

УДК 550.3:536.252

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*

Башкирский государственный университет
Россия, Республика Башкортостан, 450074 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

Тел./факс: +7 (937) 335 16 39.

*Email: kosmos.gweenblade@yandex.ru

В статье рассматривается конвективный теплоперенос жидкости в трубе при наличии ее локального нагрева. Для изучения данного процесса изготовлена экспериментальная установка, позволяющая выполнять нагрев колонны и измерять распределение температуры внутри колонны, при наличии движения в колонне и в заколонном пространстве. Приведены данные экспериментальных исследований влияния тепловой конвекции при индукционном нагреве в зависимости от расстояния относительно зоны нагрева.

Ключевые слова: конвекция, конвективный теплоперенос, индукционное воздействие, заколонная циркуляция, теплообмен, активная термометрия.

Введение

Производство углеводородов в России за последние несколько лет непрерывно растет, что выводит страну на первые места в мире по добыче не только газа, но и нефти. Вместе с тем, в нефтегазовой отрасли накопились серьезные проблемы, которые, если ими не заниматься срочно и масштабно, могут подорвать достигнутый высокий уровень производства. Среди таких проблем одной из основных остается постепенное увеличение обводненности продукции нефтяных скважин. Еще более важной является проблема обводнения газовых месторождений России [1].

Одной из причин обводнения скважины является возникновение гидравлической связи (канала) между водоносными горизонтами и нефтяными пластами – заколонные перетоки. Данная проблема может встречаться на любой стадии эксплуатации скважины, причинами возникновения которой является плохая связь цемента с пластом или с колонной; проведение прострелочно взрывных работ.

Наиболее эффективным методом решения данной задачи является термометрия. Но у данного метода возникают проблемы при определении перетока «сверху» и при определении технического состояния коротких зумпфов. В следствие чего, развитие новых методов поиска заколонных перетоков крайне актуально.

Одним из перспективных направлений развития скважинной термометрии является использование искусственных тепловых полей (метод активной термометрии [2, 3]), заключающийся в исследовании формирования теплого поля, создаваемого искусственным источником тепла, например, при индукционном воздействии [4]. Данная технология прошла промысловые испытания, которые показали ее высокую эффективность. Однако при использовании искусственных тепловых полей мы получаем

влияние нежелательного фактора, который затрудняет или делает невозможным интерпретацию данных – это свободная тепловая конвекция. Возникающие конвективные потоки приводят к «экранированию» процессов, происходящих за колонной.

Проведенные исследования по изучению свободной тепловой конвекции при индукционном нагреве эксплуатационной колонны, показали, что величина флуктуаций температуры сопоставима с температурными сигналами от заколонных перетоков. Поэтому она должна учитываться при проведении исследований и обработке результатов [5]. Для более детального изучения влияния свободной тепловой конвекции был разработан и изготовлен азимутально-распределенный температурный зонд [6] и экспериментальная установка.

Экспериментальные исследования

Экспериментальная установка (рис. 1 (а)) максимально приближена к конструкции нефтегазовых скважин. Она состоит из стальной колонны (8), с внешней стороны которой, в двух промежутках, намотана нихромовая лента – индуктор (2' – нижний индуктор; 2 – верхний индуктор). Геометрические и мощностные параметры нагревателей соответствуют тепловому воздействию скважинного индуктора.

Для имитации заколонной циркуляции жидкости с внешней стороны стальной колонны установлены 28 медных трубок (1), разделенных на 4 секции («А-Д» рис. 1 (б)). В каждой секции семь трубок. Расстояние между соседними секциями 23 мм, между медными трубками в секции – 8 мм. Медные трубки покрыты слоем желеобразного геля (3) толщиной 24–25 мм, для имитации наличия горных пород. Для исключения высыхания геля вся модель обернута 6 слоями полиэтилена (4).

Температура жидкости, циркулирующая в заколонном пространстве, поддерживается постоянной с помощью термостата LOIPFT-316–40.

Поток в колонне регулируется насосом (7). На входе потока в колонну стоит распределитель (6) и линейризатор потока (5).

Для регистрации температуры нами был применен двухуровневый многодатчиковый азимутально-распределенный температурный зонд (рис. 2). Он состоит из двух уровней (1 – нижний; 1' – верхний). На каждом уровне расположено 12 термопар (разрешающая способность 0.01 °С). Каждый из этих датчиков плотно прижат к внутренней стенке колонны, тем самым позволяя регистрировать ее температуру. Кроме указанных на макете зонда установлены датчики температуры (2), отстоящие от стенки колонны на 2 см (по 2 термопары на каждом из уровней). Они позволяют регистрировать температуру жидкости в колонне.

Система регистрации температуры реализована на базе шасси National Instruments NIcDAQ-9174, которая позволяет обрабатывать сигнал одновременно с 64 термопар.

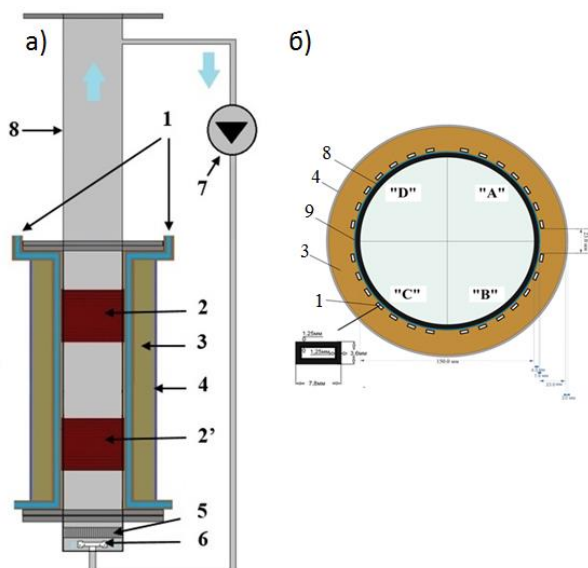


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (шифр: 1 – медные трубки; 2 – верхний индуктор; 2' – нижний индуктор; 3 – имитация горной породы; 4 – полиэтиленовая изоляция; 5 – линейризатор; 6 – распределитель потока; 7 – насос; 8 – стальная колонна; 9 – электроизолятор).

Проведена серия экспериментальных исследований, результаты которых представлены на рис. 3–9.

Серия экспериментов проводилась при следующих условиях:

- Переток «сверху» (сектор «А»), дебит перетока $Q=4,2 \text{ м}^3/\text{сут}$;
- Жидкость в колонне неподвижна;
- Работает верхний индуктор (2, рис. 1), мощность нагревателя $P=800 \text{ Вт}$;
- Нижний уровень на начало проведения исследований был расположен ниже подошвы индуктора на 50 см, с каждым последующим экспериментом смещался ниже на 10 см;

- Верхний уровень на начало проведения исследований был расположен ниже подошвы индуктора на 10 см, с каждым последующим экспериментом смещался ниже на 10 см;

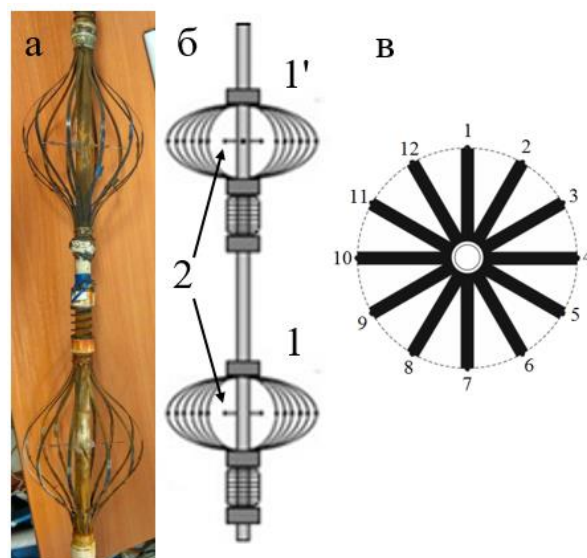


Рис. 2. Азимутально распределенный температурный зонд (шифр: а – фотография зонда; б – схема зонда; в – схема уровня температурного зонда вид сверху).

- Длительность каждого эксперимента составляла 40 минут: 20 минут нагрева, 20 минут после отключения нагревателя.

На рис. 3 представлено распределение избыточной температуры на датчиках, расположенных в 2 см от стенки колонны на разных глубинах. Он характеризует зависимость влияния тепловой конвекции на температурные датчики (скважинного прибора) на разных глубинах.

Из рисунка видно, что влияние нагревателя наиболее сильно отмечается вплоть до 20 см ниже подошвы индуктора. В области ниже 20 см от индуктора влияние конвекции резко уменьшается, а с глубины 80 см практически не наблюдается.

На рис. 4–5 представлено радиальное распределение избыточной температуры внутренней стенки колонны во время работы нагревателя (10 и 20 минут, соответственно) на разных глубинах. С увеличением расстояния до нагревателя уменьшается влияние тепловой конвекции, но при этом уменьшается температурная аномалия. Стоит также отметить, что в 10 см от подошвы нагревателя наблюдается разогрев колонны. Величина максимального разогрева на данной глубине составляет более 0.4 °С. В секторе с перетоком отмечается температурная аномалия – куполообразный пик. Разница температуры колонны в секторе с перетоком и без достигает 0.3 °С.

При более длительном нагреве (20 минут), вблизи нагревателя, зону с перетоком выделить становится достаточно сложно, из-за сильного влияния тепловой конвекции, которая искажает тепловую аномалию. При этом измерения, сделанные ниже

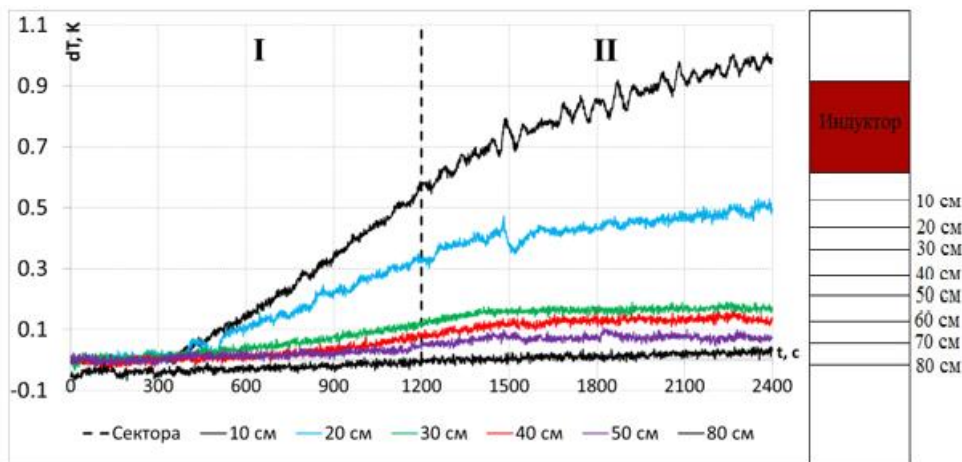


Рис. 3. Распределение избыточной температуры в 2 см от стенки стальной колонны.

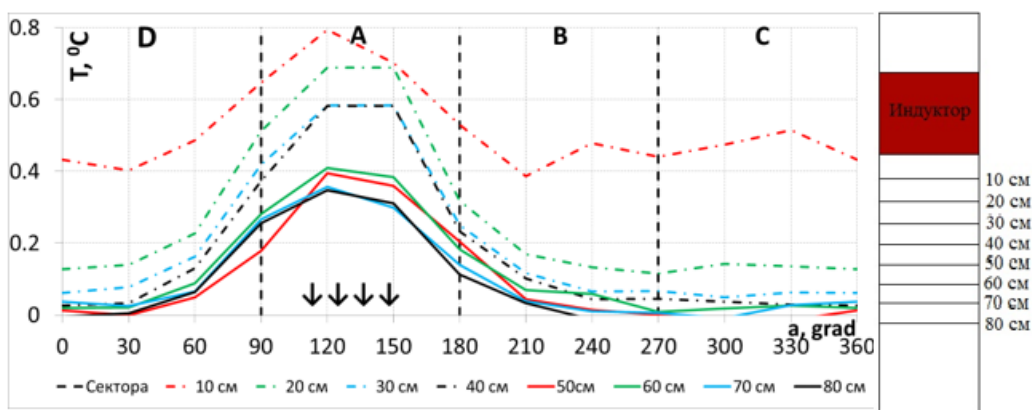


Рис. 4. Азимутальное распределение избыточной температуры стенки стальной колонны, после 10 минутной работы индуктора на различной глубине измерения.

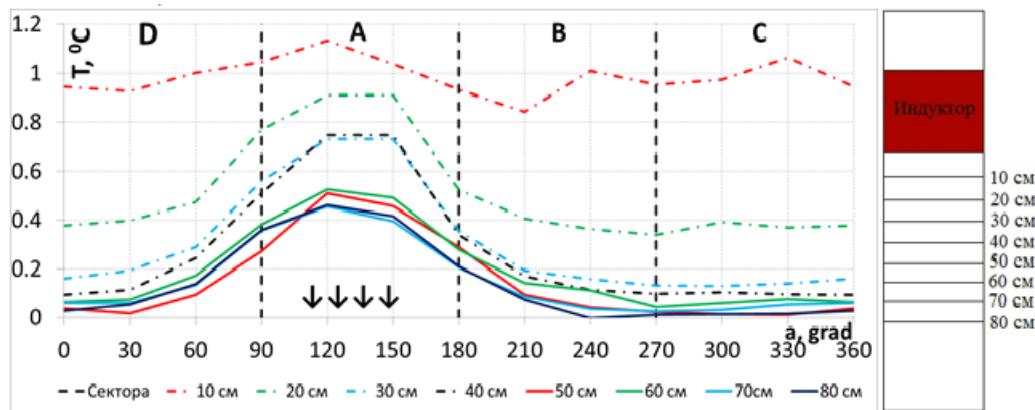


Рис. 5. Азимутальное распределение избыточной температуры стенки стальной колонны, после 20 минутной работы индуктора на различной глубине измерения.

нагревателя на 30–80 см, наглядно выделяют сектор с перетоком, разница температуры колонны в секторе с перетоком и без достигает 0.5 °С.

Ниже представлено радиальное распределение избыточной температуры внутренней стенки колонны после отключения нагревателя (10 минут; 20 минут) на разных глубинах (рис. 6–7). После отключения нагревателя наблюдается уменьшение температурной аномалии в секторе с перетоком, влияние

тепловой конвекции продолжается. При этом с уменьшением расстояния до нагревателя сектор с перетоком выделяется отрицательной температурной аномалией. А с увеличением расстояния от нагревателя идет постепенное расформирование аномалии.

Выводы

В результате проведенных исследований установлено:

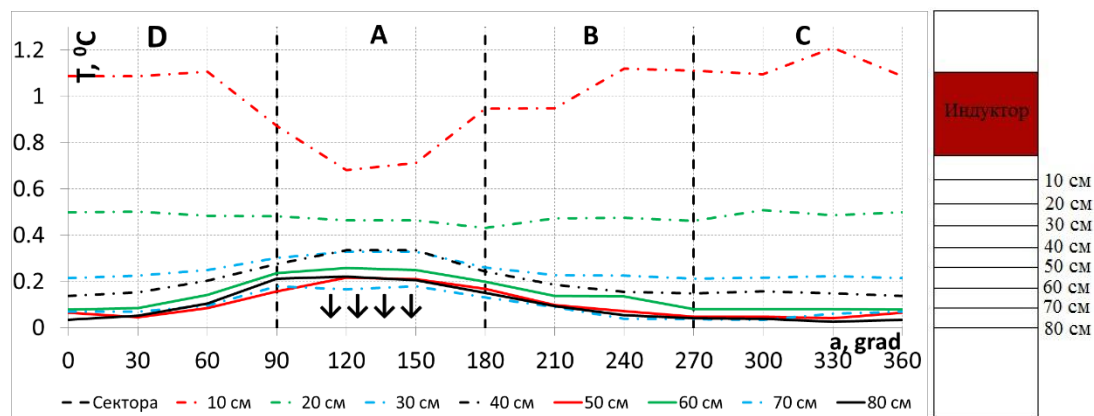


Рис. 6. Азимутальное распределение избыточной температуры стенки стальной колонны, 10 минут после отключения работы индуктора на различной глубине измерения.

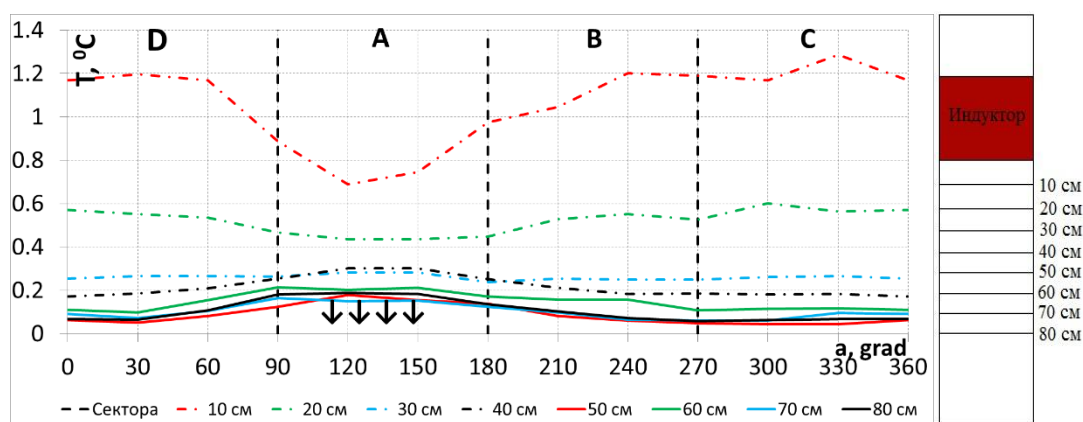


Рис. 7. Азимутальное распределение избыточной температуры стенки стальной колонны, 20 минут после отключения работы индуктора на различной глубине измерения.

1. Экспериментальная установка позволяет осуществлять нагрев колонны, создавать тепловую конвекцию внутри колонны, моделировать заколонные перетоки.

2. Азимутально-распределенный температурный зонд позволяет регистрировать искусственное тепловое поле в стальной колонне.

3. При отсутствии движения жидкости в колонне, тепловая конвекция оказывает сильное влияние на измерения температуры вблизи нагревателя, ее влияние резко уменьшается на расстоянии ниже 30 см, и практически не ощущается на глубине 80 см ниже подошвы индуктора.

4. Благодаря азимутально-распределенному температурному зонду возможно эффективное выделение заколонной циркуляции флюида «сверху». Во время нагрева эффективность резко возрастает. Различия температур достигает 0.5 °С. При этом, для выделения заколонного перетока «сверху» измерения температуры необходимо проводить ниже подошвы индуктора, как минимум на 40 см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григулецкий В. Г. Обводнение месторождений – коренной вопрос современности российского нефтегазового дела // Нефть, газ и бизнес. 2007. №5. С. 19–28.
2. Валиуллин Р. А., Шарафутдинов Р. Ф., Рамазанов А. Ш., Дрягин В. В., Адиев Я. Р., Шилов А. А. СПОСОБ АКТИВНОЙ ТЕРМОМЕТРИИ ДЕЙСТВУЮЩИХ СКВАЖИН (ВАРИАНТЫ) // патент на изобретение RU 2194160 22.01.2001
3. Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Yarulhin R. K., Fedotov V. Ya. STUDIES OF MULTI-PHASE FLOWS IN HORIZONTAL WELLS // Нефтяное хозяйство. 2002. №12. С. 55.
4. Федотов В. Я., Закиров М. Ф. Применение индукционных нагревателей при исследовании скважин // Тезисы докладов конференции, XXII Международная специализированная выставка «Газ. Нефть. Технологии-2014». Уфа. 2014. С. 69–71.
5. Валиуллин Р. А., Шарафутдинов Р. Ф., Федотов В. Я., Канафин И. В. Экспериментальная установка для изучения свободной тепловой конвекции при индукционном нагреве эксплуатационной колонны // Вестник Башкирского университета. 2016. Т. 21. №2. С. 264–268.
6. Космылин Д. В., Канафин И. В. Модернизация азимутально-распределенного температурного зонда // Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании Тезисы докладов IX Международной школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016. С. 109–110.

Поступила в редакцию 31.03.2017 г.

**THE THERMAL CONVECTION STUDY OF BEHIND-CASING FLOW
DIRECTED FROM UP TO DOWN ON A WELL MODEL
WITH INDUCTION HEATER**

© **R. A. Valiullin, R. F. Sharafutdinov, V. Y. Fedotov,
I. V. Kanafin, D. V. Kosmylin***

*Bashkir State University
32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*

Phone: +7 (937) 335 16 39.

**Email: kosmos.gweenblade@yandex.ru*

Serious problems have accumulated in oil and gas industry. If not dealt with urgently and on a large scale, they can undermine the high level of production achieved. One of the main problems among them remains the gradual increase in the water cut of oil wells. Even more important one is the drowning problem of gas fields in Russia. One of the reasons for drowning is the formation of a hydraulic link (channel) between aquifers and oil layers – the behind-casing flows. This problem can occur at any stage of a well's operation, it is caused by a poor bond of the cement and the formation/column or as a drawback by blasting perforation operations. The most effective method for solving this problem is thermometry. However, this method has problems in determining the flow “from up to down” and in determining the technical state of short sump. Therefore, the development of new methods for detection of undesirable flows is extremely important. One of the promising trends in the development of borehole thermometry is the use of artificial thermal fields (the active thermometry method), which consists in studying the formation of a thermal field created by an artificial heat source, for example, under induction. This technology has undergone field trials, which showed its high efficiency. However, dealing with artificial thermal fields, the authors find out that the influence of such undesirable factor as free thermal convection makes it difficult or impossible to interpret the data. The resulting convective currents lead to a “screening” of the processes occurring behind the column. The conducted studies on the study of free thermal convection during induction heating of the operating column showed that the magnitude of the temperature fluctuations is comparable with the temperature signals from the streaked flows. Therefore, it should be taken into account when conducting research and processing results. For a more detailed study of the effect of free thermal convection, an azimuthally distributed temperature probe and an experimental setup were designed and manufactured. The data of experimental studies of the effect of thermal convection during induction heating are presented as a function of the distance relative to the heating zone.

Keywords: convection, convective heat transfer, induction effects, behind-casing circulation, heat exchange, active thermometry.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Griguletskii V. G. *Neft', gaz i biznes*. 2007. No. 5. Pp. 19–28.
2. Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Ramazanov A. Sh., Dryagin V. V., Adiev Ya. R., Shilov A. A. patent na izobreteniye *RUS 2194160 22.01.2001*
3. Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Yarullin R. K., Fedotov V. Ya. *Neft'yanoe khozyaistvo*. 2002. No. 12. Pp. 55.
4. Fedotov V. Ya., Zakirov M. F. *Tezisy dokladov konferentsii, XXII Mezhdunarodnaya spetsializirovannaya vystavka «Gaz. Neft'. Tekhnologii-2014»*. Ufa. 2014. Pp. 69–71.
5. Valiullin R. A., Sharafutdinov R. F., Fedotov V. Ya., Kanafin I. V. *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. 2016. Vol. 21. No. 2. Pp. 264–268.
6. Kosmylin D. V., Kanafin I. V. *Fundamental'naya matematika i ee prilozheniya v estestvoznaniy Tezisy dokladov IX Mezhdunarodnoi shkoly-konferentsii dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. 2016. Pp. 109–110.

Received 31.03.2017.