

Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 6. С. 43-50. ISSN 2073-0128 (print)

Petroleum Engineering. 2023. Vol. 21. No. 6. P. 43-50. ISSN 2073-0128 (print)

Научная статья

УДК 536.242:550.360

DOI: 10.17122/ngdelo-2023-6-43-50

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОЛОННОГО ПРОСТРАНСТВА СКВАЖИНЫ МЕТОДОМ АКТИВНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Айрат Шайхуллинович Рамазанов, Рамиль Файзырович Шарафутдинов,
Денис Фавилович Исламов, Руслан Зуфарович Акчурин

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку

Исламов Денис Фавилович, islamovden@rambler.ru

Аннотация. Использование активной термометрии, основанной на локальном индукционном нагреве обсадной колонны имеет перспективы для решения экологических задач по исследованиям простаивающих скважин. При мощности индуктора в 1 кВт даже при малых временах нагрева можно создавать и регистрировать температурные аномалии в обсадной колонне.

В данной статье исследуется возможность использования активной термометрии для решения экологических задач по исследованиям простаивающих скважин.

Идея заключается в измерении температуры обсадной колонны до и после прогрева индуктором в течение определенного времени. Очевидно, что при фиксированных мощности индуктора и времени нагрева изменение температуры прогреваемого индуктором участка обсадной колонны будет зависеть от теплообмена между обсадной колонной, внутрискважинной средой и средой в заколонном пространстве. При этом условие теплообмена с внутрискважинной средой на разных глубинах могут оставаться одинаковыми, а с окружающей колонну внешней средой могут изменяться. Причиной этому могут быть изменение контакта колонны с цементом, свойств цемента, наличие вертикального или горизонтального потоков жидкости за скважиной и др.

В работе представлено новое аналитическое решение для расчета нестационарной температуры в металлической обсадной колонне, вызванной индукционным нагревом участка колонны. Решение основано на одномерной аналитической модели, которая учитывает теплообмен между жидкостью и обсадной колонной, тепловыделение в металлической колонне при включении индуктора и теплопроводные потери в цемент и породу. Для получения решения использован метод интегрального преобразования Лапласа по времени.

Результаты исследования показывают, что величина нагрева колонны меняется в зависимости от изменения условий теплообмена, от изменения термической активности среды за колонной. Значительная дифференциация температуры по глубине скважины может быть обусловлена нарушением герметичности цементного кольца, движением пластовых вод и заколонным перетоком. Это создает предпосылки для использования метода активной термометрии для решения экологических задач на разрабатываемых нефтяных месторождениях.

Для цитирования

Рамазанов А.Ш., Шарафутдинов Р.Ф., Исламов Д.Ф., Акчурин Р.З. Оценка возможности исследования заколонного пространства скважины методом активной термометрии // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 6. С. 43-50. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-43-50>.

© Рамазанов А.Ш., Шарафутдинов Р.Ф., Исламов Д.Ф., Акчурин Р.З., 2023

Ключевые слова

температурная активность; теплообмен; активная термометрия; индукционный нагрев; тепловая метка; термоаномалия; аналитическая модель

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.

Original article

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF EXPLORING THE WELL'S BACKWATER SPACE BY ACTIVE THERMOMETRY

Airat Sh. Ramazanov, Ramil F. Sharafutdinov, Denis F. Islamov, Ruslan Z. Akchurin

Ufa university of science and technology, Ufa, Russia

Corresponding author

Denis F. Islamov, islamovden@rambler.ru

Abstract. The use of active thermometry based on local induction heating of the casing string has prospects for solving environmental problems in the study of idle wells. With an inductor power of 1 kW, even with small heating times, it is possible to create and register temperature anomalies in the casing.

This article explores the possibility of using active thermometry to solve environmental problems in the study of idle wells.

The idea is to measure the temperature of the casing before and after heating by the inductor for a certain time. Obviously, with fixed inductor power and heating time, the change in temperature of the section of the casing string heated by the inductor will depend on the heat exchange between the casing string, the downhole environment and the environment in the annular space. In this case, the conditions of heat exchange with the down hole environment at different depths may remain the same, but with the external environment surrounding the column may change. The reason for this may be a change in the contact of the column with the cement, the properties of the cement, the presence of vertical or horizontal fluid flows behind the well, etc.

The paper presents a new analytical solution for calculating unsteady temperature in a metal casing caused by induction heating of a section of the column. The solution is based on a one-dimensional analytical model that takes into account heat exchange between the fluid and the casing, heat generation in the metal column when the inductor is turned on, and heat conduction losses in the cement and rock. To obtain a solution, the Laplace integral time transform method was used.

The results of the study show that the amount of heating of the column changes depending on changes in heat exchange conditions and changes in the thermal activity of the environment behind the column. Significant differentiation of temperature along the depth of the well can be caused by a violation of the tightness of the cement ring, the movement of formation water and annular flow. This creates the prerequisites for using the active thermometry method to solve environmental problems in developed oil fields.

For citation

Ramazanov A.Sh., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F., Akchurin R.Z. Ocenka vozmozhnosti issledovaniya zakolonnogo prostranstva skvazhiny metodom aktivnoj termometrii// [Assessment of the possibility of exploring the well's backwater space by active thermometry] // *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 6. pp. 43-50. [in Russian]. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-43-50>.

Введение

В последнее время как дополнение к обычной скважинной термометрии широко обсуждается новый метод, названный методом активной термометрии [1, 7]. Суть метода заключается в том, что небольшой участок металлической обсадной колонны длиной L нагревается в течение некоторого времени с помощью индуктора. Затем индуктор выключают и исследуют созданное искусственное тепловое поле в скважине с помощью темпе-

ратурных датчиков, размещенных выше и ниже индуктора.

Главное преимущество этого метода — возможность управления величиной созданной температурной аномалии в скважине через время воздействия, возможность обеспечения нескольких циклов воздействия и наблюдения.

Исследования показали эффективность метода активной термометрии при решении следующих задач:

Keywords

temperature activity; heat exchange; active thermometry; induction heating; heat label; thermal anomaly; analytical model

Acknowledgment

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

— выявление заколонных перетоков снизу, в том числе в скважинах с короткими зумпами, где отсутствует зона ненарушенной геотермы [2];

— выявление зоны перетоков сверху — наиболее сложно решаемая обычной термометрией [3];

— определение малых дебитов, используя движение тепловых меток, создаваемых в скважине при кратковременном индукционном нагреве колонны [4].

Последние модификации аппаратуры активной термометрии с распределенными датчиками позволяют регистрировать не только температуру жидкости в стволе скважины, но и температуру обсадной колонны. Это открывает новые возможности исследования околоскважинного пространства.

В данной статье исследуется возможность использования активной термометрии для решения экологических задач по исследованиям простаивающих скважин.

Идея заключается в измерении температуры обсадной колонны до и после прогрева индуктором в течение определенного времени. Очевидно, что при фиксированных мощности индуктора и времени нагрева изменение температуры прогреваемого индуктором участка обсадной колонны будет зависеть от теплообмена между обсадной колонной, внутрискважинной средой и средой в заколонном пространстве. При этом условие теплообмена с внутрискважинной средой на разных глубинах могут оставаться одинаковыми, а с окружающей колонну внешней средой могут изменяться [5]. Причиной этому могут быть изменение контакта колонны с цементом, свойств цемента, наличие вертикального или горизонтального потоков жидкости за скважиной и др.

Для оценки величины температуры прогреваемого участка колонны рассмотрим математическую модель для модели скважины, изображенной на рисунке 1 [6].

В теле обсадной колонны скважины ($r_1 < x < r_2$):

$$Mc \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_3 A \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=0} - \lambda_1 A \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} S_2 + W(t). \quad (1)$$

Во внутренней среде ($0 < x < r_1$):

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad x < 0. \quad (2)$$

Во внешней среде ($x > r_2$):

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}, \quad x > 0, \quad (3)$$

где T — температура, К; λ — теплопроводность, Вт/(м·К); a — температуропроводность, м²/с; W — мощность поглощаемой энергии, Вт; A — площадь боковой поверхности нагреваемого участка колонны.

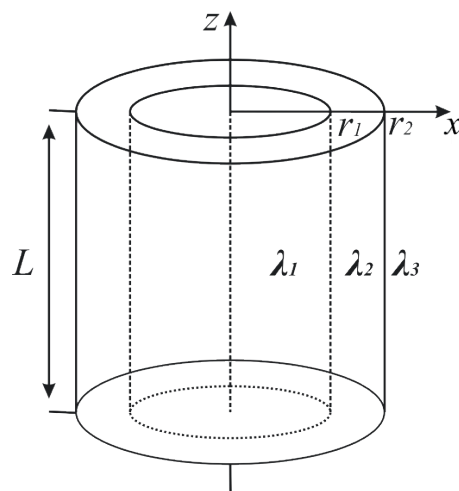


Рисунок 1. Схема

Figure 1. Scheme

Принятые допущения:

— толщина стенки мала, теплопроводность металла высокая, поэтому её температура зависит только от времени;

— площадь поверхности нагреваемого участка металла изнутри и снаружи из-за малой толщины отличается мало, принята равной A ;

— во внутренней и внешней среде тепло распространяется за счёт теплопроводности и для малого времени t поток принят линейным;

— нагреваемый участок металла массой M сосредоточен на $x=0$. Длина нагреваемого участка колонны равна L ;

— тепловыделение мощностью W происходит равномерно по всей длине L участка колонны с массой M .

Задача (1) — (3) при начальном условии $T = 0$ и $T_{1,2} = 0$ при $t = 0$ решена методом преобразования Лапласа.

В пространстве преобразований Лапласа

$$v_i(x, s) = \int_0^\infty T_i(x, t) e^{-st} dt$$

можно показать, что

$$v_3 = A e^{-\sqrt{\frac{s}{a_3}} x}; \quad x > 0,$$

$$v_1 = Be^{\sqrt{\frac{s}{a_1}}x}; x < 0.$$

Для $v_2(x,s)$ изображения функции $T_2(x,t)$ имеем

$$v_2 = v_3|_{x=0} = v_1|_{x=0},$$

$$A = B$$

В итоге вместо (1) в изображениях получаем следующее выражение

$$\frac{Mc}{A} sA = -\lambda_3 \sqrt{\frac{s}{a_3}} A - \lambda_1 \sqrt{\frac{s}{a_1}} A + W_L(s)$$

Отсюда

$$A = \frac{W_L(s)}{\left[\frac{Mc}{A} \sqrt{s} + \sqrt{\lambda_3 c_3 \rho_3} + \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} \right] A \sqrt{s}}$$

Тогда

$$v_3(x,s) = \frac{W_L(s) e^{-k\sqrt{s}}}{Mc(\sqrt{s} + b)\sqrt{s}},$$

где $k = \frac{x}{a_3}$; $b = A \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{Mc}$, $\varepsilon = \sqrt{\lambda c \rho}$ — термическая активность среды.

Воспользуемся табличной формулой обращения Лапласа

$$\frac{e^{-k\sqrt{s}}}{(\sqrt{s} + b)\sqrt{s}} \rightarrow e^{bk} \cdot e^{b^2 t} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{k}{2\sqrt{t}} + b\sqrt{t}\right).$$

Тогда для переменной мощности тепловыделения $W(t)$ изменение температуры колонны описывается следующей зависимостью

$$T_2(t) = T_3(0,t) = \frac{1}{Mc} \int_0^t W(\tau) e^{b^2(t-\tau)} \operatorname{erfc}(b\sqrt{t-\tau}) d\tau. \quad (4)$$

Пусть мощность тепловыделения постоянна за время t_0 нагрева колонны $W(t) = W_0 \gamma(t \leq t_0)$. Тогда

$$T(t) = \begin{cases} \frac{W_0}{Mc} \int_0^t e^{b^2(t-\tau)} \operatorname{erfc}(b\sqrt{t-\tau}) d\tau, & t < t_0 \\ \frac{W_0}{Mc} \int_0^{t_0} e^{b^2(t-\tau)} \operatorname{erfc}(b\sqrt{t-\tau}) d\tau, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (5)$$

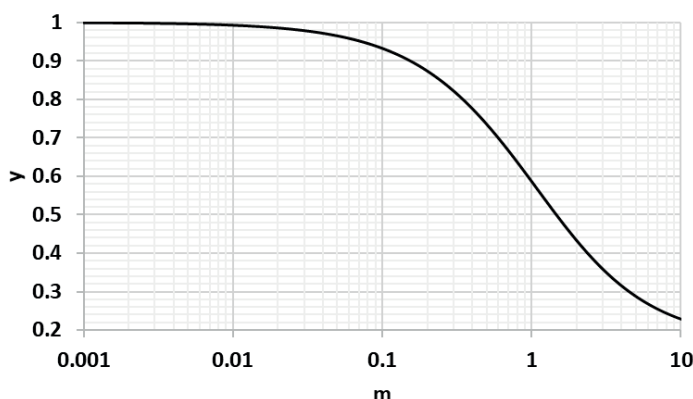


Рисунок 2. Зависимость $y(t)$ от m

Figure 2. Dependence of $y(t)$ on m

В адиабатических условиях, при отсутствии теплообмена температура стенки за время воздействия t изменилась бы на

$$T_{ad}(t) = \frac{W_0 t}{Mc}. \quad (6)$$

Пусть длина нагреваемого участка колонны $L = 40$ см, диаметр обсадной колонны $D = 146$ мм, толщина стенки колонны $h = 10$ мм, плотность (сталь) $\rho = 7800$ кг/м³, удельная теплоемкость $c = 460$ Дж/(кг·К). Соответственно объем нагреваемого участка колонны длиной L составит 1,71 дм³, а масса 13,3 кг. Тогда при мощности $W_0 = 1$ кВт изменение температуры колонны в адиабатических условиях росло бы линейно во времени с постоянной скоростью около 10 К/мин.

Для оценки вариации температуры колонны, обусловленной изменением условий теплообмена с контактирующими с колонной средами рассмотрим функцию $y(t)$, представляющую собой отношение температуры колонны с учетом теплообмена к величине адиабатического изменения температуры:

$$y(t) = \frac{T(t)}{T_{ad}(t)} = \frac{1}{t} \int_0^t e^{b^2(t-\tau)} \operatorname{erfc}(b\sqrt{t-\tau}) d\tau. \quad (7)$$

Функцию $Y(t)$ можно преобразовать к виду:

$$y(t) = \int_0^1 e^{m^2 x} \operatorname{erfc}(m\sqrt{x}) dx, \quad (8)$$

тогда $m^2 = b^2 t$ — представляет собой безразмерное время, а $b = A \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{Mc}$ — есть сумма термических активностей контактирующих с обсадной колонной сред, отнесенных к теплоемкости колонны на единицу поверхности контакта, $\frac{1}{\sqrt{c}}$.

На рисунке 2 показан график зависимости функции $y(t)$ от параметра m . Этот график можно использовать для определения параметра b . Для этого достаточно измерить изменение температуры колонны $T(t)$ за время нагрева t , рассчитать по известным W_0 , c , M величину $T_{ад}(t)$ p за время t . Далее, вычислить $y(t)$ как $T(t)/T_{ад}(t)$ и, пользуясь универсальным графиком на рисунке 2, определить значение m . Значение параметра b находим как m/t .

Как видно из рисунка 2, чувствительность температуры обсадной колонны к изменению условий теплообмена с контактирующими с ней средами начинает проявляться при значениях параметра m больше 0,01.

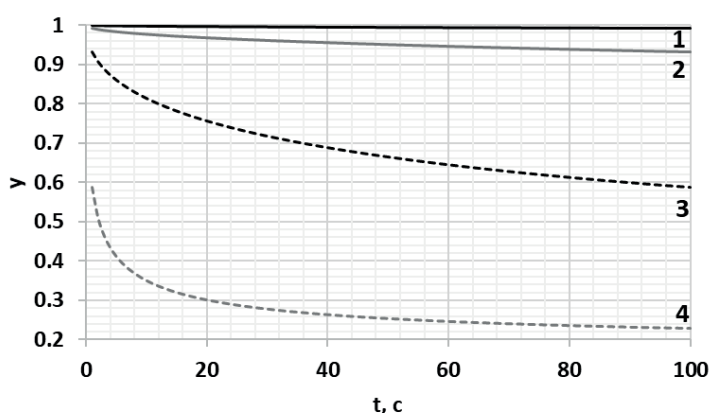
Термическая активность жидкости (вода с $\lambda_l = 0,6$ Вт/(м·К), $c_l = 4200$ Дж/(кг·К), $\rho_l = 10^3$ кг/м³) внутри скважины $\varepsilon_1 \approx 1600 \frac{Bm}{m^2 K} \sqrt{c}$. Термическая активность цемента для $\lambda_3 = 1,2$ Вт/(м·К), $c_3 = 2000$ Дж/(кг·К), $\rho_3 = 900$ кг/м³: $\varepsilon_3 \approx 1500 \frac{Bm}{m^2 K} \sqrt{c}$. Тогда суммарная термическая активность окружающих сред составит величину порядка $3 \cdot 10^3 \frac{Bm}{m^2 K} \sqrt{c}$. Теплоемкость колонны на единицу поверхности контакта Мс/А при указанных выше параметрах примерно равна $3 \cdot 10^4 \frac{Дж}{m^2 K}$. Параметр b , равный отношению термической активности окружающей среды к теплоемкости колонны на единицу площади контакта, составляет величину порядка $10^{-1} \frac{1}{\sqrt{c}}$. Для таких

значений b реализуемых на практике параметров $m > 0,01$ соответствует времени $t > 0,01$ с, т.е. практически одновременно с началом воздействия в изменении температуры обсадной колонны есть ощутимый вклад теплообмена между колонной и контактирующими с ней средами.

На рисунке 3 показана зависимость функции $y(t)$ от времени для различных значений параметра b .

Чем больше параметр b , тем меньше величина изменения температуры колонны. Вариация параметра b связана в большей степени с изменением условий теплообмена с окружающей средой, с изменением термической активности контактирующих с колонной сред.

Зависимость изменения температуры колонны при индукционном воздействии от условий теплообмена с контактирующими средами может быть использована для зондирования внешней к колонне среды при условии, когда теплообмен между колонной и внутренней к колонне средой остается постоянным. На рисунке 4 показаны кривые изменения температуры колонны во времени для нескольких значений термической активности среды за обсадной колонной скважины. Видно, что изменение условий теплообмена в заколонном пространстве отражается на величине изменения температуры обсадной колонны и его влияние растет с увеличением времени нагрева. Так, увеличение термической активности среды за колонной с 1500 до

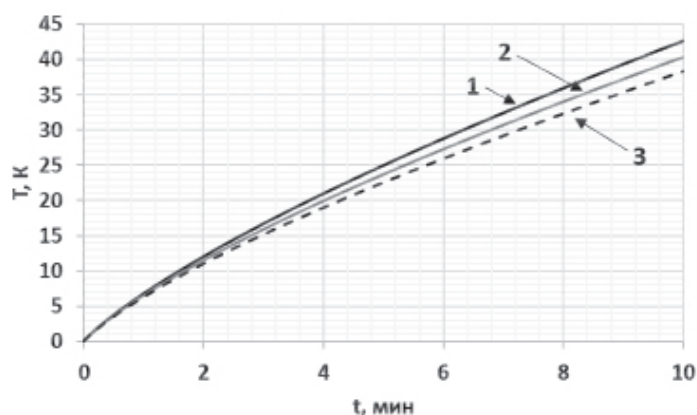


Шифр кривых — значение $b, \frac{1}{\sqrt{c}}$: 1 — 10^{-3} , 2 — 10^{-2} , 3 — 10^{-1} , 4 — 1

Curve code — value $b, \frac{1}{\sqrt{c}}$: 1 — 10^{-3} , 2 — 10^{-2} , 3 — 10^{-1} , 4 — 1

Рисунок 3. Зависимость функции $y(t)$ от времени t

Figure 3. Dependence of function $y(t)$ on time t



Шифр кривых — термическая активность внешней среды $\epsilon_3, \frac{Bm}{m^2 K} \sqrt{c}$:
1 — 1500, 2 — 1900, 3 — 2300

Curve code — thermal activity of the $\epsilon_3, \frac{W}{m^2 K} \sqrt{s}$: 1 — 1500, 2 — 1900, 3 — 2300

Рисунок 4. Изменение температуры обсадной колонны во времени

Figure 4. Casing temperature change over time

$2300 \frac{Bm}{m^2 K} \sqrt{c}$ привело к уменьшению величины нагрева колонны за 10 минут на целых 5 градусов и даже при 2-х минутном воздействии наблюдается уверенно регистрируемое различие в величинах изменения температуры.

Более сильная дифференциация термической активности в заколонном пространстве может быть обусловлена нарушением герметичности цементного кольца, вертикальным движением воды. Определение таких интервалов по исследованиям в стволе скважины и является основной задачей экологического мониторинга состояния пресноводных горизонтов.

Выводы

Использование активной термометрии, основанной на локальном индукционном на-

греве обсадной колонны, имеет перспективы для решения экологических задач по исследованиям простаивающих скважин. При мощности индуктора в 1 кВт даже при малых временах нагрева можно создавать и регистрировать температурные аномалии в обсадной колонне.

Величина нагрева колонны меняется в зависимости от изменения условий теплообмена, от изменения термической активности среды за колонной. Значительная дифференциация температуры по глубине скважины может быть обусловлена нарушением герметичности цементного кольца, движением пластовых вод и заколонным перетоком. Это создает предпосылки для использования метода активной термометрии для решения экологических задач на разрабатываемых нефтяных месторождениях.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Космылин Д.В., Давлетшин Ф.Ф., Исламов Д.В., Федотов В.Я., Гаязов М.С. Экспериментальное исследование теплового поля в скважине в процессе индукционного воздействия // Нефтегазовое дело. 2023. Т. 21, № 2. С. 56–64. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-2-56-64.
2. Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф., Сорокань В.Ю., Шилов А.А. Использование искусственных тепловых полей в скважинной термометрии // Каротажник. 2002. № 100. С. 124–137.
3. Шарафутдинов Р.Ф., Валиуллин Р.А., Федотов В.Я., Закиров М.Ф., Тихонов А.Г., Глебочева Н.К., Шувалов А.В., Шилов А.А. Опыт использования метода активной термометрии при диагностике состояния эксплуатационных скважин // Каротажник. 2010. Т. 193. № 4. С. 5–12.

4. Акчурин Р.З., Давлетшин Ф.Ф., Рамазанов А.Ш., Шарафутдинов Р.Ф. Тепловое поле в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны в условиях низкой скорости потока // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 2. С. 87–98. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3 807.

5. Давлетшин Ф.Ф., Исламов Д.Ф., Хабиров Т.Р., Гаязов М.С., Низаева И.Г. Изучение теплообменных процессов при индукционном нагреве обсадной колонны применительно к определению заколонных перетоков // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2023. Т. 9. № 1 (33). С. 60–77.

6. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи / 2-е изд., стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с.

7. Патент РФ № 2194160. МПК E21B47/06. Способ активной термометрии действующих скважин (варианты) / Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф., Рамазанов А.Ш. [и др.]. 2001102007/03, Заявлено 22.01.2001; Оpubл. 10.12.2002.

8. Пат. 2795225 РФ, E21B47/06. Способ определения работающих интервалов в действующих скважинах / Шарафутдинов Р.Ф., Валиуллин Р.А., Рамазанов А.Ш., Космылин Д.В. 2022120551, Заявлено 25.07.2022; Оpubл. 02.05.2023.

9. Рамазанов А.Ш., Давлетшин Ф.Ф., Акчурин Р.З., Шарафутдинов Р.Ф., Исламов Д.Ф. Динамика температуры в стволе скважины при локальном индукционном нагреве обсадной колонны // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64. № 2. С. 39–47. DOI: 10.15372/PMTF202215127.

10. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Ramazanov A.Sh., Shilov A.A. Enhancement of well productivity using a technique of high-frequency induction treatment // Society of Petroleum Engineers – SPE Heavy Oil Conference Canada. 2012. Paper No: SPE-157724-MS. DOI: 10.2118/157724-MS.

11. 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 // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition. 2012. Paper No: SPE-161982-MS. DOI: 10.2118/161982-MS.

12. Валиуллин Р.А., Шарафутдинов Р.Ф., Федотов В.Я., Космылин Д.В., Канафин И.В. Исследование температурного поля в скважине с индукционным нагревом колонны при наличии каналов заколонного перетока жидкости // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Т. 3. № 3. С. 17–28. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-3-17-28.

REFERENCES

1. Kosmylin D.V., Davletshin F.F., Islamov D.V., Fedotov V.Y., Gayazov M.S. Eksperimental'noe issledovanie teplovogo polya v skvazhine v processe indukcionnogo vozdejstviya [Experimental Study of the Thermal Field in the Well During Induction]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2023, Vol. 21, No. 2, pp. 56–64. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-2-56-64. [in Russian].

2. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Sorokan V.Yu., Shilov A.A. Ispol'zovanie iskusstvennyh teplovyh polej v skvazhinnoj termometrii [Use of Artificial Thermal Fields in Well Thermometry]. *Karotazhnik*, 2002, No. 100. pp. 124–137. [in Russian].

3. Sharafutdinov R.F., Valiullin R.A., Fedotov V.Ya., Zakirov M.F., Tikhonov A.G., Glebocheva N.K., Shuvalov A.V., Shilov A.A. Opyt ispol'zovaniya metoda aktivnoj termometrii pri diagnostike sostoyaniya ekspluatatsionnyh skvazhin [Experience in Using the Active Thermometry Method in Diagnosing the Condition of Production Wells]. *Karotazhnik*, 2010, Vol. 193, No. 4, pp. 5–12. [in Russian].

4. Akchurin R.Z., Davletshin F.F., Ramazanov A.Sh., Sharafutdinov R.F. Teplovoe pole v skvazhine pri indukcionnom nagreve obsadnoj kolonny v usloviyah nizkoj skorosti potoka [Thermal Field in the Well Under Induction

Heating of the Casing String Under Conditions of Low Flow Rate]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — News of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*, 2023, Vol. 334, No. 2, pp. 87–98. DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3807. [in Russian].

5. Davletshin F.F., Islamov D.F., Khabirov T.R., Gayazov M.S., Nizaeva I.G. Izuchenie teploobmennyyh processov pri indukcionnom nagreve obsadnoj kolonny primenitel'no k opredeleniyu zakolonnnyh peretokov [Study of Heat Exchange Processes During Induction Heating of the Casing String in Relation to The Determination of Behind-The-Casing Flows]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika — Bulletin of Tyumen State University. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2023, Vol. 9. No. 1 (33), pp. 60–77. [in Russian].

6. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teplopere-dachi* [Fundamentals of heat transfer]. 2nd Edition Stereotype. Moscow, Energiya Publ., 1977. 344 p.

7. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Ramazanov A.S. [et al.]. *Sposob aktivnoj termometrii dejstvuyushchih skvazhin (varianty)* [Method of active thermometry of existing wells (options)]. Patent RF, No. 2194160, 2002. [in Russian].

8. Sharafutdinov R.F., Valiullin R.A., Ramazanov A.S., Kosmylin D.V. *Sposob opredeleniya rabotayushchih intervalov v dejstvuyushchih skvazhinah* [Method for Determining Operating Intervals in Active Wells] Patent RF, No. 2795225, 2022. [in Russian].

9. Ramazanov A.S., Davletshin F.F., Akchurin R.Z., Sharafutdinov R.F., Islamov D.F. Dinamika temperatury v stvole skvazhiny pri lokal'nom indukcionnom nagreve obsadnoj kolonny [Wellbore Temperature Dynamics with Local Induction Casing Heating] *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Applied Mechanics and Technical Physics*, 2023, Vol. 64, No. 2, pp. 39–47. DOI: 10.15372/PMTF202215127. [in Russian].

10. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Ramazanov A.Sh., Shilov A.A. Enhancement of well productivity using a technique of high-frequency induction treatment. *Society of Petroleum Engineers – SPE Heavy Oil Conference Canada*, 2012, Paper No: SPE-157724-MS. DOI: 10.2118/157724-MS.

11. 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. *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Exploration and Production Technical Conference and Exhibition*, 2012, Paper No: SPE-161982-MS. DOI: 10.2118/161982-MS.

12. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Fedotov V.Ya., Kosmylin D.V., Kanafin I.V. Issledovanie temperaturnogo polya v skvazhine s indukcionnym nagrevo kolonny pri nalichii kanalov zakolonnogo peretoka zhidkosti [Study of the Temperature Field in a Well with Induction Heating of the String in the Presence of Behind-The-Casing Fluid Flow Channels]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika — Bulletin of Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy*, 2017, Vol. 3, No. 3, pp. 17–28. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-3-17-28. [in Russian].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Айрат Шайхуллинович Рамазанов, доктор технических наук, профессор кафедры «Геофизика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Ayrat Sh. Ramazanov, doctor of technical sciences, professor, Geophysics department, Ufa university of science and technology, Ufa, Russia

ramaz@geotec.ru

Рамиль Файзырович Шарафутдинов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Геофизика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Ramil F. Sharafutdinov, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Geophysics department, Ufa university of science and technology, Ufa, Russia

gframil@inbox.ru

Денис Фавилович Исламов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Геофизика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Denis F. Islamov, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Geophysics department, Ufa university of science and technology, Ufa, Russia

islamovden@rambler.ru

Руслан Зуфарович Акчурин, старший преподаватель кафедры «Геофизика», Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Ruslan Z. Akchurin, senior lecturer, Geophysics department, Ufa university of science and technology, Ufa, Russia

ac4urin.ruslan@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15.10.2023; одобрена после рецензирования 29.10.2023; принята к публикации 30.11.2023.

The article was submitted 00.00.2023; approved after reviewing 00.00.2023; accepted for publication 00.00.2023.