моделирования / А. С. Шляпкин, А. В. Татосов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 3 (23). С. 79-92. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-3-79-92
5. Aljawad M. S. Modeling study of temperature and fracture-propagation effects on the fracture-surface dissolution patterns and fractured-well productivity in acid fracturing / M. S. Aljawad, D. Zhu, A. D. Hill // SPE Production & Operation. 2019. Vol. 34. No. 4. Pp. 749-769. DOI: 10.2118/190819-PA
6. Cui J. Diagnosis of production performance after multistage fracture stimulation in horizontal wells by downhole temperature measurements / J. Cui, D. Zhu, M. Jin // SPE Annual Technical Conference and Exhibition (27-29 October, Amsterdam, The Netherlands). 2014. Paper SPE-170874-MS. DOI: 10.2118/170874-MS
7. Cui J. Fracture diagnosis in multiple-stage-stimulated horizontal well by temperature measurements with fast marching method / J. Cui, Ch. Yang, D. Zhu, A. Datta-Gupta // SPE Journal. 2016. Vol. 21. No. 6. Pp. 2289-2300. DOI: 10.2118/174880-PA
8. Hongwen L. Investigation of temperature behavior for multi-fractured horizontal well in low-permeability gas reservoir / L. Hongwen, L. Hai-tao, L. Yahui, L. Yu, T. Yongsheng // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 127. Pp. 375-395. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.043

9. Luo H. A novel inversion approach for fracture parameters and inflow rates diagnosis in multistage fractured horizontal wells / H. Luo, H. Li, Y. Tan, Y. Li, B. Jiang, Y. Lu, X. Cui // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 184. Pp. 106-108. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106585
10. Ribeiro P. M. Detecting fracture growth out of zone using temperature analysis / P. M. Ribeiro, R. N. Horne // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (27-29 October, Amsterdam, The Netherlands)*. 2014. Paper SPE-170746-MS. DOI: 10.2118/170746-MS
11. Sakaida Sh. Completion effects on diagnosing multistage fracture treatments with distributed temperature sensing / Sh. Sakaida, D. Zhu // *SPE Production & Operation*. 2020. Vol. 36. No. 1. Pp. 160-173. DOI: 10.2118/201604-MS
12. Seth G. Numerical model for interpretation of distributed-temperature-sensor data during hydraulic fracturing / G. Seth, A. C. Reynolds, J. Mahadevan // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (19-22 September, Florence, Italy)*. 2010. Paper SPE-135603-MS. DOI: 10.2118/135603-MS
13. Zhang Sh. Inversion of downhole temperature measurements in multistage fracture stimulation in horizontal wells / Sh. Zhang, D. Zhu // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (9-11 October, San Antonio, Texas, USA)*. 2017. Paper SPE-187322-MS. DOI: 10.2118/187322-MS
14. Zolotukhin A. B. Analytical definition of the overall heat transfer coefficient / A. B. Zolotukhin // *California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME (18-20 April, Ventura, California, USA)*. 1979. Paper SPE-7965-MS. DOI: 10.2118/7964-MS

Filyus F. DAVLETSHIN¹
Ramil F. SHARAFUTDINOV²

UDC 532.546

**INVESTIGATION OF THE NON-STATIONARY
TEMPERATURE FIELD IN A RESERVOIR
WITH A HYDRAULIC FRACTURING
BASED ON AN ANALYTICAL MODEL***

¹ Postgraduate Student,
Department of Geophysics,
Bashkir State University
felix8047@mail.ru

² Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
Department of Geophysics,
Bashkir State University
gframil@inbox.ru

Abstract

Currently, well temperature studies are widely used to solve various problems of control and monitoring of hydraulic fracturing. Temperature data measured in production wells during and after hydraulic fracturing provide important information about non-stationary filtration and thermal processes that are sensitive to fracture parameters — position and orientation,

* This work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education on the topic “Creation of an intelligent integrated technology for research and interpretation of data from production geophysical studies of wells, including fiber-optic measurements for monitoring the development of oil and gas fields and environmental monitoring of the state of subsoil, based on the use of mathematical modeling, machine learning, processing algorithms and robotic induction equipment”, agreement No. 075-11-2021-061 of 25 June 2021.

Citation: Davletshin F. F., Sharafutdinov R. F. 2021. “Investigation of the non-stationary temperature field in a reservoir with a hydraulic fracturing based on an analytical model”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 7, no. 3 (27), pp. 8-24.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-3-8-24

geometry and filtration characteristics. Mathematical models developed for calculating non-stationary pressure and temperature fields with known geometry and filtration-capacitive properties of the fracture and reservoir, in the general case, can be numerical and analytical. In the quantitative interpretation of temperature measurements and solving inverse problems for estimating fracture parameters, the speed of calculating the temperature field is important, in this regard, the development of analytical mathematical models of non-isothermal filtration in a reservoir with a hydraulic fracturing is relevant.

The paper presents the results of a study of a non-stationary formation temperature field in a reservoir with a hydraulic fracture based on an analytical model. The developed analytical model takes into account convective heat transfer, heat and mass transfer between the fracture and the formation, thermodynamic (adiabatic and Joule — Thomson) effects. To control the calculation correctness and adequacy of the temperature field, the analytical solution was compared with numerical calculations in the Ansys Fluent software package.

The non-stationary temperature formation features of the fluid flowing into the well in the constant withdrawal mode at various parameters of the fracture (width and permeability) are investigated. It was found that the temperature of the fluid flowing into the well increases in inverse proportion to the width and permeability of the fracture, and in the first hour after putting the well into operation, negative dynamics of the flowing liquid temperature is observed, the duration of which increases with the growth of the fracture width.

Keywords

Hydraulic fracture, analytical model, method of characteristics, non-stationary temperature field, heat transfer, Joule-Thomson effect, crack width.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-3-8-24

REFERENCES

1. Khabibullin I. L., Khisamov A. A. 2019. “Non-stationary filtration in a reservoir with a Hydraulic fracturing”. *Izvestiya RAS. Fluid and Gas Mechanics*, no. 5, pp. 6-14. DOI: 10.1134/S0568528119050050 [In Russian]
2. Sharafutdinov R. F., Davletshin F. F. 2021. “An analytical model of a non-stationary temperature field in a reservoir with a hydraulic fracturing”. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 7, no. 2 (26), pp. 75-94. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-75-94 [In Russian]
3. Sharafutdinov R. F., Davletshin F. F. 2021. “Numerical study of non-isothermal filtration of compressible fluid in a low-permeability reservoir with a hydraulic fracture”. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 62, no. 2, pp. 317-328. DOI: 10.1134/S0021894421020164 [In Russian]
4. Shlyapkin A. S., Tatosov A. V. 2020. “On the express estimation of geometrical parameters of a hydraulic fracturing crack fixed on a proppant using the methods of mathematical modeling”. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 6, no. 3 (23), pp. 79-92. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-3-79-92 [In Russian]

5. Aljawad M. S., Zhu D., Hill A. D. 2019. "Modeling study of temperature and fracture-propagation effects on the fracture-surface dissolution patterns and fractured-well productivity in acid fracturing". *SPE Production & Operation*, vol. 34, no. 4, pp. 749-769. DOI: 10.2118/190819-PA
6. Cui J. Zhu D., Jin M. 2014. "Diagnosis of production performance after multistage fracture stimulation in horizontal wells by downhole temperature measurements". *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (27-29 October, Amsterdam, The Netherlands)*. Paper SPE-170874-MS. DOI: 10.2118/170874-MS
7. Cui J, Yang Ch., Zhu D., Datta-Gupta A. 2016. "Fracture diagnosis in multiple-stage-stimulated horizontal well by temperature measurements with fast marching method". *SPE Journal*, vol. 21, no. 6, pp. 2289-2300. DOI: 10.2118/174880-PA
8. Hongwen L., Hai-tao L., Yahui L., Yu L., Yongsheng T. 2018. "Investigation of temperature behavior for multi-fractured horizontal well in low-permeability gas reservoir". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 127, pp. 375-395. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.043
9. Luo H. Li H., Tan Y., Li Y., Jiang B., Lu Y., Cui X. 2020. "A novel inversion approach for fracture parameters and inflow rates diagnosis in multistage fractured horizontal wells". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 184, pp. 106-108. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106585
10. Ribeiro P. M., Horne R. N. 2014. "Detecting fracture growth out of zone using temperature analysis". *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (27-29 October, Amsterdam, The Netherlands)*. Paper SPE-170746-MS. DOI: 10.2118/170746-MS
11. Sakaida Sh., Zhu D. 2020. "Completion effects on diagnosing multistage fracture treatments with distributed temperature sensing". *SPE Production & Operation*, vol. 36, no. 1, pp. 160-173. DOI: 10.2118/201604-MS
12. Seth G., Reynolds A. C., Mahadevan J. 2010. "Numerical model for interpretation of distributed-temperature-sensor data during hydraulic fracturing". *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (19-22 September, Florence, Italy)*. Paper SPE-135603-MS. DOI: 10.2118/135603-MS
13. Zhang Sh., Zhu D. 2017. "Inversion of downhole temperature measurements in multistage fracture stimulation in horizontal wells". *SPE Annual Technical Conference and Exhibition (9-11 October, San Antonio, Texas, USA)*. Paper SPE-187322-MS. DOI: 10.2118/187322-MS
14. Zolotukhin A. B. 1979. "Analytical definition of the overall heat transfer coefficient". *California Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME held (18-20 April, Ventura, California, USA)*. Paper SPE-7965-MS. DOI: 10.2118/7964-MS