

Изучение теплообменных процессов при индукционном нагреве обсадной колонны применительно к определению заколонных перетоков

Филиус Фанизович Давлетшин, Денис Фавилович Исламов[✉],
Тимур Раильевич Хабиров, Марат Сальманович Гаязов,
Ирина Григорьевна Низаева

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

Аннотация. Одним из перспективных методов геофизического исследования действующих скважин является активная термометрия. Технология проведения исследований данным методом включает индукционный нагрев участка металлической обсадной колонны, регистрацию и анализ изменения температуры в интервале индукционного воздействия. В результате теплообмена с нагретым участком колонны в потоке жидкости, движущейся внутри колонны или в канале заколонного перетока, создается тепловое возмущение. Анализ нестационарной температуры в процессе индукционного воздействия позволяет решать актуальные практические задачи, например определять наличие перетоков жидкости в пространстве за обсадной колонной.

В данной работе на основе численного моделирования изучаются особенности формирования температурного поля в процессе индукционного нагрева обсадной колонны применительно к определению заколонных перетоков жидкости. Численное моделирование выполнено в программном пакете Ansys Fluent. Движение жидкости в скважине описывается уравнением Навье — Стокса в приближении Буссинеска — Обербека, а ее температура рассчитывается с учетом вынужденной и свободной конвекции. Для расчета температуры в индукторе, обсадной колонне, горных породах и цементном кольце используется нестационарное уравнение теплопроводности. Рассмотрено применение индукционного нагрева при диагностике заколонных перетоков в зумпфе, локализованных ниже работающих перфорированных пластов, в кольцевом пространстве между обсадной колонной и цементным кольцом.

Построены кривые распределения средней по сечению температуры в теле обсадной колонны в интервале индукционного нагрева при различном расходе в канале заколонного перетока. Показано, что с увеличением объемного расхода в канале перетока максимальный разогрев колонны снижается за счет более интенсивной теплоотдачи потоку в канале перетока. Установлено, что на температурных кривых отмечается «затяжка» температуры (температурные возмущения в теле обсадной колонны распространяются по направлению потока в канале перетока), величина которой возрастает с ростом расхода в канале перетока. Показано, что «затяжка» температуры (величина расстояния, на которое распространяется тепловое возмущение) при перетоке вверх превышает «затяжку» при перетоке вниз, что связано с влиянием естественной тепловой конвекции в жидкости внутри обсадной колонны. На примере принятых в работе условий моделирования установлено, что перетоки вверх и вниз величиной более $0,5 \text{ м}^3/\text{сут}$ могут достоверно определяться по температурным замерам в процессе индукционного воздействия.

Ключевые слова: активная термометрия, индукционный нагрев, температура, Ansys Fluent, CFD-моделирование, заколонный переток, расход в канале перетока

Благодарности: 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.). Лицензия Ansys Academic Research CFD используется в рамках договора с Башкирским государственным университетом от 15 июня 2020 г.

Цитирование: Давлетшин Ф. Ф., Исламов Д. Ф., Хабиров Т. Р., Гаязов М. С., Низаева И. Г. 2023. 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>

Поступила 22.02.2023; одобрена 24.03.2023; принята 31.03.2023

The study of heat exchange processes during induction heating of the casing string in relation to the determination of behind-the-casing flows

Filyus F. Davletshin, Denis F. Islamov✉, Timur R. Khabirov, Marat S. Gayazov, Irina G. Nizaeva

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

Abstract. One of the promising methods of geophysical survey of existing wells is active thermometry. The technology for conducting research using this method includes induction heating of a section of a metal casing string, registration and analysis of temperature changes in the range of induction exposure. As a result of heat exchange with the heated section of the column, a thermal disturbance is created in the fluid flow moving inside the column or in the behind-the-casing flow channel. The analysis of non-stationary temperature in the process of induction action allows solving actual practical problems, for example, determining the presence of fluid overflows in the space behind the casing string.

In this work, on the basis of numerical simulation, the features of the formation of a temperature field in the process of inductive heating of the casing string are studied in relation to the determination of behind-the-casing fluid flows. Numerical simulation was performed using the Ansys Fluent software package. Fluid movement in the well is described by the Navier–Stokes equation in the Boussinesq–Oberbeck approximation, and its temperature is calculated taking into account forced and free convection. To calculate the temperature in the inductor, casing string, rocks and cement sheath, a non-stationary heat equation is used. The application of induction heating in diagnosing behind-the-casing flows in the sump, localized below the working perforated formations, in the annular space between the casing string and the cement ring is considered.

The distribution curves of the cross-sectional average temperature in the casing string body in the induction heating interval at different flow rates in the casing cross-flow channel are plotted. It is shown that with an increase in the volume flow in the overflow channel, the maximum heating of the column decreases due to more intense heat transfer to the flow in the overflow channel. It has been established that the temperature curves show a “pull” of temperature (temperature disturbances in the body of the casing string propagate in the direction of flow in the overflow channel), the value of

which increases with the flow rate in the overflow channel. It is shown that the temperature “pull” (the distance over which the thermal disturbance propagates) during upward flow exceeds the “pull” during downward flow, which is due to the influence of natural thermal convection in the fluid inside the casing string. On the example of the modeling conditions adopted in the work, it was found that up and down flows of more than $0.5 \text{ m}^3/\text{day}$ can be reliably determined from temperature measurements during the induction effect.

Keywords: active thermometry, induction heating, temperature, Ansys Fluent, CFD modeling, behind-the-casing flows, flow rate in behind the casing channel

Acknowledgements: this research was supported by Ministry of Science and Higher Education (Russian Federation) on the topic: “Creation of an intelligent integrated technology for research and interpretation of data from production and 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 equipment for induction impact” (agreement No. 075-11-2021-061 of June 25, 2021). Ansys Academic Research CFD license is used under an agreement with Bashkir State University dated June 15, 2020.

Citation: Davletshin, F. F., Islamov, D. F., Khabirov, T. R., Gayazov, M. S., & Nizaeva, I. G. (2023). 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>

Received February 22, 2023; Reviewed March 24, 2023; Accepted March 31, 2023

Введение

Эффективность разработки нефтегазовых месторождений в значительной степени зависит от своевременного мониторинга и контроля работы скважин [Ипатов, Кремнецкий, 2022]. Одной из важных задач контроля за разработкой является обоснование причин обводнения добываемой продукции, приводящего к росту объемов попутно добываемой воды. Отделение нефти от воды, подготовка и утилизация воды — эти трудоемкие технологические операции требуют существенных материальных затрат. Таким образом, с увеличением объемов добываемой воды снижается рентабельность добычи нефти, в связи с чем своевременное выявление источников обводнения и их предупреждение является важной задачей эффективной эксплуатации скважин [Леонтьев, Клещенко, 2015].

Существует несколько основных причин обводнения в нефтяных скважинах:

- поступление воды из законтурной области (пластовой, или нагнетаемой) по высокопроницаемым каналам в продуктивных пластах;

- нарушение герметичности цементного кольца скважин, приводящее к возникновению притока жидкости из неперфорированных обводненных пластов (заколонного перетока в цементном кольце, т. е. в кольцевом пространстве между обсадной колонной и горными породами) (рис. 1);
- образование конуса подошвенной воды в залежах высокой мощности.

При этом нарушение герметичности цементного кольца, причиной которого является некачественное цементирование, отслоение цемента вследствие плохой адгезии с обсадной колонной или горными породами, является оперативно устранимой проблемой: посредством закачки специальных изолирующих составов в пространство за обсадной колонной перетоки надежно ликвидируются [Коровин и др., 2010]. Ввиду этого вопросы своевременной и эффективной диагностики интервалов заколонного движения приобретают актуальность с прикладной точки зрения.

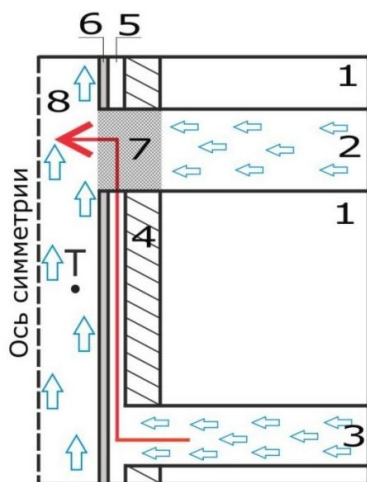


Рис. 1. Схема движения пластовых флюидов при заколонном перетоке снизу вверх: 1 — горные породы, 2 — перфорированный пласт, 3 — неперфорированный пласт, 4 — цементное кольцо, 5 — канал перетока (красная линия), 6 — металлическая обсадная колонна, 7 — интервал перфорации, 8 — поток жидкости в обсадной колонне

Fig. 1. Scheme of formation fluids flow during behind-the-casing flow from bottom to top: 1 — rocks, 2 — perforated reservoir, 3 — non-perforated reservoir, 4 — cement sheath, 5 — flow channel (red line), 6 — metal casing, 7 — perforation interval, 8 — casing fluid flow

Для определения заколонных перетоков применяются термические, акустические и радиоактивные методы, при этом наибольшее распространение на промысле получили методы термометрии и акустической шумометрии. Однако известные методы имеют ограничения: они не позволяют количественно определить расходные параметры заколонного потока, что связано со сложным характером акустического и термического полей, небольшой величиной регистрируемых аномалий температуры и акустического шума. Информативность этих методов снижается также при условии наличия потока в скважине, экранирующего влияние заколонного движения жидкости. В связи с вышесказанным

актуальным является совершенствование существующих методов диагностики заколонных перетоков в скважинах. В данной работе рассматривается перспективный метод активной термометрии, основанный на применении искусственных источников тепла в скважине. В качестве источника теплового поля используется скважинный индукционный нагреватель, который осуществляет локальный нагрев участка обсадной колонны.

Возможности использования искусственного теплового поля для решения различных практических задач и результаты промысловых испытаний рассмотрены в работах [Валиуллин и др., 2002а, 2002б]. Показана эффективность термометрических исследований скважин с использованием индукционного нагрева для определения расхода жидкости в низкодебитных скважинах. Однако в рассмотренных работах даны только общие рекомендации по методике проведения исследований. На сегодняшний день требуют развития теоретические основы применения индукционного воздействия при оценке расхода скважинной жидкости и диагностике заколонных перетоков. В работах [Sharafutdinov и др., 2012; Valiullin и др., 2012] представлена математическая модель для расчета нестационарного температурного поля в скважине при индукционном нагреве. Модель базируется на уравнении теплопроводности с тепловым источником, соответствующим удельной мощности тепловыделения в теле обсадной колонны. Теоретически обоснованы величины температурных возмущений в скважине, развиваемых в процессе индукционного нагрева. Показано, в частности, что возмущения тепла в теле обсадной колонны могут достигать нескольких десятков градусов. Однако в рассмотренных работах не учитывается наличие потока жидкости за обсадной колонной (заколонного перетока), оказывающего существенное влияние на формирование теплового поля. В данной работе исследуются особенности формирования нестационарного температурного поля при индукционном нагреве обсадной колонны с учетом наличия заколонного перетока жидкости. Рассматривается применение индукционного нагрева при диагностике заколонных перетоков в зумпфе скважины (перетоков в кольцевом пространстве между обсадной колонной и цементным кольцом, локализованных ниже работающих перфорированных пластов). Определение перетоков в зумпфе является одной из наиболее актуальных задач геофизического контроля за разработкой скважин.

Математическое моделирование индукционного нагрева

Решается задача расчета поля температуры в скважине при индукционном нагреве металлической обсадной колонны. Моделирование выполняется в модуле CFD программного пакета Ansys Fluent. Геометрия модели в осесимметричной 2D-постановке показана на рис. 2а. На рис. 2б представлены граничные условия, используемые в модели.

Расчетная область состоит из пяти отличающихся зон с различными составляющими: индуктором, жидкостью в обсадной колонне (ее скорость равна нулю, поскольку мы рассматриваем перетоки в зумпфе скважины), металлической обсадной колонной, каналом заколонного перетока, в котором движется жидкость, цементным кольцом и горными породами.

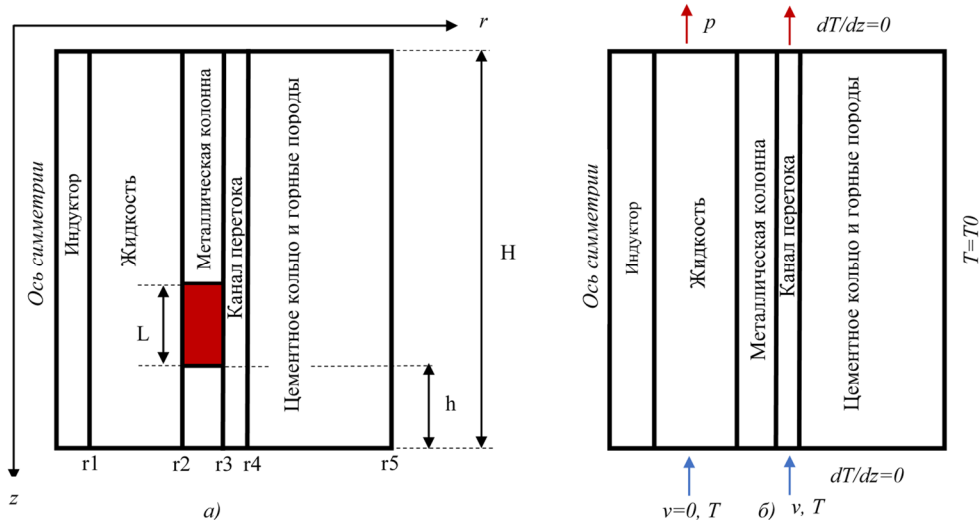


Рис. 2. Геометрия задачи (а) (цветом выделен интервал нагрева). Граничные условия (б)

Fig. 2. Geometry of the problem (a) (the heating interval is highlighted in color). Boundary conditions (б)

При моделировании приняты следующие допущения:

- вертикальный однофазный поток в канале перетока, обсадная колонна и скважинный прибор с индуктором расположены concentрично;
- несжимаемая жидкость, учет изменения плотности жидкости вследствие изменения температуры согласно приближению Буссинеска — Обербека;
- скважинный прибор с индуктором представлен в виде однородного сплошного цилиндра из углепластика (корпус индуктора выполнен из данного материала), расположенного вдоль оси скважины по всей длине участка моделирования длиной H ;
- при включении индуктора происходит нагрев участка металлической обсадной колонны длиной L , тепловыделение равномерно происходит вдоль нагреваемого участка.

Ниже интервала нагрева моделируется участок скважины длиной h . На рис. 2 показаны также радиусы элементов модели: внешний радиус индуктора r_1 , внутренний и внешний радиусы обсадной колонны r_2 и r_3 соответственно, внешний радиус области моделирования r_4 (в расчетах принято: $r_1 = 21$ мм, $r_2 = 63,5$ мм, $r_3 = 73,5$ мм, $r_4 = 74,4$ мм, $r_5 = 1$ м, $h = 2,8$ м, $H = 6$ м, $L = 0,4$ м). Интервал индукционного нагрева располагается в диапазоне глубин 2,8–3,2 м.

Движение жидкости по скважине описывается уравнением Навье — Стокса в приближении Буссинеска — Обербека, что позволяет учитывать влияние естественной тепловой конвекции в жидкости [Henkes и др., 1991]:

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

где \vec{v} — скорость течения, м/с; ρ — плотность жидкости, кг/м³; p — давление, Па; μ — динамическая вязкость, Па · с; ρ_0 — плотность жидкости при равновесной температуре T_0 , кг/м³; \vec{g} — ускорение свободного падения, м/с²; ∇ — оператор Гамильтона; Δ — оператор Лапласа; $\theta = T - T_0$ — отклонение температуры от начальной, К; β — коэффициент термического расширения, К⁻¹. Уравнение движения дополняется уравнением неразрывности.

Передача теплоты в жидкости осуществляется за счет конвективного теплопереноса (естественного и вынужденного) и теплопроводности [Bergman и др., 2019]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{v} \nabla (\theta) = a \Delta \theta, \quad (2)$$

где a — температуропроводность, м²/с.

Распределение температуры в индукторе, обсадной колонне, горных породах и цементном кольце определяется нестационарным уравнением теплопроводности [Sharafutdinov и др., 2022]:

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \Delta \theta + w(z), \quad (3)$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); c — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); ρ — плотность, кг/м³; $w(z)$ — удельная мощность тепловыделения (тепловой источник присутствует в уравнении для обсадной колонны), Вт/м³.

Рассмотрим граничные условия, представленные на рис. 2б. Начальная температура T_0 совпадает с температурой на внешней границе модели и является постоянной величиной. Для жидкости на входе (нижняя граница) задается постоянная скорость потока v и температура T_0 в канале заколонного перетока, на выходе (верхняя граница) задается граничное условие по давлению p и условие равенства нулю производной температуры по вертикальной координате z . На оси симметрии (левая граница, рис. 2б) задается условие равенства нулю производной температуры по радиальной координате r . На правой границе задается условие постоянства температуры горных пород $T = T_0$. На верхней и нижней границах в области индуктора, обсадной колонны и горных пород задается условие равенства нулю производной температуры по вертикальной координате z . Теплообмен на границах «жидкость — индуктор», «жидкость — обсадная колонна», «обсадная колонна — горные породы» обусловлен теплопроводностью. На этих границах записывается условие равенства температур и тепловых потоков. На границах «жидкость — индуктор» и «жидкость — обсадная колонна» задается условие прилипания.

Теплофизические свойства каждой зоны представлены в таблице 1.

Вязкость жидкости принята равной 0,5 мПа · с, коэффициент теплового расширения — 0,000 53 К⁻¹. Свойства жидкости были взяты для температуры 60 °С (333,15 К), принятой как начальная температура в модели и граничная температура жидкости

на входе. Мощность тепловыделения в обсадной колонне составляет 1 кВт. Рассматривается 40-минутный цикл исследований, включающий 20-минутную фазу нагрева и 20-минутную остановку индуктора (временной интервал между циклами нагрева).

Таблица 1. Теплофизические свойства зон
Table 1. Thermophysical properties of zones

| Зоны | λ , Вт/(м·К) | c , Дж/(кг·К) | ρ , кг/м ³ |
|--|-------------------------|--------------------|-------------------------------|
| Углепластик (корпус индуктора) | 0,48 | 920 | 1 500 |
| Жидкость (вода) в обсадной колонне и канале перетока | 0,65 | 4 185 | 983 |
| Металл (обсадная колонна) | 50 | 500 | 8 000 |
| Цементное кольцо + горная порода | 2 | 1 000 | 2 500 |

Анализ результатов расчетов

Исследуется тепловое поле, формируемое при индукционном нагреве колонны в зумпфе скважины, при заколонном перетоке сверху вниз (режим нагнетания жидкости в пласт) и перетоке снизу вверх (режим добычи пластового флюида) (рис. 3).

Параметром, информативным с точки зрения определения заколонного перетока, является температура колонны. Она регистрируется прижимными (прижатыми к колонне) датчиками в составе температурного модуля (позиция 2 на рис. 3), расположенного ниже/выше модуля индуктора (позиция 1 на рис. 3). Датчики экранированы от потока в обсадной колонне. В свою очередь, модуль индуктора располагается ниже интервала перфорации, осуществляя нагрев обсадной колонны, передающей тепло потоку жидкости в заколонном пространстве.

На рис. 4 показана динамика распределения средней по сечению температуры колонны в зумпфе в интервале индукционного нагрева при различных расходах заколонного перетока. Величины температурных возмущений на приведенных далее рис. 4-7 характеризуют изменение температуры $\Delta T = \theta$ относительно начального значения. Наличие заколонного перетока приводит к снижению величины разогрева колонны за счет отдачи тепла движущемуся потоку в заколонном пространстве. С увеличением объемного расхода в канале перетока с 0,1 до 5 м³/сут максимальный разогрев колонны после 20-минутного цикла работы индуктора снижается с 23,9 до 6,7 К. Также с увеличением расхода в канале перетока увеличивается «затяжка» температуры вниз (величина расстояния, на которое передается тепловое возмущение): температурные возмущения в обсадной колонне распространяются по направлению потока в канале перетока. В частности, при расходе в канале перетока 0,1 м³/сут за 40-минутный цикл индукционного воздействия возмущения температуры распространяются вниз (относительно нижней границы интервала нагрева, расположенной на глубине 3,2 м) на расстояние порядка 0,4 м, при расходе 0,5 м³/сут — на расстояние более 1 м, при расходе 1 м³/сут — на расстояние более 2 м, при расходе 5 м³/сут — на расстояние более 3 м.

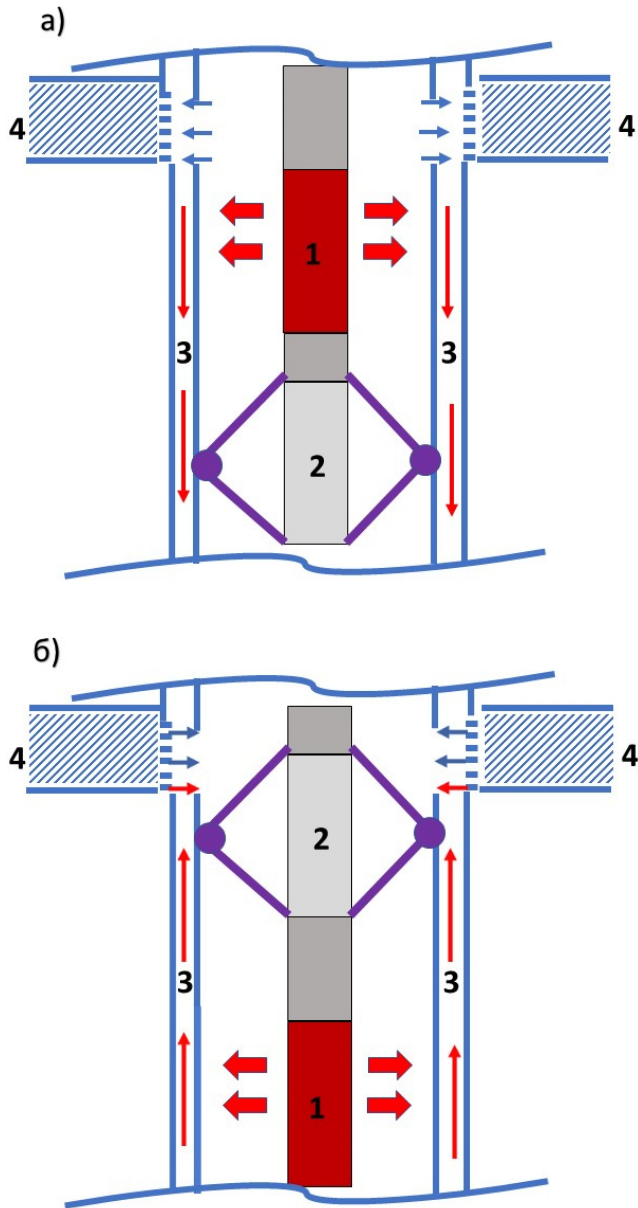


Рис. 3. Схема проведения исследований индукционным нагревателем при диагностике перетока сверху вниз (а) и снизу вверх (б): 1 — модуль индуктора, 2 — температурный измерительный модуль, 3 — канал перетока, 4 — продуктивный пласт

Fig. 3. Scheme of conducting research with an induction heater in the diagnosis of behind-the-casing flow from top to bottom (a) and from bottom to top (б): 1 — inductor module, 2 — temperature measuring module, 3 — flow channel, 4 — reservoir

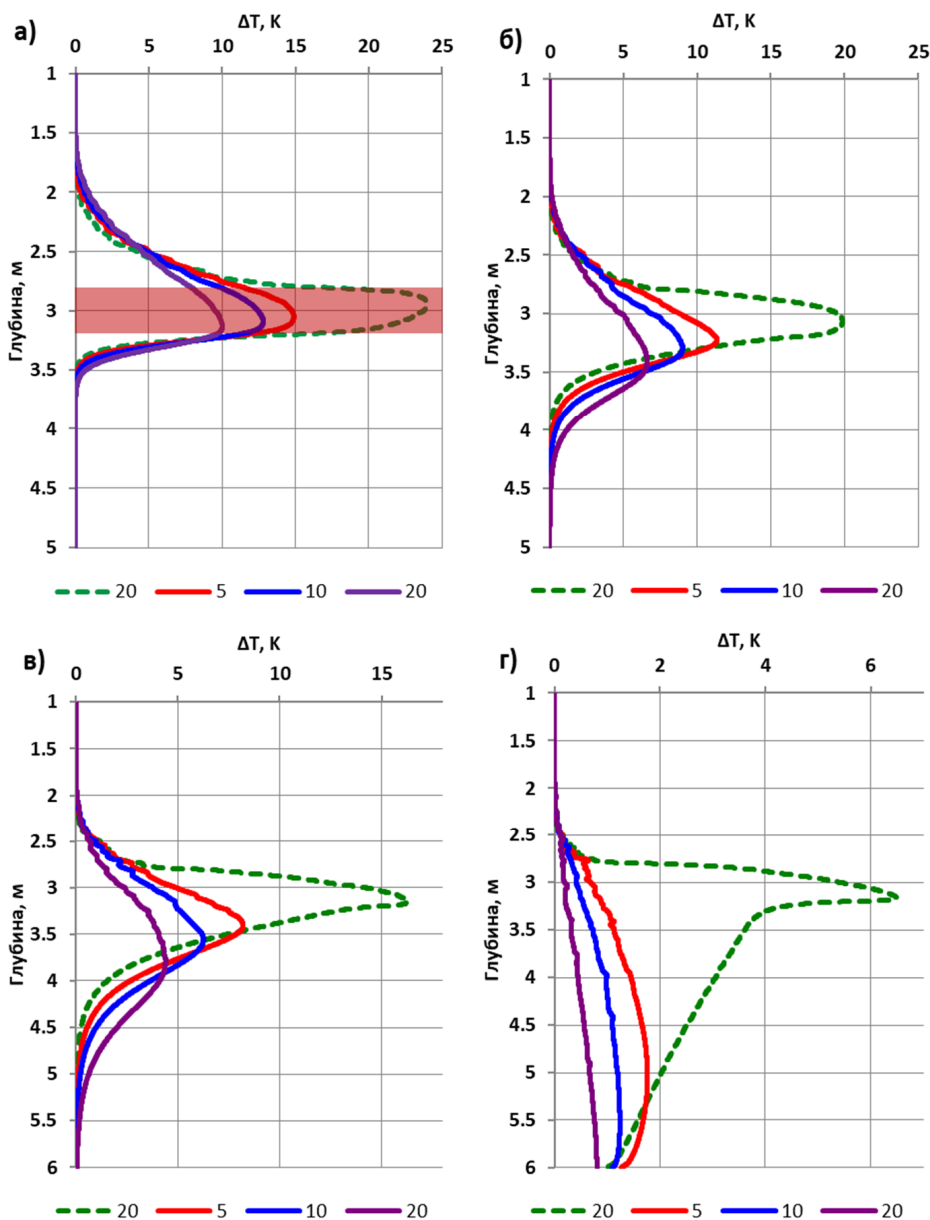


Рис. 4. Распределение температуры в обсадной колонне через 20 мин нагрева (штриховая линия) и после остановки индуктора (сплошная линия) при перетоке вниз с различным расходом: а — 0,1 м³/сут; б — 0,5 м³/сут; в — 1 м³/сут; г — 5 м³/сут. Цветом выделен интервал индукционного нагрева

Fig. 4. Temperature distribution in the casing string after 20 min of heating (dashed line) and after the inductor shutdown (solid line) with downward flow with different flow rates: а — 0.1 m³/day; б — 0.5 m³/day; в — 1 m³/day; г — 5 m³/day. The color indicates the interval of induction heating

Динамика во времени температуры в обсадной колонне на различных расстояниях относительно нижней границы интервала нагрева при различном расходе в канале перетока представлена на рис. 5. При расходе $0,1 \text{ м}^3/\text{сут}$ через 40 минут температурные возмущения на рассмотренных глубинах (0,5, 1, 1,5, 2 м ниже интервала нагрева) не превышают $0,03 \text{ К}$. При расходе $0,5 \text{ м}^3/\text{сут}$ и более температурные возмущения в колонне достигают нескольких градусов и могут уверенно регистрироваться температурными датчиками, расположенными на указанных глубинах.

Важно отметить, что температуропроводность металла обсадной колонны равна около $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. За 40-минутный цикл индукционного воздействия фронт температурного возмущения, обусловленного теплопроводностью, проходит расстояние не более $s = \sqrt{\pi at} = 0,3 \text{ м}$. Это показывает, что источником теплового возмущения в обсадной колонне на расстояниях более $0,5 \text{ м}$ относительно интервала нагрева является поток в канале перетока. Следовательно, увеличение температуры обсадной колонны на расстоянии более $0,5 \text{ м}$ ниже интервала нагрева является качественным признаком заколонного движения жидкости вниз.

Схема расположения скважинного прибора с индуктором при определении заколонного перетока снизу вверх к интервалу перфорации в режиме отбора жидкости из перфорированного пласта показана на рис. 3б. Температура жидкости регистрируется прижатыми к колонне датчиками температуры, расположенными выше индуктора по потоку в канале перетока. На рис. 6 показаны кривые распределения температуры колонны в зумпфе в интервале индукционного нагрева в различные моменты времени после начала нагрева и при различном расходе в канале заколонного перетока.

С увеличением расхода заколонного перетока с $0,1$ до $5 \text{ м}^3/\text{сут}$ максимальный разогрев колонны после 20-минутного нагрева снижается с $24,2$ до $6,6 \text{ К}$. Сравнивая с результатами расчетов при перетоке вниз, видим, что величины максимального разогрева колонны при перетоках вниз и вверх близки. Однако «затяжка» температуры для перетока вверх больше, чем для перетока вниз. Например, при расходе в канале перетока $0,5 \text{ м}^3/\text{сут}$ возмущения температуры распространяются для перетока вниз на расстояние около $1,3 \text{ м}$, для перетока вверх — на расстояние около $2,8 \text{ м}$. Вышесказанное связано с влиянием естественной тепловой конвекции в жидкости внутри обсадной колонны: слои жидкости вблизи разогретой стенки колонны нагреваются и поднимаются вверх за счет более низкой плотности, передавая тепло внутренней стенке колонны выше интервала нагрева.

Динамика температуры обсадной колонны в процессе индукционного нагрева на различных расстояниях относительно верхней границы интервала нагрева (расположенной на глубине $2,8 \text{ м}$) при различных расходах в заколонной циркуляции (ЗКЦ) представлена на рис. 7.

При расходе в канале перетока $0,1 \text{ м}^3/\text{сут}$ (рис. 7а) в течение 40-минутного цикла индукционного воздействия отмечаются существенные температурные возмущения в колонне на расстояниях $0,5$ и 1 м выше интервала нагрева, достигающие более 4 и $0,5 \text{ К}$ соответственно. Поскольку при перетоке вниз подобных температурных

возмущений не наблюдается, можно заключить, что они в значительной степени связаны с влиянием естественной тепловой конвекции жидкости в обсадной колонне. На расстояниях 1,5 и 2 м возмущения температуры практически отсутствуют, поэтому данные интервалы представляют информативность с точки зрения обоснованного определения заколонного перетока вверх без влияния естественной тепловой конвекции. На расстоянии 1,5 м относительно интервала нагрева при расходе в канале перетока 0,5, 1 и 5 м³/сут температурные возмущения в колонне достигают 0,5, 2,5 и 2,6 К соответственно, т. е. заколонные перетоки вверх величиной более 0,5 м³/сут могут достоверно определяться по температурным замерам в процессе индукционного нагрева.

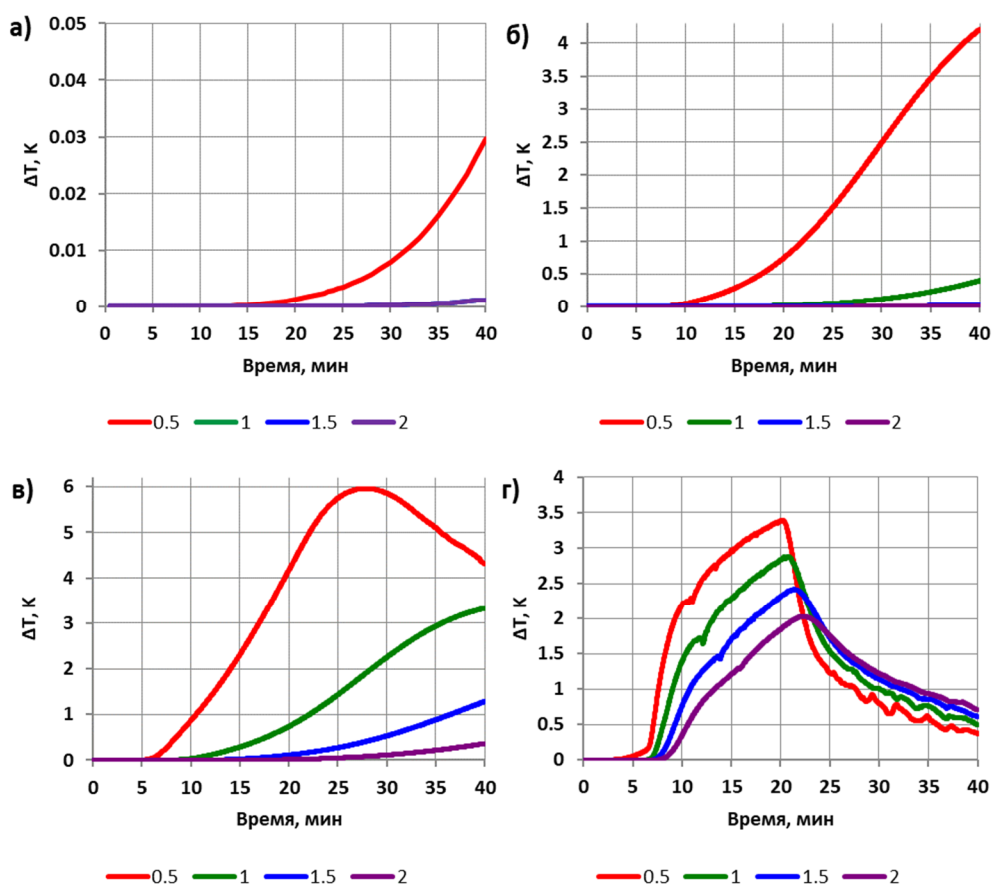


Рис. 5. Динамика температуры в теле обсадной колонны при перетоке вниз с различным расходом: а — 0,1 м³/сут; б — 0,5 м³/сут; в — 1 м³/сут; г — 5 м³/сут. Шифр кривых: расстояние до нижней границы интервала нагрева, м

Fig. 5. Temperature dynamics in the body of the casing during downward flow with different flow rates: а — 0.1 m³/day; б — 0.5 m³/day; в — 1 m³/day; г — 5 m³/day. The code of the curves: distance to the lower limit of the heating interval, m

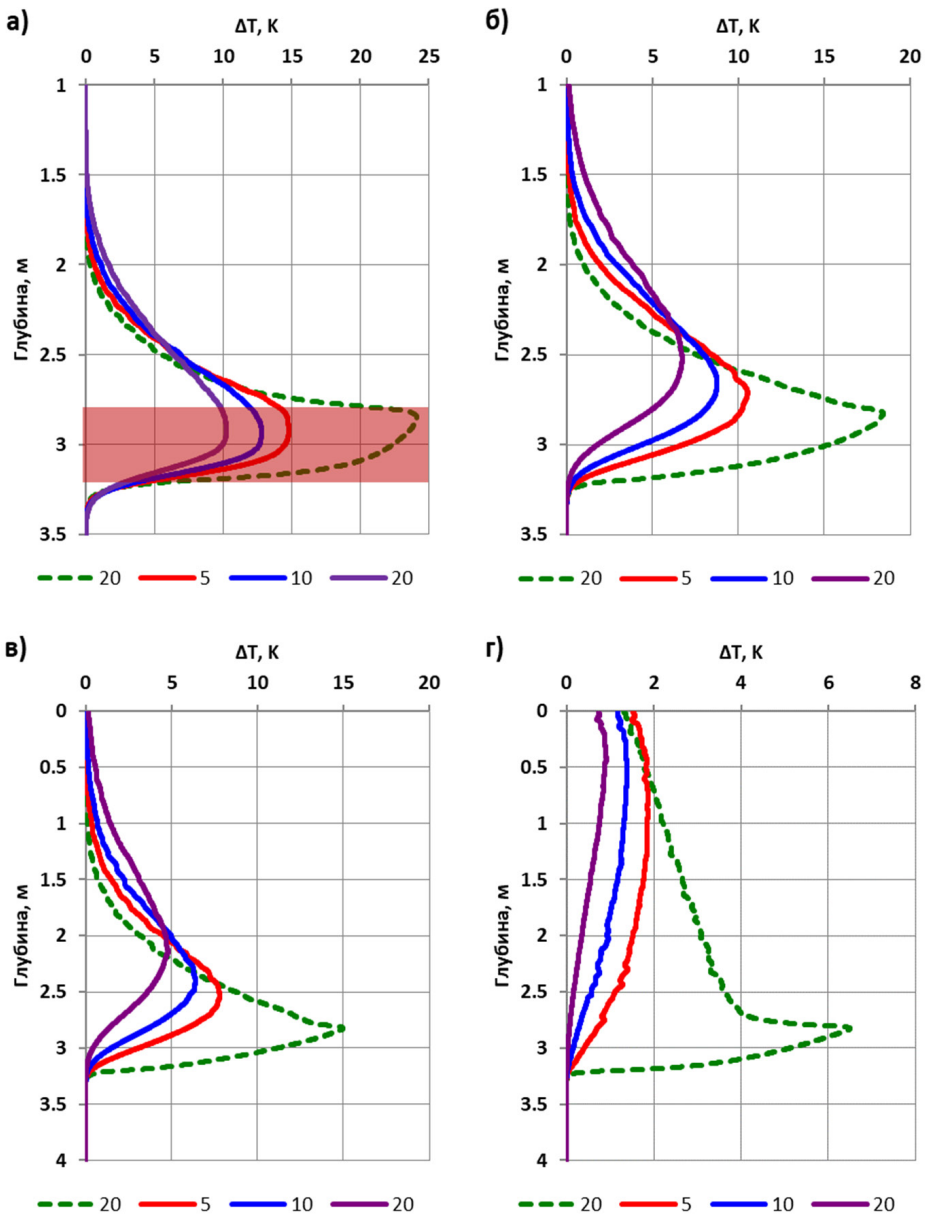


Рис. 6. Распределение температуры в обсадной колонне через 20 мин нагрева (штриховая) и после остановки индуктора (сплошная линия) при перетоке вверх с различным расходом: а — 0,1 м³/сут; б — 0,5 м³/сут; в — 1 м³/сут; г — 5 м³/сут. Цветом выделен интервал индукционного нагрева

Fig. 6. Temperature distribution in the casing string after 20 min of heating (dashed line) and after the inductor shutdown (solid line) with upward flow with different flow rates: а — 0.1 m³/day; б — 0.5 m³/day; в — 1 m³/day; г — 5 m³/day. The color indicates the interval of induction heating

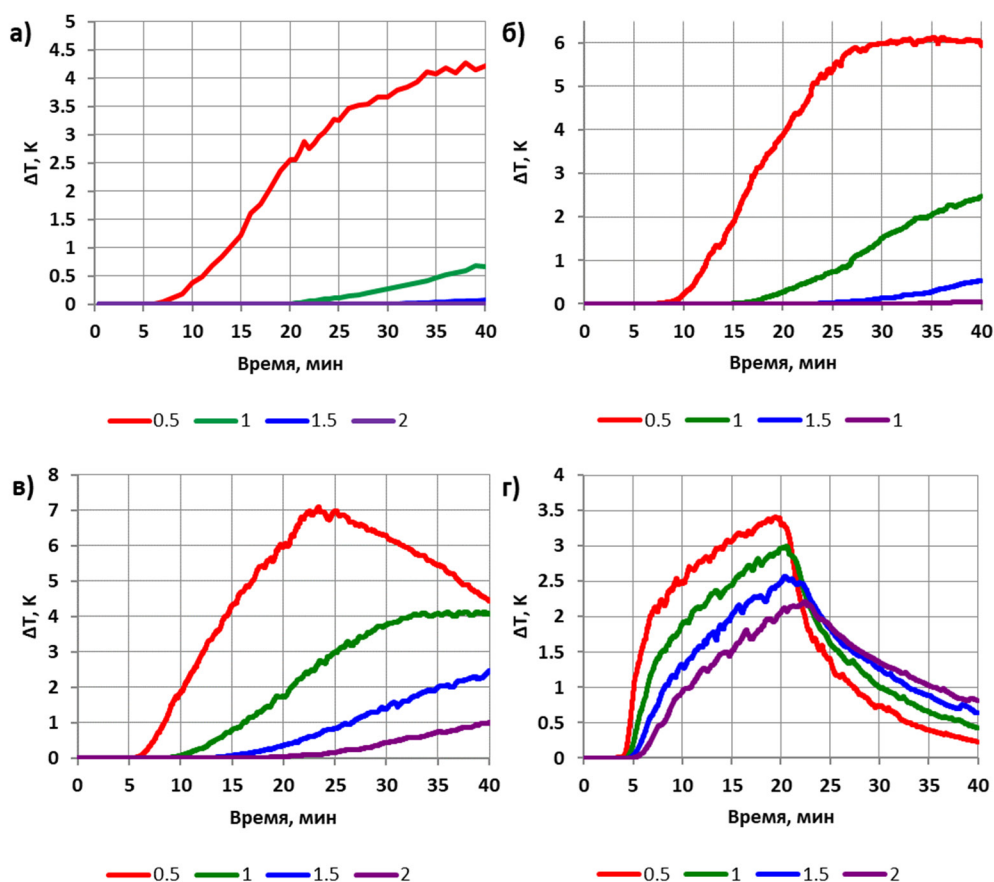


Рис. 7. Динамика температуры в теле обсадной колонны при перетоке вверх с различным расходом: а — 0,1 м³/сут; б — 0,5 м³/сут; в — 1 м³/сут; г — 5 м³/сут. Шифр кривых: расстояние от верхней границы интервала нагрева, м

Fig. 7. Temperature dynamics in the body of the casing during upward flow with different flow rates: а — 0.1 m³/day; б — 0.5 m³/day; в — 1 m³/day; г — 5 m³/day. The code of the curves: distance from the upper limit of the heating interval, m

Заключение

Таким образом, на основе численного моделирования в программном пакете Ansys Fluent исследованы особенности нестационарного теплового поля в скважине, обусловленного локальным индукционным нагревом обсадной колонны, при наличии за- колонных перетоков вниз и вверх в кольцевом пространстве между обсадной колонной и цементным кольцом в зумпфе скважины (ниже работающих продуктивных пластов).

Установлено, что расход жидкости в канале перетока оказывает существенное влияние на конфигурацию кривых распределения температуры, зарегистрированных при- жатыми к обсадной колонне температурными датчиками: с увеличением объемного

расхода в канале перетока, во-первых, снижается величина максимального разогрева колонны, во-вторых, увеличивается «затяжка» температуры (величина расстояния, на которое передается тепловое возмущение) по направлению движения потока в канале перетока. Показано, что «затяжка» температуры при перетоке вверх превышает по расстоянию «затяжку» при перетоке вниз, что связано с влиянием естественной тепловой конвекции в жидкости внутри обсадной колонны. На примере принятых в работе условий моделирования определены величины объемного расхода потока в канале перетока, которые могут достоверно определяться по температурным замерам в процессе индукционного воздействия, и расстояния относительно границ интервала нагрева, на которых должны быть расположены датчики для регистрации температурного сигнала.

Полученные данные дополняют известные результаты по формированию нестационарных тепловых полей при наличии искусственных скважинных источников тепла и могут быть использованы при интерпретации результатов термометрических измерений в добывающих и нагнетательных скважинах.

Список литературы

- Валиуллин Р. А., Шарафутдинов Р. Ф., Сорокань В. Ю. 2002а. Использование искусственных тепловых полей в скважинной термометрии // Каротажник. № 10. 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.
- 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>
- Коровин В. М., Лобанков В. М., Миллер А. В., Миллер А. А., Сулейманов А. А., Барышев В. И., Соломина И. Л., Шаисламова Г. Г. 2010. Геофизические исследования и работы в скважинах: в 7 т. Том 4. Контроль технического состояния скважин. Уфа: Информреклама. 436 с.
- Леонтьев Д. С., Клещенко И. И. 2015. Методические аспекты диагностики причин обводнения нефтяных скважин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 2 (110). С. 61–67. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2015-2-61-67>
- Bergman Th. L., Lavine A. S., Incropera F. P., DeWitt D. P. 2019. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 8th ed. John Wiley & Sons. 992 p.
- Henkes R. A. W. M., Van der Flugt F. F., Hoogendoorn C. J. 1991. Natural-convection flow in a square cavity calculated with low-Reynolds-number turbulence models // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 34. No. 2. Pp. 377–388. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(91\)90258-G](https://doi.org/10.1016/0017-9310(91)90258-G)
- 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

- Valiullin, R. A., Sharafutdinov, R. F., & Sorokan, V. Yu. (2002a). The use of artificial thermal fields in borehole thermometry. *Karotazhnik*, (10), 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]
- 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]
- Korovin, V. M., Lobankov, V. M., Miller, A. V., Miller, A. A., Suleimanov, A. A., Baryshev, V. I., Solomina, I. L., & Shaislamova, G. G. (2010). *Geophysical surveys and work in wells. Volume 4. Control of the technical condition of wells*. Informreklama. [In Russian]
- Leontiev, D. S., & Kleschenko, I. I. (2015). Methodical aspects of diagnostics of oil wells drowning causes. *Oil and Gas Studies*, (2), 61–67. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2015-2-61-67> [In Russian]
- Bergman, Th. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2019). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Henkes, R. A. W. M., Van der Flugt, F. F., & Hoogendoorn, C. J. (1991). Natural-convection flow in a square cavity calculated with low-Reynolds-number turbulence models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(2), 377–388. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(91\)90258-G](https://doi.org/10.1016/0017-9310(91)90258-G)
- 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* (October 16–18, 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*, 9(3), 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* (June 12–14, 2012, Calgary, Alberta, Canada), Paper SPE-157724-MS. <https://doi.org/10.2118/157724-MS>

Информация об авторах

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

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

Тимур Раильевич Хабиров, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
khabirovtr@mail.ru

Марат Сальманович Гаязов, старший преподаватель кафедры геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
gaiver28@mail.ru

Ирина Григорьевна Низаева, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия
nizaevaig@rambler.ru

Information about the authors

Filyus F. Davletshin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assistant, 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

Timur R. Khabirov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associated Professor, Department of Geophysics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
khabirovtr@mail.ru

Marat S. Gayazov, Associated Professor, Department of Geophysics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
gaiver28@mail.ru

Irina G. Nizaeva, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associated Professor, Department of Geophysics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
nizaevaig@rambler.ru