

Рим Абдуллович ВАЛИУЛЛИН<sup>1</sup>  
Рамиль Файзырович ШАРАФУТДИНОВ<sup>2</sup>  
Владимир Яковлевич ФЕДОТОВ<sup>3</sup>  
Денис Владимирович КОСМЫЛИН<sup>4</sup>  
Ильдар Вакифович КАНАФИН<sup>5</sup>

УДК 536.242:550.360

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ  
В СКВАЖИНЕ С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ  
КОЛОННЫ ПРИ НАЛИЧИИ КАНАЛОВ  
ЗАКОЛОННОГО ПЕРЕТОКА ЖИДКОСТИ\***

<sup>1</sup> доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики,  
Башкирский государственный университет (г. Уфа)  
valra@geotec.ru

<sup>2</sup> доктор физико-математических наук, профессор кафедры геофизики,  
Башкирский государственный университет (г. Уфа)  
gframil@inbox.ru

<sup>3</sup> старший преподаватель кафедры геофизики,  
Башкирский государственный университет (г. Уфа)  
fedotov@geotec.ru

<sup>4</sup> аспирант кафедры геофизики,  
Башкирский государственный университет (г. Уфа)  
Kosmos.gweenblade@yandex.ru

<sup>5</sup> ассистент кафедры геофизики,  
Башкирский государственный университет (г. Уфа)  
vradlik@gmail.com

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-45-020193).

---

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

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-3-17-28

---

**Аннотация**

В работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований распределения температурного поля в физической модели, максимально приближенной к конструкции реальной нефтяной скважины, при индукционном нагреве колонны с учетом заколонного перетока жидкости. Индукционное воздействие на обсадную колонну приводит к возникновению тепловой метки в стволе скважины и в затрубном пространстве. Наблюдение за формированием, движением и расформированием тепловой метки позволяет определить каналы заколонного движения жидкости.

В работе приводится описание экспериментальной установки системы измерения температуры с распределенными датчиками температуры. Изучено влияние вынужденной конвекции на показания датчиков температуры с разным их расположением в скважине (прижатый к внутренней стенке колонны, по оси прибора). Показаны преимущества азимутального расположения датчиков температуры при измерении температурных аномалий заколонного движения жидкости. Установлено, что с помощью азимутально распределенного температурного зонда можно определить заколонный переток «сверху» при проведении измерений выше и ниже точки нагрева индуктора. Определены оптимальные промежутки времени измерения температуры, при котором выделение каналов заколонного движения жидкости наиболее эффективно.

**Ключевые слова**

Температурное поле, скважина, заколонный переток, индукционный нагрев, тепловая метка, зонд, конвекция, датчик температуры, сектор перетока.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-3-17-28**

**Введение**

Наиболее важной причиной обводнения скважин является формирование гидравлической связи между пластами, т. е. формирование заколонной циркуляции (ЗКЦ). Определение наличия ЗКЦ на данный момент является крайне актуальной задачей, так как существующие методы геофизических исследований скважин не всегда однозначно могут решить данную проблему, особенно при определении ЗКЦ выше продуктивного пласта и ЗКЦ ниже продуктивного пласта при коротких зумпфах.

Перспективным направлением по обнаружению ЗКЦ является развитие скважинной термометрии, а именно использование искусственных тепловых полей (метод активной термометрии, заключающийся в исследовании формирования теплового поля, создаваемого искусственным источником тепла, например, при индукционном нагреве колонны) [3, 4]. Данная технология прошла испытания, которые показали ее эффективность и необходимость дальнейших исследований по оценке влияния на регистрируемую температуру тепловой конвекции и возможности диагностики канала ЗКЦ. Исследования показали, что измерения для определения ЗКЦ выше продуктивного пласта необходимо делать ниже индуктора как минимум на 40 см, так как вблизи индуктора на показания датчиков сильно влияет тепловая конвекция [1].

В статье [2] приведено описание разработанной аппаратуры метода «активная термометрия» для проведения геофизических исследований скважин, при этом в скважинном зонде используется классическое расположение датчиков температуры по оси прибора, которое не дает возможности определить каналы ЗКЦ. Расположенные таким образом датчики больше подвержены влиянию тепловой конвекции, при этом изменение скорости и состава флюида может быть оценено как наличие ЗКЦ.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований температурного поля в скважине при наличии ЗКЦ, описана разработанная конструкция температурного зонда, позволяющая минимизировать влияние тепловой конвекции и повысить эффективность выделения ЗКЦ.

### Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на максимально приближенной к реальной нефтегазодобывающей скважине физической модели (рис. 1). Модель подробно описана в работе [1].

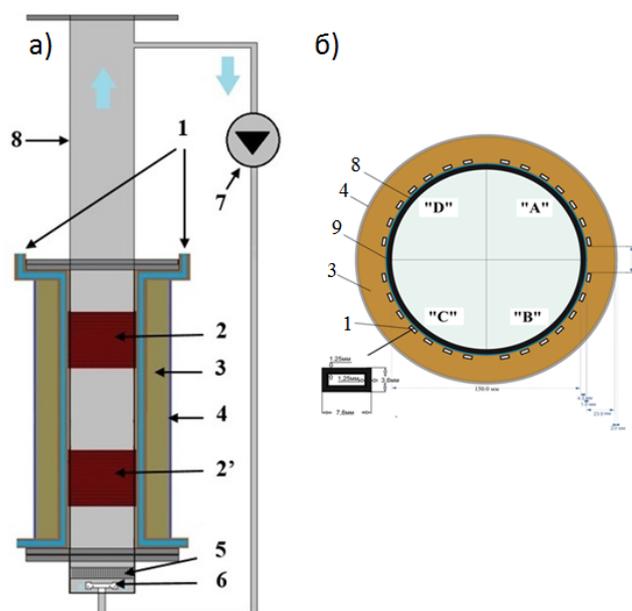


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Шифр: 1 — медные трубки; 2 — верхний индуктор; 2' — нижний индуктор; 3 — имитация горной породы; 4 — полиэтиленовая изоляция; 5 — линейризатор; 6 — распределитель потока; 7 — насос; 8 — стальная колонна; 9 — электроизолятор

Fig. 1. Scheme of the experimental setup:

1 — copper tubes;  
2 — upper inductor;  
2' — lower inductor;  
3 — imitation of rock;  
4 — polyethylene insulation;  
5 — linearizer;  
6 — flow distributor;  
7 — pump; 8 — steel column;  
9 — electrical insulator

Для измерения распределения теплового поля в модели был разработан температурный зонд (рис. 2). Он представляет собой полипропиленовую трубу (1). На ней закреплены по 12 железных пластинок (2) шириной 4 мм. Пластины с обоих концов припаяны термопистолетом к трубкам (3) большего размера. Расстояние между пластинками рассчитано так, чтобы угол между ориентированными датчиками был  $30^\circ$ . Пластины прижимаются к стенке скважины при помощи пружинки (4), установленной в нижней части крепления. На трубе (1) сделаны специальные отверстия (5), сквозь которые будут продеты датчики температуры. Они плотно припаяны к внутренней стенке пластины.

В качестве датчиков температуры используются миниатюрные термопары (КХТА 01.02) как наиболее стабильные и не требующие подгонки датчики. Регистрация изменения температуры базируется на измерительном модуле от компании National Instruments — NI-9214, позволяющем одновременно подключать до 16 термопар. Основное шасси содержит 4 таких модуля. Таким образом, система регистрации позволяет одновременно считывать данные с 64 термопар.

Были проведены экспериментальные исследования с помощью изготовленного температурного зонда. Эксперимент протекал при следующих условиях:

- переток «сверху» (сектор «А», «В»), дебит перетока  $Q = 6,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;
- жидкость в колонне неподвижна;
- мощность индуктора 800 Вт;
- уровень датчиков расположен выше кровли индуктора на 20 см;

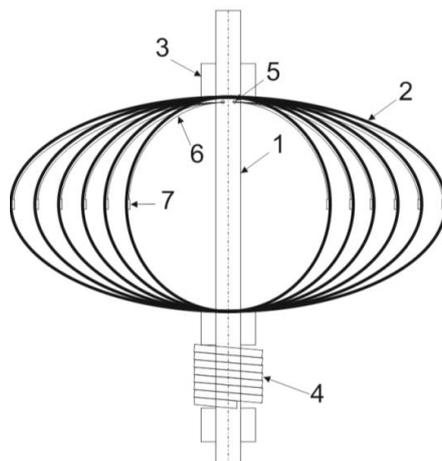


Рис. 2. Схема азимутально распределенного температурного зонда. Шифр: 1 — полипропиленовая труба; 2 — железные пластинки; 3 — фиксатор; 4 — пружина; 5 — отверстия для продевания датчиков температуры; 6, 7 — датчики температуры

Fig. 2. Diagram of an azimuthally distributed temperature probe: 1 — polypropylene tube; 2 — iron plates; 3 — retainer; 4 — spring; 5 — holes for passing temperature sensors; 6, 7 — temperature sensors

— длительность эксперимента составляет 40 минут: 20 минут нагрева, 20 минут после отключения нагревателя.

Перед проведением эксперимента температура в колонне и в заколонном пространстве стабилизировалась.

На рис. 3 представлено распределение температуры во время работы нагревателя, временные промежутки 10 и 20 минут. Из рисунка видно, что образуется отрицательная тепловая аномалия (участки снижения температуры) в секторах с наличием перетока, при этом кривые полностью повторяют друг друга, отличие заключается в смещении связанной с постепенным прогревом стальной колонны и влиянием тепловой конвекции.

На рис. 4 представлено распределение температуры после отключения нагревателя, временные промежутки 10 и 20 минут. После отключения индуктора наблюдается медленное расформирование тепловой аномалии, при этом даже через 20 минут после отключения нагревателя выделяются участки, связанные с перетоком.

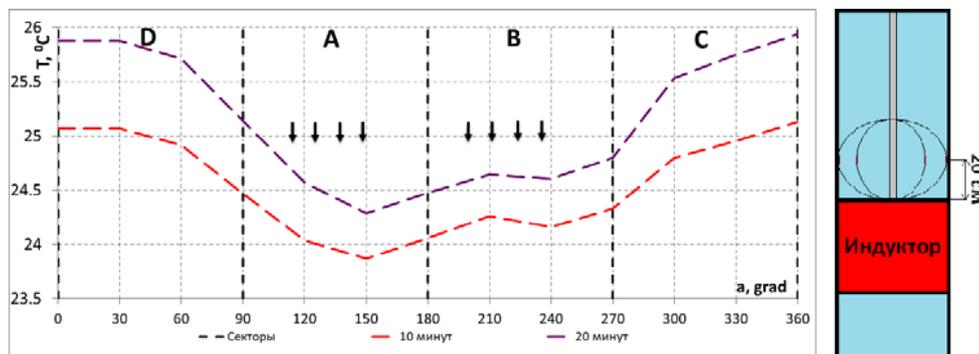


Рис. 3. Азимутальное распределение температуры стенки колонны во время работы нагревателя

Fig. 3. Azimuthal distribution of the column wall temperature during heater operation

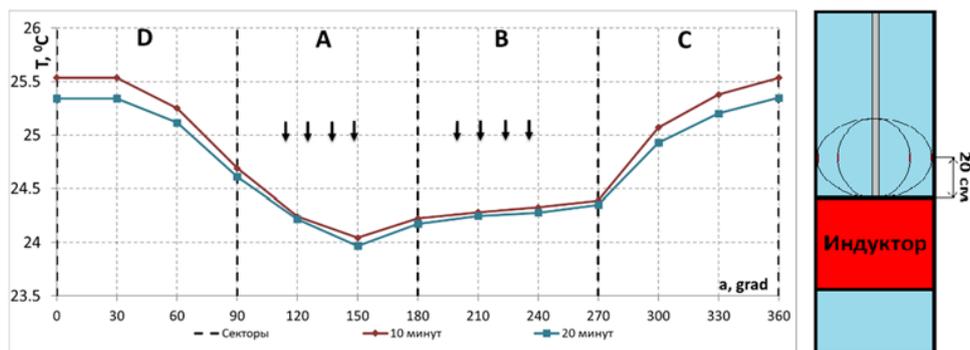


Рис. 4. Азимутальное распределение температуры стенки колонны после отключения индуктора

Fig. 4. Azimuthal distribution of the column wall temperature after disconnecting the inductor

Приведенные данные показывают возможность определения ЗКЦ выше продуктивного пласта при расположении прижатых датчиков температуры выше индуктора, при этом переток будет выделяться отрицательной тепловой аномалией.

Представляет интерес в этом случае изучение влияния конвекции на показания одного датчика температуры, расположенного в традиционном приборе, по сравнению с азимутально распределенными прижатыми к стенке датчиками температуры.

В связи с чем была осуществлена модернизация температурного зонда. Конструкция осталась прежней. Изменения заключались в добавлении второго уровня азимутально распределенных датчиков, которые располагались выше первого на 40 см (рис. 5). Датчики второго уровня расположены по тому же азимуту и параллельно над первым уровнем датчиков (1 был точно расположен над 1" и т. д.). А для имитации классического датчика температуры в центре каждого уровня добавлены дополнительные датчики (2).



Рис. 5. Модернизированный азимутально распределенный температурный зонд

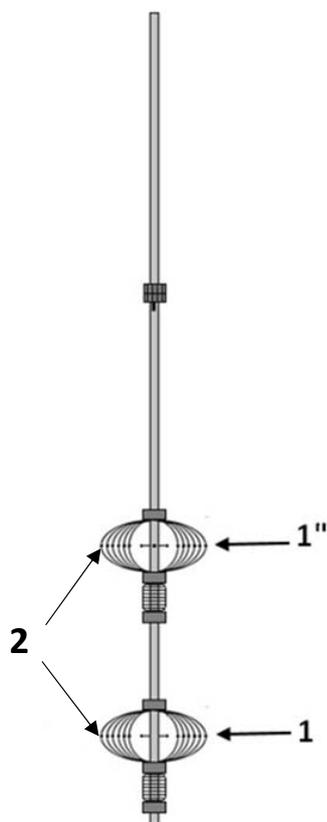


Fig. 5. Upgraded azimuthally distributed temperature probe

Закончив с модернизацией зонда, мы приступили к проведению комплексных исследований на модели скважины. Экспериментальные исследования проводили при следующих условиях:

- переток «сверху» (сектор «А»), дебит перетока  $Q = 4,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;
- жидкость в колонне неподвижна;
- мощность индуктора 800 Вт;
- 1 уровень датчиков расположен ниже подошвы индуктора на 70 см;
- 2 уровень датчиков расположен ниже подошвы индуктора на 30 см;
- длительность эксперимента составляет 40 минут: 20 минут нагрева, 20 минут после отключения нагревателя.

На рис. 6 представлено азимутальное распределение температуры на стенке колонны на каждом уровне во время работы нагревателя. Каждый уровень выделяет сектор с перетоком положительной куполообразной аномалией, при этом разница температур между сектором с перетоком и без на 1-м уровне составляет  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , на 2-м —  $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . На 2-м уровне (30 см до подошвы индуктора) видно влияние тепловой конвекции, которая отсутствует на 1-м уровне (70 см ниже подошвы индуктора).

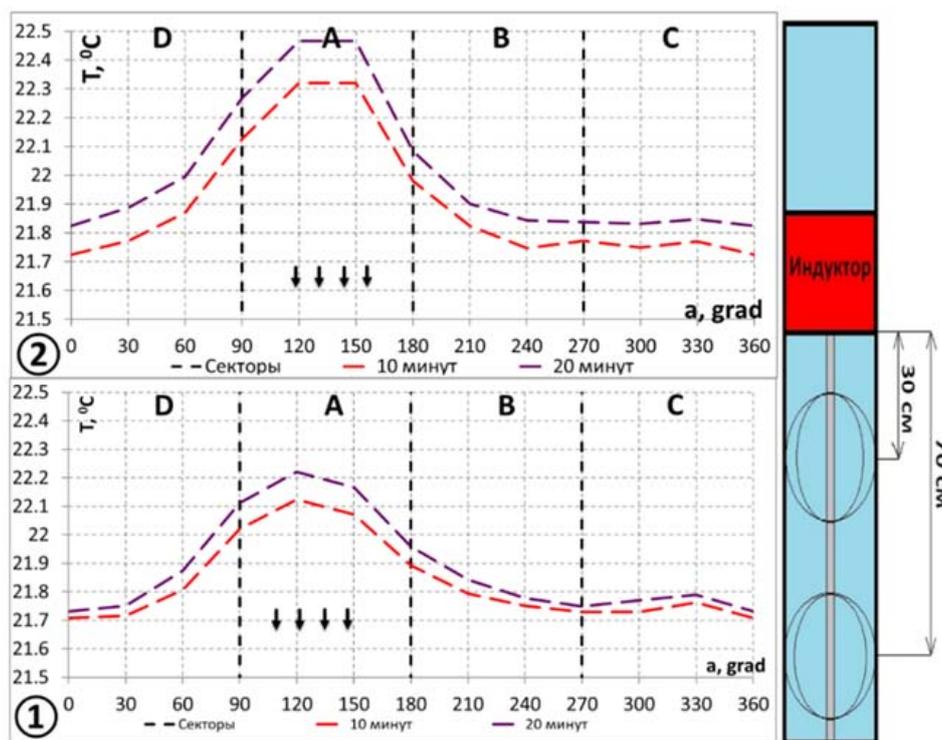


Рис. 6. Азимутальное распределение температуры стенки колонны во время работы нагревателя.

- ① — 1-й уровень датчиков;
- ② — 2-й уровень датчиков

Fig. 6. Azimuthal distribution of the pipe wall temperature during the heating:

- ① — 1<sup>st</sup> level of sensors;
- ② — 2<sup>nd</sup> level of sensors

После отключения нагревателя идет быстрое расформирование тепловой аномалии. Выделить сектор с перетоком становится затруднительно (см. рис. 7).

Из эксперимента видно, что выделение ЗКЦ выше продуктивного пласта в случае, когда датчики расположены ниже подошвы индуктора, наиболее эффективно во время работы индуктора.

Как уже было сказано выше, классическая конструкция расположения датчиков температуры, а именно по оси прибора, не позволяет получать достоверную информацию. С целью увеличения достоверности полученных данных был разработан прижимной азимутально распределенный температурный зонд (рис. 5). Благодаря разработанной конструкции возможно выделение ЗКЦ выше и ниже продуктивного пласта, выделение каналов ЗКЦ, что с помощью классической конструкции невозможно, а также выделение ЗКЦ без поступления в скважину.

На рис. 8 приведено сравнение показаний классического расположения датчика и прижимного, при этом случай без поступления ЗКЦ в скважину. Видно, что прижимной датчик четко отмечает тепловую метку, в то время как клас-

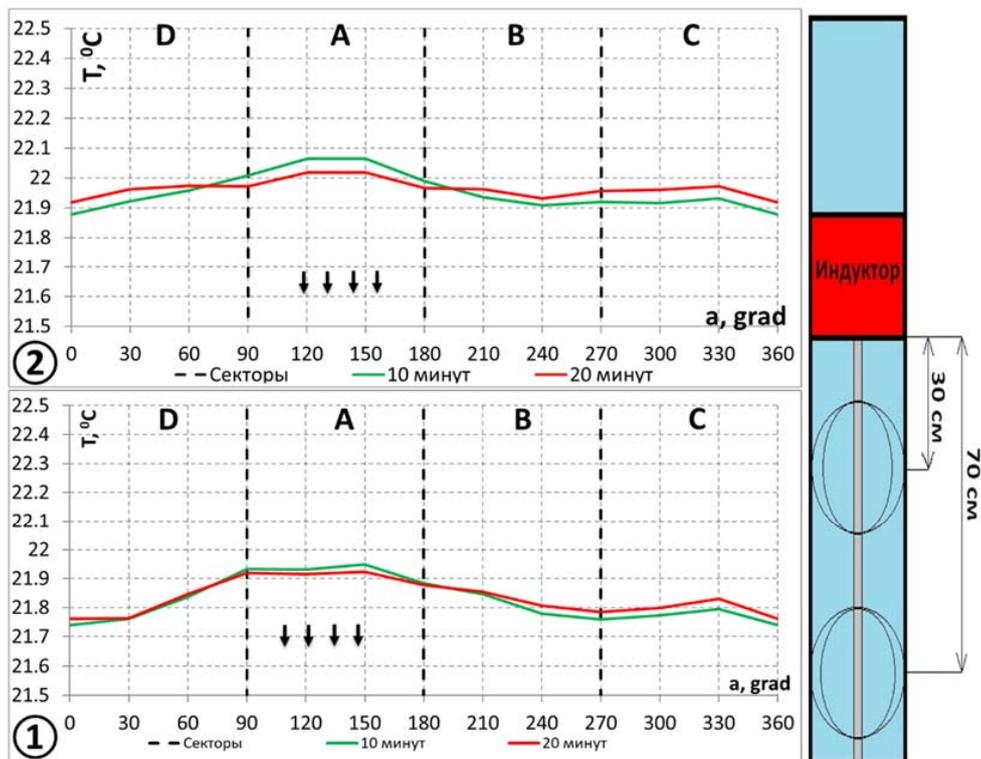


Рис. 7. Азимутальное распределение температуры стенки колонны после отключения нагревателя.

① — 1-й уровень датчиков;  
② — 2-й уровень датчиков

Fig. 7. Azimuthal distribution of the pipe wall temperature after heater shutdown:

① — 1<sup>st</sup> level of sensors;  
② — 2<sup>nd</sup> level of sensors

сический датчик подвержен только влиянию тепловой конвекции, и по показаниям классического датчика нельзя определить наличие ЗКЦ.

### Заключение

В результате проведенных исследований:

1. Изучены особенности формирования температурного поля в скважине при индукционном нагреве колонны с учетом каналов заколонного движения жидкости и естественной тепловой конвекции.
2. Установлено, что при расположении температурного зонда выше кровли индуктора сектора с перетоком отмечаются отрицательной температурной аномалией, при этом после отключения индуктора наблюдается медленное расформирование температурной аномалии. Поэтому определить наличие перетока возможно и после отключения индуктора.

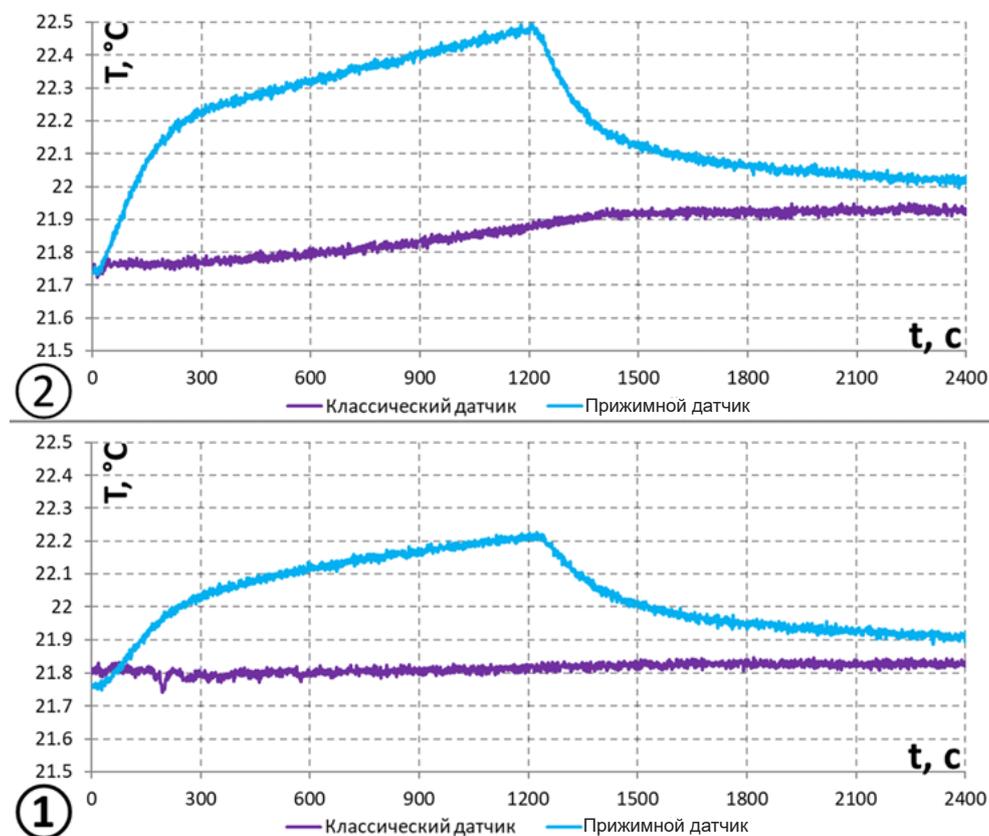


Рис. 8. Зависимость изменения температуры со временем на прижимном и классическом датчике температуры.

- ① — 1-й уровень датчиков;  
 ② — 2-й уровень датчиков

Fig. 8. Dependence of the temperature change on time on the pressed and classic temperature sensor:

- ① — 1<sup>st</sup> level of sensors;  
 ② — 2<sup>nd</sup> level of sensors

3. При расположении температурного зонда ниже подошвы индуктора сектор с перетоком отмечается положительной куполообразной температурной аномалией, которая быстро расформируется, в связи с чем регистрацию лучше производить во время работы индуктора.
4. Показана высокая эффективность конструкции зонда по сравнению с классической, а именно расположение датчиков температуры по азимутальному направлению. Благодаря разработанной конструкции возможно эффективное выделение каналов ЗКЦ.
5. Азимутально распределенный температурный зонд позволяет с большой достоверностью и эффективностью выделять ЗКЦ выше продуктивного пласта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиуллин Р. А. Изучение тепловой конвекции на модели скважины с индукционным нагревателем при заколонном перетоке «сверху» / Р. А. Валиуллин, Р. Ф. Шарафутдинов, В. Я. Федотов, И. В. Канафин, Д. В. Космылин // Вестник Башкирского университета. 2017. Т. 22. № 2.
2. Валиуллин Р. А. Метод активной термометрии для диагностики состояния скважин / Р. А. Валиуллин, Р. Ф. Шарафутдинов, А. Ш. Рамазанов, В. Я. Федотов, М. Ф. Закиров // Интервал. 2008. № 10 (117). С. 59-60.
3. Валиуллин Р. А. Способ активной термометрии действующих скважин (варианты) / Р. А. Валиуллин, Р. Ф. Шарафутдинов, А. Ш. Рамазанов, В. В. Дрягин, Я. Р. Адиев, А. А. Шилов // Патент на изобретение RUS 2194160 22.01.2001.
4. Valiullin R. A. Studies of Multi-Phase Flows in Horizontal Wells / R. A. Valiullin, R. F. Sharafutdinov, R. K. Yarullin, V. Ya. Fedotov // Нефтяное хозяйство. 2002. № 12. С. 55.

**Rim A. VALIULLIN<sup>1</sup>**  
**Ramil F. SHARAFUTDINOV<sup>2</sup>**  
**Vladimir Ya. FEDOTOV<sup>3</sup>**  
**Denis V. KOSMILIN<sup>4</sup>**  
**Ildar V. KANAFIN<sup>5</sup>**

**STUDIES OF TEMPERATURE FIELD IN WELLBORE  
DURING INDUCTION HEATING OF THE CASING PIPE  
WITH BEHIND-THE-CASING FLUID FLOW CHANNELS\***

<sup>1</sup> Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
Head of the Department of Geophysics,  
Bashkir State University (Ufa)  
valra@geotec.ru

<sup>2</sup> Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,  
Department of Geophysics,  
Bashkir State University (Ufa)  
gframil@inbox.ru

<sup>3</sup> Senior Lecturer, Department of Geophysics,  
Bashkir State University (Ufa)  
fedotov@geotec.ru

<sup>4</sup> Postgraduate Student, Department of Geophysics,  
Bashkir State University (Ufa)  
kosmos.gweenblade@yandex.ru

<sup>5</sup> Assistant, Department of Geophysics,  
Bashkir State University (Ufa)  
vradlik@gmail.com

---

\* The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research  
(grant no 17-45-020193).

---

**Citation:** Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Fedotov V. Ya., Kosmilin D. V., Kanafin I. V.  
2017. "Studies of Temperature Field in Wellbore during Induction Heating of the Casing Pipe  
with Behind-the-Casing Fluid Flow Channels". Tyumen State University Herald. Physical and  
Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 3, no 3, pp. 17-28.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-3-17-28

---

**Abstract**

This paper considers the results of experimental studies of temperature regimes' distribution in a physical model as close as possible to the systems of a real oil well, with induction heating of the column, taking into account the behind-the-casing fluid flow. Induction on the casing pipe leads to a thermal mark in the wellbore and in the annular space. Observing the formation, movement and disintegration of the thermal mark allows determining the channels of behind-the-casing fluid flow.

In this paper the authors describe the experimental setup, temperature measuring systems with distributed temperature sensors. They have studied the influence of forced convection on the sensors' readings locating them in different places in the well (pressed against the inner wall of the column, along the axis of the device). The advantages of the azimuthal temperature mapping are shown when measuring the temperature anomalies of the cumulative fluid motion. It is established that using an azimuthally distributed temperature probe allows determining the behind-the-casing fluid overflow "from above" when measuring above and below the inductor heating point. Optimal intervals of measurement time are determined, when the separation of behind-the-casing fluid flow channels is most effective.

**Keywords**

Temperature field, wellbore, behind-the-casing flow, induction heating, thermal label, probe, convection, temperature sensor, behind-the-casing flow sector.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-3-17-28**

**REFERENCES**

1. Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Fedotov V. Ya., Kanafin I. V., Kosmylin D. V. 2017. "Izucheniye teplovoy konveksii na modeli skvazhiny s induktsionnym nagrevatelem pri zakolonnom peretoke 'sverkhu'" [Study of Thermal Convection in a Well Model with an Induction Heater with behind Casing Flow from "Up to Down"]. Vestnik Bashkirskogo universiteta, vol. 22, no 2.
2. Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Ramazanov A. Sh., Fedotov V. Ya., Zakirov M. F. 2008. Metod aktivnoy termometrii dlya diagnostiki sostoyaniya skvazhin [The Method of Active Thermometry for Well Diagnosis]. Interval, no 10 (117), pp. 59-60.
3. Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Ramazanov A. Sh., Dryagin V. V., Adiyev Ya. R., Shilov A. A. 2001. RF patent. "Sposob aktivnoy termometrii deystvuyushchikh skvazhin (varianty)" [Method of Active Thermometry of Operating Wells]. No 2194160. 22 January 2001.
4. Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Yarullin R. K., Fedotov V. Ya. 2002. Studies of Multi-Phase Flows in Horizontal Wells". Oil Industry, no 12, pp. 55.