

УДК 532.546

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ В СКВАЖИНЕ ПРИ ЗАКОЛОННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ПРОЦЕССЕ ИНДУКЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Давлетшин Филлус Фанизович¹,
felix8047@mail.ru

Рамазанов Айрат Шайхуллович¹,
ramaz@geotec.ru

Акчурин Руслан Зуфарович¹,
ac4urin.ruslan@yandex.ru

Шарафутдинов Рамиль Фаизырович¹,
gframil@inbox.ru

Исламов Денис Фавилович¹,
islamovden@rambler.ru

¹ Уфимский университет науки и технологий,
Россия, 450074, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

Актуальность. Одним из перспективных методов промыслово-геофизических исследований скважин является активная термометрия. Технология проведения исследований данным методом включает локальный индукционный нагрев металлической обсадной колонны, регистрацию и анализ изменения температуры колонны. При некачественном цементировании скважин возможно возникновение потока жидкости в кольцевом пространстве между обсадной колонной и цементным кольцом (заколонного перетока). По каналу перетока в скважину поступает вода из непродуктивных пластов, что снижает рентабельность добычи нефти. В этой связи своевременное выявление и ликвидация заколонных перетоков является важной задачей эффективной эксплуатации скважин. При индукционном нагреве обсадной колонны в потоке жидкости, движущейся в канале заколонного перетока, благодаря теплообмену с нагретым участком колонны возникает тепловое возмущение, которое может быть использовано для выявления наличия перетока.

Объект: добывающая скважина, в которой проводятся исследования методом активной термометрии с помощью локального индукционного нагрева обсадной колонны.

Цель: разработка математической модели расчета теплового поля, вызванного индукционным нагревом участка металлической обсадной колонны, с учетом движения жидкости в кольцевом пространстве между обсадной колонной и цементным кольцом (заколонного перетока); получение аналитических решений для расчета температуры обсадной колонны и жидкости в канале перетока; исследование особенностей формирования температурного поля в колонне и жидкости в канале перетока в процессе индукционного нагрева, а также влияния расхода жидкости в канале перетока на тепловое поле в обсадной колонне.

Методы: метод интегрального преобразования Лапласа по времени и численный алгоритм Стеффеста с целью получения аналитических решений для расчета температурного поля; сравнение результатов расчетов по аналитической модели с результатами численного моделирования в программном пакете Ansys Fluent (Лицензия ANSYS Academic Research CFD в рамках договора с Башкирским государственным университетом от 15.06.2020).

Результаты. Методом интегральных преобразований Лапласа получены новые аналитические решения для расчета нестационарного поля температуры в скважине при индукционном нагреве участка металлической обсадной колонны с учетом потока жидкости в кольцевом пространстве между колонной и цементным кольцом. Исследованы особенности формирования температурного поля в процессе нагрева и после отключения индуктора, показано, что в течение 20 минут нагрева температурные возмущения в жидкости, движущейся в канале перетока, и обсадной колонне распространяются по направлению потока на расстояние более 2 м. Показано, что рост температуры колонны на расстояниях порядка 1–2 м выше интервала индукционного нагрева связан с теплоотдачей от нагретого флюида в канале заколонного перетока. Критерий роста температуры обсадной колонны на расстояниях 1–2 м относительно интервала индукционного нагрева может быть использован как признак заколонного движения жидкости. Исследовано влияние скорости (расхода) жидкости в канале перетока на характер формирования температуры колонны в процессе индукционного нагрева. Показано, что увеличение расхода жидкости в канале перетока при прочих равных условиях приводит к росту скорости распространения температурных возмущений в теле обсадной колонны, а также к снижению величины разогрева колонны вследствие роста интенсивности оттока тепла из интервала работы индуктора. Выполнено сравнение результатов расчетов по аналитической модели с результатами моделирования в программном пакете Ansys Fluent, установлено, что расчетные температуры колонны и жидкости несколько завышены по сравнению с численным решением в связи с применением упрощающих допущений в рамках аналитической модели.

Ключевые слова:

активная термометрия, индукционный нагрев, нестационарное температурное поле, преобразования Лапласа, алгоритм Стеффеста, тепловая метка, температурное возмущение.

Введение

Своевременный контроль работы скважин является важным условием обеспечения эффективной раз-

работки месторождений нефти и газа. Для мониторинга скважин широкое распространение получили геофизические методы исследования. Одним из

наиболее информативных методов геофизического контроля за разработкой является скважинная термометрия, основанная на измерении температуры в стволе скважины. Температурные эффекты, связанные с притоком жидкости из пластов в скважину, восходящими или нисходящими газожидкостными потоками в стволе скважины, могут быть успешно использованы для решения практических задач контроля за разработкой месторождений: выделения мест (интервалов глубин) притока флюида из пластов, оценки расхода флюида в стволе скважине, определения наличия заколонных перетоков за обсадной колонной [1, 2]. Схема течения пластовой жидкости в процессе работы скважины представлена схематично на рис. 1, а. На рис. 1, б показана геометрия задачи при математическом моделировании индукционного нагрева обсадной колонны, при этом в скважину в интервал исследования (между пластами 2 и 3) опускается скважинный прибор с индуктором – 9.

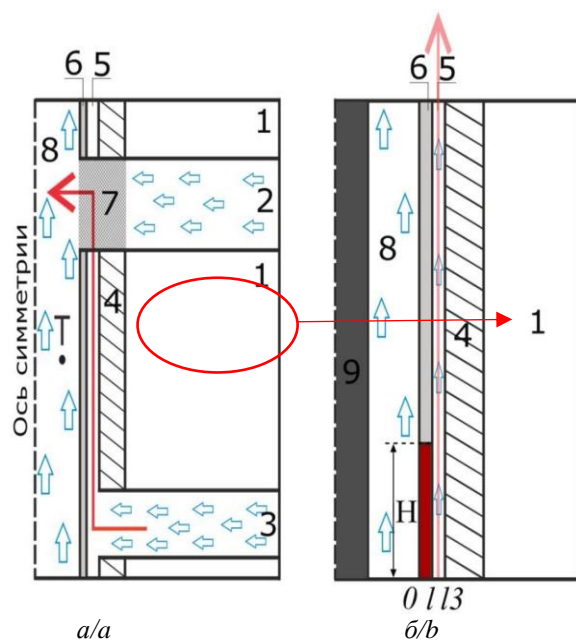


Рис. 1. а) схема движения жидкости при заколонном перетоке; б) геометрия задачи (H – длина участка индукционного нагрева, l – толщина обсадной колонны, l_3 – положение поверхности контакта «жидкость в канале перетока – цементное кольцо», стрелками показано направление движения жидкости); 1 – горные породы, 2 – перфорированный пласт, 3 – неперфорированный пласт, 4 – цементное кольцо, 5 – канал перетока, 6 – металлическая обсадная колонна, 7 – интервал перфорации, 8 – поток жидкости в обсадной колонне, T – датчик температуры

Fig. 1. a) diagram of liquid flow during the flow behind the column; b) geometry of the problem (H is the length of the induction heating section, l is the thickness of the casing, l_3 is the position of the contact surface «flow channel behind the column – cement ring», the arrows show the direction of fluid flow); 1 – rocks, 2 – perforated formation, 3 – non-perforated formation, 4 – cement ring, 5 – flow channel, 6 – metal casing, 7 – perforation interval, 8 – fluid flow in the casing, T – temperature sensor

Скважина представляет собой цилиндрическую горную выработку, вскрывающую пласты – 2 и 3. Выше и ниже проницаемых пластов 2, 3 залегают непроницаемые горные породы – 1. Цементное кольцо – 4 и обсадная колонна – 6 служат для укрепления стенок скважины. Обсадная колонна – 6 представляет собой последовательно соединенную колонну гладких труб круглого поперечного сечения. Интервал перфорации – 7 содержит специальные отверстия в обсадной колонне и цементном кольце, восстанавливающие гидродинамическую связь между пластом – 2 и скважиной после ее обсадки – спуска в скважину колонны обсадных труб и ее наружного цементирования. Пласт – 2 сообщается со скважиной благодаря перфорационным отверстиям – 7, пласт – 3 предполагается изолированным (как правило, изолируются водонасыщенные пласты, в которых нефть отсутствует). Ось скважины (цилиндра) совпадает с осью симметрии. Жидкость фильтруется через проницаемый пористый пласт – 2 и поступает в ствол скважины, формируя восходящий поток – 8, течение жидкости в стволе скважины ниже пласта – 2 обусловлено работой других пластов (не показаны на рисунке). При некачественном цементировании скважины возможно возникновение потока жидкости в кольцевом пространстве – 5 между цементным кольцом – 4 и обсадной колонной – 6. Поток жидкости в заколонном пространстве обозначают термином «заколонный переток», кольцевое пространство – термином «канал (заколонного) перетока». Вследствие наличия заколонного перетока жидкость из пласта – 3, который предполагалось изолировать (водонасыщенный пласт), поступает в ствол скважины. Увеличение доли воды в откачиваемой из скважины продукции снижает рентабельность добычи нефти, в этой связи своевременное выявление и ликвидация заколонных перетоков является важной задачей эффективной эксплуатации скважин.

Ограничением традиционной термометрии является малость регистрируемых температурных возмущений (сотые доли градуса). Перспективным направлением совершенствования традиционной термометрии является метод активной термометрии. Он основан на создании искусственного теплового поля в скважине, генерируемого скважинным индукционным нагревателем. Индукционное воздействие обуславливает нагрев участка металлической обсадной колонны. Благодаря процессам конвекции и теплопроводности при контакте с нагретым металлом разогреваются также жидкость в колонне и заколонном пространстве. При интенсивном кратковременном нагреве в жидкости создается тепловая метка, величина которой может достигать нескольких градусов. Регистрация и анализ температурных возмущений, связанных с движением тепловых меток, является основой решения важных практических задач, связанных с выявлением наличия заколонного перетока [3, 4].

Несмотря на наличие ряда практических приложений метода активной термометрии, на сегодняшний день отсутствуют теоретические основы для применения индукционного воздействия при диагностике

заколонных перетоков в скважинах. В имеющихся работах представлены лишь отдельные примеры выявления заколонных перетоков методом индукционного нагрева на промысловых примерах, даны общие рекомендации по проведению исследований [5–23].

В данной работе представлены новые аналитические решения для расчета температуры обсадной колонны и жидкости в заколонном пространстве в процессе индукционного нагрева, изучены особенности формирования нестационарного температурного поля при наличии заколонного перетока.

Математическая модель для расчета температурного поля в скважине при индукционном воздействии

Рассмотрим математическую постановку задачи для расчета нестационарного поля температуры в скважине при индукционном нагреве участка обсадной колонны длиной H (рис. 1, б). Скважинный прибор с индуктором рассматривается как однородный цилиндр из непроводящего материала (углепластика), из которого выполнен корпус индуктора для исключения его индукционного разогрева (обозначение 9 на рис. 1). Обсадная колонна и индуктор расположены концентрично. Индуктор расположен вдоль оси скважины по всей длине участка моделирования, активная часть с индукционным нагревателем имеет длину H . Полагается, что тепловыделение в колонне происходит равномерно вдоль участка нагрева H [6]. Учитывается наличие потока жидкости, движущегося с постоянным расходом Q_3 в кольцевом пространстве между обсадной колонной и цементным кольцом, – заколонного перетока (обозначение 5 на рис. 1) и потока жидкости в обсадной колонне с постоянным расходом Q (обозначение 8 на рис. 1). Поток жидкости как в обсадной колонне, так и в канале перетока движется вертикально вверх. Теплофизические свойства цементного кольца и горных пород полагаются одинаковыми. В модели для расчета нестационарного температурного поля пренебрегаем:

- теплопроводностью в вертикальном направлении в теле обсадной колонны и в жидкости, движущейся в обсадной колонне и канале перетока. Данное допущение применяется в связи с тем, что в потоке жидкости конвективный теплоперенос преобладает над кондуктивным. В обсадной колонне вертикальную составляющую теплопроводности не учитываем из-за малой толщины стенки колонны, вследствие чего площадь боковой поверхности обсадной колонны существенно превышает площадь ее поперечного сечения, благодаря чему и поток тепла через боковую поверхность колонны больше, чем через плоскость ее поперечного сечения;
- изменением температуры восходящего потока в обсадной колонне. Полагаем, что в связи с большим расходом и, соответственно, скоростью конвективного теплопереноса жидкость не успевает существенно нагреваться при прохождении интервала индукционного нагрева;
- теплоемкостью скважинного прибора с индуктором, в связи с тем, что корпус индуктора выполнен из углепластика (его удельная теплоемкость

равна порядка 900 Дж/(кг·К), что в несколько раз ниже теплоемкости жидкости в обсадной колонне (табл. 1), кроме того, полагаем, что ввиду большого расхода жидкости в обсадной колонне тепло от нагретого металла уносится потоком жидкости в ней и не доходит до индуктора);

- тепловым расширением жидкости (расчетное изменение плотности жидкости при изменении температуры на величину формируемых тепловых возмущений составило не более 1 %);
- изменением температуры горных пород в вертикальном направлении (интересующая область моделирования составляет по вертикали около 2–3 м, изменение естественной (геотермической) температуры в данном диапазоне глубин составляет не более 0,1 К [7]).

Пусть T_1 – температура жидкости в колонне; $T_2(x, z, t)$ – температура металлической колонны; $T_3(x, z, t)$ – среднемассовая температура жидкости в канале заколонного перетока; $T_4(x, z, t)$ – температура цемента и горных пород. Для тела обсадной колонны записывается уравнение теплопроводности с учетом теплового источника, обусловленного тепловыделением в колонне [8, 9]

$$C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \varphi(x, z, t), \quad 0 \leq x \leq l, \quad (1)$$

где $C_2 = \rho_2 c_2$ – объемная теплоемкость колонны; ρ_2, c_2, λ_2 – соответственно плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность материала колонны; $\varphi(x, z, t)$ – удельная на единицу объема мощность тепловыделения в колонне; l – толщина обсадной колонны. От $T_2(x, z, t)$ перейдем к средней по толщине колонны температуре

$$T(z, t) = \frac{1}{l} \int_0^l T_2(x, z, t) dx;$$

$$w(z, t) = \frac{1}{l} \int_0^l \varphi(x, z, t) dx, \quad (2)$$

С учётом (2) уравнение (1) перепишется как

$$l C_2 \frac{\partial T}{\partial t} = q(0, t) - q(l, t) + l w(z, t), \quad (3)$$

где тепловые потоки на границе металла с жидкостью $q(0, t)$ и потоком в заколонном пространстве $q(l, t)$ рассчитываются как [10]:

$$q(0, t) = -\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha (T_1 - T);$$

$$q(l, t) = -\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=l} = -\beta (T_3 - T), \quad (4)$$

где T – средняя по толщине температура металлической колонны; T_1 – среднемассовая температура жидкости в колонне; T_3 – среднемассовая температура жидкости в канале заколонного перетока; α, β – коэффициенты теплоотдачи.

Уравнение конвективного теплопереноса в жидкости, движущейся в заколонном пространстве [11, 12]:

$$A_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} + C_3 Q_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = 2\pi R \alpha (T - T_3) + 2\pi R_3 q_3, \quad (5)$$

где A_3 – площадь поперечного сечения потока; $C_3 = \rho_3 c_3$ – объемная теплоемкость жидкости, ρ_3 , c_3 – соответственно плотность, удельная теплоемкость жидкости; Q_3 – объемный расход жидкости в заколонном пространстве; R – внешний радиус обсадной колонны; R_3 – радиус поверхности контакта «жидкость в ЗКЦ – цемент»; q_3 – тепловой поток от жидкости в заколонном пространстве в цемент и горные породы, который рассчитывается из условия равенства тепловых потоков на границе «жидкость в ЗКЦ – цемент»:

$$q_3 = -\lambda_4 \left. \frac{\partial T_4}{\partial x} \right|_{x=l_3}, \quad (6)$$

где l_3 – линейная координата поверхности контакта «жидкость в ЗКЦ – цемент»; λ_4 – теплопроводность горных пород.

Линейный одномерный тепловой поток в цементе и горной породе рассчитывается из решения уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T_4}{\partial t} = a_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2}, \quad x > l_3, \quad (7)$$

где a_4 – температуропроводность цемента и горных пород.

Начальные и граничные условия (за вычетом начальной постоянной температуры): в момент времени $t=0$ температура в колонне равна начальной T_0 , соответствующей температуре восходящих потоков в обсадной колонне и канале заколонного перетока на входе в расчетную область

$$\begin{aligned} \theta_1 &= (T - T_0)|_{t=0} = 0; \\ \theta_3 &= (T_3 - T_0)|_{z=0} = 0; \\ \theta_3|_{t=0} &= (T_3 - T_0)|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Аналитическое решение

Для решения системы уравнений (3)–(8) применяется метод преобразований Лапласа [13]. Преобразования Лапласа выполняются по времени для уравнений (3), (5), (7). Изображения функций T , T_3 , T_4 обозначим как F , F_3 и F_4 соответственно. Решение для функции T_4 (уравнение (7)) в изображениях Лапласа (9) в предположении, что температура на границе «жидкость в канале перетока – цементное кольцо» соответствует среднemasсовой температуре жидкости в канале перетока F_3 , имеет вид [14]:

$$F_4(x, s, z) = F_3(s, z) e^{-\sqrt{\frac{s}{a_4}}(x-l_3)}. \quad (9)$$

В пространстве изображений уравнения (3) и (5) запишутся как:

$$\begin{aligned} lC_2 sF &= \alpha \left(\frac{\theta_1}{s} - F \right) + \beta(F_3 - F) + lw_L(s, z); \\ A_3 C_3 sF_3 + C_3 Q_3 \frac{\partial F_3}{\partial z} &= 2\pi R \alpha (F - F_3) - 2\pi R_3 \lambda_3 \sqrt{\frac{s}{a_4}} F_3, \end{aligned} \quad (10)$$

где w_L – функция с изображение w . Температуру жидкости в колонне (за вычетом начальной постоянной

температуры), аналогично (8), примем равной нулю $\theta_1=0$.

Из первого уравнения в (10) выразим F через F_3 :

$$\begin{aligned} F &= \frac{\beta}{B(s)} F_3 + \frac{lw_L(s, z)}{B(s)}; \\ B(s) &= \alpha + \beta + C_2 ls. \end{aligned} \quad (11)$$

Подставив (11) во второе из уравнений (10) и учитывая граничное условие (8), получим задачу Коши для функции $F_3(s, z)$:

$$\begin{aligned} \frac{dF_3}{dz} + A(s)F_3 &= D(s)w_L(s, z); \\ F_3|_{z=0} &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

где функции $A(s)$ и $D(s)$ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} A(s) &= \frac{1}{C_3 Q_3} \left(A_3 C_3 + 2\pi R \beta \left(1 - \frac{\beta}{B(s)} + \frac{\lambda_3 R_3}{R \beta} \sqrt{\frac{s}{a_4}} \right) \right); \\ D(s) &= \frac{2\pi R \beta l}{C_3 Q_3 B(s)}. \end{aligned}$$

Решение (12) ищем в виде функции

$$F_3 = C(z) e^{-A(s)z}. \quad (13)$$

Подставив (13) в (12), после несложных преобразований получим решение

$$F_3 = \begin{cases} \frac{D(s)w_L(s, z)}{A(s)} (1 - e^{-A(s)z}), & z \leq H; \\ \frac{D(s)w_L(s, z)}{A(s)} (e^{-A(s)(z-H)} - e^{-A(s)z}), & z > H, \end{cases} \quad (14)$$

где H – длина участка индукционного нагрева.

Решение в изображениях Лапласа для температуры обсадной колонны F запишется как

$$F = \frac{\beta}{B(s)} F_3 + \begin{cases} \frac{lw_L(s, z)}{B(s)}, & z \leq H; \\ 0, & z > H. \end{cases} \quad (15)$$

Для периода нагрева при постоянной удельной мощности тепловыделения на единицу объема $W(t)=W=\text{const}$ изображение w_L имеет вид $\frac{W}{s}$. В общем случае с учетом периода работы длительностью t_w и дальнейшей остановки работы индуктора изображение запишется как

$$w_L = \int_0^\infty W \gamma(t \leq t_w) e^{-st} dt = \frac{W}{s} (1 - e^{-st_w}).$$

Для получения оригиналов функций (14) и (15) используется численный алгоритм Стефеста [15].

Для контроля корректности полученного аналитического решения проведено сравнение результатов расчетов разогрева жидкости θ_3 в канале заколонного перетока после прохождения интервала индукционного нагрева H со строгим аналитическим решением. Аналитическое выражение для расчета максимального разогрева жидкости при прохождении интервала индуктора получено согласно следующим соображе-

нием: после достижения теплового равновесия в колонне все тепло, выделяемое индуктором, отводится жидкостью. Выделяемая за время dt энергия, передаваемая жидкости в канале заколонного перетока:

$$Wdt = c\theta_3 \cdot dm = c_3\theta_3\rho_3Q_3dt, \quad (16)$$

где m_3 , ρ_3 , c_3 – масса, плотность и удельная теплоемкость жидкости в канале перетока соответственно; Q_3 – объемный расход жидкости; θ_3 – изменение температуры жидкости при прохождении интервала индуктора. Из (16) получаем формулу для расчета максимального разогрева жидкости:

$$\theta_3 = \frac{W}{\rho_3 c_3 Q_3}. \quad (17)$$

Для достижения аналогичной постановки в полученном методом преобразований Лапласа аналитическом решении обнуляли: тепловой поток от нагретого металла потоку жидкости в обсадной колонне, а также поток тепла от жидкости в канале заколонного перетока цементному кольцу и горным породам (для этого коэффициенты α , λ_3 приравнивали нулю), длительность индукционного нагрева принимали достаточно большой (100 часов). Результаты расчета максимального нагрева жидкости в канале перетока в зависимости от мощности индукционного нагрева P , расхода жидкости в канале перетока Q_3 представлены на рис. 2. Получено, что отклонение результатов расчетов по аналитическим решениям (17) не превышает 0,2 %.

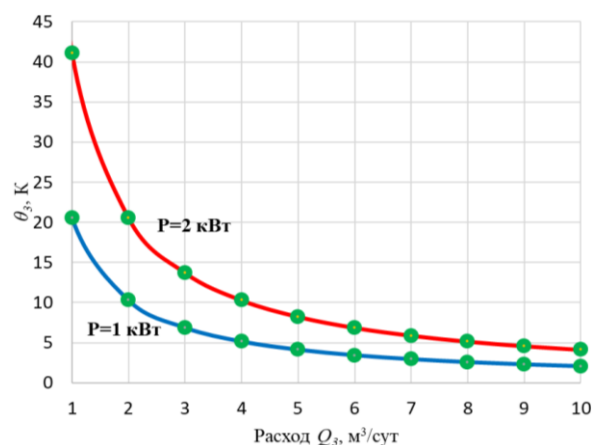


Рис. 2. Сравнение результатов расчетов максимального нагрева жидкости θ_3 в канале заколонного перетока (точки – строгое аналитическое решение, линии – аналитическое решение на основе преобразований Лапласа)

Fig. 2. Comparison of the results of calculations of the maximum heating of the liquid θ_3 in the flow channel (points are a strict analytical solution, lines are an analytical solution based on Laplace transformations)

Анализ результатов расчетов

Геометрия рассматриваемой задачи включает несколько зон: поток жидкости в колонне (с постоянной температурой), металлическая обсадная колонна, поток в канале заколонного перетока, цементное кольцо и горные породы с отличающимися свойствами (теп-

лопроводностью λ , удельной теплоемкостью c , плотностью ρ (табл. 1), параметры взяты при температуре 60 °С (NIST, 2022), соответствующей типичной температуре в скважине на глубинах порядка 1000–1500 м, в которых проводятся геофизические исследования). Свойства жидкости соответствуют воде, что обусловлено значительным содержанием воды в добываемых скважинах в связи с переходом месторождений на позднюю стадию разработки (для поддержания пластового давления, падающего по мере добычи нефти, в скважины и пласты закачивается большое количество воды).

Таблица 1. Теплофизические свойства среды

Table 1. Thermophysical properties of the medium

Материал/Material	λ Вт/(м·К) W/(m·K)	c Дж/(кг·К) J/(kg·K)	ρ кг/м ³ kg/m ³
Жидкость в колонне и заколонном пространстве (вода) Liquid in the string and annulus (water)	0,65	4185	983
Металл/Metal	50	500	8000
Цемент+горная порода Cement+rock	1,2	1000	2500
Углепластик (корпус индуктора, используется при численном моделировании в Ansys) Carbon fiber (inductor housing, used in numerical modeling in Ansys)	0,48	920	1500

Для расчета коэффициента теплоотдачи в работе используется следующая корреляция для числа Нуссельта (19) при вынужденной конвекции в трубе [16, 17]

$$\alpha = \frac{\lambda Nu}{d};$$

$$Nu = \begin{cases} 4,36, & Re \leq 2100; \\ Nu_{lam} + \frac{Nu_{turb} - Nu_{lam}}{Re_{turb} - Re_{lam}} (Re - Re_{lam}), & 2100 < Re < 10000; \\ 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3}, & Re \geq 10000, \end{cases} \quad (19)$$

где d – гидравлический диаметр; Nu , Re , Pr – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля соответственно; lam , $turb$ – ламинарный и турбулентный режимы соответственно; $Re_{lam}=2100$, $Re_{turb}=10000$, $Nu_{lam}=4,36$,

$$Nu_{turb} = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3} \Big|_{Re=10000};$$

$$Re = \frac{\rho Q d}{A \mu};$$

$$Pr = \frac{\mu c}{\lambda},$$

где μ , λ – динамическая вязкость и теплопроводность жидкости соответственно.

Принятые в расчетах параметры: внешний радиус обсадной колонны $R=73,5$ мм, толщина стенки колонны $l=10$ мм, радиус поверхности контакта «жидкость в ЗКЦ – цементное кольцо $R_3=74,5$ мм (что соответствует толщине канала перетока 1 мм), длина участка индукционного нагрева $H=0,4$ м, мощность индуктора, принимаемая равной мощности тепловыделения в колонне, $P=1$ кВт, длительность цикла

нагрева $t_w=20$ мин, длительность периода охлаждения (при выключенном индукторе) также равна 20 мин. Объемный расход жидкости в обсадной колонне $Q_1=25$ м³/сут, в канале перетока $Q_3=1$ м³/сут (данные значения расходов являются типичными для обводненных низкодебитных скважин). В общем случае расход в канале перетока зависит от диаметра канала перетока, перепада давления (разницы между пластовым давлением для пласта-источника перетока и давлением в скважине на глубине выхода в нее жидкости

из канала перетока), вязкости жидкости, длины канала перетока. Линейная скорость жидкости в обсадной колонне $v_1=0,03$ м/с, в канале перетока $v_3=0,025$ м/с, числа Рейнольдса Re равны соответственно 4360 (переходный режим течения) и 498 (ламинарный).

На рис. 3 показано формирование температурного поля в обсадной колонне и жидкости, движущейся в заколонном пространстве (жидкость в ЗКЦ), в процессе индукционного нагрева.

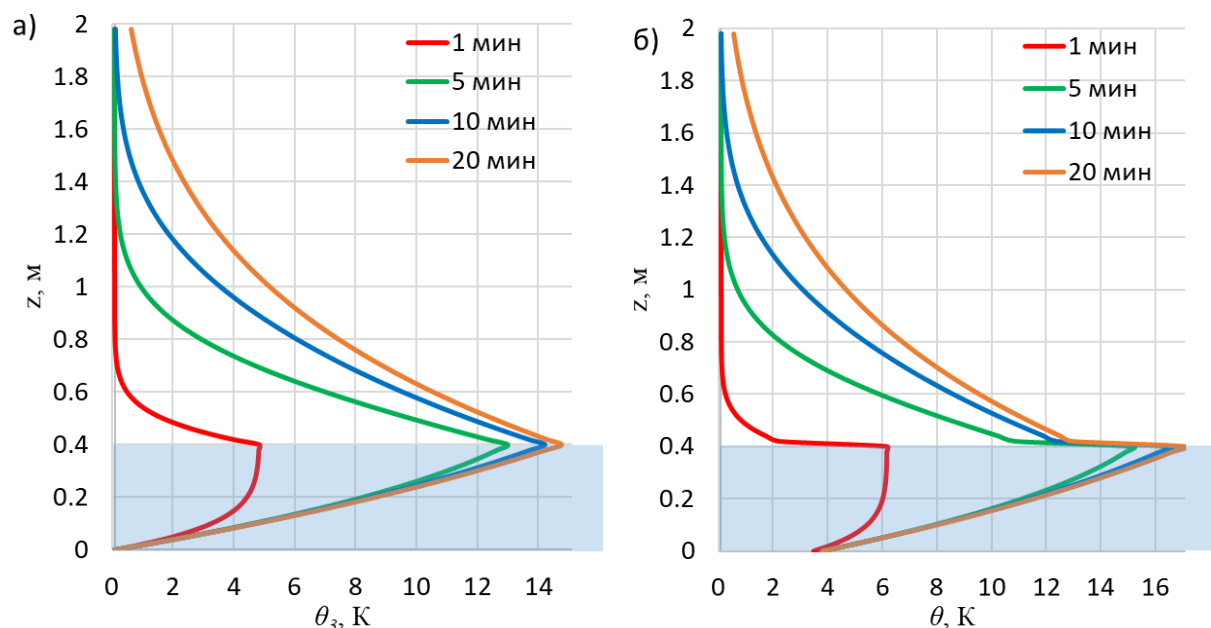


Рис. 3. Динамика распределения температуры в жидкости в канале перетока θ_z (а) и обсадной колонне θ (б) в процессе индукционного нагрева (шифр кривых – время после начала нагрева, цветом выделен интервал индукционного нагрева)

Fig. 3. Dynamics of temperature distribution in the liquid in flow channel θ_z (a) and casing θ (b) during induction heating (curve code – time after the start of heating, the induction heating interval is highlighted in color)

В течение 20 минут работы индуктора разогрев жидкости в заколонном пространстве и колонне достигает 14,6 и 17,0 К, соответственно. В процессе нагрева наблюдается «затяжка» температуры вверх: температурные возмущения не только в жидкости, но и в обсадной колонне распространяются по направлению потока на расстояние более 2 м, причем температурные кривые в жидкости и колонне хорошо согласуются друг с другом по форме. Передача тепла в жидкости обусловлена конвективным теплопереносом, в колонне же распространение возмущений тепла происходит за счет теплообмена с нагретым флюидом в канале заколонного перетока.

Динамика расформирования теплового поля в жидкости и колонне после остановки индукционного нагрева представлена на рис. 4. В процессе охлаждения температура обсадной колонны постепенно снижается за счет отвода теплоты восходящими потоками жидкости в колонне и канале перетока, в результате максимум температуры смещается вверх по потоку. Например, в колонне через 1, 5, 10, 20 мин положение максимума температуры (высота относи-

тельно верхней границы интервала нагрева 0,4 м) составляет 0, 0,48, 0,74, 0,78 м, соответственно, величины остальных температурных возмущений составляют соответственно 11,4, 4,0, 2,1, 0,8 К. Изменения температуры в колонне и жидкости близки по величине, что связано с малой теплоемкостью жидкости, движущейся в узком канале между обсадной колонной и цементом.

Приведенные выше расчеты показывают, что температура обсадной колонны в значительной степени чувствительна к температурным возмущениям в заколонном пространстве, возникающим, в свою очередь, благодаря передаче тепла в интервале индукционного нагрева от нагретого металла к жидкости в канале перетока. Интересен вопрос взаимосвязи скорости (расхода) жидкости в заколонном пространстве и характера формирования температуры колонны. На рис. 5 представлена динамика температуры колонны в процессе нагрева и после отключения индуктора на различных высотах относительно верхней границы интервала нагрева.

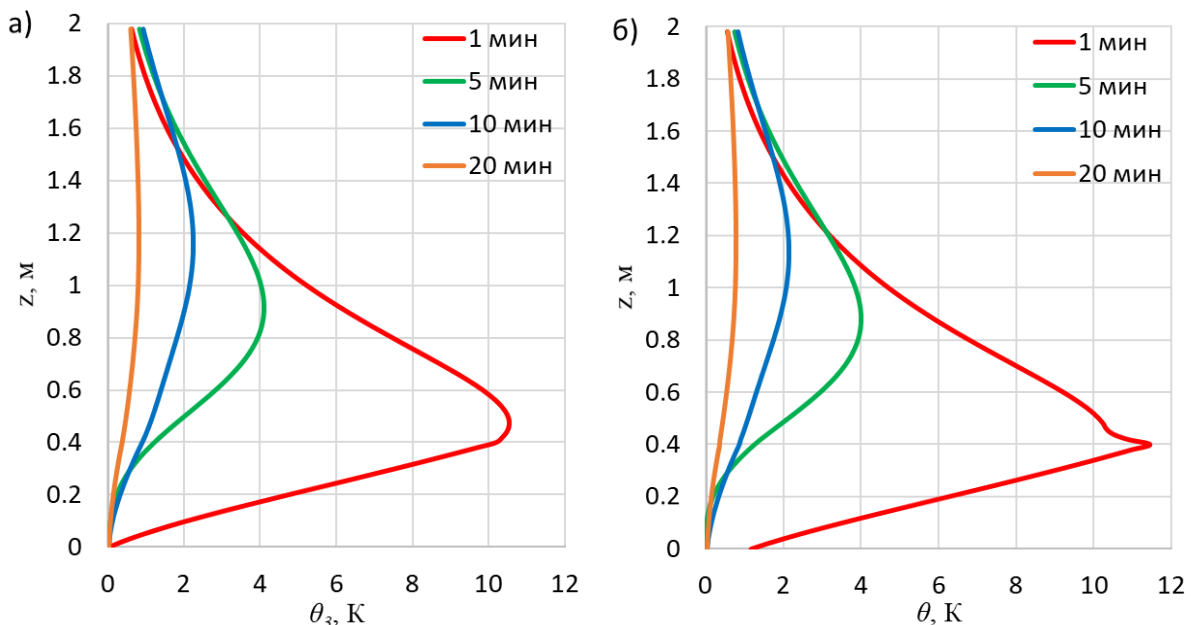


Рис. 4. Динамика распределения температуры в жидкости (а) и обсадной колонне (б) после остановки индукционного нагрева (шифр кривых – время после остановки нагрева)

Fig. 4. Dynamics of temperature distribution in the liquid (a) and the casing (б) after stopping induction heating (curve cipher – time after stopping heating)

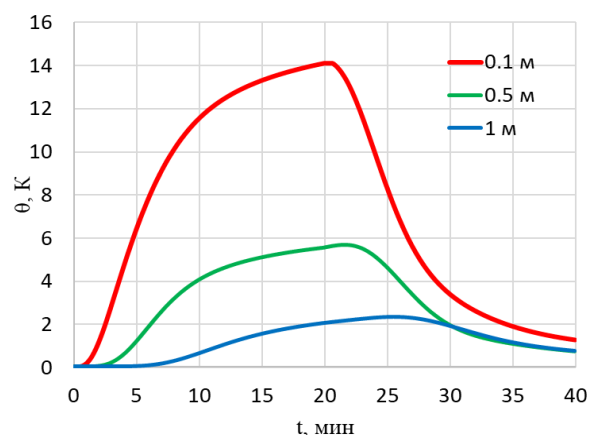


Рис. 5. Динамика температуры в колонне для различных точек выше интервала нагрева (шифр кривых – расстояние до верхней границы интервала нагрева)

Fig. 5. Temperature dynamics in the column for various points above the heating interval (curve cipher – distance to the upper limit of the heating interval)

Теплопроводность металла обсадной колонны равна около $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, за 5 мин (300 с) моделирования возмущения тепла вдоль колонны за счет теплопроводности распространяются на расстояние порядка $s = \sqrt{\pi \alpha t} = 0,1 \text{ м}$; за 20-минутный период нагрева фронт температурного возмущения, обусловленного теплопроводностью, проходит расстояние около 0,2 м. Выше показано, что возмущение тепла по колонне за счет теплоотдачи от потока нагретого флюида в канале перетока распространяется за 5 мин на расстояние порядка 1 м. Это показывает, что источником теплового возмущения в обсадной колонне на расстояниях порядка 1 м является поток в канале

перетока, что позволяет качественно использовать критерий роста температуры обсадной колонны на расстоянии 1–2 м выше интервала нагрева как признак заколонного движения жидкости. С точки зрения количественной оценки скорости потока в канале перетока ситуация сложнее: линейное расстояние, которое проходит поток жидкости в канале перетока за 5 мин, для рассматриваемого расхода в канале $Q_3 = 1 \text{ м}^3/\text{сут}$, составляет около 7,5 м. Таким образом, скорость распространения теплового возмущения существенно ниже линейной скорости потока в канале перетока, поскольку нагретому потоку в канале перетока выше интервала индукционного нагрева необходимо прогреть более холодные цементное кольцо, горные породы и обсадную колонну.

При увеличении расстояния до интервала нагрева величина температурных возмущений колонны снижается. Например, при увеличении расстояния до верхней границы интервала нагрева с 0,1 до 1 м максимальное изменение температуры колонны в процессе нагрева снижается с 11,2 до 2,3 К. В целом с увеличением расстояния до интервала нагрева отмечается запаздывание характера изменения температуры на кривых относительно друг друга, в частности, если на расстоянии 0,1 м температура колонны начинает снижаться практически сразу после отключения индуктора, то на расстояниях 0,5 и 1 м температура снижается только через 97 и 336 с, соответственно, после прекращения нагрева.

Увеличение расхода жидкости в канале перетока при прочих равных условиях (расход жидкости в обсадной колонне постоянен) приводит к росту скорости распространения температурных возмущений в колонне (рис. 6). Кроме того, при увеличении расхода жидкости в заколонном пространстве с 1 до $5 \text{ м}^3/\text{сут}$

максимальный разогрев колонны снижается с 5,6 до 2,9 К, поскольку возрастает интенсивность оттока тепла из интервала индукционного нагрева. Критерий изменения температуры колонны при изменении расхода в канале перетока потенциально можно использовать для решения обратных задач по оценке расхода жидкости в канале перетока по замерам температуры стенки обсадной колонны.

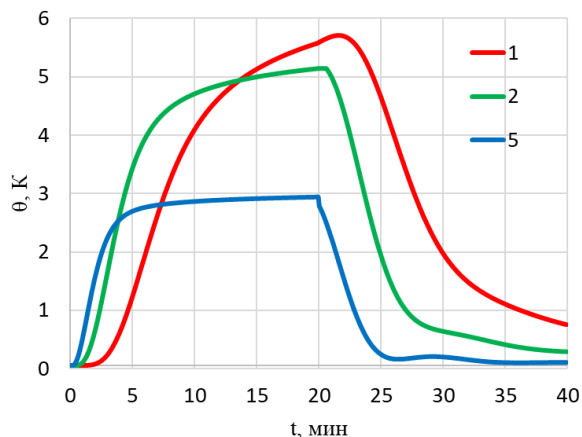


Рис. 6. Динамика температуры в колонне на 0,5 м выше интервала нагрева (шифр кривых – объемный расход жидкости в канале перетока, м³/сут)

Fig. 6. Temperature dynamics in the column is 0,5 m above the heating interval (the cipher of the curves is the liquid volume flow rate in the overflow channel, m³/day)

Расчеты с аналогичными параметрами (внешний радиус обсадной колонны $R=73,5$ мм, толщина стенки колонны $l=10$ мм, радиус поверхности контакта «жидкость в ЗКЦ – цементное кольцо $R_3=74,5$ мм (что соответствует толщине канала перетока 1 мм), длина участка индукционного нагрева $H=0,4$ м, мощность индуктора, принимаемая равной мощности тепловыделения в колонне, $P=1$ кВт, длительность цикла нагрева $t_w=20$ мин, длительность периода охлаждения (при выключенном индукторе) также равна 20 мин, объемный расход жидкости в обсадной колонне $Q_1=25$ м³/сут, в канале перетока $Q_3=1$ м³/сут, теплофизические параметры жидкости, обсадной колонны, свойства индуктора представлены в табл. 1) были выполнены с использованием CFD (Computational Fluid Dynamics) моделирования в программном пакете Ansys Fluent. При CFD моделировании учтено изменение температуры по радиусу и вертикали в жидкости, движущейся в колонне и канале заколонного перетока, металлической колонне, цементе и горных породах. Учитывается также вертикальная теплопроводность и теплоемкость индуктора. Начальная температура равна температуре на внешней границе модели и является постоянной величиной. На входе модели задается постоянная температура T и скорость потока v в колонне и канале заколонного перетока, на выходе задается граничное условие по давлению p . На остальных границах задается условие отсутствия теплового потока. В области индуктора, колонны, цемента и горных пород решается уравнение теплопровод-

ности (с учетом тепловыделения в колонне), для жидкости в колонне и канале заколонного перетока решаются уравнения Навье–Стокса для несжимаемой жидкости. Для численного решения уравнений Навье–Стокса используется метод (схема) PISO – алгоритм, входящий в семейство алгоритмов SIMPLE (в сравнении с SIMPLE он основан на более высокой степени приближенного соотношения между поправками на давление и скорость). Для пространственной дискретизации конвективных членов была выбрана схема QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics), которая имеет третий порядок точности на четырехугольных сетках. При расчете градиентов для вычисления диффузионных членов и производных скоростей используется способ Green-Gauss Node Based. Для вычисления градиента давления выбрана схема PRESTO!, которая используется для сильно закрученных течений и течений с большими градиентами. Для моделирования турбулентных течений в обсадной колонне используется модель переноса сдвиговых напряжений (SST k- ω) [18].

На рис. 7 приведено сравнение распределений температуры колонны и жидкости в канале перетока после двадцатиминутного индукционного нагрева, полученных по численной и аналитической моделям.

Видно, что кривые в целом хорошо согласуются друг с другом по форме, по аналитической модели температура колонны несколько выше, чем по численной, максимальная разница температур составляет около 2,1 К (19 %) для жидкости и 2,5 К (20 %) для колонны. Выше и ниже области максимальных тепловых возмущений кривые приближаются друг к другу, отклонения по температуре не превышают нескольких десятых долей К. Различие между кривыми можно объяснить неучетом вертикальной теплопроводности в металлической колонне по аналитической модели, приводящей к завышению температуры, использованием корреляций для описания теплообмена между металлом и потоками в колонне и заколонном пространстве, одномерных приближений уравнений теплопереноса.

Сопоставление результатов расчетов по аналитической модели с результатами CFD моделирования показывает, что полученные аналитические решения могут использоваться при прогнозном расчете температурного поля в стволе скважины в процессе индукционного нагрева при наличии заколонных перетоков, для оценки расхода жидкости в канале заколонного перетока.

Заключение

Получены новые аналитические решения для расчета нестационарного поля температуры в скважине при индукционном нагреве обсадной колонны с учетом наличия заколонного перетока в пространстве между колонной и цементным кольцом. Методом интегрального преобразования Лапласа по времени получены аналитические решения в изображениях для температуры обсадной колонны и жидкости в канале перетока, для нахождения оригиналов использован численный алгоритм Стефеста.

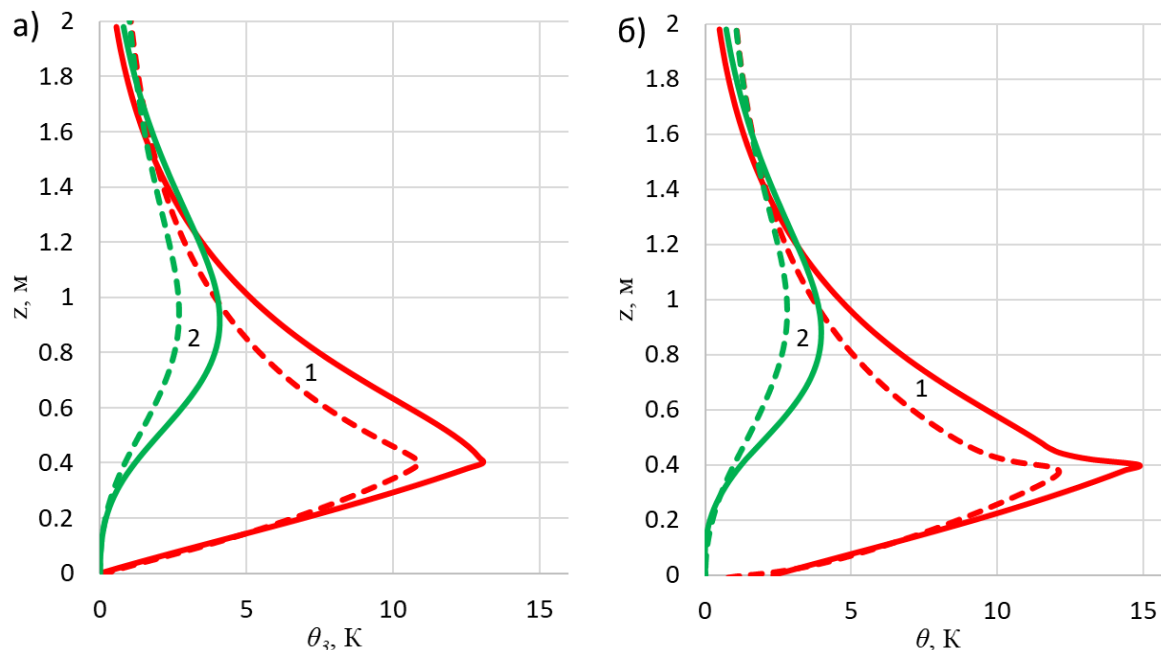


Рис. 7. Распределение температуры в жидкости (а) и колонне (б) через 10 с (1) и 5 мин (2) после остановки индукционного нагрева (сплошная линия – аналитическая модель, штриховая – CFD-расчет)

Fig. 7. Temperature distribution in the liquid (a) and the column (б) in 10 s (1) and 5 min (2) after stopping the induction heating (solid line – analytical model, dashed line – CFD calculation)

Исследованы особенности формирования нестационарного поля температуры в колонне и жидкости в процессе нагрева и после отключения индуктора. Показано, что в течение 20 минут работы индуктора температурные возмущения как в жидкости в канале перетока, так и в самой колонне распространяются вверх по потоку на расстояние более 2 м. За 20-минутный период нагрева фронт температурного возмущения, обусловленного теплопроводностью, проходит вдоль обсадной колонны расстояние около 0,2 м. Таким образом, рост температуры колонны на расстояниях порядка 1–2 м выше интервала индукционного нагрева связан не с кондуктивным теплопереносом вдоль колонны, а с теплоотдачей от нагретого флюида в канале заколонного перетока, что позволяет качественно использовать критерий роста температуры обсадной колонны как признак заколонного движения жидкости.

Исследовано влияние скорости (расхода) жидкости в заколонном пространстве на характер формирования температуры колонны в процессе индукционного нагрева, показано, что увеличение расхода жидкости в канале перетока при прочих равных условиях приводит к росту скорости распространения тепловых возмущений в колонне. Установлено, что увеличение расхода жидкости в канале перетока обуславливает снижение разогрева колонны вследствие роста интенсивности оттока тепла из интервала работы индуктора: для принятых при моделировании условиях при увеличении расхода в канале перетока от 1 до

5 м³/сут максимальный разогрев колонны снизился с 5,6 до 2,9 К. Чувствительность температуры колонны к расходу в канале перетока потенциально можно использовать для решения обратных задач по оценке расхода жидкости в канале перетока по замерам температуры стенки обсадной колонны.

Сравнение результатов расчетов по аналитической модели с результатами моделирования в программном пакете Ansys Fluent показало, что расчетные температуры колонны и жидкости несколько завышены по сравнению с численным решением, что связано с учетом вертикальной теплопроводности в колонне в рамках аналитического решения, а также с использованием корреляций для описания теплообмена между металлом и потоками в колонне и заколонном пространстве, одномерных приближений уравнений теплопереноса. Показано, что полученные аналитические решения могут использоваться при прогнозном расчете температурного поля в скважине в процессе индукционного нагрева колонны при наличии заколонных перетоков, для оценки расхода жидкости в канале перетока.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по теме: «Создание интеллектуальной комплексной технологии исследования и интерпретации данных промыслово-геофизических исследований скважин, включая оптоволоконные измерения для контроля за разработкой нефтегазовых месторождений ...», соглашение № 075-11-2021-061 от 25 июня 2021 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиуллин Р.А., Яруллин Р.К. Особенности геофизических исследований действующих горизонтальных скважин // Вест-
2. Ипатов А.И., Кременецкий М.И. Проблемы промыслово-геофизического контроля в условиях «новой экономической

ник Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – № 1. – С. 21–28.

- политики» // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2022. – Т. 37. – № 2. – С. 87–99.
3. Гаязов М.С., Валиуллин Р.А., Яруллин Р.К. Применение метода регулярных температурных меток для измерения фазовых расходов в низкодебитных горизонтальных скважинах // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 150–165.
4. Способ активной термометрии действующих скважин (варианты): пат. Рос. Федерации № 2194160, заявл. 22.01.2001; опубл. 10.12.2002. – 5 с.
5. 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. – Calgary, Alberta, Canada, 12–14 June 2012. – P. 1–7.
6. 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.
7. Turcotte D.L., Schubert G. Geodynamics. – Cambridge, England, UK: Cambridge University Press, 2002. – 187 p.
8. Fundamentals of heat and mass transfer. 8th ed. / Th.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. DeWitt. – St. Joseph County: University of Notre Dame, Indiana, USA, 2006. – 1070 p.
9. Теплообмен цилиндрического тела с каталитической поверхностью при обтекании потоком дозвуковой неравновесной воздушной плазмы / А.И. Брызгалов, С.А. Васильевский, А.Ф. Колесников, С.Е. Якуш // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2022. – № 5. – С. 94–112.
10. Марков А.А. Газодинамические и тепловые эффекты синтеза микронных частиц методом горения углерода в прямоточном и трехзонном реакторе // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2022. – № 3. – С. 17–29.
11. Hasan A.R., Kabir C.S. Fluid flow and heat transfer in wellbores. – Richardson: Soc. Petrol. Eng., 2002. – 175 p.
12. Ахметова О.В., Филиппов А.И., Шабаров А.Б. Температурное поле турбулентного потока в скважине с учетом зависимости теплоемкости от температуры // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56. – № 4. – С. 588–595.
13. Хабибуллин И.Л., Хисамов А.А. Нестационарная фильтрация в пласте с трещиной гидроразрыва // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2019. – № 5. – С. 6–14.
14. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
15. Порошина Н.И., Рябов В.М. О методах обращения преобразования Лапласа // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2011. – Т. 44. – № 3. – С. 55–64.
16. 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. – V. 39. – P. 1287–1295.
17. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
18. ANSYSR1 Documentation, Fluent Theory Guide. – Southpointe: ANSYS Inc, 2022. – 1036 p.
19. Application of active temperature logging at oilfields of Russia / R.F. Sharafutdinov, R.A. Valiullin, A.Sh. Ramazanov, V.Ya. Fedotov, A.A. Sadretdinov, 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.
20. Inverse model for the control of induction heat treatments / M.Z. Asadzadeh, P. Raninger, P. Prevedel, W. Ecker, M. Mücke // Materials. – 2019. – № 12. – P. 1–15.
21. 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. – V. 19. – № 3. – P. 292–302.
22. Experimental and numerical study of the effect of coil structure on induction nitriding temperature field / K. Song, J. Guan, J. Liu, K. Li // Advances in Mechanical Engineering. – 2020. – V. 12. – № 7. – P. 1–14.
23. Optimal control for a phase field model of melting arising from inductive heating / Z. Xiong, W. Wei, Y. Zhou, Y. Wang, Y. Liao // AIMS Mathematics. – 2021. – V. 7. – № 1. – P. 121–142.

Поступила: 19.10.2022 г.

Прошла рецензирование: 24.11.2022 г.

Информация об авторах

Давлетшин Ф.Ф., кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий.

Рамзанов А.Ш., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий.

Акчури Р.З., старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий.

Шарафутдинов Р.Ф., доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий.

Исламов Д.Ф., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологий.

UDC 532.542

INVESTIGATION OF THERMAL FIELD IN A WELL UNDER FLUID MOVEMENT UNDER INDUCTION IMPACT

Filyus F. Davletshin¹,
felix8047@mail.ru

Ayrat Sh. Ramazanov¹,
ramaz-1953@mail.ru

Ruslan Z. Akchurin¹,
ac4urin.ruslan@yandex.ru

Ramil F. Sharafutdinov¹,
gframil@inbox.ru

Denis F. Islamov¹,
islamovden@rambler.ru

¹ Ufa University of Science and Technology,
32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russia.

Relevance. One of the promising methods of field geophysical studies of wells is active thermometry. The technology of conducting research by this method includes local induction heating of a metal casing, registration and analysis of changes in the temperature of the column. In case of poor-quality cementing of wells, a liquid flow may occur in the annular space between the casing and the cement ring (column overflow). Through the flow channel, water from unproductive reservoirs enters the well, which reduces the profitability of oil production. In this regard, timely detection and elimination of backwater flows is an important task of efficient well operation. During induction heating of the casing string in the liquid flow moving in the channel of the column overflow, due to heat exchange with the heated section of the column, a thermal disturbance occurs, which can be used to detect the presence of overflow.

Object: a production well in which studies are carried out by the method of active thermometry using local induction heating of the casing string.

Purpose of the research is to develop a mathematical model for calculating the thermal field caused by induction heating of a section of a metal casing string, taking into account liquid movement in the annular space between the casing string and the cement ring (column overflow); obtain analytical solutions for calculating the temperature of the casing string and liquid in the overflow channel; investigate the features of temperature field formation in the column and liquid in the overflow channel in induction heating, as well as the effect of fluid flow in the flow channel on the thermal field in the casing.

Methods: method of the integral Laplace transformation in time and the numerical algorithm of Steffest in order to obtain analytical solutions for calculating the temperature field; comparison of the results of calculations based on an analytical model with the results of numerical modeling in the Ansys Fluent software package (ANSYS Academic Research CFD license, agreement with Bashkir State University dated 06/15/2020).

Results. By the method of integral Laplace transformations, new analytical solutions were obtained for calculating the non-stationary temperature field in a well during induction heating of a section of a metal casing string, taking into account the fluid flow in the annular space between the column and the cement ring. The peculiarities of temperature field formation during heating and after switching off the inductor are investigated, it is shown that during 20 minutes of heating, temperature disturbances in the liquid moving in the overflow channel and the casing string propagate in the direction of flow at a distance of more than 2 m. It is shown that an increase in the column temperature at distances of about 1–2 m above the induction heating interval is associated with heat transfer from the heated fluid in the channel of the column flow. The criterion for increasing the temperature of the casing at distances of 1–2 m relative to the induction heating interval can be used as a sign of the column motion of the liquid. The influence of liquid velocity (flow rate) in the flow channel on column temperature formation nature during induction heating is investigated. It is shown that an increase in fluid flow in the overflow channel, other things being equal, leads to growth of temperature disturbance propagation rate in the casing body, as well as to a decrease in the heating value of the column due to an increase in the intensity of heat outflow from the inductor operation interval. The results of calculations based on the analytical model are compared with the results of modeling in the Ansys Fluent software package, it is found that the calculated temperatures of the column and liquid are somewhat overestimated compared to the numerical solution due to the use of simplifying assumptions within the analytical model.

Key words:

active thermometry, induction heating, non-stationary temperature field, Laplace transforms, Steffest algorithm, thermal mark, temperature perturbation.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic: «Creation of an intelligent integrated technology for the study and interpretation of data from field and geophysical studies of wells...», Agreement no. 075-11-2021-061 dated June 25, 2021.

REFERENCES

1. Valiullin R.A., Yarullin R.K. Peculiarities of geophysical research in running horizontal wells. *Bulletin of the Academy of Sciences of Republic of Bashkortostan*, 2014, no. 2, pp. 21–28. In Rus.
2. Ipatov A.I., Kremenetsky M.I. Problems of field development control in the context of the «new economic policy». *Actual problems of oil and gas*, 2022. vol. 37, no. 2, pp. 87–99. In Rus.
3. Gayazov M.S., Valiullin R.A., Yarullin R.K. The method of regular temperature labels in measuring phase flow rates in low-flow horizontal wells. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2020, vol. 6, no. 1 (21), pp. 150–165. In Rus.
4. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Ramazanov A.Sh., Dryagin V.V., Adiev Ya.R., Shilov A.A. *Sposob aktivnoy termometrii deystvuyushchikh skvazhin (varianty)* [Method of active temperature logging of operating wells (versions)]. Patent RF, no. 2194160, 2002.
5. 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. Calgary, Alberta, Canada, 12–14 June 2012. pp. 1–7.
6. 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 Rus.
7. Turcotte D.L., Schubert G. *Geodynamics*. Cambridge, England, UK, Cambridge University Press, 2002. 187 p.
8. Bergman Th.L., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8th ed. St. Joseph County, Indiana, USA, University of Notre Dame, 2006. 1070 p.
9. Bryzgalov A.I., Vasilevskiy S.A., Kolesnikov A.F., Yakush S.E. Heat exchange of a cylindrical body with a catalytic surface when a subsonic nonequilibrium air plasma flows around. *Fluid Dynamics*, 2022, no. 5, pp. 94–112. In Rus.
10. Markov A.A. Gasdynamic and thermal effects of the synthesis of micron-sized particles by the carbon combustion method in straight-flow and three-zone reactors. *Fluid Dynamics*, 2022, no. 3, pp. 17–29. In Rus.
11. Hasan A.R., Kabir C.S. *Fluid flow and heat transfer in wellbores*. Richardson, Soc. Petrol. Eng., 2002. 175 p.
12. Akhmetova O.V., Filippov A.I., Shabarov A.B. The temperature field of the turbulent flow in the well, taking into account the dependence of the heat capacity on temperature. *High Temperature*, 2018, vol. 56, no. 4, pp. 588–595. In Rus.
13. Khabibullin I.L., Khisamov A.A. Non-stationary filtration in a formation with a hydraulic fracturing crack. *Fluid Dynamics*, 2019, no. 5, pp. 6–14. In Rus.
14. Carslaw G., Jaeger D. *Teploprovodnost tverdykh tel* [Thermal conductivity of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1964. 488 p.
15. Poroshina N.I., Ryabov V.M. Methods for Laplace transform inversion. *Vestnik of the St. Petersburg University: Mathematics*, 2011, vol. 44, no. 3, pp. 55–64. In Rus.
16. 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.
17. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 416 p.
18. *ANSYSR1 Documentation, Fluent Theory Guide*. Southpointe, ANSYS Inc, 2022. 1036 p.
19. 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, 16–18 October 2012. pp. 1–10.
20. Asadzadeh M.Z., Raninger P., Prevedel P., Ecker W., Mücke M. Inverse model for the control of induction heat treatments. *Materials*, 2019, no. 12, pp. 1–15.
21. 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.
22. Song K., Guan J., Liu J., Li K. Experimental and numerical study of the effect of coil structure on induction nitriding temperature field. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, vol. 12, no. 7, pp. 1–14.
23. Xiong Z., Wei W., Zhou Y., Wang Y., Liao Y. Optimal control for a phase field model of melting arising from inductive heating. *AIMS Mathematics*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 121–142.

Received: 19 October 2022.

Reviewed: 24 November 2022.

Information about the authors

Filyus F. Davletshin, Cand. Sc., assistant, Ufa University of Science and Technology.

Ayrat Sh. Ramazanov, Dr. Sc., professor, Ufa University of Science and Technology.

Ruslan Z. Akchurin, senior lecturer, Ufa University of Science and Technology.

Ramil F. Sharafutdinov, Dr. Sc., professor, Ufa University of Science and Technology.

Denis F. Islamov, Cand. Sc., senior lecturer, Ufa University of Science and Technology.