

УДК 532.546

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ПЛАСТ–ТРЕЩИНА ГИДРОРАЗРЫВА В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ОТБОРА

© 2022 г. Ф. Ф. Давлетшин\*, Р. Ф. Шарафутдинов  
ФГБОУ ВО “Башкирский государственный университет”, Уфа, Россия

\*E-mail: felix8047@mail.ru

Поступила в редакцию 10.09.2021 г.

После доработки 14.12.2021 г.

Принята к публикации 15.02.2022 г.

На основе численного моделирования исследовано формирование нестационарного температурного поля в системе пласт–трещина гидроразрыва в режиме отбора жидкости из пласта. Показано, что температурное поле чувствительно к параметрам трещины, таким как ширина и проницаемость. Установлено, что в зависимости от проницаемости пласта и ширины трещины на кривой изменения во времени температуры притекающей в скважину жидкости наблюдаются участки отрицательной и положительной динамики температуры, обусловленные соответственно адиабатическим эффектом и эффектом Джоуля–Томсона.

DOI: 10.31857/S004036442202003X

### ВВЕДЕНИЕ

Одно- и многофазные потоки сплошной среды наблюдаются в ряде природных явлений и технологических процессов, например при фильтрации в насыщенных пористых средах (нефтяных и газовых пластах) и движении потоков в трубопроводах [1, 2]. Исследование многофазных потоков и особенностей формирования фильтрационных и температурных полей является теоретической основой различных методов контроля разработки нефтегазовых месторождений [3].

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) на сегодняшний день получил широкое распространение на поздних стадиях разработки нефтяных месторождений, характеризующихся снижением дебита добывающих скважин. ГРП также активно применяется при эксплуатации месторождений с низкой проницаемостью пластов. Оценка качества работ по гидроразрыву имеет важное значение при прогнозировании производительности коллекторов и оценке извлекаемых запасов нефти [4]. В настоящее время одним из активно развиваемых направлений с точки зрения определения ориентации трещин ГРП и оценки их геометрических характеристик (длины, ширины, высоты) является нестационарная термометрия [5]. Анализ распределения температуры вдоль ствола скважины и ее динамики во времени позволяет решать ряд задач, связанных с локализацией трещин и оценкой их геометрических характеристик [6]. Исследование нестационарных тепловых процессов в системе пласт–горизонтальная сква-

жина–трещины гидроразрыва [7] показало, что температурное поле в стволе скважины чувствительно к местоположению трещин. Предложены методики оценки длины и проводимости трещины по данным распределенных датчиков температуры [7]. В работе [8] исследованы тепловые процессы при закачке жидкости в трещину ГРП и последующем восстановлении температуры после прекращения закачки, разработана методика оценки ширины трещины по данным нестационарного температурного поля в скважине.

Особенностью приведенных работ является моделирование тепловых процессов непосредственно при ГРП в процессе закачки рабочей жидкости в пласт и восстановлении температуры после остановки закачки. Как правило, температура закачиваемой жидкости существенно отличается от пластовой, формируемой под действием теплового потока из недр Земли. При закачке жидкости гидроразрыва определяющее влияние на формирование температурного поля оказывает конвективный перенос тепла при движении жидкости в высокопроницаемой трещине. При дальнейшей эксплуатации скважины температурные эффекты, связанные с закачкой жидкости с температурой, контрастной относительно пластовой, ослабевают. При работе скважины в режиме отбора пластового флюида на формирование температурного поля оказывают влияние не только конвективный и кондуктивный механизмы теплопереноса, но и термодинамические эффекты (Джоуля–Томсона и адиабатический), которые

определяются полем давления и его динамикой во времени. Эффект Джоуля–Томсона обуславливает нагрев жидкости по пути ее фильтрации в пласте под действием градиента давления. С увеличением перепада давления, проходимого жидкостью, ее температура возрастает за счет теплового эффекта Джоуля–Томсона. Адиабатический эффект, напротив, приводит к снижению температуры жидкости при снижении давления вследствие расширения пластового флюида [9].

Наличие высокопроницаемой трещины в пласте с низкой проницаемостью существенно искажает картину фильтрационных течений в сравнении с невозмущенным пластом. Температурное поле, формируемое в процессе фильтрации пластового флюида, в значительной степени зависит от параметров трещины. В работе исследуется влияние параметров трещины ГРП на характер тепловых процессов в системе пласт–трещина гидро разрыва в режиме отбора жидкости из пласта.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В СИСТЕМЕ ПЛАСТ–ТРЕЩИНА ГРП**

Математическая модель неизотермической фильтрации основана на уравнении неразрывности, законе фильтрации Дарси и законе сохранения энергии для пласта [3] с учетом конвективного теплопереноса, теплопроводности, термодинамических (Джоуля–Томсона и адиабатического) эффектов. Уравнения для расчета полей давления и температуры записываются в виде [10]

$$\begin{aligned} \frac{\partial(m\rho_f)}{\partial t} - \operatorname{div}\left(\rho_f \frac{k}{\mu} \nabla p\right) &= 0, \\ \frac{\partial((\rho c)_e T)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_f c_f \mathbf{v} T - \lambda \nabla T) &= \Phi, \\ (\rho c)_e &= m\rho_f c_f + (1 - m)\rho_r c_r, \\ \Phi &= m\rho_f c_f \eta \frac{\partial p}{\partial t} - \rho_f c_f \mathbf{v} \epsilon \nabla p. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь  $k$ ,  $m$  – соответственно проницаемость и пористость пласта или трещины;  $\rho_f$ ,  $\mu$  – плотность и вязкость жидкости;  $\mathbf{v}$  – скорость фильтрации;  $p$  – давление;  $\rho_r$  – плотность скелета породы;  $(\rho c)_e$  – эффективная теплоемкость пласта;  $c_r$ ,  $c_f$  – удельные теплоемкости скелета породы и флюида;  $T$  – температура;  $\Phi$  – источниковое слагаемое, связанное с термодинамическими эффектами (эффектом Джоуля–Томсона и адиабатическим);  $\eta$  – адиабатический коэффициент;  $\epsilon$  – коэффициент Джоуля–Томсона;  $\lambda$  – теплопроводность.

Граничные и начальные условия для решения уравнения неразрывности записываются в предположении, что на границе пласта со скважиной поддерживается постоянной объемный расход

жидкости (далее дебит)  $Q$ . На границе пласта с контуром питания температура и давление постоянны и равны пластовым значениям:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \left( \sigma r \frac{\partial p(r_w, \varphi)}{\partial r} \right) d\varphi &= Q, \\ p|_{r=R_c} &= p_{\text{res}}, \\ p|_{r=0} &= p_{\text{res}}, \\ T|_{r=R_c} &= T_{\text{res}}, \\ T|_{r=0} &= T_{\text{res}}, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $t$  – время;  $r_w$ ,  $R_c$  – радиусы скважины и контура питания;  $\sigma$  – гидропроводность пласта или трещины [3];  $p_{\text{res}}$  – пластовое давление;  $T_{\text{res}}$  – пластовая температура.

Система уравнений (1) вместе с граничными и начальными условиями (2) записывается в двумерной  $(r, \varphi)$  постановке и решается численно. Геометрия области моделирования представляет собой однородный пласт, ограниченный цилиндрической поверхностью радиусом  $R_c$  (контуром питания), пересеченный вертикальной скважиной и трещиной постоянной ширины, симметричной относительно скважины и имеющей в горизонтальном сечении форму прямоугольника (рис. 1).

Для дискретизации уравнений используется метод контрольных объемов. Детальное описание модели и численной схемы расчета представлено в [10].

**РЕЗУЛЬТАТЫ**

Исследуется формирование нестационарного температурного поля в пласте с трещиной гидро-

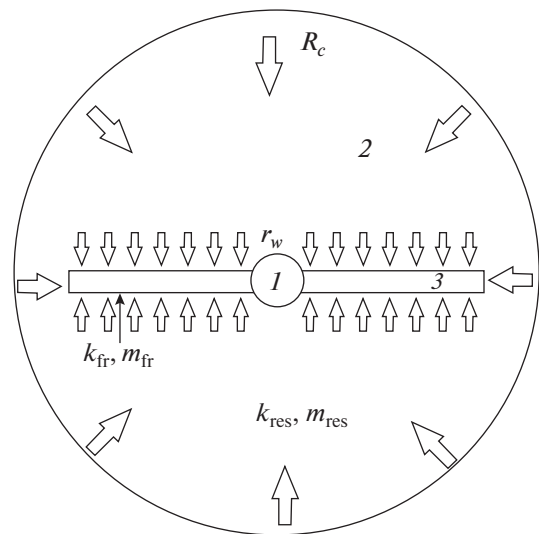


Рис. 1. Геометрия задачи: 1 – скважина, 2 – пласт, 3 – трещина.

Таблица 1. Параметры пласта и трещины

Параметр	Значение
Плотность горной породы, кг/м <sup>3</sup>	2700
Теплоемкость горной породы, Дж/(кг К)	1000
Теплопроводность пласта, Вт/(м К)	2
Вязкость жидкости, мПа с	10
Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	800
Теплоемкость жидкости, Дж/(кг К)	2000
Адиабатический коэффициент жидкости, К/МПа	0.14
Коэффициент Джоуля–Томсона жидкости, К/МПа	0.4
Сжимаемость жидкости и скелета, Па <sup>-1</sup>	$20 \times 10^{-10}$ , $10^{-10}$

разрыва при работе добывающей скважины в режиме постоянного отбора: дебит жидкости из пласта на единицу его мощности (высоты)  $Q = 1$  м<sup>2</sup>/сут, проницаемость пласта  $k_{\text{res}} = 10^{-14}$  м<sup>2</sup> (~10 мД<sup>1</sup>), проницаемость трещины  $k_{\text{fr}} = 10^{-11}$  м<sup>2</sup> (~10 Д), пористость пласта  $m_{\text{res}} = 0.1$ , пористость трещины  $m_{\text{fr}} = 0.3$ , радиус скважины  $r_w = 0.1$  м, радиус контура питания  $R_c = 120$  м, полудлина (длина крыльев) трещины  $l_{\text{fr}} = 50$  м, пластовое давление  $p_{\text{res}} = 20$  МПа, пластовая температура  $T_{\text{res}} = 50^\circ\text{C}$ , другие параметры модели представлены в табл. 1.

На рис. 2 приводятся рассчитанные зависимости изменения во времени температуры жидкости, притекающей в ствол скважины (область 1 на рис. 1), которая является результатом калориметрического смешивания жидкостей из области пласта (область 2 на рис. 1) и трещины (область 3 на рис. 1). Под изменением температуры  $\Delta T(t)$  понимается разница между температурой жидкости  $T(t)$  и начальной температурой жидкости (пластовой)  $T_{\text{res}}$ , т.е.  $\Delta T(t) = T(t) - T_{\text{res}}$ .

Температурные кривые характеризуются наличием минимума, наблюдаемого в первый час после начала отбора и обусловленного адиабатическим эффектом. В частности, при ширине трещины 1 мм в течение первого часа после начала отбора жидкости давление на границе скважины и пласта снижается с 20 до 15 МПа, в результате в прискважинной (ближней) зоне пласта жидкость охлаждается за счет адиабатического расширения.

После участка кратковременного охлаждения на температурных кривых наблюдается участок немонотонного повышения температуры за счет эффекта Джоуля–Томсона. При увеличении ширины трещины от 1 до 10 мм изменение температуры (в дальнейшем вместо “изменение темпера-

туры” используется для простоты “температура”) притекающей в скважину жидкости за 50 ч отбора снижается с 0.48 до 0.10°С. Характер температуры притекающей в скважину жидкости определяется главным образом притоком жидкости из области трещины (доля жидкости, притекающей в скважину из области трещины, составляет для рассмотренных параметров около 90% суммарного расхода  $Q$  на границе скважина–пласт).

Для поддержания равного дебита жидкости градиент давления в более узкой трещине требуется выше, чем для более широкой. Для сравнения средний градиент давления в прискважинной зоне трещины при ширине трещины 1 и 10 мм составляет соответственно 0.16 и 0.092 МПа/м (рис. 3). Средний градиент давления рассчитан в прискважинной зоне трещины на расстоянии от 0.1 до 10 м от оси скважины. Благодаря увеличению градиента давления в трещине при снижении ее ширины возрастает вклад эффекта Джоуля–Томсона в формирование температуры пластовой системы, и температура жидкости во времени увеличивается более интенсивно.

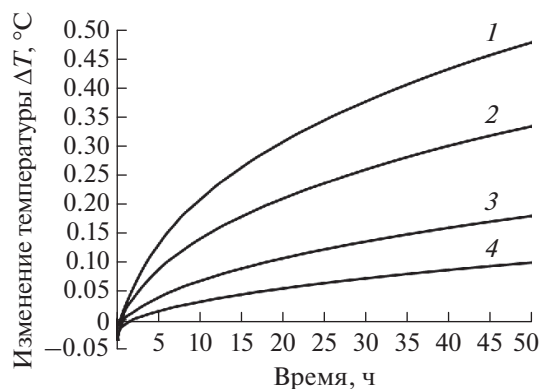


Рис. 2. Изменение температуры притекающей в скважину жидкости при проницаемости пласта  $10^{-14}$  м<sup>2</sup>: 1 — ширина трещины — 1 мм, 2 — 2, 3 — 5, 4 — 10.

<sup>1</sup> Дарси (Д) — единица проницаемости, соответствующая проницаемости горной породы, через поперечное сечение которой, равное 1 см<sup>2</sup>, при ламинарном режиме фильтрации, перепаде давления в 1 атм на протяжении 1 см в 1 с проходит 1 см<sup>3</sup> жидкости с вязкостью 1 Па с.

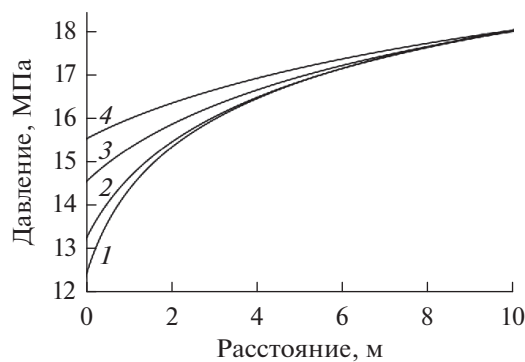


Рис. 3. Распределение давления в трещине через 50 ч отбора: 1–4 – см. рис. 2.

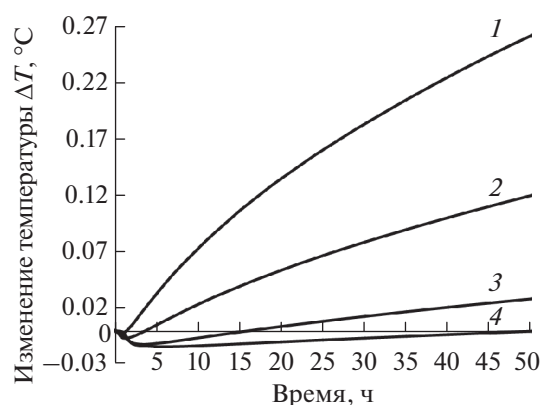


Рис. 4. Изменение температуры притекающей в скважину жидкости, проницаемость пласта –  $10^{-15} \text{ м}^2$ : 1–4 – см. рис. 2.

Таблица 2. Влияние параметров трещины на изменение температуры притекающей в скважину жидкости через 50 ч отбора

Полудлина трещины, м	$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	Проницаемость трещины, $10^{-12} \text{ м}^2$	$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$
25	0.18	5	0.28
50	0.18	10	0.18
100	0.18	100	0.01

Разница температур притекающей в скважину жидкости (через 50 ч отбора) при варьировании ширины трещины в интервале 1–10 мм составляет 0.38 $^\circ\text{C}$ . Поскольку разрешающая способность современных термометров составляет менее 0.01 $^\circ\text{C}$  [5], это позволяет использовать данные нестационарных температурных замеров при оценке ширины трещины.

Результаты исследования влияния полудлины и проницаемости трещины на температуру притекающей в скважину жидкости через 50 ч после начала отбора жидкости из пласта представлены в табл. 2. Ширина трещины в расчетах постоянна и равна 5 мм, при варьировании полудлины трещины ее проницаемость принята равной  $10^{-11} \text{ м}^2$  (~10 Д), при варьировании проницаемости трещины ее полудлина равна 50 м.

При моделируемых параметрах изменение полудлины трещины в диапазоне 25–100 м практически не влияет на температуру притекающей в скважину жидкости. Увеличение проницаемости трещины в диапазоне  $(5\text{--}100) \times 10^{-12} \text{ м}^2$  приводит к значительному снижению температуры притекающей жидкости: с 0.28 до 0.01 $^\circ\text{C}$ , что обусловлено увеличением пропускной способности трещины и снижением градиента давления в ней (и, соответственно, вклада эффекта Джоуля–Томсона).

Результаты моделирования при рассмотрении пласта с более низкой проницаемостью ( $10^{-15} \text{ м}^2$ ,

или ~1 мД) представлены на рис. 4. Дебит жидкости на единицу мощности пласта принят  $Q = 0.5 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

При ширине трещины до 2 мм наблюдается преимущественно рост температуры притекающей жидкости во времени, а при ширине более 5 мм после начала отбора жидкости отмечается участок продолжительного охлаждения. При снижении проницаемости пласта и дебита жидкости снижается скорость фильтрации, и соответственно, вклад эффекта Джоуля–Томсона. В результате температура притекающей жидкости при проницаемости пласта  $10^{-15} \text{ м}^2$  (~1 мД) ниже, чем при проницаемости  $10^{-14} \text{ м}^2$  (~10 мД). При ширине трещины 5 и 10 мм изменение температуры жидкости мало и составляет сотые доли градусов, однако можно отметить фактор, чувствительный к ширине трещины, – время достижения минимальной температуры притекающей в скважину жидкости. Период отрицательной динамики температуры притекающей в скважину жидкости при ширине трещины 5 мм составляет порядка 3 ч, при ширине 10 мм достигает 6 ч, т.е. он возрастает с увеличением ширины трещины.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты численных исследований показали, что температура притекающей в скважину жидкости в режиме постоянного отбора чувствительна к параметрам трещины: ши-

рине, проницаемости. Установлено, что при проницаемости пласта  $10^{-14} \text{ м}^2$  (~10 мД) температурное поле определяется, главным образом, эффектом Джоуля–Томсона, причем изменение температуры притекающей в скважину жидкости возрастает с уменьшением ширины трещины и за 50 ч отбора достигает  $0.5^\circ\text{C}$ . При проницаемости пласта  $10^{-15} \text{ м}^2$  (~1 мД) для трещин шириной от 5 до 10 мм на температурных кривых отмечается участок отрицательной динамики температуры притекающей в скважину жидкости во времени, причем время достижения минимума температуры возрастает с ростом ширины трещины. Перечисленные особенности температурного поля могут быть использованы при оценке параметров трещин гидроразрыва по данным температурных замеров в скважине.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ 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.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вараксин А.Ю.* Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 646.
2. *Шарафутдинов Р.Ф., Садретдинов А.А., Бочков А.С.* Радиально-азимутальный неизотермический приток жидкости к скважине в условиях теплового воздействия // ТВТ. 2011. Т. 49. № 3. С. 449.
3. *Рамазанов А.Ш.* Теоретические основы скважинной термометрии. Уфа: РИЦ БашГУ, 2017. 114 с.
4. *Экономидес М., Олини Р., Валько П.* Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта. От теории к практике. М.—Ижевск: Ин-т комп. иссл., 2007. 236 с.
5. *Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф., Федотов В.Я., Закиров М.Ф., Шарипов А.М., Ахметов К.Р., Азизов Ф.Ф.* Использование нестационарной термометрии для диагностики состояния скважин // Нефтяное хозяйство. 2015. № 5. С. 93.
6. *Seth G., Reynolds A.C., Mahadevan J.* Numerical Model for Interpretation of Distributed Temperature Sensor Data During Hydraulic Fracturing // SPE Annu. Tech. Conf. and Exhibition. Florence, Italy. 19–22 Sept. 2010. Paper SPE-135603-MS. <https://doi.org/10.2118/135603-MS>
7. *Ribeiro P.M., Horne R.N.* Pressure and Temperature Transient Analysis: Hydraulic Fractured Well Application // SPE Annu. Tech. Conf. and Exhibition. New Orleans, Louisiana, USA. 30 Sept.–2 Oct. 2013. Paper SPE-166222-MS. <https://doi.org/10.2118/166222-MS>
8. *Шарипов А.М., Шарафутдинов Р.Ф., Рамазанов А.Ш., Валиуллин Р.А.* Исследование восстановления температуры в скважине после прекращения закачки воды в пласт с трещиной ГРП // Вестн. Башкирск. ун-та. 2017. № 2. С. 315.
9. *Шарафутдинов Р.Ф., Давлетшин Ф.Ф.* Исследование параметрической чувствительности температурного поля в пласте с трещиной гидроразрыва // Вестн. Академии наук РБ. 2021. Т. 38. № 1. С. 22.
10. *Шарафутдинов Р.Ф., Давлетшин Ф.Ф.* Численное исследование неизотермической фильтрации сжимаемого флюида в низкопроницаемом пласте с трещиной гидроразрыва // ПМТФ. 2021. Т. 62. № 2. С. 160.