

Особенности теплового поля при закачке жидкости в скважину в процессе индукционного нагрева обсадной колонны

Руслан Зуфарович Акчурин, Филюс Фанизович Давлетшин, Денис Фавилович Исламов[✉], Рим Абдуллович Валиуллин, Айрат Шайхуллинович Рамазанов

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
Контакт для переписки: islamovden@rambler.ru[✉]

Аннотация. Закачка воды в продуктивные пласты — один из распространенных методов разработки нефтяных месторождений. Эффективность технологии заводнения пластов во многом зависит от соответствия проектных и фактических объемов закачки воды. Вследствие нарушения герметичности цементного кольца в заколонном пространстве возникают перетоки жидкости, которые обуславливают непроектный уход закачиваемой жидкости в неперфорированные пласты. Выявление и оперативное устранение заколонных перетоков при закачке жидкости в нагнетательные скважины является одной из важных задач эффективной и экологичной разработки нефтяных месторождений.

В работе рассматривается применение индукционного нагрева обсадной колонны для определения заколонного перетока снизу вверх при закачке жидкости в скважину. Исследования основаны на численном моделировании в инженерном пакете Ansys Fluent. Смоделированы сценарии отсутствия и наличия перетока при закачке жидкости в скважину. Показано, что в скважине без перетока возмущение температурного поля распространяется от нагреваемого участка колонны преимущественно радиально в цемент и горные породы, в скважине с перетоком тепловое возмущение от участка нагрева распространяется также в вертикальном направлении по направлению перетока, причем на расстоянии до 1 м выше участка нагрева возмущения температуры в теле колонны и заколонном пространстве достигают 2...3 К. Установлено, что признаками перетока являются также снижение степени нагрева обсадной колонны и повышенная динамика остывания колонны во времени по сравнению с отсутствием заколонного движения жидкости. Полученные результаты служат теоретическим обоснованием

принципиальной информативности метода активной термометрии при диагностике заколонных перетоков в нагнетательных скважинах.

Ключевые слова: индукционный нагрев, температура, Ansys Fluent, заколонный переток, нагнетательная скважина, тепловое возмущение, конвективный теплоперенос

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-20017, <https://rscf.ru/project/23-17-20017/>). Лицензия Ansys Academic Research CFD используется в рамках договора с Башкирским государственным университетом от 15 июня 2020 г.

Цитирование: Акчурин Р. З., Даветшин Ф. Ф., Исламов Д. Ф., Валиуллин Р. А., Рамазанов А. Ш. 2023. Особенности теплового поля при закачке жидкости в скважину в процессе индукционного нагрева обсадной колонны // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 9. № 4 (36). С. 44–58. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-4-44-58>

Поступила 04.10.2023; одобрена 09.11.2023; принята 15.12.2023

Features of the thermal field during fluid injection into the well during induction heating of the casing

Ruslan Z. Akchurin, Filyus F. Davletshin, Denis F. Islamov✉,
Rim A. Valiullin, Ayrat Sh. Ramazanov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
Corresponding author: islamovden@rambler.ru✉

Abstract. Pumping water into productive formations is one of the most common methods of oil field development. The effectiveness of reservoir flooding technology largely depends on the compliance of the design and actual volumes of water injection. Due to the violation of the tightness of the cement ring, fluid flows occur in the column space, which cause non-project withdrawal of the injected liquid into non-perforated layers. Identification and prompt elimination of backwater flows during injection of liquid into injection wells is one of the important tasks of efficient and environmentally friendly development of oil fields.

The paper considers the use of induction heating of the casing string to determine the bottom-up backflow when pumping liquid into the well. The research is based

on numerical modeling in the Ansys Fluent engineering package. Scenarios of absence and presence of overflow during injection of liquid into the well are simulated. It is shown that in a well without overflow, the temperature field disturbance propagates from the heated section of the column mainly radially into cement and rocks, in a well with overflow, the thermal disturbance from the heating section also propagates vertically in the direction of the overflow, and at a distance of up to 1 m above the heating section, temperature disturbances in the column body and the column space reach 2...3 K. It was found that the signs of overflow are also a decrease in the degree of heating of the casing string and an increased dynamics of cooling of the column over time compared with the absence of the column movement of the liquid. The results obtained serve as a theoretical justification for the fundamental informativeness of the active thermometry method in the diagnosis of backwater flows in injection wells.

Keywords: induction heating, temperature, Ansys Fluent, backwater overflow, injection well, thermal disturbance, convective heat transfer

Acknowledgements: the research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-17-20017, <https://rscf.ru/en/project/23-17-20017/>). Ansys Academic Research CFD license is used under an agreement with Bashkir State University dated June 15, 2020.

Citation: Akchurin, R. Z., Davletshin, F. F., Islamov, D. F., Valiullin, R. A., & Ramazanov, A. Sh. (2023). Features of the thermal field during fluid injection into the well during induction heating of the casing. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 9(4), 44–58. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-4-44-58>

Received October 4, 2023; Reviewed November 9, 2023; Accepted December 15, 2023

Введение

На сегодняшний день заводнение нефтяных пластов путем закачки воды является одним из наиболее популярных методов увеличения нефтеотдачи. Основной принцип данной технологии разработки месторождений заключается в вытеснении нефти из пор пласта закачиваемой водой, поддержании пластовой энергии путем обеспечения требуемого пластового давления [Литвиненко, 2008]. Эффективность методов заводнения пластов в значительной степени зависит от технического состояния нагнетательных скважин, через которые осуществляется закачка жидкости. Вследствие нарушения целостности обсадной колонны и цементного кольца в заколонном пространстве возникает непродуктивный (непроектный) уход жидкости в неперфорированные пласты. Обнаружение и оперативное устранение заколонных перетоков такого типа является задачей, от которой зависит эффективность всей технологии разработки месторождений [Валиуллин и др., 2015; Ипатов, Кременецкий, 2022].

Для определения заколонных перетоков широко применяется метод скважинной термометрии в комплексе с другими геофизическими методами исследования: барометрией,

расходомерией, методами состава [Валиуллин, Яруллин, 2014]. Однако в ряде случаев, например при определении заколонного перетока снизу вверх от перфорированных пластов к вышележащим неперфорированным горизонтам в нагнетательных скважинах, данный комплекс не всегда позволяет достоверно определять заколонные перетоки. Это связано с преобладающим влиянием на тепловое поле закачиваемой жидкости, экранирующей тепловой сигнал от негерметичного заколонного пространства в условиях встречных потоков: поток в стволе скважины направлен вниз, поток в заколонном пространстве — вверх. При длительной закачке жидкости в окружающем скважину пространстве формируется зона охлаждения, которая еще больше осложняет задачу обнаружения заколонных перетоков. Между тем при некачественном цементировании скважин переток жидкости снизу вверх может достигать пресноводных горизонтов, оказывая негативное влияние на экологическую обстановку в регионе. Вышесказанное подчеркивает актуальность разработки эффективных методов обнаружения заколонных перетоков в нагнетательных скважинах [Abeling и др., 2021].

Для решения этой задачи рассматривается метод скважинных геофизических исследований, основанный на индукционном нагреве колонны и, соответственно, среды, контактирующей с нагреваемым участком [Валиуллин и др., 2002а, 2002б; Шарафутдинов и др., 2023]. При наличии перетока в потоке жидкости в заколонном пространстве возникает тепловое возмущение, движущееся вместе с потоком. Информативность активной термометрии применительно к определению заколонного перетока основывается на регистрации температуры обсадной колонны выше или ниже участка нагрева, в зависимости от предполагаемого направления перетока. На рис. 1 представлена схема течения жидкости при заколонном перетоке снизу вверх в нагнетательной скважине, также показано размещение скважинного прибора с индукционным нагревателем.

На сегодняшний день опубликован ряд исследований, посвященных изучению термического эффекта в пластах за счет индукционного воздействия, диагностике движения флюида в стволе скважины и заколонном пространстве в добывающих скважинах за счет создания искусственного теплового возмущения в обсадной колонне [Sharafutdinov и др., 2012; Valiullin и др., 2012; Ковалева и др., 2019; Sharafutdinov и др., 2022; Акчурун и др., 2023а, 2023б; Давлетшин и др., 2023б; Космылин и др., 2023; Рамазанов и др., 2023].

Методы

В данной работе исследуются особенности температурного поля в нагнетательной скважине, в которой осуществляется локальный индукционный нагрев обсадной колонны, при этом основной задачей исследований является изучение влияния заколонного перетока на температуру обсадной колонны.

Математическая модель индукционного нагрева обсадной колонны

Моделируется процесс индукционного нагрева участка колонны при наличии потока жидкости в колонне, наличии/отсутствии потока в заколонном пространстве (рис. 2). Расчетная область состоит из пяти различных зон с отличающимися свойствами (теплофизические свойства областей представлены в таблице 1).

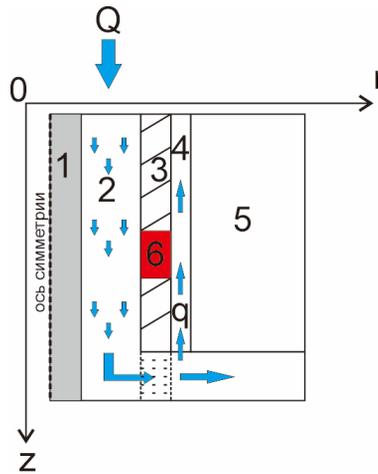


Рис. 1. Схема потоков жидкости в процессе закачки: 1 — скважинный прибор с индукционным нагревателем; 2 — поток закачиваемой жидкости; 3 — колонна; 4 — область перетока; 5 — твердая среда, включающая цемент и породы; 6 — участок нагрева; Q , q — расходы жидкости в соответствующих областях

Fig. 1. Flow diagram of the fluid flow during the casing string overflow during injection: 1 — downhole tool with induction heater; 2 — the flow of the injected liquid; 3 — casing string; 4 — flow channel; 5 — cement ring and rocks; 6 — the induction heating section; Q , q — volume flow of liquid in the casing string and the channel of the casing string overflow, respectively

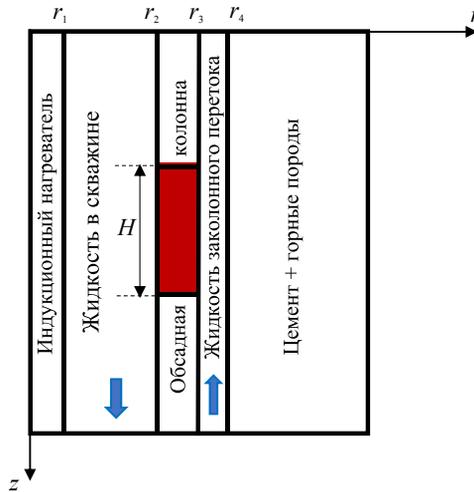


Рис. 2. Геометрия модели: H — длина участка индукционного нагрева, вдоль которого происходит равномерное тепловыделение в колонне; r_1-r_4 — радиусы элементов модели

Fig. 2. Geometry of the model: H — the length of the induction heating section along which uniform heat generation occurs in the column; r_1-r_4 — the radii of the model elements

Таблица 1. Теплофизические параметры модели

Table 1. Thermophysical properties of model

Материал (область)	Теплопроводность λ , Вт/(м · К)	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг · К)	Плотность ρ , кг/м ³
Углепластик (1)	0,48	920	1 500
Жидкость, вода (2, 4)	0,65	4 200	1 000
Горные породы (5)	2	1 000	2 000
Цемент (5)	2	1 000	2 000
Металл, сталь (3)	50	500	7 800

Радиусы областей: $r_1 = 0,021$ м, $r_2 = 0,063$ м, $r_3 = 0,0735$ м, $r_4 = 0,0745$ м, $H = 0,4$ м. Участок нагрева располагается в середине моделируемой области ($z = 2,8 \dots 3,2$ м).

Поле скорости \vec{v} и давления p при течении жидкости в стволе скважины и канале заколонного движения рассчитывается на основе уравнений Навье — Стокса в приближении Буссинеска [Сухов, 2012]:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \rho(T) \vec{g}, \quad \nabla \cdot \vec{v} = 0. \quad (1)$$

Рассчитанное поле скорости используется для дальнейшего расчета поля температуры с учетом конвекции и теплопроводности, в твердых средах (области 1, 3, 5 на рис. 1) решается уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + w(z). \quad (2)$$

Здесь \vec{v} — скорость течения, м/с; \vec{g} — ускорение свободного падения, м/с²; Δ — оператор Лапласа; ∇ — оператор Гамильтона; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); p — давление, Па; t — время, с; T — температура, К; $w(z)$ — удельная мощность тепловыделения, принимающая ненулевое значение только внутри обсадной колонны, Вт/м³; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); μ — динамическая вязкость, Па · с; ρ — плотность жидкости, кг/м³; ρ_0 — плотность жидкости при равновесной температуре T_0 , кг/м³.

Условия на границах модели, а также детальное описание методов численного решения системы уравнений (1)–(2) представлено в работе [Давлетшин и др., 2023а].

Результаты и обсуждение

В рамках математического моделирования длительность индукционного нагрева принята 20 мин, также изучается расформирование теплового поля после прекращения нагрева. Рассматриваются два сценария: 1) закачка жидкости в технически исправную скважину (заколонный переток жидкости отсутствует); 2) закачка жидкости в скважину с нарушением герметичности цементного кольца, обуславливающим заколонный переток снизу вверх между колонной и цементом (рис. 1, 2). Расход закачиваемой жидкости в обсадной

колонне принят $Q = 50 \text{ м}^3/\text{сут}$, расход в канале перетока $q = 5 \text{ м}^3/\text{сут}$, т. е. доля перетока составляет 10% от суммарного расхода закачиваемой жидкости. Мощность тепловыделения в обсадной колонне составляет 1 000 Вт. Картина распределения температуры в области индукционного нагрева при отсутствии заколонного перетока показана на рис. 3. Построена картина изменения температуры относительно начальной $\Delta T = T - T_0$, где начальная температура в модели T_0 принята $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (333,15 К).

Тепловое возмущение сконцентрировано главным образом на участке нагрева (вертикальная координата 2,8...3,2 м), разогрев (увеличение температуры) колонны в этой области достигает 12,9 К. За счет теплопроводности возмущение температурного поля распространяется радиально от нагретого участка колонны к цементу и горным породам, в этой области температура достигает от 6 до 12 К. Разогрев движущегося внутри колонны потока в сравнении с разогревом самой колонны на порядок ниже; изменение среднемассовой температуры жидкости, проходящей через участок нагрева, составляет порядка 0,4 К; при этом на участке нагрева на границе с металлом локальная температура жидкости достигает 6 К.

Распределение температуры в колонне на ее внутренней поверхности (также построены кривые изменения температуры относительно начальной) в различные моменты времени после начала индукционного нагрева показано на рис. 4. Температура внутренней поверхности колонны может быть измерена специальными прижимными датчиками [Канафин, Космылин, 2017], и в условиях расположения измерительного прибора внутри скважины температура колонны обладает наибольшей информативностью с точки зрения диагностики процессов в заколонном пространстве.

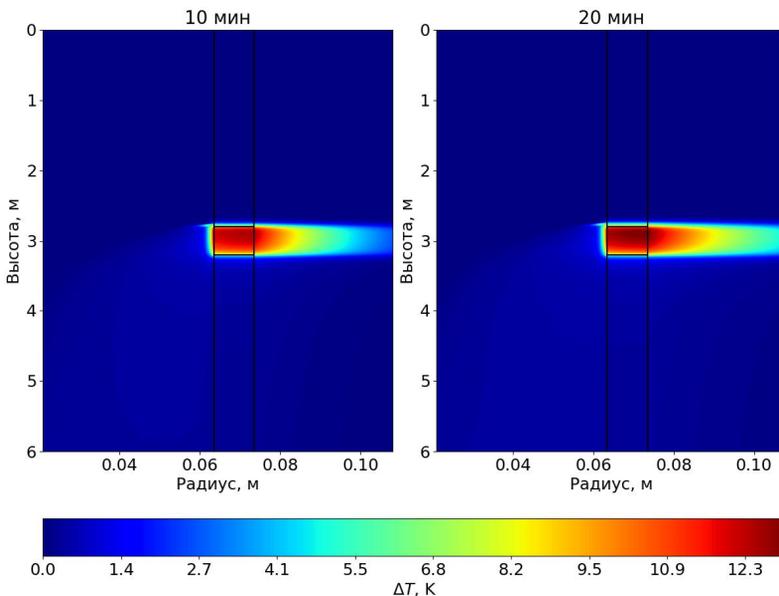


Рис. 3. Температура (T) в скважине через 10 и 20 мин после начала нагрева
Fig. 3. The temperature (T) in the well after 10 and 20 min after the start of heating

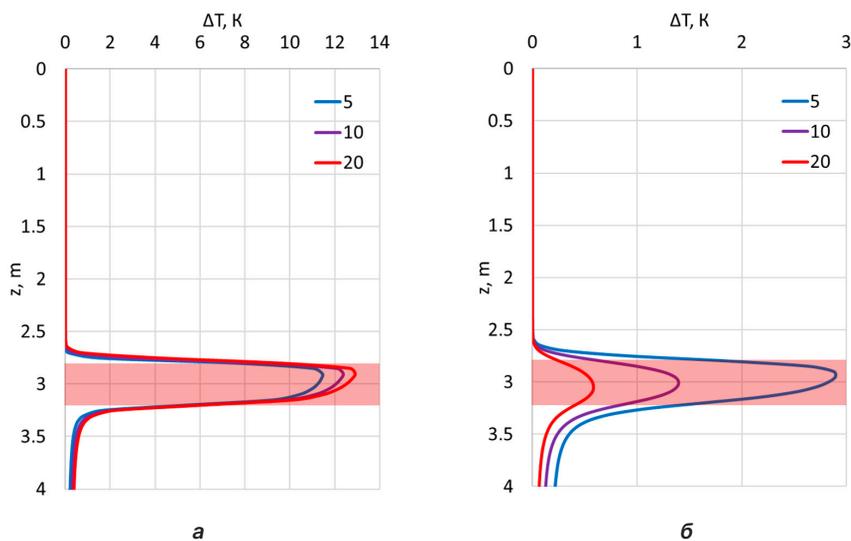


Рис. 4. Изменение температуры (ΔT) внутренней поверхности колонны по высоте (z), область нагрева закрашена. Время (5, 10, 20 мин): а — после начала нагрева; б — после прекращения нагрева

Fig. 4. The temperature change (ΔT) of the inner surface of the column in height (z), the heating area is painted over. Time (5, 10, 20 min): а — after the start of heating; б — after the stop of heating

В отсутствие заколонного перетока перенос тепла вдоль колонны вертикально вверх осуществляется только за счет теплопроводности, разогрев колонны выше участка нагрева отмечается на расстоянии до 0,2 м. Ниже участка нагрева увеличение температуры колонны связано как с теплопроводностью, так и с теплообменом колонны с закачиваемой в скважину жидкостью, нагреваемой при прохождении участка нагрева.

Картина теплового поля в скважине в области индукционного нагрева при наличии заколонного перетока жидкости показана на рис. 5. За счет конвективного теплопереноса восходящим потоком жидкости в заколонном пространстве тепловое возмущение от участка нагрева распространяется в вертикальном направлении; благодаря теплообмену с заколонным потоком нагреваются также колонна, цемент и горные породы. На расстоянии до 1 м выше участка нагрева возмущения температуры в теле колонны и заколонном пространстве достигают 2...3 К. Распределение температуры внутренней поверхности колонны по вертикали с учетом заколонного перетока показано на рис. 6.

Величина максимального разогрева колонны для сценария с перетоком составляет 5,4 К, что более чем в два раза ниже по сравнению со сценарием без перетока (12,9 К). Кроме того, переток интенсивно уносит тепло из области индукционного нагрева, в результате уже через 5 мин после остановки нагрева остаточные температурные возмущения в колонне на участке нагрева не превышают 0,2 К, тогда как для сценария без перетока (рис. 4б) нагрев колонны через 5 мин составляет около 3 К, т. е. на порядок выше.

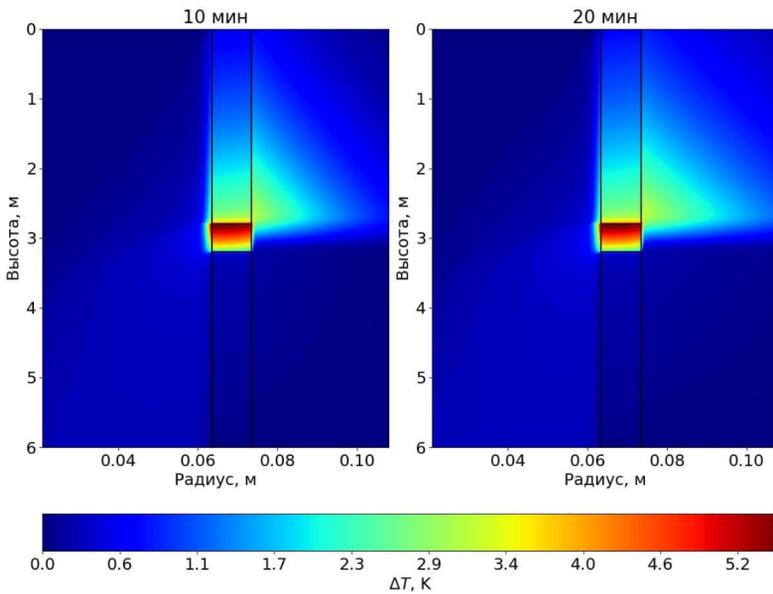


Рис. 5. Температура (T) в скважине через 10 и 20 мин после начала нагрева с учетом заколонного перетока

Fig. 5. The temperature (T) in the well after 10 and 20 min after the start of heating in the presence of a casing string overflow

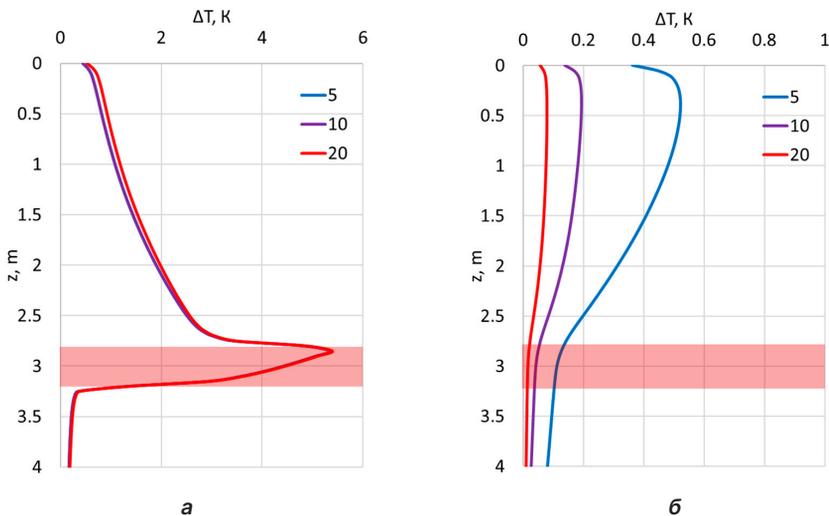


Рис. 6. Изменение температуры (ΔT) внутренней поверхности колонны по высоте (z) с учетом заколонного перетока. Время (5, 10, 20 мин): а — после начала нагрева; б — после прекращения нагрева

Fig. 6. The temperature change (ΔT) of the inner surface of the column in height (z) in the presence of a casing string overflow. Time (5, 10, 20 min): а — after the start of heating; б — after the stop of heating

Обобщая вышесказанное, можно заключить, что наличие перетока приводит, во-первых, к снижению степени нагрева обсадной колонны, во-вторых, к повышенной динамике остывания колонны во времени. Эти выводы наглядно демонстрируют кривые изменения во времени температуры колонны (рис. 7), построенные в середине участка нагрева (координата $z = 3$ м, рис. 6). Величина нагрева колонны для сценариев с перетоком и без составляет около 3,6 и 11,4 К соответственно (отличие в три раза), причем при наличии перетока после отключения индукционного нагревателя температура колонны интенсивно снижается во времени, так что через 5 мин остаточный нагрев колонны снижается до 0,1 К. Через аналогичный промежуток времени в скважине без перетока нагрев колонны еще сохраняется на уровне более 2 К.

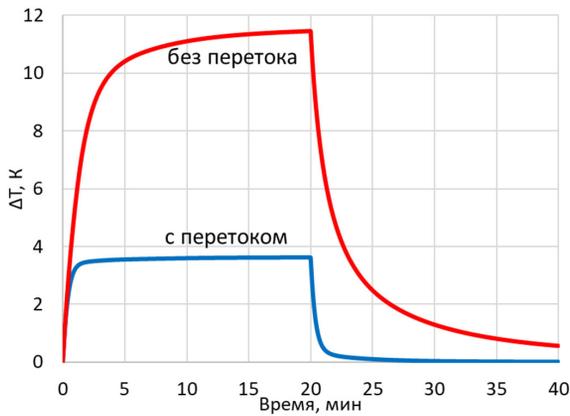


Рис. 7. Изменение во времени температуры колонны (ΔT) в середине участка нагрева
 Fig. 7. Time change of the column temperature (ΔT) in the middle of the heating section

Заключение

Путем численного моделирования в инженерном пакете Ansys Fluent изучено формирование теплового поля в процессе закачки жидкости в скважину применительно к обнаружению заколонных перетоков жидкости с использованием метода активной термометрии — локального индукционного нагрева обсадной колонны. Рассмотрены два сценария: 1) закачка жидкости в технически исправную скважину (заколонный переток жидкости отсутствует); 2) закачка жидкости в скважину с нарушением герметичности цементного кольца, обуславливающим заколонный переток снизу вверх между колонной и цементом. Показано, что в скважине без перетока возмущение температурного поля распространяется от нагреваемого участка колонны преимущественно радиально в цемент и горные породы; в скважине с перетоком тепловое возмущение от участка нагрева распространяется также в вертикальном направлении по направлению перетока, причем на расстоянии до 1 м выше участка нагрева возмущения температуры в теле колонны и заколонном пространстве достигают 2... 3 К. Построены кривые распределения по высоте температуры в обсадной колонне на ее внутренней поверхности, регистрируемой прижимными датчиками. Установлено, что величина максимального разогрева

колонны для сценария с перетоком более чем в два раза ниже по сравнению со сценарием без перетока (5,4 и 12,9 К соответственно). Также показано, что сценарий с перетоком характеризуется повышенной динамикой остывания колонны во времени по сравнению со сценарием без перетока: в частности, через 5 мин после остановки нагрева остаточные температурные возмущения в колонне на участке нагрева не превышают десятых долей К, тогда как без перетока нагрев колонны достигает нескольких К. Полученные результаты могут быть использованы при интерпретации результатов температурных исследований нагнетательных скважин с использованием метода активной термометрии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Акчури Р. З., Давлетшин Ф. Ф., Исламов Д. Ф., Валиуллин Р. А., Шарафутдинов Р. Ф. 2023а. Особенности температурного поля в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны с учетом влияния естественной конвекции // Теплофизика и аэромеханика. Том 30. № 3. С. 517–529.
- Акчури Р. З., Давлетшин Ф. Ф., Рамазанов А. Ш., Шарафутдинов Р. Ф. 2023б. Тепловое поле в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны в условиях низкой скорости потока // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Том 334. № 2. С. 87–98. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/2/3807>
- Валиуллин Р. А., Шарафутдинов Р. Ф., Сорокань В. Ю., Шилов А. А. 2002а. Использование искусственных тепловых полей в скважинной термометрии // Каротажник. № 100. С. 124–137.
- Валиуллин Р. А., Шарафутдинов Р. Ф., Рамазанов А. Ш., Дрягин В. В., Адиев Я. Р., Шилов А. А. 2002б. Способ активной термометрии действующих скважин (варианты): пат. 2194160 РФ / заявитель и патентообладатель Башкирский государственный университет, НПФ «ГеоТЭК». № 2001102007/03; заявл. 22.01.2001; опубл. 10.12.2002.
- Валиуллин Р. А., Яруллин Р. К. 2014. Особенности геофизических исследований действующих горизонтальных скважин // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. Том 19. № 1. С. 21–28.
- Валиуллин Р. А., Шарафутдинов Р. Ф., Садретдинов А. А., Закиров М. Ф., Хабиров Т. Р., Шарипов А. М. 2015. Экологические вопросы контроля за эксплуатацией скважин подземных хранилищ газа // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том 17. № 5. С. 256–262.
- Давлетшин Ф. Ф., Исламов Д. Ф., Хабиров Т. Р., Гаязов М. С., Низаева И. Г. 2023а. Изучение теплообменных процессов при индукционном нагреве обсадной колонны применительно к определению заколонных перетоков // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 9. № 1 (33). С. 60–77. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-1-60-77>
- Давлетшин Ф. Ф., Акчури Р. З., Шарафутдинов Р. Ф., Исламов Д. Ф. 2023б. Неизотермическое течение жидкости в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. № 4. С. 81–92. <https://doi.org/10.31857/S1024708423600045>
- Ипатов А. И., Кременецкий М. И. 2022. Проблемы промыслово-геофизического контроля в условиях «новой экономической политики» // Актуальные проблемы нефти и газа. № 2 (37). С. 87–99. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art6>

- Канафин И. В., Космылин Д. В. 2017. Изучение формирования теплового поля на модели скважины с локальным нагревом // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. № 2 (76). С. 44–48.
- Ковалева Л. А., Зиннатуллин Р. Р., Султангужин Р. Ф., Сектаров Э. С., Шашков А. В. 2019. Экспериментальное исследование воздействия электромагнитных полей на нефтяные сланцы // Вестник Башкирского университета. Том 24. № 1. С. 43–48.
- Космылин Д. В., Давлетшин Ф. Ф., Исламов Д. В., Федотов В. Я., Гаязов М. С. 2023. Экспериментальное исследование теплового поля в скважине в процессе индукционного воздействия // Нефтегазовое дело. Том 21. № 2. С. 56–64. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-2-56-64>
- Литвиненко В. И. 2008. Проблемы заводнения нефтяных месторождений шельфа арктических морей // Записки Горного института. Том 176. С. 57–60.
- Рамазанов А. Ш., Давлетшин Ф. Ф., Акчурин Р. З., Шарафутдинов Р. Ф., Исламов Д. Ф. 2023. Динамика температуры в стволе скважины при локальном индукционном нагреве обсадной колонны // Прикладная механика и техническая физика. Том 64. № 2. С. 39–47. <https://doi.org/10.15372/PMTF202215127>
- Сухов С. А. 2012. Моделирование двумерной конвекции Рэлея — Хэдди // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. № 3 (169). С. 32–37.
- Шарафутдинов Р. Ф., Валиуллин Р. А., Рамазанов А. Ш., Космылин Д. В. 2023. Способ определения работающих интервалов в действующих скважинах: пат. 2795225 РФ / патентообладатель Уфимский университет науки и технологий. № 2022120551; заявл. 25.07.2022; опубл. 02.05.2023, Бюл. № 13.
- Abeling J, Bartels U, Singh K, Dutta Sh., Agrawal G., Kumar A. 2021. Well integrity leak diagnostic using fiber-optic distributed temperature sensing and production logging // SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference (28 November — 1 December 2021, event canceled). Paper SPE-204557-MS. <https://doi.org/10.2118/204557-MS>
- Sharafutdinov R., Valiullin R., Ramazanov A., Fedotov V., Sadretdinov A., Zakirov M. 2012. Application of active temperature logging at oilfields of Russia // SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition (16–18 October 2012, Moscow, Russia). Paper SPE-161982-MS. <https://doi.org/10.2118/161982-MS>
- Sharafutdinov R., Akchurin R., Davletshin F., Ramazanov A. 2022. Numerical simulation of induction heating of well casing // Aspects in Mining and Mineral Science. Vol. 9. No. 3. Pp. 1047–1050. <https://doi.org/10.31031/AMMS.2022.09.000714>
- Valiullin R., Sharafutdinov R., Ramazanov A., Shilov A. 2012. Enhancement of well productivity using a technique of high-frequency induction treatment // SPE Heavy Oil Conference (12–14 June 2012, Calgary, Alberta, Canada). Paper SPE-157724-MS. <https://doi.org/10.2118/157724-MS>

References

- Akchurin, R. Z., Davletshin, F. F., Islamov, D. F., Valiullin, R. A., & Sharafutdinov, R. F. (2023a). Temperature field in a well with casing induction heating: Considering the natural convection influence. *Thermophysics and Aeromechanics*, 30(3), 517–529. [In Russian]
- Akchurin, R. A., Davletshin, F. F., Ramazanov, A. Sh., & Sharafutdinov, R. F. (2023b). Thermal field in the well during induction heating of the casing under conditions of low flow velocity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 334(2), 87–98. [In Russian]

- Valiullin, R. A., Sharafutdinov, R. F., Sorokan, V. Yu., & Shilov, A. A. (2002a). The use of artificial thermal fields in borehole thermometry. *Karotazhnik*, (100), 124–137. [In Russian]
- Valiullin, R. A., Sharafutdinov, R. F., Ramazanov, A. Sh., Dryagin, V. V., Adiev, Ya. R., & Shilov, A. A. (2002b). *Method of active temperature logging of operating wells (versions)* (R.F. Patent No. 2194160). Bashkir State University, GeoTEC. [In Russian]
- Valiullin, R. A., & Iarullin, R. K. (2014). Peculiarities of geophysical research in running horizontal wells. *The Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*, 19(1), 21–28. [In Russian]
- Valiullin, R. A., Sharafutdinov, R. F., Saretudinov, A. A., Zakirov, M. F., Khabirov, T. R., & Sharipov, A. M. (2015). Ecological questions of control for operation of underground gas storages wells. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 17(5), 256–262. [In Russian]
- Davletshin, F. F., Islamov, D. F., Khabirov, T. R., Gayazov, M. S., & Nizaeva, I. G. (2023a). The study of heat exchange processes during induction heating of the casing string in relation to the determination of behind-the-casing flows. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 9(1), 60–77. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-1-60-77> [In Russian]
- Davletshin, F. F., Akchurin, R. Z., Sharafutdinov, R. F., & Islamov, D. F. (2023b). Nonisothermal fluid flow in a well during induction heating of the casing string. *Fluid Dynamics*, 58(4), 586–597. <https://doi.org/10.1134/S0015462823600505>
- Ipatov, A. I., & Kremenetsky, M. I. (2022). Problems of field development control in the context of the “new economic policy”. *Actual Problems of Oil and Gas*, (2), 87–99. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art6> [In Russian]
- Kanafin, I. V., & Kosmilin, D. V. (2017). Thermal field generation in wellbore analogue with local heating. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, (2), 44–48. [In Russian]
- Kovaleva, L. A., Zinnatullin, R. R., Sultanguzhin, R. F., Sektorov, E. S., & Shashkov, A. V. (2019). Experimental study of the influence of high frequency and microwave electromagnetic fields on oil shales. *Bulletin of the Bashkir State University*, 24(1), 43–48. [In Russian]
- Kosmylin, D. V., Davletshin, F. F., Islamov, D. F., Fedotov, V. Ya., & Gayazov, M. S. (2023). Experimental study of the thermal field in the wellbore during induction. *Petroleum Engineering*, 21(2), 56–64. [In Russian]
- Litvinenko, V. I. (2008). Problems of waterflooding of oil fields of the shelf of the Arctic seas. *Journal of Mining Institute*, 176, 57–60. [In Russian]
- Ramazanov, A. Sh., Davletshin, F. F., Akchurin, R. Z., Sharafutdinov, R. F., & Islamov, D. F. (2023). Dynamics of temperature in the wellbore at local induction heating in a casing. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 64(2), 39–47. <https://doi.org/10.15372/PMTF202215127> [In Russian]
- Sukhov, S. A. (2012). Modeling of the two-dimensional Rayleigh–Hadley convection. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences*, (3), 32–37. [In Russian]
- Sharafutdinov, R. F., Valiullin, R. A., Ramazanov, A. Sh., & Kosmylin, D. V. (2023). *Method for determining operating intervals in operating wells* (R.F. Patent No. 2795225). Ufa University of Science and Technology. [In Russian]

- Abeling, J., Bartels, U., Singh, K., Dutta, Sh., Agrawal, G., & Kumar, A. (2021, November 28–December 1). *Well integrity leak diagnostic using fiber-optic distributed temperature sensing and production logging* [Conference paper SPE-204557-MS]. SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, event canceled. <https://doi.org/10.2118/204557-MS>
- Sharafutdinov, R., Valiullin, R., Ramazanov, A., Fedotov, V., Sadretdinov, A., & Zakirov, M. (2012, October 16–18). *Application of active temperature logging at oilfields of Russia* [Conference paper SPE-161982-MS]. SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia. <https://doi.org/10.2118/161982-MS>
- Sharafutdinov, R., Akchurin, R., Davletshin, F., & Ramazanov, A. (2022). Numerical simulation of induction heating of well casing. *Aspects in Mining and Mineral Science*, 9(3), 1047–1050. <https://doi.org/10.31031/AMMS.2022.09.000714>
- Valiullin, R., Sharafutdinov, R., Ramazanov, A., & Shilov, A. (2012, June 12–14). *Enhancement of well productivity using a technique of high-frequency induction treatment* [Conference paper SPE-157724-MS]. SPE Heavy Oil Conference, Calgary, Alberta, Canada. <https://doi.org/10.2118/157724-MS>

Информация об авторах

Руслан Зуфарович Акчурун, старший преподаватель кафедры геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
ac4urin.ruslan@yandex.ru

Филиус Фанизович Давлетишин, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
felix8047@mail.ru

Денис Фавилович Исламов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
islamovden@rambler.ru

Рим Абдуллович Валиуллин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
valra@geotec.ru

Айрат Шайхуллинович Рамазанов, доктор технических наук, профессор кафедры геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
ramaz-1953@mail.ru

Information about the authors

Ruslan Z. Akchurin, Senior Lecturer, Department of Geophysics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
ac4urin.ruslan@yandex.ru

Filyus F. Davletshin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Lecturer, Department of Geophysics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
felix8047@mail.ru

Denis F. Islamov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associated Professor, Department of Geophysics,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
islamovden@rambler.ru

Rim A. Valiullin, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Geophysics, Ufa Uni-
versity of Science and Technology, Ufa, Russia
valra@geotec.ru

Ayrat Sh. Ramazanov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of Geophysics, Ufa University of
Science and Technology, Ufa, Russia
ramaz-1953@mail.ru