

$$\begin{cases} \int (r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = \rho \cdot v^{l,frac} \cdot dl, (r, \varphi) \in \Gamma \\ J(r, \varphi) = 0, (r, \varphi) \notin \Gamma \\ p(r, \varphi)|_{\Gamma} = p(x, y)|_{\Gamma} \end{cases} \quad (2)$$

где Γ – граница между областью трещины и пласта (рис. 1), $v^{l,frac}$ – скорость фильтрации жидкости через боковую поверхность трещины, p_{well} – давление в скважине, p_{pl} – пластовое давление, dl – длина элемента границы области трещины, r_{well} – радиус скважины, R_k – радиус контура.

Уравнение притока тепла с учетом Джоуля-Томсона и адиабатического эффектов, кондуктивного и конвективного механизмов теплопереноса для пласта и трещины в обобщенных координатах имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (m \cdot \rho \cdot c + [1 - m] \cdot \rho_{res} \cdot c_{res}) \cdot T + \\ & + \frac{\rho \cdot c}{H_1 \cdot H_2} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} (v_{q1} \cdot T \cdot H_2) + \frac{\partial}{\partial q_2} (v_{q2} \cdot T \cdot H_1) \right] = \\ & = \frac{\lambda}{H_1 \cdot H_2} \left[\frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{H_2}{H_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial q_1} \right) + \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_1}{H_2} \cdot \frac{\partial T}{\partial q_2} \right) \right] + \\ & \quad + m \cdot \rho \cdot c \cdot \eta \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \\ & \quad + \rho \cdot c \cdot \varepsilon \cdot \frac{k}{\mu} \cdot \left[\frac{1}{H_1^2} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial q_1} \right)^2 + \frac{1}{H_2^2} \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial q_2} \right)^2 \right] + \\ & \quad + \delta \cdot Q(r, t) \end{aligned} \quad (3)$$

где T – температура, c – теплоемкость жидкости, ρ_{res} – плотность горной породы, c_{res} – теплоемкость горной породы, λ – теплопроводность среды, η – коэффициент адиабатического расширения жидкости, ε – коэффициент Джоуля-Томсона жидкости, $Q(r, t)$ – источник тепла для модели пласта (характеризует энергию, которая утекает из рассматриваемого элементарного объема пласта в трещину в случае отбора, либо притекает в случае закачки), m – пористость, k – проницаемость, μ – вязкость жидкости.

Граничные и начальные условия для уравнения притока тепла имеют вид:

$$T(r, \varphi)|_{t=0} = T_0, T(x, y)|_{t=0} = T_0$$

в случае отбора: $T(R_k, \varphi) = T_1$; в случае закачки: $T(r_{well}, \varphi) = T_1$; крайевые условия на границе между трещиной и пластом:

$$\begin{cases} Q(r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = \\ = \rho \cdot v^{l,frac} \cdot c \cdot T^{in/out} \cdot dl - \\ - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dl, (r, \varphi) \in \Gamma \\ Q(r, \varphi) = 0, (r, \varphi) \notin \Gamma \\ T(r, \varphi)|_{\Gamma} = T(x, y)|_{\Gamma} \end{cases} \quad (4)$$

где $T^{in/out}$ – температура жидкости, которая притекает из трещины в пласт/утекает из пласта в трещину, T_0 – начальная температура пласта и трещины, T_1 – температура на границе (в случае отбора на контуре пласта, в случае закачки на границе со скважиной), n – нормаль к границе области трещины.

Температура в скважине вычисляется как средняя температура на границе между скважиной и трещиной, скважиной и пластом. Такое допущение возможно, когда эффектом ТВСС (температурное влияние ствола скважины [5]) можно пренебречь.

Для экономии вычислительного времени, т.к. задача симметрична, решается только $\frac{1}{4}$ часть всего пласта. На границах записывается условие симметрии (отсутствие потоков). Уравнения (1), (3) аппроксимируются с помощью метода контрольного объема [6]. Полученная система линейных алгебраических уравнений решается методом верхней релаксации [7].

На рис. 2–7 приведены результаты расчетов при следующих значениях параметров: пластовое давление – 20 МПа; начальная температура пласта и трещины – 50 °С; температура закачиваемой жидкости – 40 °С; радиус скважины – 0.1 м; радиус контура – 140 м; пористость пласта – 0.1; пористость трещины – 0.3; проницаемость пласта – $0.05 \cdot 10^{-12}$ м²; проницаемость трещины – $100 \cdot 10^{-12}$ м²; плотность горной породы – 2700 кг/м³; теплоемкость горной породы – 1000 Дж/кг·К; теплопроводность пласта – 2 Вт/м·К; вязкость воды – 0.001 Па·с; плотность воды – 1000 кг/м³; теплоемкость воды – 4200 Дж/кг·К; коэффициент адиабатического расширения воды – 0.014 К/МПа; коэффициент Джоуля – Томсона воды – 0.2 К/МПа; ширина трещины – 0.005, 0.01, 0.015 м; полудлина трещины – 0, 1, 5, 20, 50, 100 м.

Как видно из рис. 2, увеличение длины трещины немонотонно влияет на восстановление температуры в скважине при постоянной репрессии. При увеличении длины трещины от 0 до 5 метров наблюдается тенденция, что темп восстановления температуры в скважине увеличивается. Это связано с тем, что при увеличении длины трещины, больше жидкости по трещине уходит вглубь пласта, а на восстановление температуры в скважине непосредственно влияет температура при скважинной зоне. При дальнейшем увеличении длины трещины от 5 до 100 метров наблюдается обратная зависимость, связанная с тем, что в случае постоянной репрессии при увеличении длины трещины также увеличивается и приемистость пласта (рис. 2), соответственно поглощается больше холодной жидкости.

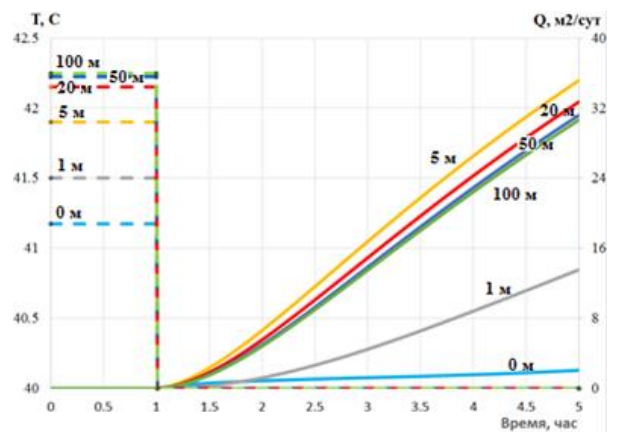


Рис. 2. Изменение температуры в скважине и удельной приемистости (на единицу высоты трещины и пласта) в процессе закачки и после остановки при различной полудлине трещины. Закачка при репрессии 50 атм, время закачки 1 час, ширина трещины 0.005 м. Сплошные линии соответствуют изменению температуры, пунктирные – изменению приемистости. Подписи кривых соответствуют полудлине трещины.

На характер восстановления температуры также влияют условия закачки жидкости в пласт с трещиной ГРП. Выше был рассмотрен случай постоянной репрессии на пласт, а ниже приведены результаты расчета восстановления температуры после прекращения закачки при постоянной удельной приемистости (на единицу высоты трещины и пласта). Видно, что в этом случае темп восстановления температуры увеличивается с увеличением длины трещины (рис. 3).

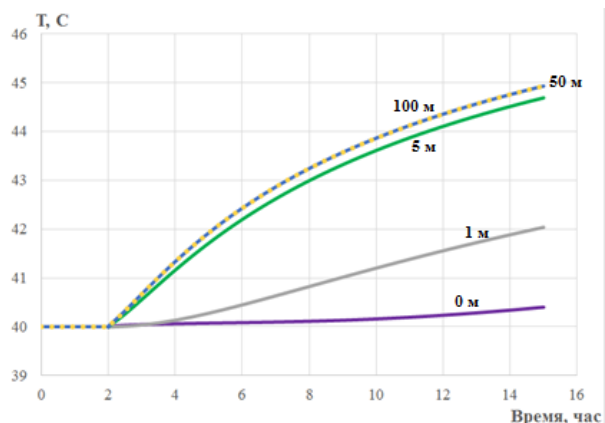


Рис. 3. Изменение температуры в скважине в процессе закачки и после остановки при различной полудлине трещины. Удельная приемистость 15.2 м²/сут, время закачки 2 часа, ширина трещины 0.005 м. Подписи кривых соответствуют полудлине трещины.

Таким образом, из рис. 3 следует, что в отличие от случая с постоянной репрессией, чем больше длина трещины, тем быстрее восстанавливается температура в скважине. В данном случае, приемистость считается постоянной, поэтому один и тот же объем закаченной жидкости при увеличении длины трещины уходит по трещине на большее расстояние

от скважины (рис. 4). Непосредственное влияние на восстановление температуры в скважине оказывает область теплового возмущения от нагнетаемой жидкости в призабойной зоне, при увеличении длины трещины область теплового возмущения в призабойной зоне уменьшается (большая часть теплового возмущения уходит по узкой трещине гидроразрыва) и поэтому увеличивается темп восстановления температуры.

Ниже (рис. 5–7) приведены результаты расчета, характеризующие влияние изменения ширины трещины на восстановление температуры в скважине после прекращения закачки. Для случая постоянной репрессии с увеличением ширины трещины температура восстанавливается быстрее (рис. 5). Чем больше ширина трещины, тем дальше вглубь пласта уходит закачиваемая холодная жидкость по трещине и область теплового возмущения в призабойной зоне уменьшается (рис. 6).

На рис. 7 приведены результаты расчета для случая постоянной приемистости пласта. Из рис. 7 следует, что в этом случае также наблюдается увеличение темпа восстановления температуры в скважине после прекращения закачки в пласт с трещиной ГРП при увеличении ширины трещины.

Выводы:

1. Наличие трещины ГРП существенно влияет на восстановление температуры в скважине после прекращения закачки, увеличивается темп восстановления температуры в скважине по сравнению с однородным пластом;
2. Наблюдается зависимость темпа восстановления температуры от геометрии трещины (длина, ширина);
3. В случае постоянной приемистости темп восстановления температуры зависит от полудлины трещины и ее ширины монотонно;

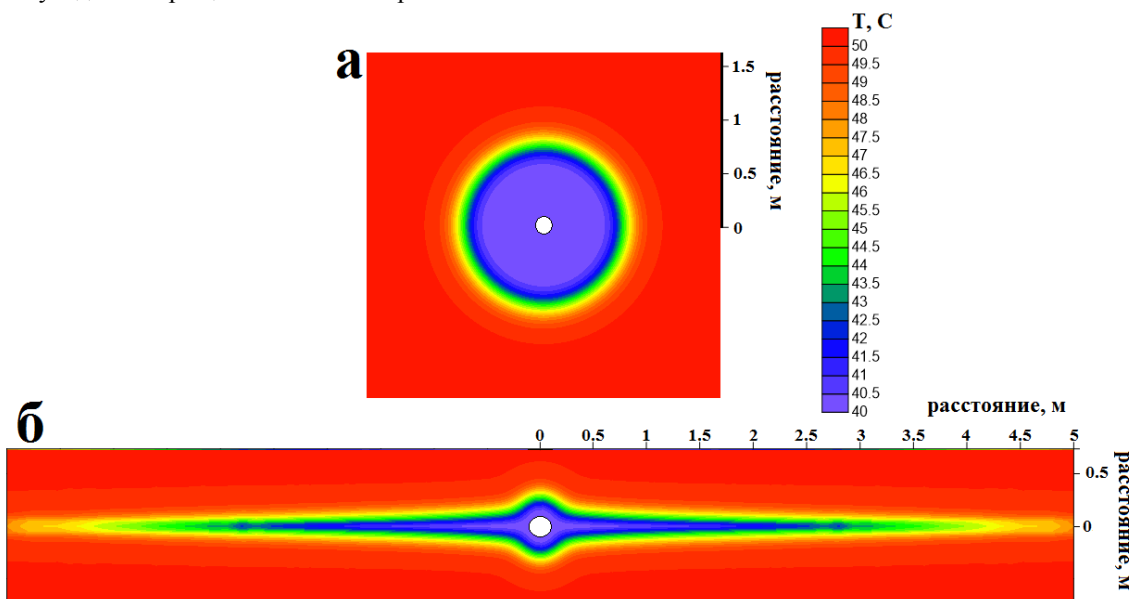


Рис. 4. Распределение температуры в пласте без ГРП (а) и с трещиной ГРП (б) после 2 часов закачки, ширина трещины 0.005 м, удельная приемистость 15.2 м²/сут, а – длина трещины 0 м, б – длина трещины 100 м.

4. В случае постоянной репрессии темп восстановления температуры зависит от полудлины трещины немонотонно, а от ширины трещины монотонно.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту РФФИ 16–29–15130 офи_м.

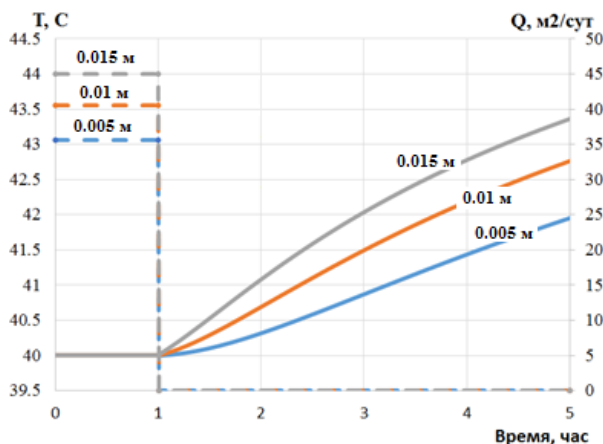


Рис. 5. Изменение температуры в скважине и удельной приемистости (на единицу высоты трещины и пласта) в процессе закачки и после остановки при различной ширине трещины. Закачка при репрессии 50 атм., время закачки 1 час, полудлина трещины 50 м. Сплошные линии соответствуют изменению температуры, пунктирные – изменению приемистости. Подписи кривых соответствуют ширине трещины.

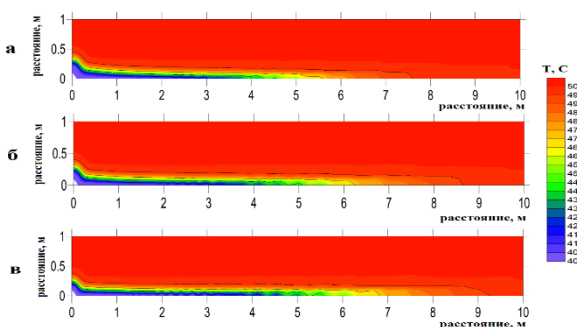


Рис. 6. Распределение температуры в пласте после 1 часа закачки, полудлина трещины 50 м, закачка при репрессии 50 атм, а – ширина трещины 0.005 м, б – ширина трещины 0.01 м, в – ширина трещины 0.015 м.

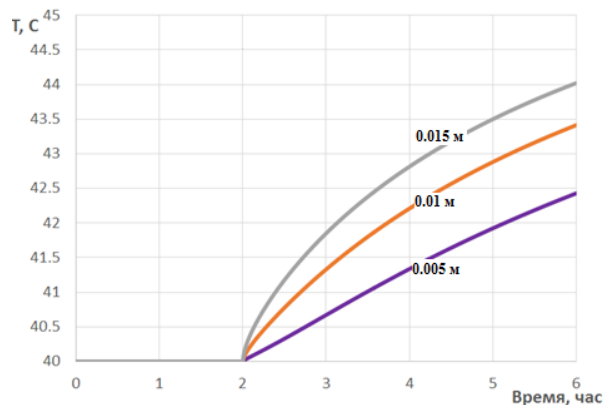


Рис. 7. Изменение температуры в скважине в процессе закачки и после остановки при различной ширине трещины. Закачка с приемистостью 15.2 м³/сут, время закачки 2 часа, полудлина трещины 50 м. Подписи кривых соответствуют ширине трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мусалеев Харис, Мельников Сергей. Анализ нестационарной термометрии в скважинах с ГРП // Материалы Российской нефтегазовой технической конференции, Москва, 26–28 октября 2015 г, SPE 176645-RU.
2. Ribeiro P. M., Horne R. N. Pressure and Temperature Transient Analysis: Hydraulic Fractured Well Application // SPE 166222, 2013 г.
3. Hoang H., and Mahadevan J., Lopez H.: “Interpretation of Wellbore Temperatures Measured using Distributed Temperature Sensors during Hydraulic Fracturing” // SPE 140442, 2011 г.
4. Cui J., and Zhu D., and Jin M.: “Diagnosis of Multi-Stage Fracture Stimulation in Horizontal Wells by Downhole Temperature Measurements” // SPE 170775170874, 2014 г.
5. Рамазанов А. Ш., Валиуллин Р. А., Садретдинов А. А., Шако В. В., Пименов В. П., Федоров В. Н., Белов К. В. Термогидродинамические исследования в скважине для определения параметров прискважинной зоны пласта и дебитов многопластовой системы // SPE 136256, 2010 г.
6. Патанкар С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах: Пер с англ. Калабина Е. В; под ред. Г. Г. Янькова. М: Издательство МЭИ, 2003 г. 312 с.
7. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем: Пер с англ. А. В. Королева, В. П. Кестнера; под ред. Максимова М. М. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004 г. 416 с.

Поступила в редакцию 15.03.2017 г.

**STUDY OF THE TEMPERATURE RECOVERY PROCESS IN A WELL
AFTER STOP OF WATER INJECTION IN A RESERVOIR
WITH HYDRAULIC FRACTURING**

© **A. M. Sharipov***, **R. F. Sharafutdinov**, **A. Sh. Ramazanov**, **R. A. Valiullin**

*Bashkir State University
32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (347) 272 60 56.

**Email: art.hata@mail.ru*

Much attention is paid currently to the development of oil and gas fields using hydraulic fracturing. Monitoring of technical condition of the well is among the actual questions. One of the effective methods for diagnosing of a well and formation with a hydraulic fracture is thermohydrodynamic studies. At the same time, the studies of temperature recovery process in the well after the stop of water injection are of particular interest; this process is observed after completion of hydraulic fracturing process in production well or in the stopped injection well. In this article, the temperature recovery process in the well after the stop of water injection in reservoir with hydraulic fracturing is studied on the basis of numerical modeling taking into account Joule-Thomson and adiabatic effects, convective and conductive heat transfer. It is shown that existence of fracture in reservoir leads to reduction of recovery time of temperature in the well to geothermal temperature. Change of fracture geometry (length or width) leads to essential change of temperature recovery rate. In the case of constant injection, the rate of temperature recovery varies monotonically with a change in fracture length; and in the case of constant repression, a nonmonotonic dependence is observed. Increase of the width of fracture leads to increase of the temperature recovery rate after the injection is stopped.

Keywords: well, temperature recovery, hydraulic fracturing, thermometry, numerical modeling.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Musaleev Kharis, Mel'nikov Sergei. Analiz nestatsionarnoi termometrii v skvazhinakh s GRP. Materialy Rossiiskoi neftegazovoi tekhnicheskoi konferentsii, Moscow: 26–28 oktyabrya 2015 g, SPE 176645-RU.
2. Ribeiro P. M., Horne R. N. SPE 166222, 2013 g.
3. Hoang H., and Mahadevan J., Lopez H. SPE 140442, 2011 g.
4. Cui J., and Zhu D. SPE 170775170874, 2014 g.
5. Ramazanov A. Sh., Valiullin R. A., Sadretdinov A. A., Shako V. V., Pimenov V. P., Fedorov V. N., Belov K. V. SPE 136256, 2010 g.
6. Patankar S. V. Chislennoe reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh [Numerical solution of problems of thermal conductivity and convective heat transfer in the flow in channels]: Per s angl. Kalabina E. V; pod red. G. G. Yan'kova. M: Izdatel'stvo MEI, 2003 g.
7. Aziz Kh., Settari E. Matematicheskoe modelirovanie plastovykh system [Mathematical modeling of reservoir systems]: Per s angl. A. V. Koroleva, V. P. Kestnera; pod red. Maksimova M. M. Moskva – Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2004 g.

Received 15.03.2017.