

УДК 532.546

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4385

Шифр специальности ВАК: 1.3.14

Диагностика технического состояния скважин, пересекающих пресноводные горизонты, методом активной термометрии

Р.З. Акчурина, Ф.Ф. Давлетшин, А.Ш. Рамазанов,
Р.А. Валиуллин, Р.Ф. Шарафутдинов, Д.Ф. Исламов✉

Уфимский университет науки и технологий, Россия, г. Уфа

✉islamovden@rambler.ru

Аннотация. Актуальность. В последнее время в повестке нефтегазовых компаний важная роль уделяется ESG (Environment, Social, Governance) принципам – это активно развивающийся глобальный тренд в современной бизнес-среде. Одним из его ключевых аспектов является ответственное отношение к окружающей среде, повышение приоритета решения экологических проблем, возникающих при добыче углеводородов. Значимой экологической проблемой является, в частности, загрязнение пресноводных горизонтов в процессе добычи нефти вследствие их некачественной изоляции при цементировании скважин. При этом в пространстве скважины за обсадной колонной возникает переток скважинной жидкости к пресноводным горизонтам, оказывающий негативное влияние на экологическую обстановку в данном регионе. В этой связи контроль за техническим состоянием скважин, пересекающих пресноводные горизонты, является важной и актуальной задачей. **Объект:** эксплуатационная скважина, пересекающая пресноводный горизонт, в которой проводятся геофизические исследования методом активной термометрии – осуществляется локальный нагрев участка обсадной колонны и исследуется динамика температурного поля в ней. **Цель:** выявление качественных закономерностей и получение количественных оценок влияния потока жидкости в пространстве за обсадной колонной (заколонном пространстве) на температурное поле в обсадной колонне в процессе ее индукционного нагрева. **Методы.** Численное математическое моделирование тепловых и гидродинамических процессов в скважине с использованием программного комплекса Ansys Fluent. **Результаты.** Изучено влияние плоскопараллельного горизонтального потока жидкости пресноводного горизонта, обтекающего скважину, на азимутальное распределение температуры обсадной колонны в процессе индукционного нагрева. Показано, что в случае негерметичности цементного кольца в интервале пресноводного горизонта отмечается неоднородность азимутального распределения температуры колонны, достигающая по величине нескольких градусов Кельвина (К). Выполнено моделирование индукционного нагрева в скважине при наличии заколонного перетока жидкости к вышележащему интервалу пресноводного горизонта. Показано, что признаком, указывающим на переток, является возникновение области температурного возмущения по вертикали над интервалом индукционного нагрева протяженностью более 1 м. В целом результаты выполненных исследований показывают информативность метода активной термометрии применительно к диагностике технического состояния скважин, пересекающих пресноводные горизонты.

Ключевые слова: пресноводные горизонты, экология, заколонный переток, активная термометрия, индукционный нагрев, температура обсадной колонны, моделирование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по теме «Разработка инновационной технологии на основе метода активной термометрии для решения задач экологии пресноводных горизонтов», соглашение № 23-17-20017 от 20 апреля 2023 г.

Для цитирования: Диагностика технического состояния скважин, пересекающих пресноводные горизонты, методом активной термометрии / Р.З. Акчурина, Ф.Ф. Давлетшин, А.Ш. Рамазанов, Р.А. Валиуллин, Р.Ф. Шарафутдинов, Д.Ф. Исламов // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 175–188. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4385

UDC 532.542

DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4385

Diagnostics of the technical condition of wells drilled through freshwater horizons using active thermometry

R.Z. Akchurin, F.F. Davletshin, A.Sh. Ramazanov,
R.A. Valiullin, R.F. Sharafutdinov, D.F. Islamov✉

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

✉islamovden@rambler.ru

Abstract. Relevance. Recently, ESG (Environment, Social, Governance) principles have been given an important role in the agenda of oil and gas companies – this is an actively developing global trend in the modern business environment. One of its key aspects is a responsible attitude to the environment, increasing the priority of solving environmental problems arising from the extraction of hydrocarbons. A significant environmental problem is, in particular, pollution of freshwater horizons during oil production due to their poor-quality insulation when well cementing. At the same time, in the space of the well behind the casing, there is a flow of borehole fluid to freshwater horizons, which has a negative impact on the environmental situation in this region. In this regard, monitoring the technical condition of wells crossing freshwater horizons is an important and urgent task. **Object.** An operational well drilled through freshwater horizon, in which geophysical studies are carried out by the method of active thermometry – local heating of the casing section is carried out and the dynamics of the temperature field in it is studied. **Aim.** To identify qualitative patterns and obtain quantitative estimates of the effect of the fluid flow in the space behind the casing (column space) on the temperature field in the casing. **Methods.** Numerical mathematical modeling of thermal and hydrodynamic processes in a well using the software package Ansys Fluent (ANSYS Academic Research CFD license, agreement with Bashkir State University dated 06/15/2020). **Results.** The authors have studied the effect of a plane-parallel horizontal fluid flow of the freshwater horizon on the azimuthal temperature distribution of the casing string during induction heating. It is shown that in the case of leakiness of the cement ring in the interval of the freshwater horizon, an inhomogeneity of the azimuthal temperature distribution of the column is observed, reaching a value of few more K. The authors carried out the simulation of induction heating in the well with liquid column flow to the interval of the freshwater horizon. It is shown that the sign indicating the overflow is the occurrence of a temperature disturbance area vertically above the induction heating interval with a length of more than 1 m. In general, the results of the performed studies show the informativeness of the active thermometry method in relation to the diagnosis of the technical condition of wells drilled through freshwater horizons.

Keywords: freshwater horizons, ecology, column flow, active thermometry, induction heating, casing temperature, modeling

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation on the topic "Development of innovative technology based on the method of active thermometry for solving problems of ecology of freshwater horizons", Agreement no. 23-17-20017 of April 20, 2023

For citation: Akchurin R.Z., Davletshin F.F., Ramazanov A.Sh., Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F. Diagnostics of the technical condition of wells drilled through freshwater horizons using active thermometry. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 175–188. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4385

Введение

Для нефтяных регионов с большим количеством пробуренных добывающих и нагнетательных скважин контроль за состоянием пресноводных горизонтов является актуальной задачей с точки зрения экологического мониторинга состояния недр [1, 2]. Загрязнение пресноводных горизонтов может происходить как на стадии бурения скважины вследствие проникновения фильтрата промывочной жидкости в водоносные пласты, так и на стадии эксплуатации скважины [3]. Во втором случае загрязнение водоносных горизонтов происходит в результате перето-

ка пластовых и закачиваемых в пласты вод через негерметичное заколонное пространство скважин [4]. Негерметичность заколонного пространства обусловлена некачественным цементированием скважины, выполняемым для укрепления стенок скважины и изоляции нецелевых пластов. В этой связи своевременное выявление негерметичности цементного кольца (кольцевой области между обсадной колонной и горными породами) играет важную роль для оперативного принятия решения по ликвидации перетоков и предупреждения загрязнения пресноводных горизонтов [5].

Одним из основных методов, используемых для определения заколонных перетоков, является метод скважинной термометрии [6–8]. Однако традиционный подход, основанный на анализе естественных тепловых полей, регистрируемых в стволе скважины, не позволяет решить задачу по выявлению заколонных перетоков, если естественные температурные аномалии составляют малую величину: сотые или десятые доли градуса. Для устранения недостатков традиционной термометрии предлагается метод активной термометрии, основанный на создании искусственных температурных полей в результате индукционного теплового воздействия на металлическую обсадную колонну в стволе скважины. Кратковременное индукционное воздействие приводит к локальному разогреву металлической обсадной колонны и одновременно с этим к изменению температуры жидкости в заколонном пространстве скважины, контактирующем с нагреваемым участком металла. В потоке жидкости в заколонном пространстве возникает тепловое возмущение (искусственная температурная аномалия) и происходит перенос тепла по направлению движения потока жидкости от нагреваемого участка, при этом характер теплового поля зависит от интенсивности и направления потока флюида за обсадной колонной. Информативность активной термометрии применительно к оценке интенсивности заколонного движения жидкости основывается на регистрации и анализе динамики температуры обсадной колонны на участке индукционного нагрева [9]. Существующие работы в области применения индукционного воздействия в скважинах посвящены решению таких задач, как применение электромагнитного воздействия для нагрева прискважинной зоны продуктивных пластов с целью снижения вязкости пластового флюида, использование индукционного нагрева для оценки расхода жидкости в стволе скважины, выявление заколонных перетоков с выходом жидкости в ствол скважины, приводящих к обводнению скважинной продукции [10–14]. В данной работе на основе математического моделирования анализируются особенности теплового поля в скважине, пересекающей пресноводный горизонт, в процессе индукционного нагрева участка обсадной колонны. Применительно к диагностике технического состояния скважины рассматривается три сценария:

- I. Горизонтальный плоскопараллельный поток жидкости пресноводного горизонта, обтекающий скважину, при герметичном цементном кольце.*
- II. Горизонтальный плоскопараллельный поток жидкости пресноводного горизонта, обтекающий скважину, при наличии локальной негерметичности цементного кольца в интервале пресноводного горизонта.*

III. Вертикальный поток жидкости в заколонном пространстве к интервалу пресноводного горизонта вследствие некачественного цементирования скважины.

Для моделирования первых двух сценариев используется двумерная x - y модель, для моделирования третьего сценария – двумерная r - z модель, далее приведем описание каждой из моделей.

Модель индукционного нагрева обсадной колонны в скважине при ее поперечном обтекании горизонтальным потоком жидкости (x - y модель)

Рассматривается задача расчета динамики температуры обсадной колонны в процессе ее индукционного нагрева, причем на моделируемом участке скважину пересекает пресноводный горизонт – пористый водонасыщенный пласт – 1 (рис. 1, *a*). В пласте имеется горизонтальный плоскопараллельный поток жидкости, обтекающий скважину. Скважина состоит из следующих концентрично расположенных зон: цементное кольцо – 2, металлическая обсадная колонна – 3, жидкость в обсадной колонне – 4, в центре скважины находится индукционный нагреватель – 5. На рис. 1, *б* показаны анализируемые в работе точки регистрации температуры на внутренней поверхности (стенке) обсадной колонны (при помощи распределенных и прижатых к колонне датчиков). Принятые допущения:

- пресноводный горизонт рассматривается как однородный изотропный пористый пласт, фильтрация однофазной жидкости происходит с постоянной скоростью;
- двумерная x - y модель, толщина пресноводного горизонта достаточно большая, так что теплообменом на верхней и нижней границах пласта можно пренебречь;
- равномерное тепловыделение в теле обсадной колонны на участке нагрева, вертикальной теплопроводностью в колонне, а также изменением температуры в теле колонны в радиальном направлении пренебрегаем вследствие ее малой толщины;
- изменением температуры потока жидкости T_f в обсадной колонне по сравнению с изменением температуры колонны T пренебрегается (течение флюида в зоне 4 изотермическое); корпус индуктора (область 5 на рис. 1) выполнен из непроводящего материала (карбон), изменение его температуры также не учитывается. Таким образом, в рамках принятых допущений тепловые процессы в областях 4 и 5 не моделируются.
- теплообмен между обсадной колонной – 3 и потоком жидкости в стволе скважины – 4 происходит по закону Ньютона [15]

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(r=r_c) = \alpha(T_w - T_{fl}) = \alpha(T_w - T_0), \quad (1)$$

где λ – теплопроводность металла; r_c – внутренний радиус обсадной колонны; α – коэффициент теплопередачи; T_{fl} – среднemasовая температура потока жидкости в стволе скважины (принята как постоянная величина T_0); $T_w = T(r=r_c)$ – температура внутренней поверхности обсадной колонны.

В области 1 решается двумерное уравнение теплопроводности с учетом вынужденной конвекции, обусловленной фильтрационным потоком в пресноводном горизонте [16]

$$\begin{aligned} (mc_r \rho_r + (1-m)c_f \rho_f) \frac{\partial T}{\partial t} + c_f \rho_f v_x \frac{\partial T}{\partial x} + \\ + c_f \rho_f v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь m – пористость пласта; c , ρ – удельная теплоемкость и плотность соответственно; v – скорость фильтрации; индекс r (rock) соответствует скелету породы, слагающей пресноводный горизонт, индекс f (fluid) – пластовому флюиду (воде); $\lambda_x = \lambda_y$ – теплопроводность пласта. Скорость фильтрации рассчитывается по закону Дарси

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \quad (3)$$

где k – проницаемость пласта; μ – динамическая вязкость жидкости.

В областях 2 и 3 решается уравнение теплопроводности [17]

$$c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{xi} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_{yi} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_i; i = m, c, \quad (4)$$

где индекс i соответствует области металла m или цемента c ; q_i – удельная мощность тепловыделения, не равная нулю для обсадной колонны:

$$q_m = \frac{W}{HS}, \quad (5)$$

где W – мощность тепловыделения в обсадной колонне; H – длина участка индукционного нагрева; S – площадь поперечного сечения колонны.

Тепловые процессы в зоне 4 не моделируются, вместо этого на границе зон 3 и 4 задается условие теплообмена (1).

На внешних границах модели задаются скорости и температуры. На входе (правая граница) заданы условия постоянной температуры и скорости фильтрации жидкости:

$$\begin{cases} v(x=L, y) = v_{inlet}; \\ T(x=L, y) = T_{inlet}. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь L – линейный размер области моделирования; v_{inlet} – скорость потока в пористой среде, которая является варьируемой величиной; $T_{inlet} = T_0 = 293,15$ К – начальная температура в модели.

На верхней и нижней границах заданы условия равенства нулю скорости и теплового потока:

$$\begin{cases} v(x, y=0) = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial y}(x, y=0) = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} v(x, y=L) = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial y}(x, y=L) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

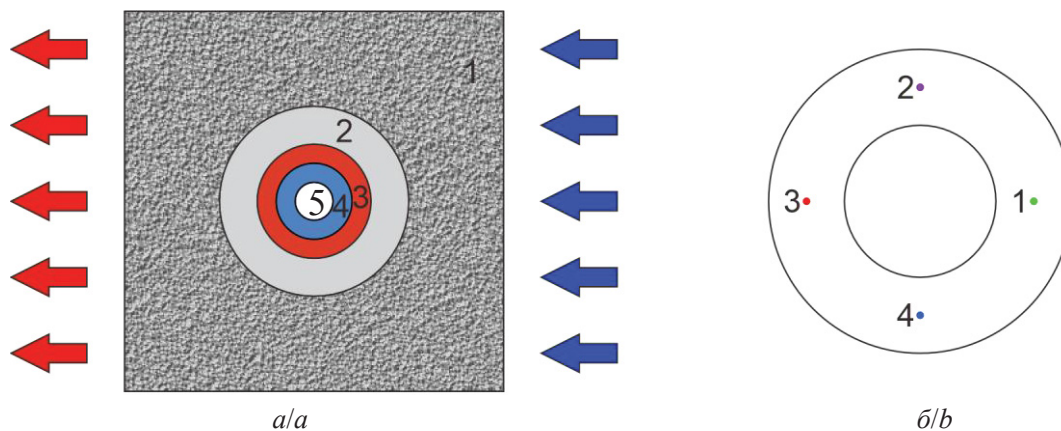


Рис. 1. Геометрия модели (горизонтальное сечение скважины и пласта): а) области: 1 – пресноводный горизонт; 2 – цементное кольцо; 3 – металлическая обсадная колонна; 4 – жидкость в обсадной колонне; 5 – индукционный нагреватель; б) точки 1–4 – регистрации температуры на внутренней поверхности обсадной колонны

Fig. 1. Model geometry (horizontal section of the well and reservoir): а) areas: 1 – freshwater horizon; 2 – cement ring; 3 – metal casing; 4 – liquid in the casing; 5 – induction heater; б) points 1–4 are the temperature registrations on the inner surface of the casing

На выходе модели (левая граница) задаются постоянное давление и условие отсутствия теплового потока (кондуктивного) через границу.

Теплообмен на границах твердых тел (горные породы 1 – цементное кольцо 2, цементное кольцо 2 – обсадная колонна 3) обусловлен теплопроводностью, на границах различных зон i и j выполняются условия равенства температур и тепловых потоков

$$\begin{aligned} T_i &= T_j; \\ \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} &= \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial r}. \end{aligned} \quad (8)$$

Применительно к моделированию фильтрационных процессов в пласте внешняя поверхность герметичного цементного кольца принимается как непроницаемая стенка.

Начальное условие для всех областей модели одинаково:

$$\begin{cases} v(t=0) = 0; \\ T(t=0) = T_{inlet}. \end{cases} \quad (9)$$

Влияние расхода жидкости в обсадной колонне (область 4) на температуру колонны (область 3) определяется коэффициентом теплообмена между стенкой металлической обсадной колонны и потоком жидкости [18]

$$\alpha = \frac{\lambda Nu}{d}, \quad (10)$$

где λ – теплопроводность жидкости; d – гидравлический диаметр потока; Nu – число Нуссельта, которое зависит от типа потока и определяется как

$$Nu = \begin{cases} Nu_1, Re \leq Re_1; \\ Nu_1 + \frac{Nu_2 - Nu_1}{Re_2 - Re_1} (Re - Re_1), Re_1 \leq Re \leq Re_2; \\ 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}, Re \geq Re_2, \end{cases} \quad (11)$$

где Nu , Re , Pr – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля соответственно. Здесь первое выражение соответствует ламинарному типу движения ($Re_1 < 2300$), третье – турбулентному ($Re_2 > 10000$), второе – переходному; Nu_1 , Nu_2 – граничные значения чисел Нуссельта для режимов (4,36 и $0,023 \cdot 10000^{0.8} Pr^{0.4}$ соответственно).

Числа Рейнольдса и Прандтля определяются как [19]

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho v d}{\mu}; \\ Pr &= \frac{\rho \mu}{\lambda}, \end{aligned} \quad (12)$$

где ρ – плотность жидкости; v – скорость потока; μ – динамическая вязкость.

Ввиду простоты принятых допущений о характере теплообмена колонны и потока жидкости внутри нее, соответствующих стабилизированному режиму течения, x -у модель в данной работе используется не для количественной оценки величины тепловых возмущений в обсадной колонне, ее основной задачей является установление качественных закономерностей, отражающих влияние горизонтального потока жидкости, обтекающего колонну, на характер теплового поля в ней при герметичном/негерметичном цементном кольце в процессе индукционного нагрева.

Принятые при моделировании параметры: внешний диаметр индукционного нагревателя 42 мм, внутренний диаметр обсадной колонны 126 мм, внешний диаметр 146 мм, толщина цементного кольца 35 мм, соответственно внешний диаметр скважины 216 мм. В табл. 1 приведены теплофизические свойства материалов модели

Таблица 1. Теплофизические параметры модели

Table 1. Thermophysical parameters of the model

Материал (зона) Material (zone)	λ , Вт/(м·К) W/(m·K)	c , Дж/(кг·К) J/(kg·K)	ρ , кг/м ³ kg/m ³
Жидкость, вода (1, 4) Liquid, water (1, 4)	0,65	4200	1000
Горные породы (1) Rocks (1)	2	1000	2000
Цемент (2)/Cement (2)	2	1000	2000
Металл, сталь (3) Metal, steel (3)	50	500	7800

Вязкость жидкости (воды) составляет 1 мПа·с, пористость пресноводного горизонта равна 0,2. Длительность цикла нагрева, после которого индукционный нагреватель отключается, составляет 10 мин. Рассмотрено три варианта объемного расхода жидкости в скважине: 10, 30, 120 м³/сут (принятая в нефтегазовой области единица измерения расхода) и три варианта скорости фильтрации жидкости в пресноводном горизонте: 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} м/с. В табл. 2 представлены значения коэффициента теплообмена α на внутренней стенке обсадной колонны в зависимости от расхода потока в ней.

Таблица 2. Расчет коэффициента теплообмена α

Table 2. Calculation of the heat transfer coefficient α

Q , м ³ /сут m ³ /day	v , м/с m/s	Re	Режим потока Flow mode	Pr	Nu	α
10	0,01	877	Ламинарный Laminar	6,46	4,36	22,5
30	0,03	2632	Переходный Transitional	6,46	7,48	38,6
120	0,125	10526	Турбулентный Turbulent	6,46	80,11	413,3

Система уравнений (1), (2), (4) с учетом граничных и начальных условий (6)–(9), а также вспомогательных выражений (5), (10)–(12) решается в Ansys Fluent. В качестве схемы аппроксимации уравнений используется схема SIMPLE. Для пространственной дискретизации конвективных членов была выбрана схема QUICK (Quadratic Upwind Interpolation). При расчете градиентов для вычисления диффузионных членов и производных скоростей используется способ Green-Gauss Node Based. Для вычисления градиента давления выбрана схема PRESTO! [20]. Другие особенности численного моделирования описаны в [21].

Модель индукционного нагрева обсадной колонны в скважине при наличии вертикального перетока жидкости в заколонном пространстве к пресноводному горизонту (*r-z* модель)

Рассматривается задача расчета поля температуры в теле обсадной колонны в процессе индукционного нагрева ее участка при наличии заколонного перетока – потока жидкости в пространстве между обсадной колонной и негерметичным цементным кольцом к пресноводному горизонту (рис. 2, исследования проводятся ниже по глубине пресноводного горизонта). Расчетная область состоит из пяти различных зон со свойствами, отличающимися от внутренней к внешней границе модели: индукционный нагреватель, жидкость в стволе скважины, металлическая обсадная колонна, жидкость в кольцевом заколонном пространстве, цементное кольцо и горные породы (теплофизические свойства областей приведены в табл. 1).

Допущения, принятые при моделировании:

- вертикальная скважина, однофазный восходящий поток вязкой несжимаемой жидкости в обсадной колонне и заколонном пространстве, силами инерции при движении жидкости пренебрегается;
- скважинный прибор с индуктором представлен в виде однородного сплошного цилиндра из углепластика, активная часть с индукционным нагревателем имеет длину 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 скважины r_4 с учетом наличия заколонного перетока толщиной 1 мм (в расчетах принято $r_1=21$ мм, $r_2=63,5$ мм, $r_3=73,5$ мм, $r_4=74,5$ мм, $H=0,4$ м). Интервал нагрева располагается в диапазоне глубин 2,8–3,2 м (середина области моделирования).

Движение жидкости в скважине описывается уравнениями Навье–Стокса в приближении Буссинеска [22]

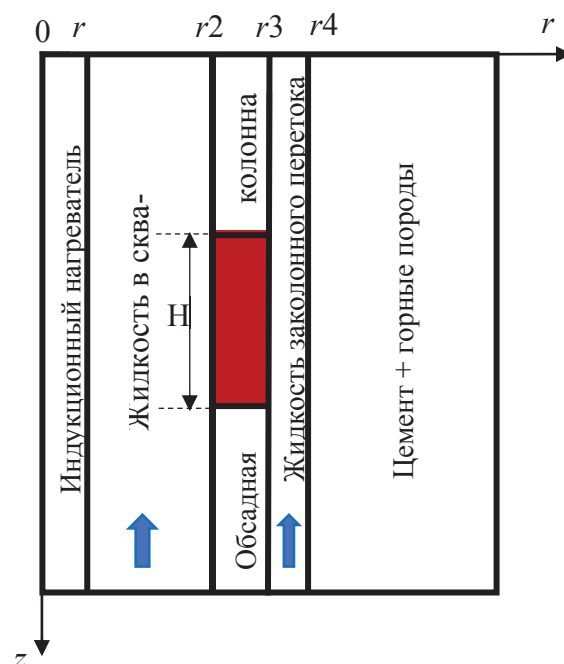


Рис. 2. Геометрия *r-z* модели (H – длина участка индукционного нагрева, r_1 – r_4 – радиусы элементов модели)

Fig. 2. Geometry of the *r-z* model (H is the length of the induction heating section, r_1 – r_4 are the radii of the model elements)

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

$$\nabla(\vec{v}) = 0;$$

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)),$$
(13)

где $\vec{v}$ – скорость течения; ρ_0 – плотность жидкости при начальной температуре T_0 ; p – давление; μ – динамическая вязкость; $\vec{g}$ – ускорение силы тяжести; β – коэффициент термического расширения.

Передача теплоты в жидкости осуществляется за счет конвективного теплопереноса и теплопроводности, распределение температуры T в индукторе, обсадной колонне, горных породах и цементном кольце определяется нестационарным уравнением теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + w(z),$$
(14)

где λ – теплопроводность; c – удельная теплоемкость; $w(z)$ – удельная мощность тепловыделения (слагаемое для расчета температуры колонны). Граничные и начальные условия, а также детальное описание численного решения системы уравнений (13), (14) представлено в [21]. В частности, граничные условия для жидкости: на входе (нижняя граница, рис. 2) задается постоянная скорость потока v и температура T_0 , 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 $r=0$ на рис. 2) задается условие равенства нулю производной температуры по радиальной координате r . На правой границе задается ($r=1$ м) использовано 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 внутренних границах моделируемых областей обусловлен теплопроводностью и описывается условиями (8).

Для моделирования турбулентных течений в обсадной колонне были рассмотрены модель турбулентности Спаларта–Аллмараса (SA) и модель переноса сдвиговых напряжений (SST $k-\omega$) [23]. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что наилучшей сходимостью с экспериментальными данными обладает модель SST $k-\omega$, принятая в дальнейших расчетах (подробное описание представлено в [23]). Задача решается численно в Ansys Fluent в осесимметричной постановке [21, 23].

Анализ результатов моделирования

Основной задачей моделирования является исследование влияния потока жидкости в пространстве за обсадной колонной на особенности теплового поля в ней. На первом этапе рассматривается индукционный нагрев обсадной колонны на участке скважины, пересекающей пресноводный горизонт, и исследуется чувствительность температуры колонны к горизонтальному плоскопараллельному движению воды в пресноводном горизонте при герметичном цементном кольце (сценарий 1). На рис. 3 показана динамика изменения во времени температуры внутренней поверхности колонны (здесь и далее приведена разность между текущей и начальной температурой колонны $\Delta T = T - T_{inlet}$ в точках 1–4 (рис. 1), характеризующая ее разогрев) при различном расходе жидкости в стволе скважины. Скорость жидкости в пресноводном горизонте принята 10^{-4} м/с. Ввиду симметрии модели температура в точках 2 и 4 совпадает.

С увеличением расхода жидкости в скважине с 10 до $120 \text{ м}^3/\text{сут}$ режим течения потока переходит от ламинарного к турбулентному (табл. 2), при этом увеличивается интенсивность теплообмена колонны с потоком, а максимальный разогрев колонны снижается с 37,0 до 12,8 К. Благодаря наличию герметичного цементного кольца в пространстве за обсадной колонной (рис. 1), экранирующего влияние плоскопараллельного потока в пласте, значения температуры внутренней поверхности колонны в точках 1–4 близки между собой, макси-

мальная разница температур в точках 1–4 за 20-минутный цикл исследований при всех трех расходах $10\text{--}120 \text{ м}^3/\text{сут}$ не превышает 0,5 К.

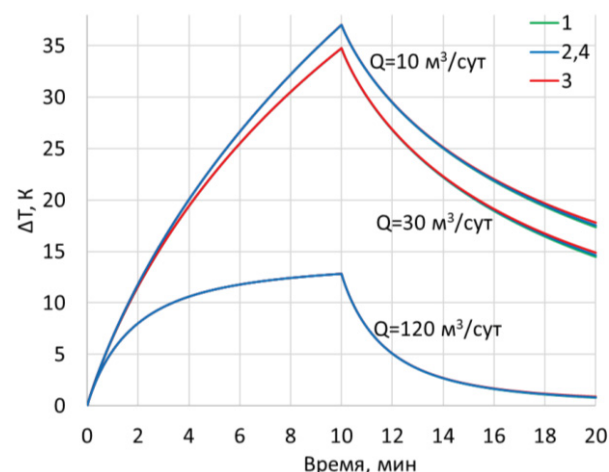


Рис. 3. Динамика температуры колонны в точках 1–4 при различном расходе жидкости в стволе скважины (шифр кривых)

Fig. 3. Column temperature dynamics at points 1–4 with different fluid flow in the borehole (curve key)

Изменение скорости потока в пресноводном горизонте в диапазоне $10^{-4}\text{--}10^{-2}$ м/с (расход жидкости в скважине принят $30 \text{ м}^3/\text{сут}$) практически не оказывает влияния на характер разогрева колонны в цикле нагрева, разница температур в точках 1–4 не превышает 0,1 К (рис. 4). Это связано с тем, что при герметичном цементном кольце теплообмен потока, фильтрующегося в пресноводном горизонте, с обсадной колонной происходит опосредованно, через цементное кольцо. Благодаря его низкой тепло- и теплопроводности (порядка $10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$) скорость распространения тепловых возмущений является достаточно небольшой, например, за 10-минутный цикл индукционного нагрева тепловое возмущение по цементу проходит расстояние только порядка толщины цементного кольца $r = \sqrt{\pi a t} \approx 40 \text{ мм}$.

Различие в показаниях датчиков отмечается только после отключения индукционного нагревателя (рис. 4, б). Из кривых азимутального распределения температуры в колонне (где нулевой азимут соответствует ориентации точки 1 и противоположен направлению фильтрационного потока в пласте) через 20 мин после начала исследования (или 10 мин после отключения нагревателя) следует, что при увеличении скорости потока в пресноводном горизонте с 10^{-4} до 10^{-2} м/с максимальный разогрев колонны снижается с 14,9 до 12,9 К (в точке 3). Разница температур между точками 1–4 варьируется в диапазоне 0,4–1 К в зависимости от скорости потока в пресноводном горизонте.

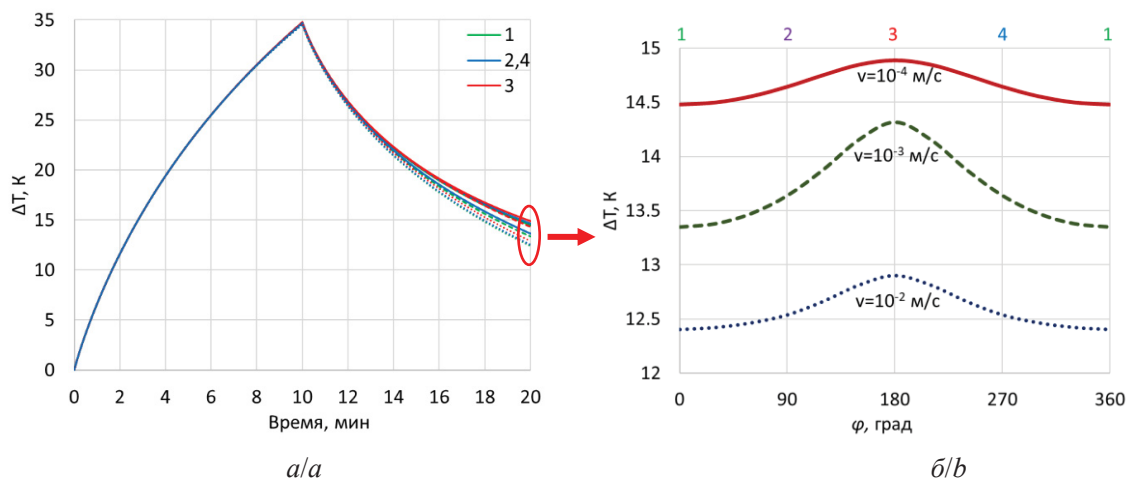


Рис. 4. а) динамика температуры колонны в точках 1–4 при различной скорости жидкости в пресноводном горизонте; б) азимутальное распределение температуры в колонне через 20 мин после начала исследований (сплошная линия – скорость потока в пресноводном горизонте 10^{-4} м/с, штриховая – 10^{-3} м/с, точки – 10^{-2} м/с)

Fig. 4. а) column temperature dynamics at points 1–4 at different fluid velocities in the freshwater horizon; б) azimuthal temperature distribution in the column 20 minutes after the start of the study (solid line – flow velocity in the freshwater horizon 10^{-4} m/s, dashed – 10^{-3} m/s, points – 10^{-2} m/s)

При цементировании скважин наибольшее распространение получил прямой метод, при котором цементный раствор закачивается в колонну обсадных труб, и затем под давлением он продавливается в пространство между обсадной колонной и горными породами, осуществляя подъем в заколонном пространстве. При наличии осложнений в процессе цементирования, например, поглощении тампонажного раствора, недостаточном подъеме уровня цемента в затрубном пространстве, в верхней части скважины цементное кольцо не будет герметичным. Результаты моделирования индукционного нагрева участка

скважины, обтекаемого горизонтальным потоком жидкости из пресноводного горизонта, при наличии негерметичного цементного кольца на этом участке, показаны на рис. 5 (сценарий 2). Негерметичное цементное кольцо моделируется для простоты как пористый пласт со свойствами, аналогичными пресноводному горизонту. В этом случае в области 2 решается уравнение (2) теплопроводности с учетом конвективного теплопереноса, скорость фильтрации рассчитывается по закону Дарси (3). Также при негерметичном цементном кольце непроницаемой стенкой является уже наружная стенка обсадной колонны.

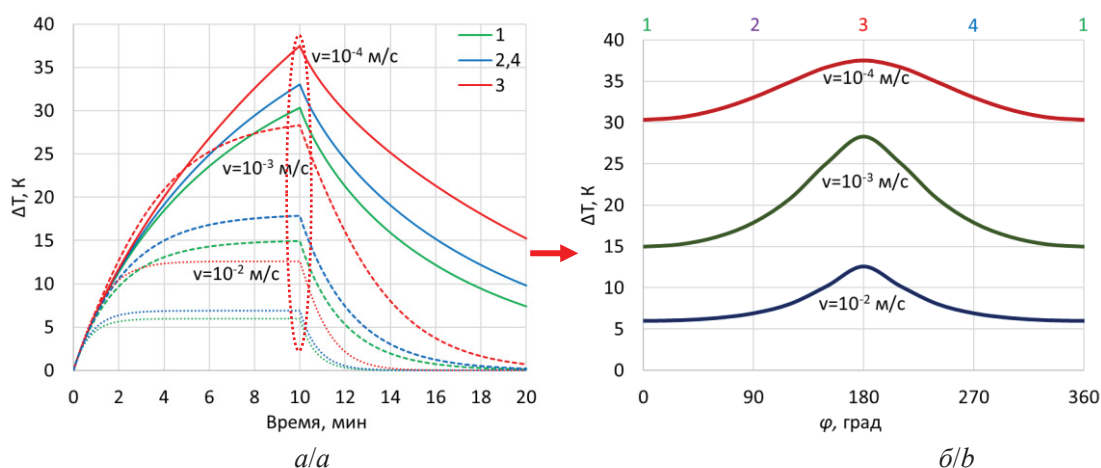


Рис. 5. а) динамика температуры колонны в точках 1–4 при различном расходе жидкости в пресноводном горизонте и негерметичном цементном кольце; б) азимутальное распределение температуры в колонне через 10 мин после включения индукционного нагревателя (сплошная линия – скорость фильтрации в пресноводном горизонте 10^{-4} м/с, штриховая – 10^{-3} м/с, точки – 10^{-2} м/с)

Fig. 5. а) column temperature dynamics at points 1–4 at different liquid flow rates in the freshwater horizon and an unpressurized cement ring; б) azimuthal temperature distribution in the column in 10 minutes the induction heater is turned on (solid line – flow velocity in the freshwater horizon 10^{-4} m/s, dashed – 10^{-3} m/s, points – 10^{-2} m/s)

При наличии негерметичности цементного кольца (трещин и каналов в цементе) фильтрационный поток в пласте может напрямую контактировать с обсадной колонной, в этом случае теплообмен интенсифицируется за счет конвекции, в результате чувствительность температуры колонны к потоку в пресноводном горизонте возрастает. При увеличении скорости потока в пресноводном горизонте с 10^{-4} до 10^{-2} м/с максимальный разогрев колонны в точке 1 снижается с 30,3 до 6,0 К (на 24,3 К), в точке 3 – с 37,5 до 12,6 К (на 24,9 К). Максимальная разница температур между точками 1–4 при негерметичном цементном кольце также существенно возрастает, например, при скорости потока 10^{-4} м/с она достигает 7,2 К, при скорости 10^{-3} м/с – 13,4 К, при скорости 10^{-2} м/с – 6,6 К. Поскольку теплоперенос осуществляется в направлении движения фильтрационного потока в пресноводном горизонте, максимальная температура достигается в точке 3, минимальная – в точке 1.

В рассмотренных выше расчетах при моделировании теплообмена обсадной колонны с потоком жидкости внутри нее учитывается влияние только вынужденной конвекции. В действительности вследствие индукционного нагрева колонны в жидкости возникает и свободная конвекция. Для оценки влияния свободной конвекции широко применяется критерий Ричардсона, который рассчитывается следующим образом:

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{gL\beta\Delta T}{\nu^2},$$

где Gr – число Грасгофа; Re – число Рейнольдса; β – коэффициент теплового расширения; ΔT – характерная разница температур; L – характерный линейный размер области теплообмена; ν – скорость потока жидкости.

При $Ri \ll 1$ влияние естественной тепловой конвекции пренебрежимо мало в сравнении с вынужденной, при $Ri \gg 1$, естественная тепловая конвекция преобладает над вынужденной, а при $Ri \approx 1$ требуется учет как естественной, так и вынужденной конвекции.

Для моделируемых условий расчетное число Ричардсона изменяется в интервале от 0,3 (для расхода жидкости в колонне $120 \text{ м}^3/\text{сут}$) до 80 (для расхода жидкости в колонне $10 \text{ м}^3/\text{сут}$), таким образом, влияние свободной тепловой конвекции значительно при малых расходах. В этой связи оно было учтено в рамках численной г-з модели.

Наиболее неблагоприятным с точки зрения экологии сценарием, возникающим при наличии негерметичности цементного кольца, является возникновение перетока пластовой продукции в верхние водоносные пресноводные горизонты, приводящее к их загрязнению (*сценарий 3*). Для выявления перетоков такого рода предлагается проведение скважинных исследований с применением индукционного нагревателя на участке скважины, расположенном ниже пресноводных горизонтов.

На рис. 6 показаны результаты расчета распределения температуры внутренней поверхности обсадной колонны при индукционном нагреве с учетом наличия заколонного перетока с расходом $q=1 \text{ м}^3/\text{сут}$, расход жидкости в скважине принят $Q=30 \text{ м}^3/\text{сут}$, другие параметры соответствуют вышеприведенным. В результате теплообмена жидкости в заколонном пространстве с нагретой обсадной колонной и дальнейшего конвективного теплопереноса в колонне формируется достаточно протяженная по вертикали область температурного возмущения (более 1–1,5 м относительно середины участка индукционного нагрева, имеющей координату $z=3 \text{ м}$, температурное возмущение по величине превышает 1 К). Следует отметить, что влияние теплопроводности в металле за 20-минутный цикл исследования ограничивается расстоянием порядка $s = \sqrt{4at} \approx 0,2 \text{ м}$, разогрев колонны за счет теплообмена с потоком жидкости в стволе скважины также менее существенен (это видно из распределения температуры в колонне без перетока (кривая $q=0 \text{ м}^3/\text{сут}$, рис. 7). Таким образом, увеличение температуры колонны на величину порядка 1 К и более в этой области связано главным образом с обратной передачей тепла обсадной колонне от нагретого флюида в заколонном пространстве.

Температурное поле в колонне выше участка нагрева при увеличении расхода заколонного перетока меняется нелинейно (рис. 7): с одной стороны, максимальные температурные возмущения снижаются вследствие того, что при большем расходе поток в заколонном пространстве более интенсивно уносит тепло из участка индукционного нагрева, не давая ему прогреться, с другой – скорость конвективного теплопереноса в заколонном пространстве возрастает, поэтому температурные возмущения распространяются вдоль колонны с большей скоростью. Например, при расходе заколонного перетока $0,5 \text{ м}^3/\text{сут}$ через 1 и 5 мин после остановки нагрева максимум температуры смещается от координаты $z=2,80 \text{ м}$ до координаты $z=2,55 \text{ м}$ (на $0,25 \text{ м}$), при расходе $1 \text{ м}^3/\text{сут}$ – от координаты $z=2,70 \text{ м}$ до координаты $z=2,20 \text{ м}$ (на $0,5 \text{ м}$). При расходе перетока $5 \text{ м}^3/\text{сут}$ уже через 5 мин температурные возмущения распространяются на расстояние более 3 м, однако их величина не превышает 1 К, тогда как при расходах до $1 \text{ м}^3/\text{сут}$ разогрев колонны выше участка индукционного нагрева достигает порядка 1–2 К.

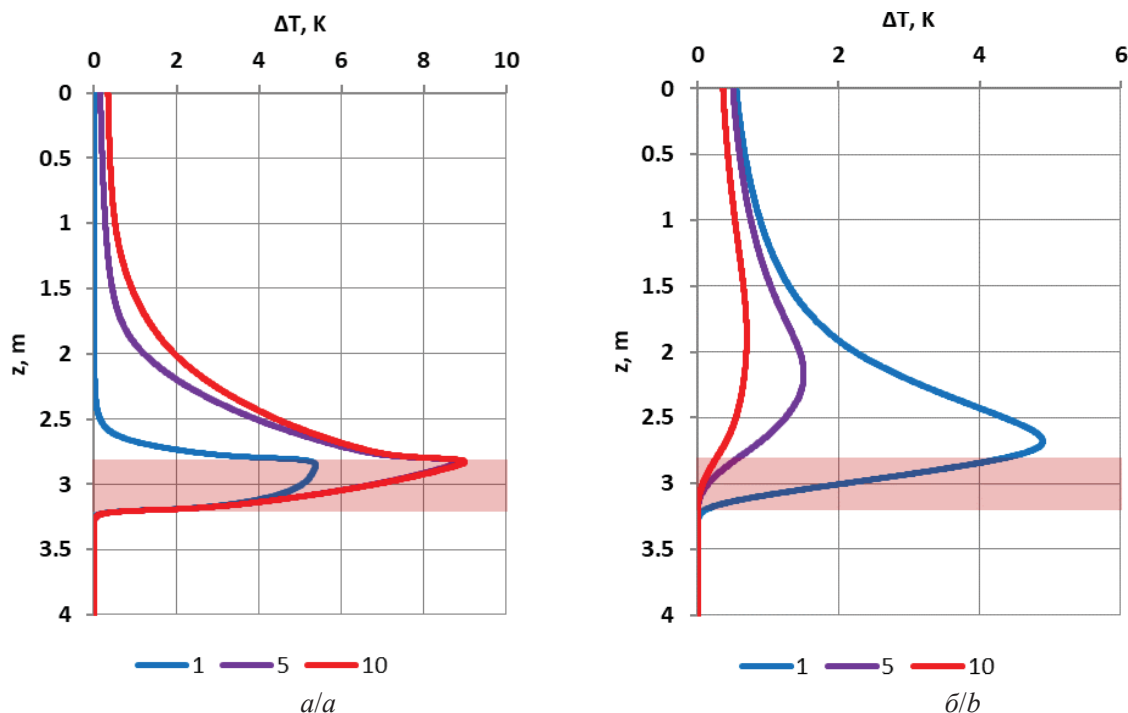


Рис. 6. Распределение температуры колонны по высоте при наличии заколонного перетока к пресноводному горизонту: а) в цикле нагрева; б) после отключения нагревателя (шифр кривых – время после включения/остановки индукционного нагрева в минутах, цветом выделен участок нагрева колонны)

Fig. 6. Column temperature distribution by height in the presence of a column flow to the freshwater horizon: а) in the heating cycle; б) after the heater is turned off (the curve key is the time after the induction heating is turned on/off in minute, the column heating section is highlighted in color)

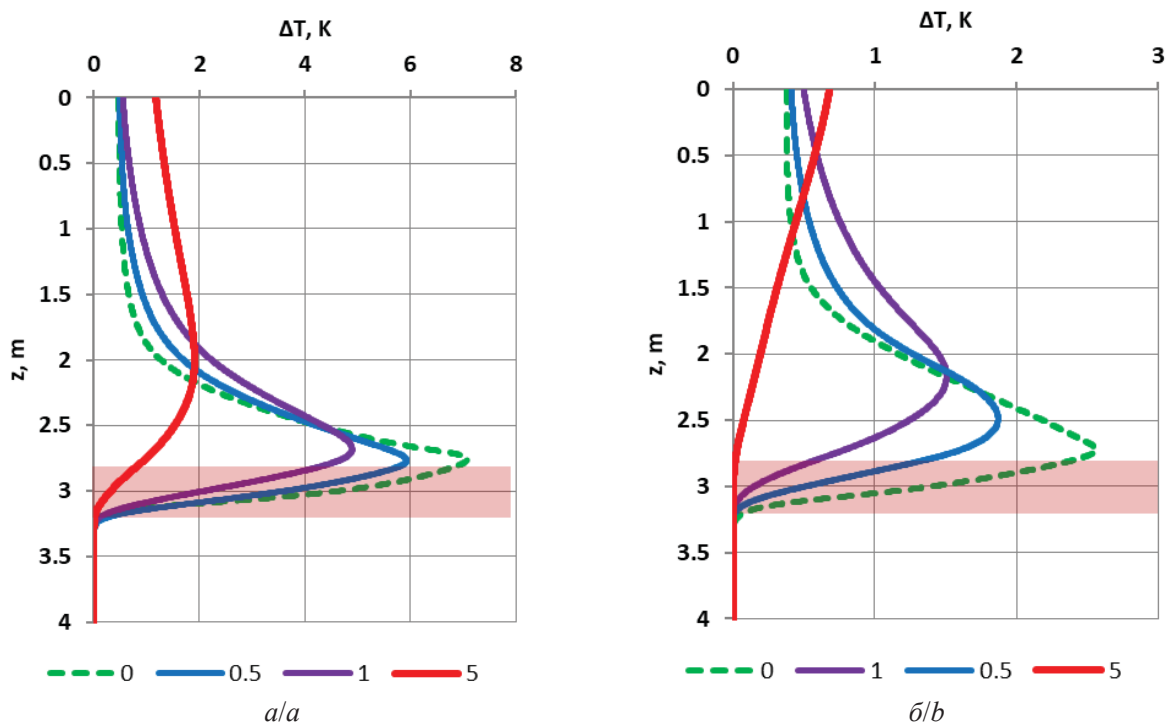


Рис. 7. Распределение температуры колонны по высоте при наличии заколонного перетока с различным расходом: а) через 1 мин после остановки нагрева; б) через 5 мин после остановки нагрева (шифр кривых – объемный расход жидкости в заколонном пространстве в м³/сут, цветом выделен участок нагрева колонны)

Fig. 7. Column temperature distribution by height in the presence of a column flow with different flow rates: а) 1 min after heating stops; б) 5 min after heating stops (the key of the curves is the volume flow of liquid in the column space in m³/day, the column heating section is highlighted in color)

Динамика температуры колонны на участке нагрева (выбрана координата $z=2,8$ м, соответствующая верхней границе интервала нагрева) показана на рис. 8.

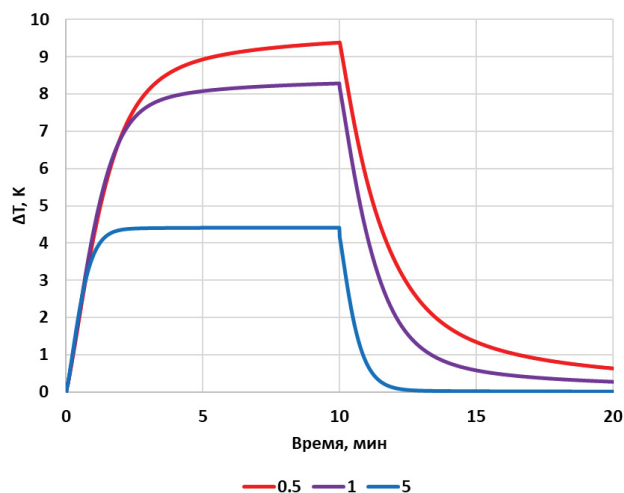


Рис. 8. Динамика температуры колонны на участке индукционного нагрева (шифр кривых – объемный расход жидкости в заколонном пространстве, $\text{м}^3/\text{сут}$)

Fig. 8. Column temperature dynamics at the induction heating site (curve cipher – volumetric flow rate of liquid in the column space, m^3/day)

Сравнивая результаты расчета в рамках r - z и x - y моделей, можно заключить, не учет особенностей смешанной конвекции в x - y модели приводит к завышению величины разогрева обсадной колонны.

При увеличении расхода заколонного перетока от 0,5 до 5 $\text{м}^3/\text{сут}$ максимальный разогрев колонны снижается с 9,3 до 4,4 К, т. е. более чем в 2 раза. Также при увеличении расхода заколонного перетока возрастает интенсивность охлаждения колонны во времени: если при расходе 0,5 $\text{м}^3/\text{сут}$ через 10 мин после отключения нагревателя остаточный разогрев колонны достигает 0,6 К, то при расходе 5 $\text{м}^3/\text{сут}$ уже в течение 2 мин после остановки нагрева разогрев колонны снижается практически до нулевого значения. Вышеперечисленные особенности температурного поля показывают информативность метода активной термометрии применительно к выявлению заколонных перетоков жидкости в интервалы пресноводных горизонтов.

Выводы

1. На основе результатов математического моделирования, выполненного в программном комплексе Ansys Fluent, изучены особенности формирования теплового поля в скважине, пересекающей пресноводный горизонт, в процессе локального индукционного нагрева обсадной ко-

лонны. Применительно к диагностике целостности цементного кольца рассмотрены три сценария, включающие технически исправную скважину с герметичным цементным кольцом, скважину с локальным нарушением герметичности цементного кольца в интервале пресноводного горизонта (без заколонного перетока), а также скважину с нарушением герметичности цементного кольца, обуславливающим заколонный переток жидкости к вышележащему интервалу пресноводного горизонта.

2. Показано, что в технически исправной скважине при кратковременном индукционном нагреве (продолжительностью порядка 10 мин) благодаря низкой температуропроводности цементного кольца фильтрационный поток в пресноводном горизонте слабо влияет на температуру обсадной колонны, отличие температуры в различных точках колонны, расположенных в одном горизонтальном сечении и имеющих различный азимутальный угол, не превышает 0,1 К.
3. Моделирование индукционного нагрева в скважине с локальной негерметичностью цементного кольца (в интервале пресноводного горизонта) показало, что в этом случае неоднородность азимутального распределения температуры в горизонтальном сечении обсадной колонны может достигать по величине нескольких градусов К, причем азимут максимальной температуры колонны соответствует направлению движения фильтрационного потока в пресноводном горизонте. Неоднородность азимутального распределения температуры колонны в процессе кратковременного индукционного нагрева на участке скважины, пересекающей пресноводный горизонт, является признаком негерметичности цементного кольца, при выявлении этого признака целесообразным является проведение детальных исследований целостности цементного кольца вдоль всего ствола скважины.
4. Выполнено моделирование индукционного нагрева в скважине с нарушением герметичности цементного кольца и наличием заколонного перетока жидкости в заколонном пространстве к интервалу пресноводного горизонта. Установлено, что при наличии заколонного перетока в обсадной колонне выше участка индукционного нагрева формируется область температурного возмущения по вертикали длиной более 1 м, связанная с теплообменом жидкости в заколонном пространстве и обсадной колонны. Показано, что при увеличении расхода заколонного перетока в диапазоне 0,5–5 $\text{м}^3/\text{сут}$ максимальный разогрев колонны на участке индукционного нагрева снижается более чем в три раза, от 9,4 до 4,4 К. Вышеперечисленные особенности

температурного поля показывают информативность метода активной термометрии применительно к выявлению движения жидкости в законном пространстве скважин, пересекающих

пресноводные горизонты, в том числе для решения задачи диагностики их технического состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чижова М.А., Хайруллина Л.И., Тучкова О.А. Принципы создания и структура экологического мониторинга на объектах нефтедобычи // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18 – № 16. – С. 290–292.
2. Наянова Е.А., Курбатова А.И. Разработка программы производственного экологического мониторинга наульского месторождения нефти // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 11 (53). – С. 92–95.
3. Зималин С.В., Нетепенко Е.Н., Барановский М.Г. Экологичный комплексный реагент POLYSIL Potassium – ингибирующая основа бурового раствора для безаварийного бурения скважины // Нефть. Газ. Новации. – 2022. – № 7 (260). – С. 24–26.
4. Жолдакова З.И., Беляева Н.И. Опасность загрязнения водных объектов при нефтедобыче // Гигиена и санитария. – 2015. – Т. 94. – № 1. – С. 28–31.
5. Дзюбло А.Д., Рубан Г.Н. Надежная диагностика и ликвидация заколонных перетоков как залог экологической безопасности при разработке нефтегазовых месторождений // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 4 (23). – С. 1–10.
6. Machine-learning distributed-temperature-sensing-based pipeline leak detection / W. Sfar Zaoui, Th. Lauber, C. Pohl, M. Kerk, Th. Glaeser, W. Jelinek // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 202905. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. – Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9–12 November 2020. – P. 1–11.
7. Well integrity leak diagnostic using fiber-optic distributed temperature sensing and production logging / J. Abeling, U. Bartels, K. Singh, Sh. Dutta, G. Agrawal, A. Kumar // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 204557, SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. – Manama, Bahrain, 28 November – 1 December, 2021. – P. 1–13.
8. Use of rigorous multiphase flow models for leak detection and online flow assurance / K. Havre, Ch. Trudvang, G. Kjørrefjord, S. Smith, C. King, J. Vinicombe, T. Roberts // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 208899, SPE Canadian Energy Technology Conference. – Calgary, Alberta, Canada, 16–17 March 2022. – P. 1–19.
9. Использование искусственных тепловых полей в скважинной термометрии / Р.А. Валиуллин, Р.Ф. Шарафутдинов, В.Ю. Сорокань, А.А. Шилов // Каротажник. – 2002. – № 100. – С. 124–137.
10. Mathematical and computer simulation technology of condensate oil and gas wells stimulated by electromagnetic heating / C. Pu, R. Pei, H. Huang, J. Feng, G.H. Su // Journal of Hydrodynamics. – 2007. – Vol. 19. – № 3. – P. 292–302.
11. Экспериментальное исследование воздействия электромагнитных полей на нефтяные сланцы / Л.А. Ковалева, Р.Р. Зиннатуллин, Р.Ф. Султангужин, А.С. Сектаров, А.В. Шашков // Вестник Башкирского университета. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 43–48.
12. Application of active temperature logging at oilfields of Russia / R.F. Sharafutdinov, R.A. Valiullin, A.Sh. Ramazanov, V.Ya. Fedotov, A.A. Sadretudinov, M.F. Zakirov // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 161982, SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 16–18 October 2012. – P. 1–10.
13. Канафин И.В., Космылин Д.В. Изучение формирования теплового поля на модели скважины с локальным нагревом // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2017. – № 2. – С. 44–48.
14. Enhancement of well productivity using a technique of high-frequency induction treatment / R.A. Valiullin, R.F. Sharafutdinov, A.Sh. Ramazanov, A.A. Shilov // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 157724, SPE Heavy Oil Conference. – Canada, Calgary, Alberta, 12–14 June 2012. – P. 1–7.
15. Hasan A.R., Kabir C.S. Fluid flow and heat transfer in wellbores. – Richardson: Soc. Petrol. Eng., 2002. – 175 p.
16. Sakaida Sh., Zhu D. Completion effects on diagnosing multistage fracture treatments with distributed temperature sensing // SPE (Society of Petroleum Engineers) Production & Operation. – 2020. – Vol. 36. – № 1. – P. 160–173.
17. Onay M.E. Analytical solutions for predicting fracture outlet temperature of produced fluid from enhanced geothermal systems with different well-completion configurations // SPE-204274 – SPE Annual Technical Conference & Exhibition. Denver, Colorado, USA, 5–7 October 2020. – P. 1–36.
18. Fundamentals of heat and mass transfer. 8th ed. / Th.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. de Witt. – St. Joseph County: University of Notre Dame, Indiana, USA, 2006. – 1070 p.
19. McEligot D.M., Taylor M.F. The turbulent Prandtl number in the near-wall region for low-Prandtl-number gas mixtures // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1996. – Vol. 39. – P. 1287–1295.
20. ANSYSR1 Documentation, Fluent Theory Guide. – Southpointe: ANSYS Inc, 2022. – 1036 p.
21. Тепловое поле в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны в условиях низкой скорости потока / Р.З. Акчурин, Ф.Ф. Давлетшин, А.Ш. Рамазанов, Р.Ф. Шарафутдинов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 87–98.
22. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
23. Неизотермическое течение жидкости в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны / Ф.Ф. Давлетшин, Р.З. Акчурин, Р.Ф. Шарафутдинов, Д.Ф. Исламов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2023. – № 4. – С. 81–92.

Информация об авторах

Руслан Зуфарович Акчурин, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. ac4urin.ruslan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-9991-167X>

Филюс Фанизович Давлетшин, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. felix8047@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7532-1437>

Айрат Шайхуллинович Рамазанов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. ramaz@geotec.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5501-3755>

Рим Абдуллович Валиуллин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. valrageo@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3705-8260>

Рамиль Фаизырович Шарафутдинов, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. gframil@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6980-8364>

Денис Фавилович Исламов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий, Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32. islamovden@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5369-9327>

Поступила в редакцию: 08.09.2023

Поступила после рецензирования: 06.12.2023

Принята к публикации: 31.05.2024

REFERENCES

1. Chizhova M.A., Khayrullina L.I., Tuchkova O.A. Principles of creation and structure of environmental monitoring at oil production facilities. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 16, pp. 290–292. (In Russ.)
2. Nayanova E.A., Kurbatova A.I. The development of the production environmental monitoring program of naulsky oilfield. *International research journal*, 2016, vol. 53, no. 11, pp. 92–95. (In Russ.)
3. Zimalin S.V., Netepenko E.N., Baranovskiy M.G. The inhibitory basis in drilling fluid for trouble-free well drilling. *Neft. Gaz. Novacii*, 2022. vol. 260, no 7, pp. 24–26. (In Russ.)
4. Zholdakova Z. I., Belyaeva N. I. Pollution hazard for water bodies at oil production. *Gigiena i sanitariya*, 2015, vol. 94, no. 1, pp. 28–31. (In Russ.)
5. Dzyublo A.D., Ruban G.N. Reliable diagnostics and liquidation of behind casing flows as an ecological safety guarantee during the oil and gas fields development. *Actual Problems of Oil and Gas*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 1–10. (In Russ.)
6. Sfar Zaoui W., Lauber Th., Pohl C., Kerk M., Glaeser Th., Jelinek W. Machine-learning distributed-temperature-sensing-based pipeline leak detection. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 202905, Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, United Arab Emirates, November 2020. pp. 1–11.
7. Abeling J., Bartels U., Singh K., Dutta Sh., Agrawal G., Kumar A. Well integrity leak diagnostic using fiber-optic distributed temperature sensing and production logging. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 204557, SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*. Manama, Bahrain, November – December 2021. pp. 1–13.
8. Havre K., Trudvang Ch., Kjørrerfjord G., Smith S., King C., Vinicombe J., Roberts T. Use of rigorous multiphase flow models for leak detection and online flow assurance. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 208899, SPE Canadian Energy Technology Conference*. Calgary, Alberta, Canada, March 2022. pp. 1–19.
9. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Sorokan V.Yu., Shilov A.A. The use of artificial thermal fields in borehole thermometry. *Karotazhnik*, 2002, no. 100, pp. 124–137. (In Russ.)
10. Pu C., Pei R., Huang H., Feng J., Su G.H. Mathematical and computer simulation technology of condensate oil and gas wells stimulated by electromagnetic heating. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, vol. 19, no. 3, pp. 292–302.
11. Kovaleva L.A., Zinnatullin R.R., Sultanguzhin R.F., Sektarov E.S., Shashkov A.V. Experimental study of the influence of high frequency and microwave electromagnetic fields on oil shales. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 43–48. (In Russ.)
12. Sharafutdinov R.F., Valiullin R.A., Ramazanov A.Sh., Fedotov V.Ya., Sadretdinov A.A., Zakirov M.F. Application of active temperature logging at oilfields of Russia. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 161982, SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, October 2012. pp. 1–10.
13. Kanafin I.V., Kosmylin D.V. Thermal field generation in wellbore analogue with local heating. *Proceedings of the Kabardino-Balkarian scientific center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, no. 2, pp. 44–48. (In Russ.)
14. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Ramazanov A.Sh., Shilov A.A. Enhancement of well productivity using a technique of high-frequency induction treatment. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 157724, SPE Heavy Oil Conference Canada*. Calgary, Alberta, Canada, June 2012. pp. 1–7.
15. Hasan A.R., Kabir C.S. *Fluid flow and heat transfer in wellbores*. Richardson, Soc. Petrol. Eng., 2002. 175 p.
16. Sakaida Sh., Zhu D. Completion effects on diagnosing multistage fracture treatments with distributed temperature sensing. *SPE (Society of Petroleum Engineers) Production & Operation*, 2020, vol. 36, no. 1, pp. 160–173.
17. Onay M.E. Analytical solutions for predicting fracture outlet temperature of produced fluid from enhanced geothermal systems with different well-completion configurations. *SPE-204274 – SPE Annual Technical Conference & Exhibition*. Denver, Colorado, USA, October 2020. pp. 1–36.
18. Bergman Th.L., Lavine A.S., Incropera F.P., De Witt D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8th ed. St. Joseph County, University of Notre Dame, Indiana, USA, 2006. 1070 p.

19. McEligot D.M., Taylor M.F. The turbulent Prandtl number in the near-wall region for low-Prandtl-number gas mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, vol. 39, pp. 1287–1295.
20. *ANSYSR1 Documentation, Fluent Theory Guide*. Southpointe, ANSYS Inc, 2022. 1036 p.
21. Akchurin R.Z. 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*, 2023, vol. 334, no. 2, pp. 87–98. (In Russ.)
22. Landau L.D., Lifshits E.M. *Hydrodynamics*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 736 p. (In Russ.)
23. Davletshin F.F., Akchurin R.Z., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F. Nonisothermal fluid flow in a well during induction heating of the casing string. *Fluid Dynamics*, 2023, vol. 58, no. 4, pp. 586–597. (In Russ.)

Information about the authors

Ruslan Z. Akchurin, Senior Lecturer, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. ac4urin.ruslan@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-9991-167X>

Filyus F. Davletshin, Cand. Sc., Senior Lecturer, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. felix8047@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7532-1437>

Ayrat Sh. Ramazanov, Dr. Sc., Professor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. ramaz-1953@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5501-3755>

Rim A. Valiullin, Dr. Sc., Professor, Head of the Department, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. valrageo@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3705-8260>

Ramil F. Sharafutdinov Dr. Sc., Professor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. gframil@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6980-8364>

Denis F. Islamov, Cand. Sc., Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russian Federation. islamovden@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5369-9327>

Received: 08.09.2023

Revised: 06.12.2023

Accepted: 31.05.2024