

УДК 532.542

## ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ В СКВАЖИНЕ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА

Акчури Р.З. Суффарович<sup>1</sup>,  
ac4urin.ruslan@yandex.ru

Давлетшин Филлюс Фанизович<sup>1</sup>,  
felix8047@mail.ru

Рамазанов Айрат Шайхуллович<sup>1</sup>,  
ramaz@geotec.ru

Шарафутдинов Рамиль Фаизирович<sup>1</sup>,  
gframail@inbox.ru

<sup>1</sup> Уфимский университет науки и технологии,  
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 в стволе скважины. В результате теплообмена с колонной в потоке жидкости, движущейся в скважине, создается тепловая метка, которая регистрируется температурными датчиками, расположенными в колонне по пути движения жидкости. Наблюдение за движением тепловых меток позволяет решать ряд важных практических задач, таких как определение объемного расхода флюида в стволе скважины, оценка дебита заколонного перетока. При низкой скорости потока разогрев колонны может привести к возникновению значительных градиентов температуры в жидкости, что обуславливает возникновение естественной тепловой конвекции. В этой связи актуальным является исследование тепловых процессов в скважине при индукционном нагреве с учетом естественной тепловой конвекции.

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

**Цель:** исследование особенностей формирования температурного поля в скважине в процессе индукционного нагрева обсадной колонны с учетом естественной тепловой конвекции при малом расходе потока в колонне.

**Методы:** численное моделирование в программном пакете Ansys Fluent (Лицензия ANSYS Academic Research CFD в рамках договора с Башкирским государственным университетом от 15.06.2020).

**Результаты.** Установлено, что разогрев колонны и жидкости вблизи ее поверхности достигает около 12 и 5 К соответственно, что способствует увеличению локальной скорости жидкости за счет влияния естественной тепловой конвекции. Выше интервала нагрева в жидкости наблюдается повторяющаяся структура потока, соответствующая образованию конвекционных ячеек. Построены кривые динамики температуры жидкости во времени на различном радиальном расстоянии от стенки колонны и различной высоте относительно интервала нагрева, по времени прихода тепловой метки выполнена оценка линейной скорости потока жидкости. Установлено, что расчетная скорость жидкости, определяемая по скорости движения тепловой метки, возрастает на величину 6 % и более относительно скорости ламинарного восходящего потока в отсутствие влияния естественной тепловой конвекции. Показано, что измерение температуры в центральной части потока позволяет более точно оценить расход жидкости в колонне, поскольку в пристеночных областях локальная скорость жидкости возрастает за счет естественных конвективных потоков.

### Ключевые слова:

Активная термометрия, метод температурных меток, естественная тепловая конвекция, скорость потока, Ansys Fluent, CFD-моделирование.

### Введение

Одним из ключевых условий обеспечения эффективной разработки нефтегазовых месторождений является непрерывный контроль работы скважин. Мониторинг скважин включает следующие задачи: определение мест (интервалов) притока флюида из пластов, оценка поинтервальных дебитов, определение источников обводнения скважинной продукции, связанных с заколонными перетоками жидкости из водонасыщенных горизонтов, негерметичностью обсадной колонны [1, 2]. Для решения этих задач применяется комплекс промыслово-геофизических методов исследования: термометрия, механическая и тер-

мокондуктивная расходомерия, барометрия, индукционная и дизелькометрическая влагометрия, акустическая шумомерия и другие методы [3, 4].

Нестационарная термометрия является одним из наиболее информативных методов промыслово-геофизических исследований. Она основана на измерении температуры в стволе скважины. Анализ конфигурации зарегистрированной температурной кривой (термограммы) и ее сопоставление с фоновым (начальным на момент начала исследований) распределением позволяет выделить на термограмме характерные участки (термоаномалии), связанные с притоком жидкости в скважину из пластов, движением жидкости в обсадной колонне и заколонном про-

странстве [5]. Однако зачастую величины естественных температурных аномалий оказываются незначительными, например, при низкой скорости флюида в скважине, что затрудняет их достоверную регистрацию существующей скважинной аппаратурой.

Перспективным методом, позволяющим расширить область применения традиционной термометрии, является активная термометрия, основанная на создании искусственного теплового поля в скважине. В качестве источника тепловой энергии используется скважинный индукционный нагреватель, осуществляющий локальный индукционный нагрев металлической обсадной колонны. Благодаря процессам конвекции и теплопроводности при контакте с нагретым металлом разогревается жидкость в колонне, цементное кольцо и околоскважинное пространство в интервале размещения индуктора. В процессе кратковременного индукционного нагрева в потоке жидкости, движущейся в обсадной колонне, создается тепловая метка. При наличии заколонного перетока тепловая метка создается также в потоке жидкости, движущейся в пространстве за обсадной колонной. Наблюдение за движением тепловых меток позволяет решать ряд важных практических задач, таких как определение объемного расхода флюида в стволе скважины, оценка дебита заколонного перетока [6].

Исследованию особенностей нагрева металлических деталей с помощью индукционного воздействия применительно к промышленным задачам посвящены работы [7–9]. Расчеты выполнены на основе комплексной математической модели, включающей как уравнения Максвелла для электромагнитного поля, так и уравнение теплопереноса с учетом теплового источника. Изучено влияние температурного градиента на характер выравнивания температурного профиля по объему нагреваемого изделия.

В работе [10] рассмотрены вопросы применения индукционного нагрева для прогрева призабойной зоны нефтегазоконденсатных скважин с целью повышения эффективности их работы. На основе численной модели получены распределения температуры и насыщенности конденсата при работе индукционного нагревателя. Показано, что повышение температуры за счет индукционного нагрева колонны является эффективным способом устранения закупорки конденсата и накопления жидкости в прискважинной зоне пласта.

Результаты экспериментальных исследований метода активной термометрии при определении объемного расхода жидкости в обсадной колонне представлены в работе [11]. Методика проведения исследований включает кратковременный нагрев обсадной колонны, после которого проводится серия замеров распределения температуры в скважине. Оценка объемного расхода потока в колонне выполняется на основе скорости прохождения тепловой метки, то есть динамики изменения ее положения, определяемого по пиковому значению на температурных кривых, зарегистрированных в различные моменты времени. Выполнена оценка расхода жидкости в скважине для конкретного промыслового примера, расход составил

около  $5 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Применение метода тепловых меток для оценки локальных скоростей различных сечений потока в горизонтальных скважинах при многофазных потоках рассмотрено в работе [12]. Показано, в частности, что наблюдение за движением тепловых меток в различных сечениях потока, регистрируемых распределенными датчиками температуры, позволяет определить линейную скорость водяной и нефтяной фазы в двухфазном потоке.

В работах [13, 14] предложена математическая модель для расчета нестационарного температурного поля в скважине при индукционном нагреве, основанная на уравнении теплопроводности с тепловым источником, учитывающим тепловыделение в колонне. Показано, что рассчитанные температурные возмущения в скважине (в частности, металлической обсадной колонне) могут достигать нескольких десятков градусов и определяются расстоянием от оси скважины, длительностью нагрева: наибольший нагрев наблюдается в колонне, наименьший – в потоке жидкости на оси скважины. Полученные в расчетах величины максимальных температур (колонны и жидкости) не совсем корректны, поскольку в математической модели не учитывается влияние естественной тепловой конвекции на формирование теплового поля в скважине, что приводит к завышению расчетной температуры жидкости и колонны. Рассмотрено применение технологии индукционного воздействия для нагрева призабойной зоны пласта с целью интенсификации добычи нефти, в частности, при добыче высоковязкой и парафинистой нефти.

Для обоснованного выбора параметров работы индукционного нагревателя (мощности теплового источника, длительности циклов нагрева и интервала времени между ними) на этапе планирования исследований важной задачей является прогнозирование температурных возмущений, возникающих в жидкости и обсадной колонне. Разогрев обсадной колонны при индукционном нагреве может составлять до нескольких десятков градусов, особенно при малой скорости потока в колонне, в результате чего в жидкости на границе с колонной возникают существенные градиенты температуры и плотности. В этих условиях на характер температурного поля значительное влияние оказывает естественная тепловая конвекция (ЕТК), однако в рассмотренных выше математических моделях индукционного нагрева ее вклад не учитывается. В данной работе тепловые процессы при индукционном нагреве с учетом ЕТК исследуются на основе численного CFD-моделирования в программном пакете Ansys Fluent.

#### Математическая модель индукционного нагрева

Решается задача расчета поля температуры в скважине при индукционном нагреве металлической обсадной колонны. Геометрия модели в осесимметричной 2D постановке показана на рис. 1, а. На рис. 1, б представлены граничные условия, используемые в модели. Расчетная область состоит из четырех различных зон с различными свойствами: индуктор, жидкость (восходящий поток), металлическая обсад-

ная колонна и цементное кольцо с горными породами. Цементное кольцо и горные породы имеют одинаковые свойства. Индуктор включает следующие основные элементы: немагнитная втулка, на которой закреплены ферритовые сердечники (ферритовые

кольца), на каждый сердечник намотана катушка из медной изолированной проволоки. Внешний корпус индуктора выполнен из немагнитного непроводящего материала (углепластик, карбон) для исключения индукционного разогрева корпуса прибора.

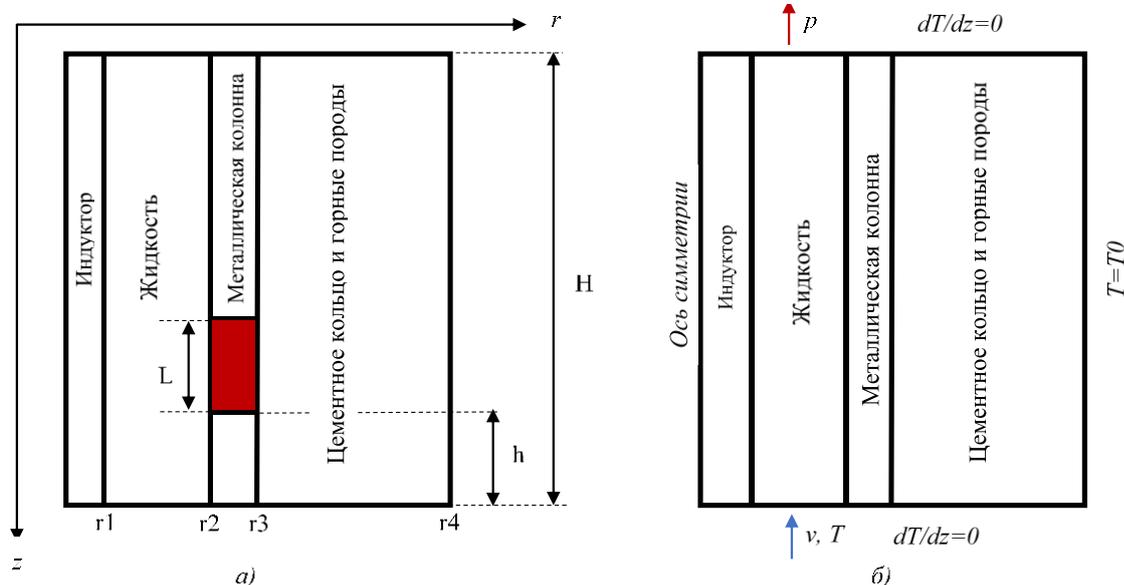


Рис. 1. а) геометрия задачи (цветом выделен интервал нагрева); б) граничные условия  
 Fig. 1. а) problem sketch (the heating interval is highlighted in color); б) boundary conditions

Допущения, принятые при моделировании:

- скважина вертикальная, обсадная колонна и скважинный прибор с индуктором расположены concentрично;
- рассматривается однофазный восходящий поток жидкости в колонне;
- жидкость предполагается несжимаемой, при этом учитывается изменение плотности жидкости в связи с изменением температуры в соответствии с приближением Буссинеска–Обербека;
- скважинный прибор с индуктором представлен в виде однородного сплошного цилиндра из углепластика, расположенного вдоль оси скважины по всей длине участка моделирования длиной  $H$ ;
- КПД индуктора равен 1 (вся мощность индуктора идет на тепловыделение в обсадной колонне).

При включении индуктора происходит нагрев участка металлической обсадной колонны длиной  $L$ . Ниже интервала нагрева моделируется участок скважины и длиной  $h$ . На рис. 1 показаны также радиусы элементов модели: внешний радиус индуктора  $r_1$ , внутренний и внешний радиусы обсадной колонны  $r_2$  и  $r_3$ , соответственно, внешний радиус области моделирования  $r_4$  (в расчетах принято  $r_1=21$  мм,  $r_2=63,5$  мм,  $r_3=73,5$  мм,  $r_4=1$  м,  $h=1,55$  м,  $H=6$  м,  $L=0,4$  м). Интервал нагрева располагается в диапазоне глубин 4,05–4,45 м.

Движение жидкости в скважине описывается уравнением Навье–Стокса в приближении Буссинеска–Обербека [15, 16]. Основная идея приближения состоит в учете зависимости плотности от температуры только при массовых силах. Жидкость при-

нимается несжимаемой, вязкость является величиной постоянной. Вызванные неоднородностью температуры отклонения плотности от среднего значения предполагаются достаточно малыми, так что ими можно пренебречь во всех уравнениях, кроме уравнения движения (1), где отклонение учитывается лишь в члене с подъемной силой [17]:

$$\rho_0 \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p' + \mu \Delta \vec{v} - \rho_0 \beta \vec{g} \theta. \quad (1)$$

Здесь  $\vec{v}$  – скорость течения, м/с;  $\beta$  – коэффициент теплового расширения,  $K^{-1}$ ;  $p$  – давление, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $\rho_0$  – плотность жидкости при равновесной температуре  $T_0$ ;  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\nabla$  – оператор Гамильтона;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\theta=T-T_0$  – изменение температуры жидкости относительно начальной  $T_0$ ;  $p'=p-p_0$  – давление в жидкости, возникающее вследствие действия потока жидкости (за вычетом гидростатической составляющей, т. е. обусловленное гидродинамическим трением);  $p_0=\rho_0 g z + p_w$  – начальное гидростатическое распределение давления (не учитывается в работе, т. е.  $p_0=const$ );  $p_w$  – давление в жидкости на верхней границе модели. Ось координат направлена вниз, против направления восходящего потока.

Уравнение движения дополняется уравнением неразрывности

$$\rho \nabla(\vec{v}) = 0.$$

Учет неоднородности плотности лишь в уравнении движения (1) означает некоторую нестрогость приближения Буссинеска. Однако сравнение резуль-

татов решения уравнений конвекции с обширным экспериментальным материалом с определенностью свидетельствует о том, что эти уравнения достаточно хорошо отражают все важнейшие особенности тепловой конвекции, возникающие в реальных условиях.

Передача теплоты в жидкости осуществляется за счет конвективного теплопереноса (естественного и вынужденного) и теплопроводности [17, 18]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \bar{v} \nabla (\theta) = a \Delta \theta.$$

Здесь  $a$  – температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Плотность жидкости линейно зависит от температуры:

$$\rho(\theta) = \rho_0 (1 - \beta \theta).$$

Распределение температуры в индукторе, обсадной колонне, горных породах и цементном кольце определяется нестационарным уравнением теплопроводности [19]:

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

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $w(z)$  – удельная мощность тепловыделения (тепловой источник присутствует в уравнении для колонны),  $\text{Вт}/\text{м}^3$ .

Начальная температура  $T_0$  совпадает с температурой на внешней границе модели и является постоянной величиной. Граничные условия для жидкости: на входе (нижняя граница) 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, рис. 1, б) задается условие равенства нулю производной температуры по радиальной координате  $r$ . На правой границе задается условие постоянства температуры горных пород  $T=T_0$ . На верхней и нижней границах в области индуктора, обсадной колонны и горных пород задается условие равенства нулю производной температуры по вертикальной координате  $z$ . Теплообмен на границах жидкость–индуктор, жидкость – обсадная колонна, обсадная колонна – горные породы обусловлен теплопроводностью и автоматически учитывается в Ansys Fluent. На границах жидкость–индуктор и жидкость – обсадная колонна задается условие прилипания, т. е. равенство нулю нормальной и касательной компонент скорости жидкости.

Термофизические свойства каждой зоны представлены в таблице.

Вязкость жидкости (воды)  $0,5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ , коэффициент теплового расширения  $0,00053 \text{ К}^{-1}$ . Свойства жидкости были взяты для температуры  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $333,15 \text{ К}$ ), принятой как начальная температура в модели и граничная температура жидкости на входе. Мощность индуктора (и соответственно мощность тепловыделения в колонне) составляет  $1 \text{ кВт}$ . Для верификации построенной модели выполнено сравнение результа-

тов расчетов в Ansys Fluent с данными экспериментальных замеров в стендовой скважине, получена удовлетворительная сходимость расчетов и экспериментальных данных.

**Таблица.** Термофизические свойства зон

**Table.** Thermophysical properties of zones

| Зоны<br>Zones  | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·К)<br>W/(m·K) | $c$ ,<br>Дж/(кг·К)<br>J/(kg·K) | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup><br>kg/m <sup>3</sup> |
|--|------------------------------------|--------------------------------|--|
| Углепластик (корпус индуктора)<br>Carbon fiber (inductor case) | 0,48                               | 920                            | 1500   |
| Жидкость (вода)/Liquid (water)                                 | 0,65                               | 4185                           | 983  |
| Металл (сталь)/Metal (steel)                                   | 50                                 | 500                            | 8000   |
| Цементное кольцо + горная порода<br>Cement sheath + rock       | 2                                  | 1000                           | 2500   |

### Анализ результатов расчетов

Рассматривается цикл работы индуктора, включающий 20-минутную фазу нагрева, и 20-минутную фазу охлаждения при отключенном индукторе (интервал времени между циклами нагрева). Объемный расход жидкости в обсадной колонне принят  $5 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Число Рейнольдса для восходящего потока жидкости рассчитывалось по формуле

$$\text{Re} = \frac{\rho_0 Q d}{A \mu},$$

где  $Q$  – объемный расхода жидкости;  $d$ ,  $A$  – гидравлический диаметр и площадь поперечного сечения потока, соответственно. Расчетное число Рейнольдса жидкости составляет 436, что соответствует ламинарному режиму течения.

Анализировались особенности формирования температуры в жидкости и в обсадной колонне, поскольку эти параметры регистрируются в процессе проведения исследований. На рис. 2 представлена картина распределения температуры в жидкости и в колонне в процессе нагрева. Величины температурных возмущений на приведенных ниже рисунках характеризуют изменение температуры  $\Delta T = \theta$  (разогрев) относительно начального значения. Наибольшие температурные возмущения наблюдаются в колонне в интервале индукционного нагрева, величина разогрева колонны достигает  $12,4 \text{ К}$ . Жидкость имеет максимальную температуру на границе со стенкой колонны.

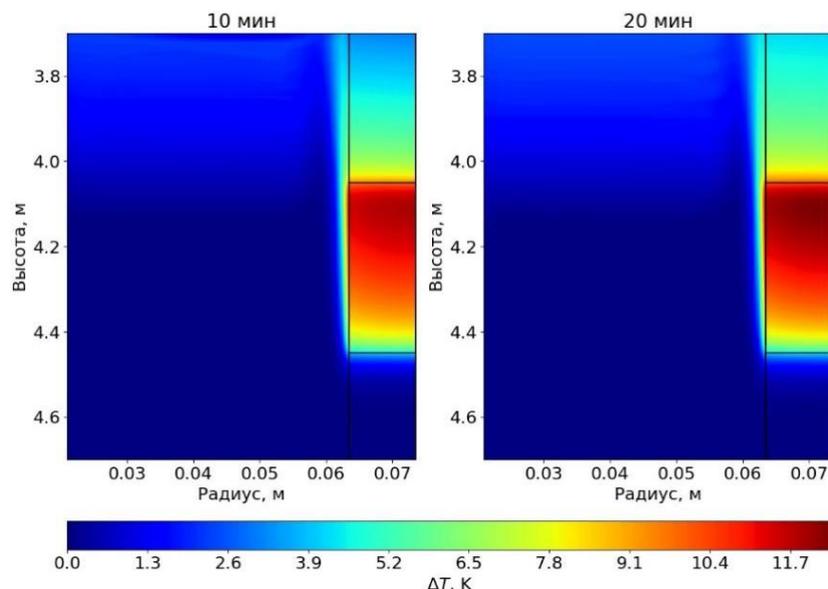
На рис. 3 детально показано температурное поле в жидкости через 10 и 20 мин после начала нагрева.

Максимальные температурные возмущения в жидкости локализованы в пристеночной области вблизи нагретой стенки колонны, их величина достигает  $5,7 \text{ К}$ . Следует отметить, что изменение плотности жидкости вследствие изменения ее температуры в указанном диапазоне составляет не более  $3 \text{ кг}/\text{м}^3$  (около  $0,3 \%$  от начальной плотности флюида  $\rho_0$ ).

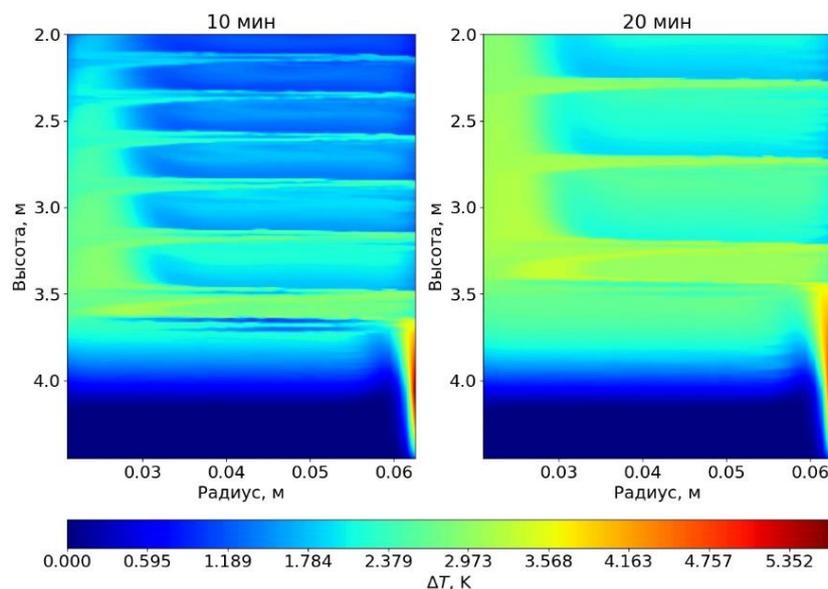
Сечения жидкости в диапазоне радиусов  $r=0,02-0,06 \text{ м}$  в интервале нагрева (интервале глубин  $4,05-4,45 \text{ м}$ ) практически не разогреваются, температурные возмущения не превышают  $0,01 \text{ К}$ . Выше интервала индукционного нагрева распределение температуры в жидкости носит выраженный немонотонный характер: если в интервале индукционного нагрева горячая

жидкость поднимается вверх вдоль стенки колонны, то выше интервала нагрева возникают радиальные конвективные потоки, и температурные возмущения наблюдаются в различных сечениях жидкости. Например, на границе жидкости с индуктором ( $r_1=0,021$  м) величина разогрева жидкости достигает 3,5 К. Подобная схема течения является характерной для конвекционных систем. В результате теплообмена более горячей (и легкой) жидкости с более холод-

ной (и тяжелой) жидкостью остывает и становится более плотной. Поскольку остывшая жидкость не может опускаться через восходящий поток нагретой жидкости, она перемещается в радиальном направлении, в результате образуются конвекционные ячейки [20]. Размер конвекционных ячеек, а также температура жидкости в них возрастают с увеличением длительности работы индуктора (рис. 3).



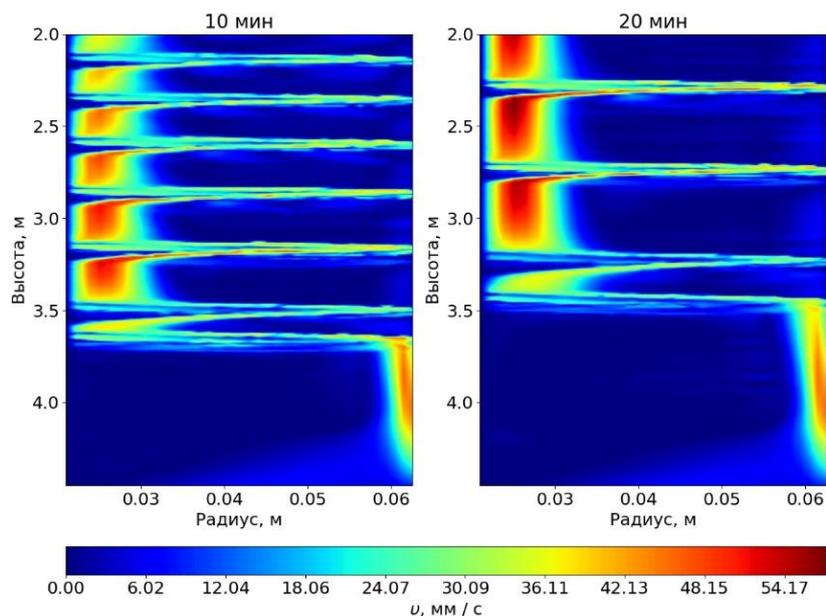
**Рис. 2.** Температура в системе колонна–жидкость при индукционном нагреве  
**Fig. 2.** Temperature in the column–liquid system during induction heating



**Рис. 3.** Температура жидкости в процессе индукционного нагрева  
**Fig. 3.** Liquid temperature during induction heating

Распределение модуля скорости жидкости (рис. 4) согласуется с картиной температурного поля. В интервале индукционного нагрева наибольшая скорость потока наблюдается в пристеночной области у обсадной колонны, выше интервала нагрева наблюдается повторяющаяся структура движения жидкости, соот-

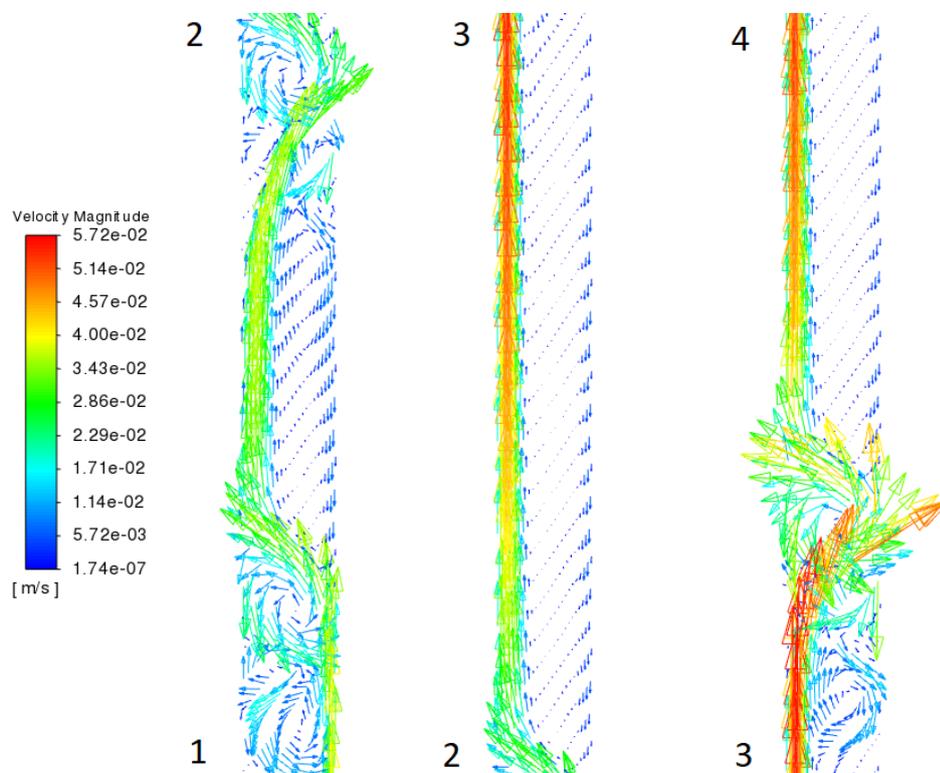
ветствующая образованию конвекционных ячеек. Линейная скорость движения жидкости достигает более 50 мм/с; для сравнения, средняя линейная скорость восходящего потока, соответствующая объемному расходу  $5 \text{ м}^3/\text{сут}$ , составляет 5,3 мм/с, что говорит о преобладании ЕТК в данных условиях.



**Рис. 4.** Модуль линейной скорости жидкости в процессе индукционного нагрева  
**Fig. 4.** Magnitude of liquid linear velocity during induction heating

Картина линий тока в жидкости через 20 минут после включения индуктора представлена на рис. 5. Периодическую структуру движения жидкости можно описать следующим образом: в интервале индукционного нагрева и выше, до глубины около 3,7 м, максимальная скорость жидкости отмечается вблизи стенки обсадной колонны, далее наблюдается область

интенсивного закручивания (завихрения) потока, причем основной подъем жидкости происходит уже у стенки индуктора, а вблизи колонны поток движется вниз. Выше по потоку отмечается образование областей вихревого движения в интервалах 3,4–3,6, 3,1–3,3, 2,8–3, 2,5–2,7 м и выше (рис. 4, 5).

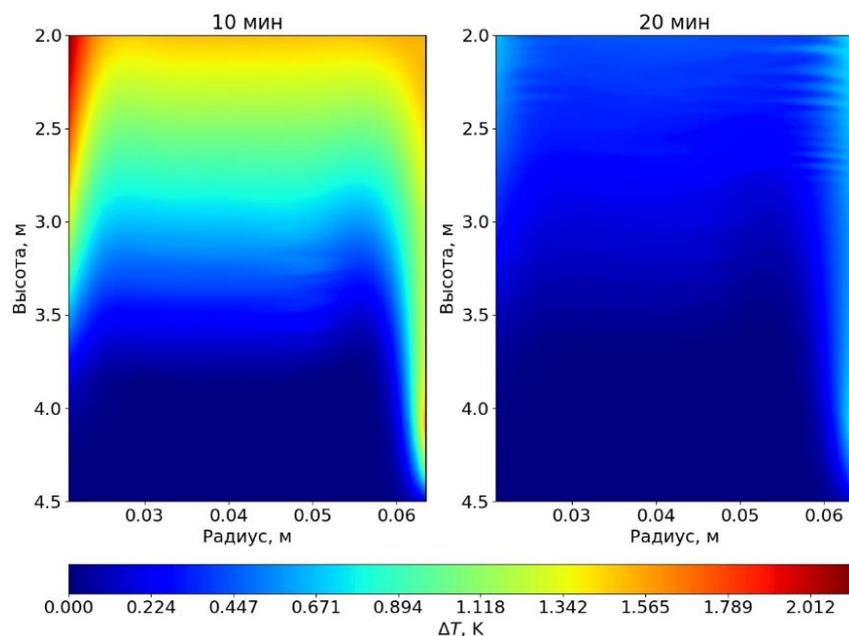


**Рис. 5.** Картина линий тока через 20 мин индукционного нагрева (глубины точек 1–4 равны 3,75; 3,5; 3,25; 3 м соответственно)

**Fig. 5.** Current lines in the liquid after 20 minutes of induction heating (the depths of points 1–4 are 3,75; 3,5; 3,25; 3 m, respectively)

Распределение температуры и линейной скорости жидкости после прекращения работы индуктора показано на рис. 6, 7. В процессе остывания температура обсадной колонны постепенно снижается за счет отвода теплоты восходящим потоком жидкости, в результате максимум температуры перемещается вверх по потоку (это хорошо видно на левом графике

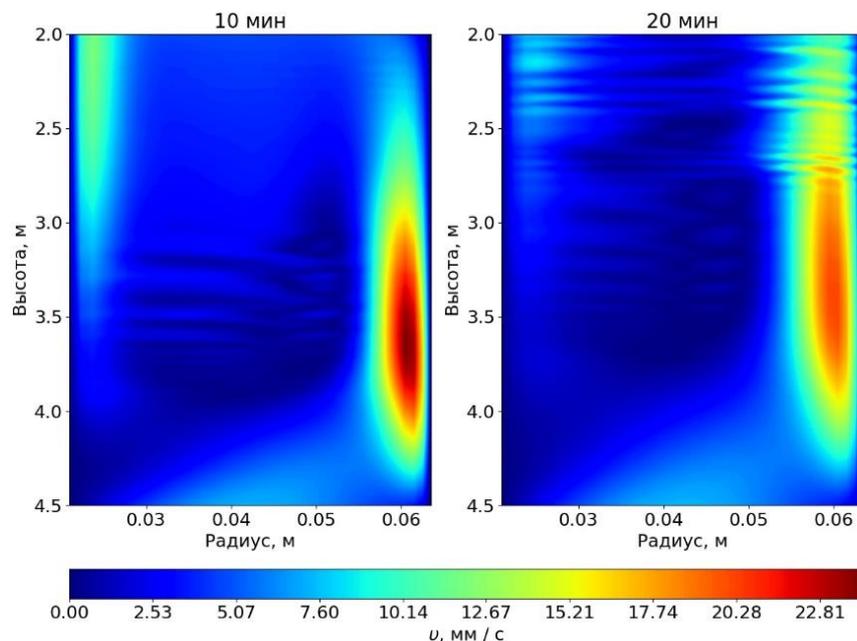
рис. 6). Следует отметить, что максимальная остаточная температура жидкости отмечается не на границе с обсадной колонной, а на границе с индуктором, через 10 и 20 мин она достигает 2,13 и 0,73 К, соответственно. Как видно из рис. 4, 5, это связано с особенностями радиального движения жидкости в конвекционных ячейках.



**Рис. 6.** Температура жидкости после остановки индуктора  
**Fig. 6.** Liquid temperature after stopping the inductor

Картина распределения скорости потока (рис. 7) показывает, что после остановки индукционного нагрева проявление ЕТК гораздо менее выражено, чем при работе индуктора, однако остаточные воз-

мущения поля скорости остаются значительными, особенно в пристеночной области вблизи обсадной колонны, линейная скорость жидкости в этой области достигает более 20 мм/с.



**Рис. 7.** Модуль линейной скорости жидкости после остановки индуктора  
**Fig. 7.** Magnitude of liquid linear velocity after stopping the inductor

Динамика во времени температуры жидкости на расстоянии 0,5 м выше интервала нагрева ( $h=3,55$  м) и различном радиальном расстоянии от стенки обсадной колонны показана на рис. 8. Температура жидкости растет во времени немонотонно для всех радиальных расстояний, причем кривые 1 и 2 в целом согласуются между собой, а динамика температуры жидкости на

границе со стенкой колонны (кривая 3) отстает по темпу от кривых 1 и 2, но после 14 минут начинает опережать. Для жидкости на границе со стенкой колонны отмечается максимальная температура в процессе нагрева, достигающая 3,5 К. Для кривых 1 и 2 можно отметить значительные колебания температуры величиной до 1 К, связанные с влиянием ЕТК.

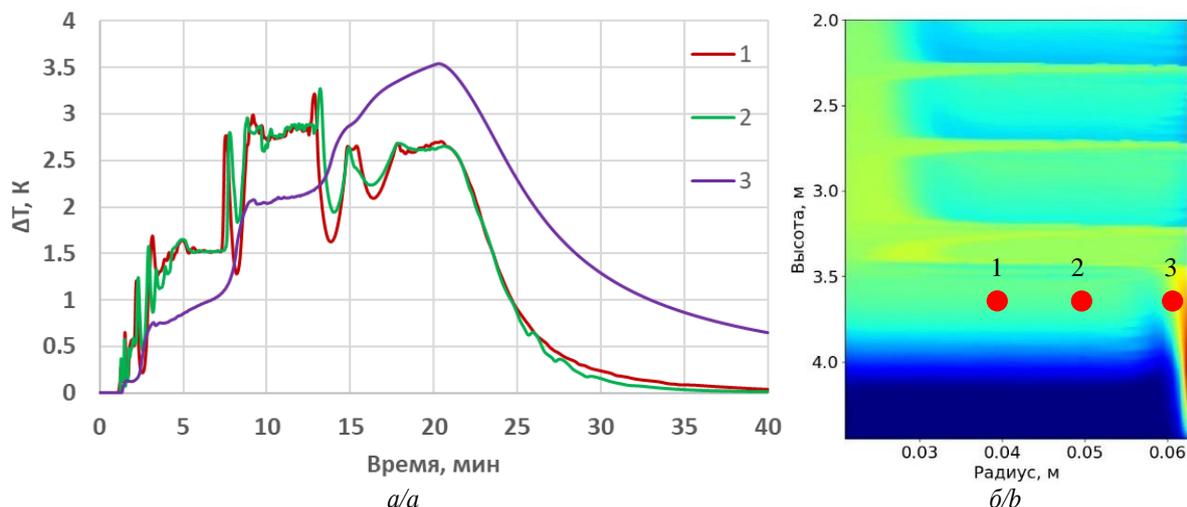


Рис. 8. а) динамика температуры на расстоянии 0,5 м выше интервала нагрева (1 – на радиальном расстоянии 20 мм от стенки обсадной колонны в жидкости, 2 – 10 мм, 3 – на внутренней стенке колонны); б) схема расположения точек

Fig. 8. a) temperature dynamics at a distance of 0,5 m above the heating interval (1 – at a radial distance of 20 mm from the casing wall in the liquid, 2 – 10 mm, 3 – on the inner wall of the column); б) location of points

На рис. 9 представлены кривые изменения во времени температуры жидкости на различном расстоянии выше интервала нагрева. Радиальная координата для точек наблюдения выбрана  $r=0,0435$  м (20 мм от стенки скважины). Характер поведения температуры существенно немонотонный, особенно в первые 5 минут после начала нагрева, на кривых наблюдаются значительные колебания температуры, амплитуда которых

составляет более 1,5 К. Для кривой 3 (на расстоянии 0,2 м выше интервала нагрева) через указанный промежуток времени колебания температуры практически прекращаются, при этом температура жидкости оказывается минимальной по сравнению с расстояниями 0,5 и 1 м (кривые 2 и 3). Это показывает, что влияние конвекции приводит к смещению максимума температуры жидкости вверх относительно интервала нагрева.

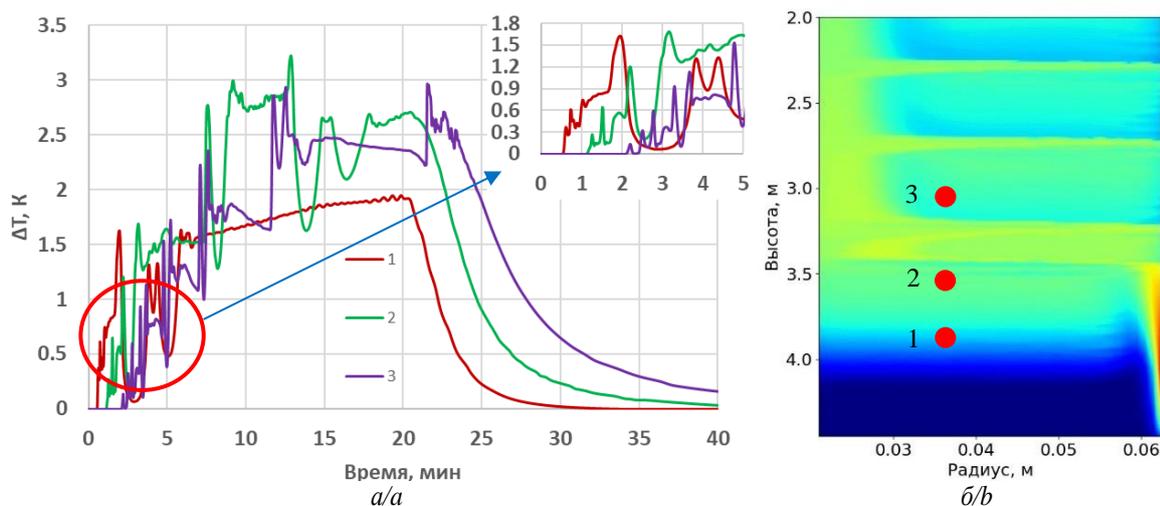


Рис. 9. а) динамика температуры жидкости (на радиальном расстоянии 20 мм от стенки скважины) на различных высотах (1 – 0,2 м выше интервала нагрева, 2 – 0,5 м, 3 – 1 м); б) схема расположения точек

Fig. 9. a) fluid temperature dynamics (at a radial distance of 20 mm from the well wall) at various heights (1 – 0,2 m above the heating interval, 2 – 0,5 m, 3 – 1 m); б) location of points

Динамика температуры в первые 5 минут после начала индукционного нагрева (график в правом верхнем углу рис. 9, а) показывает, что интервал времени прихода тепловой метки (определяемый по начальному участку роста температуры на кривых) возрастает по мере увеличения расстояния до интервала нагрева. Оцененная по скорости движения тепловой метки линейная скорость жидкости составила 8,3 мм/с, при этом в отсутствие ЕТК в ламинарном потоке жидкости скорость жидкости в данном сечении составляет 7,8 мм/с (на 6 % ниже).

Объемный расход жидкости в колонне рассчитывается следующим образом: вычисляется скорость движения тепловой метки  $u_T$  для данного вертикального сечения жидкости с радиальной координатой  $r_T$  (по началу участка роста температуры в точках, расположенных на различной высоте относительно интервала нагрева в этом сечении). Поскольку поправка к скорости жидкости за счет ЕТК неизвестна, объемный расход жидкости рассчитывается исходя из предположения о ламинарном режиме течения в колонне (при условии, что число Рейнольдса  $Re \leq 2300$  и соответствует ламинарному режиму течения). Решение уравнения Навье–Стокса для установившегося прямолинейного и осесимметричного движения жидкости в кольцевом пространстве между двумя концентрическими трубами (индуктором и обсадной колонной) имеет общий вид [21]

$$u(r) = u_m f(r, r_1, r_2), \quad (2)$$

где  $u$  – скорость жидкости в сечении с координатой  $r$ ;  $r_1, r_2$  – внешний диаметр корпуса индуктора и внутренний диаметр колонны соответственно,

$$u_m = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

– средняя скорость жидкости. Исходя из этой зависимости для температурного датчика, расположенного на известном радиальном расстоянии  $r_T$  от оси скважины, с учетом рассчитанного значения скорости тепловой метки  $u_T$  формула для оценки расхода жидкости в колонне примет с учетом (2) и (3) вид

$$Q = \frac{u_T A}{f(r_T, r_1, r_2)}. \quad (4)$$

Объемный расход жидкости по формуле (4) составил около 5,3 м<sup>3</sup>/сут, что достаточно близко к фактическому значению 5 м<sup>3</sup>/сут (на 6 % выше), рост скорости потока и расчетного расхода связан с влиянием естественной тепловой конвекцией.

Таким образом, можно сделать вывод, что метод активной термометрии применим даже в условиях значительного влияния ЕТК. В целом из рис. 4, 7 видно, что центральная часть потока жидкости лучше подходит для оценки расхода, поскольку в пристеночных областях наблюдаются значительные возмущения поля линейной скорости жидкости в условиях естественной конвекции.

## Заключение

1. Путем численного моделирования в программном пакете Ansys Fluent изучены особенности тепловых процессов индукционного нагрева обсадной колонны при малых значениях скорости и объемного расхода восходящего потока в колонне. Установлено, что для принятых в работе условий моделирования (мощность индуктора 1 кВт, длина участка нагрева 0,4 м, внешний диаметр индуктора 42 мм, поток воды в колонне внутренним диаметром 127 мм и толщиной стенки 10 мм, длительность циклов нагрева и интервал между ними 20 мин, объемный расход потока в колонне 5 м<sup>3</sup>/сут) разогрев колонны и жидкости достигает 12,4 и 5,7 К соответственно, причем максимальные температурные возмущения в жидкости локализованы в пристеночной области вблизи нагреваемой стенки обсадной колонны.
2. Установлено, что выше интервала нагрева в жидкости наблюдается повторяющаяся структура движения жидкости, соответствующая образованию конвекционных ячеек. Ввиду особенностей радиального движения жидкости в ячейках температурные возмущения наблюдаются в различных сечениях жидкости, в частности, на границе с индуктором величина разогрева жидкости достигает 3,5 К. Линейная скорость движения жидкости в условиях естественной тепловой конвекции достигает около 50 мм/с, что на порядок превышает среднюю скорость ламинарного восходящего потока в ее отсутствие (например, ниже интервала нагрева).
3. Построены кривые изменения во времени температуры жидкости в процессе индукционного нагрева для различных точек выше интервала нагрева, и отмечено наличие значительных колебаний температуры амплитудой 1–1,5 К и более, связанных с влиянием естественной тепловой конвекции. Выполнена оценка линейной скорости жидкости по динамике движения тепловой метки, она составила 8,3 мм/с для рассмотренного сечения, расположенного на радиальном расстоянии 20 мм от стенки скважины и на 0,5 м выше интервала индукционного нагрева. Расчетная скорость движения тепловой метки на 6 % выше скорости ламинарного восходящего потока в отсутствие влияния естественной тепловой конвекции. Показано, что центральная часть потока жидкости лучше подходит для оценки расхода жидкости, поскольку в пристеночных областях наблюдаются значительные возмущения скорости жидкости в условиях естественной тепловой конвекции.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по теме: «Создание интеллектуальной комплексной технологии исследований 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 // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – № 1. – С. 21–28.
2. Особенности проведения промыслово-геофизических исследований действующих горизонтальных скважин на Верхне-чонском нефтегазоконденсатном месторождении / Р.А. Валиуллин, Р.К. Яруллин, Я.И. Гордеев, С.О. Маслов // Каротажник. – 2012. – Т. 220. – № 10. – С. 12–29.
3. Informative value and interpretation reliability of wide frequency range acoustic noise technique in operating horizontal wells / R.K. Yarullin, R.A. Valiullin, A.R. Yarullin, D.N. Mihailov, V.V. Shako, M.M. Bikkulov // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 206619, SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, October 2021. – P. 1–14.
4. Water injection profiling using fiber optic sensing by applying the novel pressure rate temperature transient PTRa analysis / M. Al-Hashemi, D. Spivakovskaya, E. Moes, P. Panhuis, G. Hemink, V. Shako, D. Kortukov // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 204713, SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. – Moscow, November 2021. – P. 1–17.
5. Panarina E.P., Kremenetskiy M.I., Melnikov S.I. Quantitative inflow profile determination in unsable producers transient temperature potential // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 181981, SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, October 2016. – P. 1–15.
6. Опыт использования метода активной термометрии при диагностике состояния эксплуатационных скважин / Р.Ф. Шарафутдинов, Р.А. Валиуллин, В.Я. Федотов, М.Ф. Закиров, А.Г. Тихонов, Н.К. Глебова, А.В. Шувалов, А.А. Шилов // Каротажник. – 2010. – Т. 193. – № 4. – С. 5–12.
7. Smolyanov I., Tarasov F., Shvydkiy E. Numerical calculation of large-sized objects induction heating // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 950. – № 1. – P. 1–7.
8. 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.
9. 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.
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. – V. 19. – № 3. – P. 292–302.
11. Использование искусственных тепловых полей в скважинной термометрии / Р.А. Валиуллин, Р.Ф. Шарафутдинов, В.Ю. Со-рокань, А.А. Шилов // Каротажник. – 2002. – № 100. – С. 124–137.
12. 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.
13. 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, Canada, 12–14 June 2012. – P. 1–7.
14. 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.
15. Henkes R.A.W.M., Van der Flugt F.F., Hoogendoorn C.J. Natural convection flow in a square cavity calculated with low-Reynolds-number turbulence models // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1991. – V. 34. – P. 1543–1557.
16. Сухов С.А. Моделирование двумерной конвекции Рэлея–Хэдли // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2012. – № 3. – С. 32–37.
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
18. Fundamentals of heat and mass transfer. 8<sup>th</sup> ed. / Th.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. deWitt. – St. Joseph County, Indiana, USA: University of Notre Dame, 2006. – 1070 p.
19. 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.
20. Воронина А.В. Моделирование естественной конвекции у поверхности отработанных тепловыделяющих сборок в бассейне выдержки АЭС // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия I: Естественные науки. – 2020. – Т. 35. – № 1. – С. 27–34.
21. Бахтизин Р.Н., Давлетов М.Ш., Хакимов Т.А. Методика расчета нагрузок на колонну насосных штанг в насосной установке с выносным утяжелителем // Нефтегазовое дело. 2013. – Т. 11. – № 2. – С. 59–63.

Поступила: 10.08.2022 г.

Дата рецензирования: 17.09.2022 г.

## Информация об авторах

**Акчурина Р.З.**, старший преподаватель кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологии.

**Давлетшин Ф.Ф.**, ассистент кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологии.

**Рамазанов А.Ш.**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Уфимского университета науки и технологии.

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

UDC 532.542

## THERMAL FIELD IN THE WELL DURING INDUCTION HEATING OF THE CASING UNDER CONDITIONS OF LOW FLOW VELOCITY

Ruslan Z. Akchurin<sup>1</sup>,  
ac4urin.ruslan@yandex.ru

Filyus F. Davletshin<sup>1</sup>,  
felix8047@mail.ru

Ayrat Sh. Ramazanov<sup>1</sup>,  
ramaz-1953@mail.ru

Ramil F. Sharafutdinov<sup>1</sup>,  
gframil@inbox.ru

<sup>1</sup> Ufa University of Science and Technology,  
32, Zaki Validi street, Ufa, 450076, Russia.

**Relevance.** One of the promising methods of production logging of wells is active thermometry. The research technology of this method includes local induction heating of a metal casing, registration and analysis of temperature changes in the wellbore. As a result of heat exchange between the fluid moving in the well and the column, a thermal mark is created, which is recorded by temperature sensors located in the column along the path of the fluid movement. Monitoring the movement of heat marks allows solving a number of important practical tasks, such as determining the volume fluid flow rate in the wellbore, estimating the flow rate of the behind-the-casing flow. At a low flow rate, the heating of the column can lead to significant temperature gradients in the liquid, which causes the occurrence of natural thermal convection. In this regard, the study of thermal processes in wells with heating with natural convection turned on is relevant.

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

**Purpose** of the research is to study the features of temperature field formation in the well during induction heating of the casing, taking into account natural thermal convection at a low flow rate in the wellbore.

**Methods:** numerical simulation in the Ansys Fluent software package (ANSYS Academic Research CFD license, agreement with Bashkir State University dated 06/15/2020).

**Results.** It was found that heating the column and the liquid near its surface reaches more than 12 and 5 K, respectively, which contributes to an increase in the local velocity of the liquid due to the influence of natural thermal convection. Above the heating interval, a repeating flow structure is observed in the liquid, corresponding to the formation of convection cells. Curves of fluid temperature dynamics over time at different radial distances from the column wall and different heights relative to the heating interval are constructed, the linear velocity of the fluid flow is estimated by the time of arrival of the heat mark. It is established that the calculated velocity of the liquid, determined by the velocity of the heat mark, increases by an amount of 6 % or more relative to the velocity of the laminar upward flow in the absence of the influence of natural thermal convection. It is shown that measuring the temperature in the central part of the flow makes it possible to more accurately estimate the flow rate of the liquid in the column, since in the wall areas the local velocity of the liquid increases due to natural convective flows.

### Key words:

Active thermometry, temperature marks method, natural thermal convection, flow velocity, Ansys Fluent, CFD simulation.

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. Valiullin R.A., Yarullin R.K., Gordeev Ya.I., Maslov S.O. Peculiarities of field geophysical tests in running horizontal wells of the upper chonskoe oil and gas condensate field. *Logger*, 2012, vol. 220, no. 10, pp. 12–29. In Rus.
3. Yarullin R.K., Valiullin R.A., Yarullin A.R., Mihailov D.N., Shako V.V., Bikkulov M.M. Informative value and interpretation reliability of wide frequency range acoustic noise technique in operating horizontal wells. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 206619*, SPE Russian Petroleum Technology Conference. Moscow, October 2021. pp. 1–14.
4. Al-Hashemi M., Spivakovskaya D., Moes E., Panhuis P., Hemink G., Shako V., Kortukov D. Water injection profiling using fiber optic sensing by applying the novel pressure rate temperature transient PTR analysis *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 204713*, SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. Moscow, November 2021. pp. 1–17.
5. Panarina E.P., Kremenetskiy M.I., Melnikov S.I. Quantitative in-flow profile determination in unsable producers transient temperature potential. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 181981*, SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition. Moscow, Russia, October 2016. pp. 1–15.
6. Sharafutdinov R.F., Valiullin R.A., Fedotov V.Ya., Zakirov M.F., Tikhonov A.G., Glebocheva N.K., Shuvalov A.V., Shilov A.A. The experience of using the method of active thermometry in the diagnosis of the state of production wells. *Logger*, 2010, vol. 193, no. 4, pp. 5–12. In Rus.
7. Smolyanov I., Tarasov F., Shvydkiy E. Numerical calculation of large-sized objects induction heating. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 950, no. 1, pp. 1–7.
8. 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.
9. 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.
  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. Valiullin R.A., Sharafutdinov R.F., Sorokan V.Yu., Shilov A.A. The use of artificial thermal fields in borehole thermometry. *Logger*, 2002, no. 100, pp. 124–137. In Rus.
  12. 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.
  13. 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, 12–14 June 2012. pp. 1–7.
  14. 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.
  15. Henkes R.A.W.M., Van der Flugt F.F., Hoogendoorn C.J. Natural convection flow in a square cavity calculated with low-Reynolds-number turbulence models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, vol. 34, pp. 1543–1557.
  16. Sukhov S.A. Modeling of the two-dimensional Rayleigh-Hadley convection. *News from higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Natural Sciences*, 2012, no. 3, pp. 32–37. In Rus.
  17. Landau L.D., Lifshits E.M. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 736 p.
  18. Bergman Th.L., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 8<sup>th</sup> ed. St. Joseph County, Indiana, USA, University of Notre Dame, 2006. 1070 p.
  19. 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.
  20. Voronina A.V. Modeling of natural convection along the surface of spent fuel assemblies in the cooling pond of nuclear power plants. *Bulletin of Dagestan State University. Series 1: Natural Sciences*, 2020, vol. 35, no. 1, pp. 27–34. In Rus.
  21. Bakhtizin R.N., Davletov M.Sh., Khakimov T.A. Metodika rascheta nagruzok na kolonnu nasosnykh shtang v nasosnoy ustanovke s vynosnym utyazhelitelem [Method of calculating the loads on the rod string in a pump installation with external weighting]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2013, vol. 11, no. 2, pp. 59–63. In Rus.

Received: 10 August 2022.

Reviewed: 17 September 2022.

#### Information about the authors

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

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

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

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