

На правах рукописи



**ГАЯЗОВ МАРАТ САЛЬМАНОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВОЙ МЕТКИ НА  
МОДЕЛИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКВАЖИНЫ  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИИ АКТИВНОЙ  
ТЕРМОМЕТРИИ**

Специальности: 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника,  
1.6.9. Геофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Уфа - 2024

Работа выполнена на кафедре геофизики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Научный руководитель: **Валиуллин Рим Абдуллович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные  
оппоненты:

**Лежнин Сергей Иванович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник ФГБУН «Институт  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского  
отделения Российской академии наук»

**Лобанков Валерий Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры «Геофизические методы исследования»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью  
“РН - БашНИПИнефть”, г. Уфа

Защита диссертации состоится «22» октября 2024 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.479.03 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и на сайте: <https://uust.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.479.03,  
к.ф.-м.н.



Т.Р. Хабилов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последние годы в России наметился динамичный положительный тренд в развитии горизонтального бурения. В течение 2019-2020 годов темпы годового роста общероссийского объема горизонтального бурения выросли на 19% в 2019 году и на 22% в 2020 году по сравнению с предыдущим годом. Так, по итогам первого квартала 2021 г. видно, что большинство нефтяных компаний все больше внимания уделяет горизонтальному бурению, объемы которого занимают более трети от общего метража проходки. В связи с интенсивным увеличением фонда ГС возникла острая необходимость в разработке, обновлении и модернизации методов исследования, и специализированной скважинной аппаратуры при промыслово-геофизических исследованиях скважин (ПГИС). Одна из актуальных задач современной промысловой геофизики в действующих горизонтальных скважинах – определение расходов, включая и фазовых расходов с оценкой поинтервального дебита. Особую сложность представляет решение задач при исследовании горизонтальных скважин с многофазными потоками.

**Степень разработанности темы исследования.** На сегодняшний день изучению различных термогидродинамических аспектов многофазных течений посвящены труды большого числа отечественных и зарубежных авторов.

Применительно к моделированию тепловых процессов при движении одно- и многофазного потока в стволе скважины следует отметить работы следующих исследователей: Кутателадзе С.С., Брусиловский А.И., Розенберг М.Д., Чарный И.А., Лежнин С.И., Нигматуллин Р.И., Чекалюк Э.Б., Теслюк Е.В., Золотарев П.П., Хасанов М.М., Булгакова Г.Т., Костерин А.В., Саламатин А.Н., Федоров К.М., Шабаров А.Б., Филиппов А.И., Wallis G.B., Taitel Y., Ducker A.E., Aziz K., Hasan A.R., Kabir C.S., Ramey Jr., Shoham O. и ряда других авторов. Авторами исследованы особенности формирования температурного поля при неизотермическом одно- и многофазном течении жидкости в стволе скважины с учетом участков притока жидкости из пласта, термодинамических эффектов, фазовых переходов, однако на

сегодняшний день недостаточно изучены процессы теплообмена, связанные с работой искусственных тепловых источников в скважине, в частности, при индукционном нагреве.

Большой вклад в изучение вопросов измерения параметров потока в горизонтальных скважинах (ГС) внесли сотрудники кафедры геофизики УУНиТ: Р.А. Валиуллин, Р.К. Яруллин, А.Ш. Рамазанов, Р.Ф. Шарафутдинов, А.Р. Яруллин и другие. Разработана технология активной термометрии, базирующаяся на использовании генератора тепловых меток. Однако большинство исследований были выполнены преимущественно для вертикальных скважин. А возможность применения активной термометрии для оценки расхода жидкости в горизонтальных скважинах практически не исследованы.

**Целью диссертационной работы** является научное обоснование и экспериментальное подтверждение возможности использования тепловой метки, в том числе созданной индукционным воздействием, для оценки расхода жидкости в горизонтальных скважинах.

#### **Основные задачи, решаемые в диссертационной работе:**

1. Разработка и изготовление термогидродинамического стенда, моделирующего горизонтальную скважину, обеспечивающего контролируемую циркуляцию многофазного потока в широком диапазоне скоростей при изменяющемся угле наклона трубы.

2. Обеспечение оптимальных параметров индукционного воздействия для создания регистрируемой тепловой аномалии на стенде.

3. Разработка системы регистрации и экспериментальное изучение особенностей движения и расформирования тепловой метки при различных параметрах нагревателя, различном наклоне потока относительно горизонтали, различном фазовом составе потока жидкости.

4. Изучение возможности оценки расходных параметров при многофазных потоках на основе использования тепловой метки.

5. Проведение стендовых испытаний активной термометрии с целью разработки рекомендаций для применения результатов диссертационной работы на практике.

**Методы решения поставленных задач.** Поставленные задачи решались путем экспериментальных исследований с учетом

термодинамических процессов, происходящих в многофазных потоках. Проведен анализ и обобщение существующих методов измерения фазовых скоростей и расходных параметров одно- и многофазного потока в скважинной геофизике. Физическое моделирование неизотермического потока выполнено на сертифицированных термогидродинамических стендах, исследовано формирование и эволюция температурной метки в условиях ламинарного потока. Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований выполнены на базе современных технических средств и эталонированных средств измерения.

**Степень достоверности.** Достоверность результатов диссертационной работы обеспечена обобщением и анализом результатов отечественных и зарубежных разработок и исследований, использованием сертифицированных термогидродинамических стендов (№ 098-05/17 и № 065-10/23), эталонированных средств измерения, достаточным объемом экспериментальных исследований и повторяемостью результатов, сопоставлением их с теоретическими данными.

#### **Научная новизна:**

1. Разработана экспериментальная установка с источниками тепла для изучения неизотермических многофазных потоков применительно к горизонтальным скважинам.

2. Выявлены закономерности эволюции тепловой метки в двухфазном потоке жидкости для различных углов наклона ствола скважины.

3. Разработан алгоритм расчета фазовых скоростей и расходов в двухфазном потоке по анализу движения тепловой метки.

4. Предложена методика использования тепловых меток в технологии активной термометрии с кратковременным индукционным нагревом стальной колонны.

**Теоретическая и практическая значимость исследования.** Теоретическая значимость работы заключается в установлении закономерностей искусственного теплового поля в одно- и двухфазном потоке жидкости, сформированном кратковременным действием различных источников тепла. Изучено влияние параметров проточного и

индукционного нагревателя (мощности, длительности и количества циклов нагрева), расхода, угла наклона, фазового состава и влияние свободной конвекции на эволюцию тепловой метки в потоке.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики и алгоритмов определения расходных параметров одно- и двухфазного потока по анализу эволюции тепловой метки, создаваемой источниками тепла. Разработанная экспериментальная установка может быть использована для учебных целей и дальнейшего исследования неизотермических многофазных потоков.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Экспериментальная установка в виде системы стальных труб разного диаметра с изменяющимся наклоном позволяет воспроизводить тепловые метки и изучать закономерности течения многофазных неизотермических газожидкостных потоков в добывающих скважинах.

2. Исследования эволюции тепловой метки, сформированной различными типами воздействия, включая индукционный скважинный нагреватель позволяют определить скорость потока жидкости в стволе скважины.

3. Методика измерения расхода одно- и двухфазного потоков жидкости методом “тепловых меток” в условиях горизонтального, восходящего и нисходящего потоков, учитывающая закономерности естественной тепловой конвекции.

**Апробация работы.** Апробация основных результатов работы докладывались на российских и международных конференциях и научных школах: Десятая молодежная научно-практическая конференция «Разведочная и промысловая геофизика: проблемы и пути их решения», Уфа, 2015, Международная научно-практическая конференция «Тенденции и инновации современной науки» (Trends and innovation of modern science), Прага, 2015 г., XXII Научно-практическая конференция «Новая геофизическая техника и технологии для решения задач нефтегазовых и сервисных компаний», Уфа, 2016., II международная научно-практическая конференция «Горизонтальные скважины 2017. Проблемы и перспективы», Казань, 2017, XI молодежная научно-практическая конференция «Разведочная и промысловая геофизика: проблемы и пути их решения», Уфа, 2016 г.,

71-я Международная молодежная научная конференция "Нефть и газ – 2017", XXIII Научно-практическая конференция «Новая геофизическая техника и технологии для решения задач нефтегазовых и сервисных компаний», Уфа, 2017 г. Международный конкурс акселерат инновационных бизнес идей в нефтегазовой сфере «Petro quantum», Уфа, 2017., Российская отраслевая энергетическая конференция, Москва, 2023.

**Личный вклад автора.** Постановка задачи осуществлена автором совместно с научным руководителем, д.т.н. Валиуллиным Р.А. Основная часть работы выполнена автором самостоятельно. Им созданы экспериментальные стенды, настроены и адаптированы измерительные приборы к условиям эксперимента, проведены экспериментальные работы, выполнена обработка и анализ полученных данных, совместно подготовлены публикации в научно-технических журналах и патентах.

**Благодарности от автора.** Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю, доктору технических наук Р.А. Валиуллину, за руководство, ценные советы и замечания при подготовке рукописи диссертационной работы.

Автор выражает признательность сотрудникам кафедры геофизики УУНиТ: к. ф.-м. н. Р.К. Яруллину, при поддержке которого были получены основные результаты исследования; к.т.н. А.Р. Яруллину, В.Я. Федотову, Д.В. Космыллину за помощь в подготовке и проведении экспериментальных работ.

Соискатель считает своей приятной обязанностью поблагодарить доктора физико-математических наук, профессора кафедры «Технологические процессы и аппараты» Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук С.И. Лежнина и доктора технических наук, профессора кафедры «Геофизические методы исследования» Уфимского государственного нефтяного технического университета В.М. Лобанкова за поддержку диссертационной работы и ряд ценных замечаний.

**Публикации.** Результаты выполненных исследований отражены в 14 научных работах, из них, опубликованных согласно перечню, российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание

ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК) – 4, в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science – 2, патент РФ на изобретение – 1 шт., патент РФ на полезную модель – 1 шт.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и литературы из 88 наименований. Текст диссертации изложен на 128 страницах печатного текста, содержит 76 рисунков, 19 таблиц, 1 приложение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, приведены защищаемые положения, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** представлено описание конструкций экспериментальных установок, методик измерения параметров эволюции температурной метки в трубах.

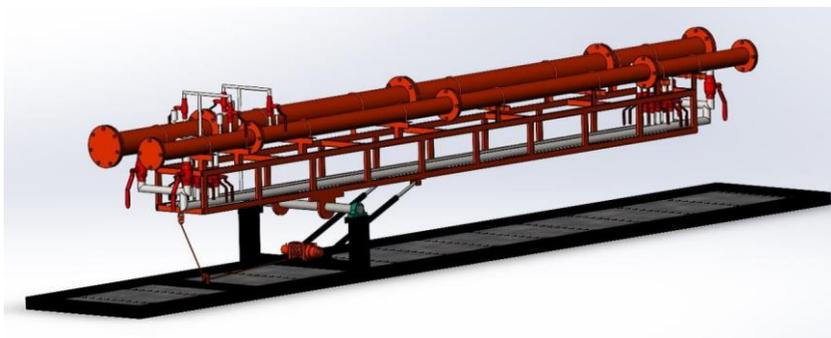
Сделан обзор публикаций существующих в мире аналогов. Установлен факт широкого применения физического моделирования на таких установках в Англии, Франции, Норвегии, США и Китае для изучения физических основ и развития техники измерения многофазного потока.

По результатам анализа и с учетом задач, стоящих перед исследователями при разработке технологии промыслово-геофизических исследований действующих горизонтальных скважин, показана необходимость использования различных по оснащению и геометрии термогидродинамических стендов и экспериментальных установок, обеспечивающие возможность моделирования многофазных неизотермических потоков в области расходов от 0,1 до 8 м<sup>3</sup>/ч, с системой контроля и учета входных и выходных параметров рабочих флюидов и обеспечивающего возможность исследования эволюции тепловой метки и тестирования скважинной аппаратуры активной термометрии в условиях гидродинамического подобия потоков.

Исходя из вышеизложенного, были сформулированы основные требования к термогидродинамическим стендам, в соответствии с которыми были сконструированы, собраны и модернизированы 6 экспериментальных установок (ЭУ).

Экспериментальные исследования диссертационной работы были выполнены на различных стендах, отличающиеся различными источниками создания тепловых меток, геометрическими размерами модели и системой управления. На рисунке 1 представлена одна из основных ЭУ, разработанная в процессе выполнения диссертационных исследований. Она представляет собой две параллельно расположенные

линий трубопровода диаметрами 10 см и 15 см и длиной 600 см каждая. Каждая из линий трубопровода состоит из 4-х разъемных секций (2 торца подачи и слива рабочего флюида по 100 см каждый, два рабочих участка по 200 см). На участках в 200 см заложены элементы физического моделирования термогидродинамических процессов, приближенные к скважинным условиям (заколонный переток вниз/вверх, интервала притока/ухода жидкости и пр.). Наличие пандуса с точкой вращения для крепления несущей фермы обеспечивает возможность вращения несущей фермы в вертикальной плоскости в диапазоне от  $-3^\circ$  до  $22^\circ$  от горизонтали, а система гидравлической обвязки – физического моделирование работы добывающей или нагнетательной скважины.



*Рис. 1. Объемная 3D модель внешнего вида рабочей части ЭУ*

На ЭУ по изучению неизотермических многофазных потоков получен сертификат калибровки средств измерения № 065-10/23 от 13 октября 2023 года выданный ООО центр метрологических исследований «Урал-Гео».

**Во второй главе** представлены результаты исследований особенностей создания и регистрации тепловых меток.

В исследование для создания тепловой метки были использован проточный нагреватель, нихромовая обмотка стальной трубы (обеспечивающая радиальный нагрев участка трубы) и скважинный индуктор. Показано отсутствие влияния метода создания тепловой метки

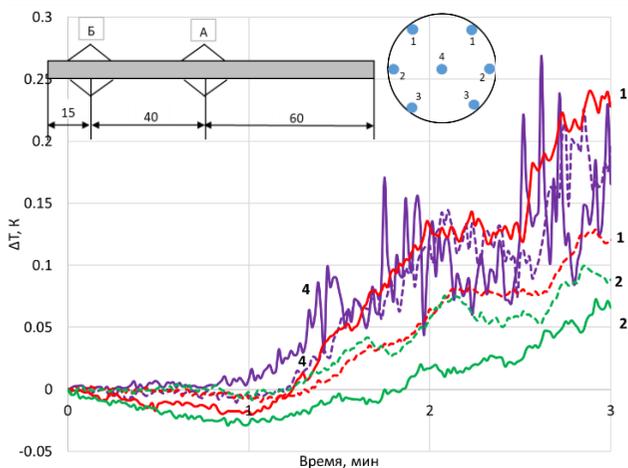
на распределение скорости ее распределения в процессе продвижения по трубе.

По результатам экспериментов была представлена динамика изменения во времени температуры на внешней поверхности (стенке) трубы в интервале индукционного нагрева ( $\Delta T = T_n - T_0$ ) при различном расходе однофазного потока в трубе (воды). При расходе от 0 м<sup>3</sup>/сут (подача жидкости отсутствует) до 50 м<sup>3</sup>/сут. При этом величина нагрева трубы варьировалась от 1,3 К до 12,3 К.

В экспериментальной установке мониторинг за движением тепловых меток осуществляется при помощи лабораторного макета скважинного прибора с распределенными датчиками температуры, состоящего из двух модулей.

Характер изменения температуры во времени в значительной степени определяется местоположением температурного датчика в сечении трубы. Наибольшие температурные аномалии отмечаются для датчиков, находящихся вблизи от стенки трубы (как к внутренней, так и к внешней) в ее верхней латерали, наименьшие – для датчиков, расположенных в нижней части трубы. Это связано с тем, что нагреваемая за счет теплообмена с горячей трубой (на участке индукционного нагрева) жидкость поднимается вверх благодаря естественной тепловой конвекции (ЕТК) или термогравитационного эффекта, и далее движется вдоль трубы по верхней образующей.

Наибольшие температурные аномалии, а также колебания температуры отмечаются для датчика 4, находящегося в центре потока жидкости, далее следует пара датчиков уровня 1. Относительно скорости распространения температурных возмущений вдоль трубы можно отметить, что она близка для датчиков уровня 1 и 4, датчики уровней 2 и 3 несколько запаздывают (но менее чем на 1 мин). Сравнение динамики температурного поля, регистрируемой датчиками модулей А и Б, показано на рисунке 2.



*Рис. 2. Сравнение динамики изменения во времени температуры  $\Delta T$  на уровне датчиков 1, 2, 4 (сплошные линии – модуль Б, штриховые – модуль А), расход жидкости в трубе 25 м<sup>3</sup>/сут*

Датчики модуля Б расположены ближе к индукционному нагревателю, тепловая метка до них доходит быстрее, чем до датчиков модуля А. Датчиков 4, 1, 2 модуля Б тепловая метка достигает примерно через 60, 65, 75 с соответственно после начала регистрации температуры, соответствующих датчиков уровня А – через 70, 77, 85 с соответственно. Оцененный по скорости прохождения тепловой метки датчиков 4, 1, 2 расход составляет около 27, 23, 27 м<sup>3</sup>/сут соответственно. Значения расхода достаточно близки к среднему по сечению расходу в трубе (25 м<sup>3</sup>/сут, погрешность оценки расхода составляет около 8%). При этом на датчиках уровня 1 и датчике 4 рост температуры более выраженный, чем на датчиках уровней 2 и 3, поэтому эти датчики рекомендуется использовать при анализе движения температурных меток.

**В третьей главе** описана разработка методики оценки расходных параметров с использованием тепловой метки. Был отработан алгоритм определения локальных скоростей неизотермического потока.

Экспериментальные модели включают в себя 2 и более группы датчиков температуры, разнесенные на фиксированные базовые

расстояния. Локальные скорости потока были рассчитаны путем регистрации расхождения во времени отклика датчиков ( $\Delta t$ ) на тепловую метку.

$$v = \frac{L}{\Delta t} \quad (1)$$

где  $v$  – скорость потока в слое, м/с,  $L$  – базовое расстояние между датчиками, м,  $\Delta t$  – время прохождения фронта термоаномалии между точками наблюдения, с.

Необходимость сканирования вертикального сечения неизотермического потока обусловлено следующими факторами:

- эффект термогравитационного расслоения потока внутри каждой фазы жидкости;
- площадь живого сечения потока каждой из фаз и их распределения скоростей в вертикальном сечении;
- увеличении скорости движения разогретой жидкости за счет силы Архимеда при восходящем потоке;
- максимальных захват живого сечения более разогретой жидкости при нисходящем потоке с уменьшением ее средней скорости течения.

При расчетах поток в трубопроводе был представлен в виде “слоистого пирога”, то есть локальная скорость каждой прослойки высчитывалась отдельно, при этом распределение скорости внутри одного сегмента (слоя) считается одинаковой.

Для расчета локальных дебитов, были вычислены площади каждого сегмента. Зная расположение датчиков температуры внутри потока и принимая за границу слоев середину между соседними термопарами вычисление площади сегмента не представляет большого затруднения.

После были рассчитаны локальные дебиты для каждого сегмента по формуле:

$$Q_i = v_i * S_i \quad (2)$$

где:  $v_i$  – скорость потока в сегменте, м/с;  $S_i$  – площадь сегмента, м<sup>2</sup>.

Для определения времени пробега ( $\Delta t$ ) было выбрано и исследовано два основных способа: по «фронту» и по «максимуму» (рис. 3). Так как на графиках лучше выделяется точка резкого повышения температуры (вступление фронта термоаномалии) по сравнению с определением по точке максимума.

Очевидно, что выбор точки в качестве отсечки в “хвостовой” части температурной метки невозможен, ввиду ее большой протяженности и влияния на метку (особенно на хвостовую часть) сопутствующих факторов в виде изменения траектории течения и общего разогрева флюида в застойных зонах.

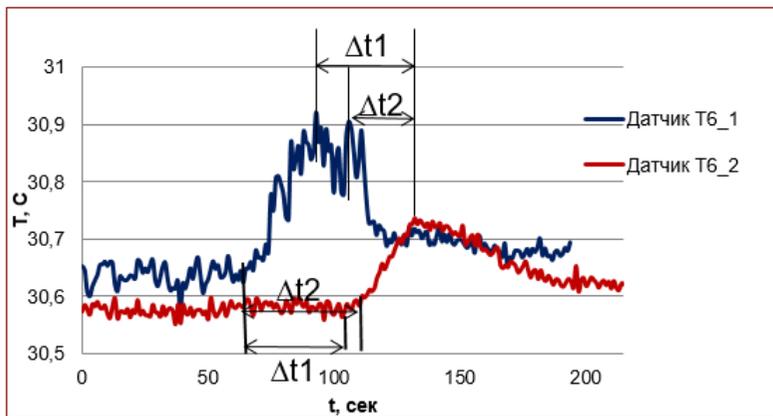


Рис. 3. Варианты определения скорости прохода термоаномалии между двумя сечениями.

Одним из главных и наиболее сложных случаев для интерпретации, при этом наиболее распространенным является наличие двухфазного расслоенного потока. Для изучения эволюции тепловой метки в расслоенном потоке были выполнены работы на стеклянном стенде с внутренним диаметром 9.6 см и длиной более 12 м. В качестве рабочих флюидов была использована техническая вода и гидравлическое масло, обладающие следующими характеристиками:

- вода техническая, вязкость 1 сПз, плотность 1000 кг/м<sup>3</sup>;
- масло гидравлическое – вязкость 15 сПз (при 26 °C), плотность 880 кг/м<sup>3</sup>.

Для определения характера изменения послойных скоростей многофазного потока сечение трубы делится на равные по толщине слои. Результат послойного распределения скоростей между

интервалами 4-х контрольных сечений совместно уровнем водомасляного раздела представлены на рисунке 4.

Характер движения рабочего флюида вдоль горизонтального трубопровода тяжело предсказуем. Ближе к концу стенда наблюдаем увеличение скорости движения масла.

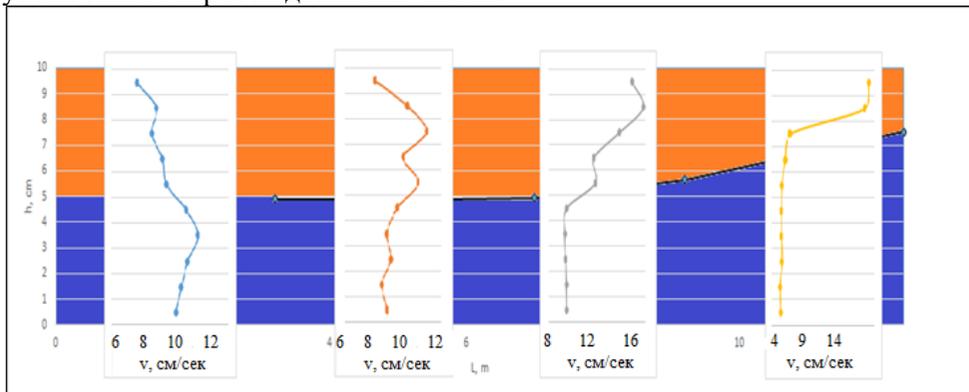


Рис. 4. Распределение локальных скоростей и уровня водомасляного контакта по длине стенда.

Сравнение показания механических расходомеров и рассчитанных дебитов методом тепловых меток по каждой фазе приведены в таблице №1.

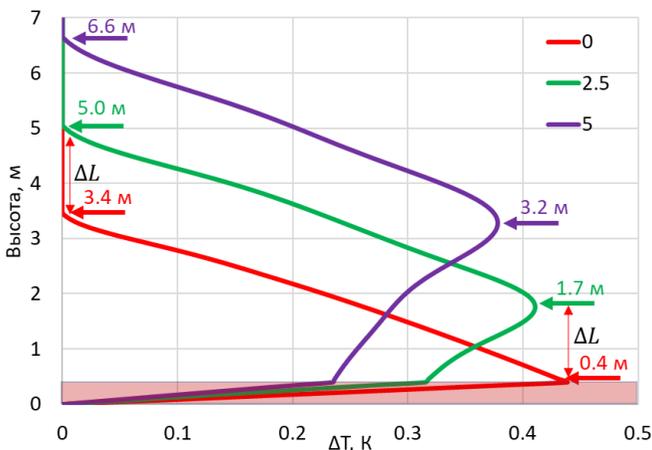
Таблица №1.

Регистрируемые и рассчитанные дебиты масла и воды.

Угол наклона	Показания расходомера $Q_v \pm 5\%$ м <sup>3</sup> /час	Показания расходомера $Q_m \pm 5\%$ м <sup>3</sup> /час	Расчетные данные $Q_v$ , м <sup>3</sup> /час	Расчетные данные $Q_m$ , м <sup>3</sup> /час
0 °	1,25	0,90	1,30±7%	1,05±10%
0 °	2,70	0,50	2,60±8%	0,44±10%
+3 °	1,35	1,30	1,40±10%	1,45±13%
+3 °	2,95	3,10	3,05±9%	3,35±12%
-3 °	2,65	2,80	2,95±10%	2,60±12%
-3 °	1,55	1,65	1,70±11%	1,50±11%

**В четвертой главе** описаны пути практического применения метода температурных меток в скважинной геофизике. При регистрации распределения температуры потока внутри колонны решается задача по определению работающих пластов и количественной оценки поинтервального расхода флюида в скважинах с двумя и более интервалами перфорации, портов гидроразрыва пласта и т.д. Исследовано влияние естественной тепловой конвекции (ЕТК) на расчетные данные

Предложена методика расчета расхода жидкости на основе интерпретации серии кривых зарегистрированных по глубине. Время прихода тепловой метки, фиксируемое разнесенными по глубине датчиками температуры в потоке, обеспечивает расчет скорости потока с выходом на расход. Расчет может быть выполнен как по точкам начала роста температуры (фронт температурного возмущения), так и по точкам максимальной температуры на датчиках. Например, распределение температуры в добывающей скважине, фиксируемое в различные моменты времени после завершения индукционного нагрева, показано на рис. 5.



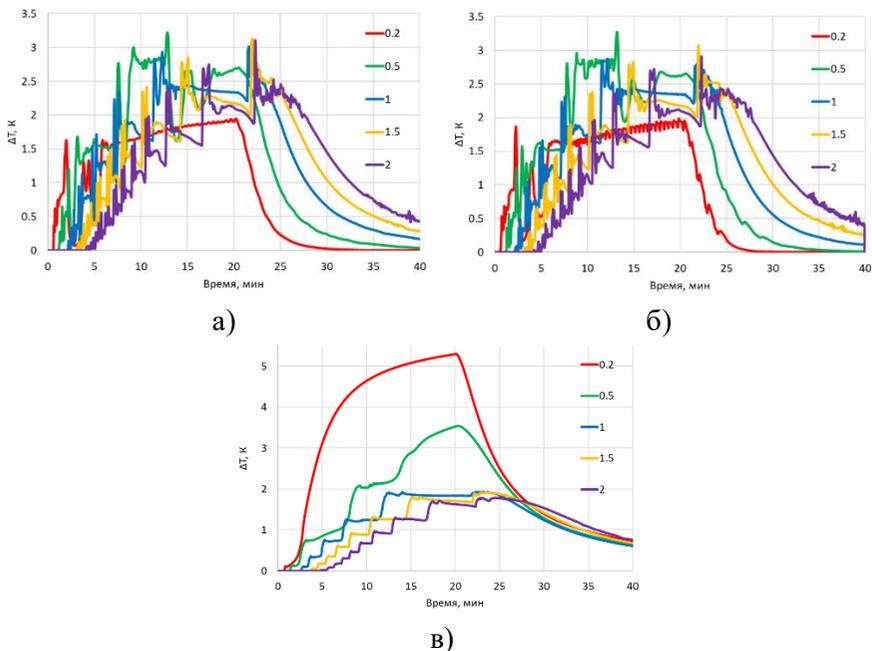
*Рис. 5. Распределение температуры в добывающей скважине в различные моменты времени после завершения индукционного нагрева, расход жидкости 10 м<sup>3</sup>/сут (шифр кривых – время после прекращения нагрева, мин, цветом выделен участок нагрева)*

Положение фронта тепловой метки (расстояние относительно нижней границы участка нагрева) через 0, 2.5, 5 мин после прекращения нагрева равно около 0.4, 1.7, 3.2 м соответственно, что соответствует расходу в колонне 8.5 и 9.7 м<sup>3</sup>/сут соответственно. Расход в колонне по динамике перемещения температурного фронта (положение 3.4, 5.0, 6.6 м) равен 10.4 м<sup>3</sup>/сут.

Данная технология в реальных скважинных условиях реализуется путем проведения серии замеров на подъеме и спуске сразу после завершения работы индуктора. Время работы индуктора зависит от дебита скважины, поскольку с увеличением расхода нагрев жидкости, определяющий величину тепловой метки, снижается. В частности, при увеличении расхода жидкости с 5 до 10 м<sup>3</sup>/сут величина максимальной термоаномалии жидкости на выходе из области индукционного нагрева снижается с 0,82 до 0,44 К.

В добывающих скважинах в качестве мешающего фактора выступает эффект естественной тепловой конвекции (ЕТК) и наличие в потоке двух фаз, например, нефть и вода. ЕТК и всплытие капель нефти в потоке сопровождается формированием вихрей и значительными температурными флуктуациями. Результаты расчета динамики температуры над участком индукционного нагрева при продолжительности цикла нагрева 20 мин показаны на рис. 6.

Расход жидкости в обсадной колонне принят 5 м<sup>3</sup>/сут. Построены кривые на расстоянии по радиусу 20, 10, 0 мм от стенки обсадной колонны (от центра потока к стенке колонны). Характер поведения температуры из-за эффекта ЕТК немонотонен, на кривых наблюдаются значительные колебания температуры, амплитуда колебаний на модельных кривых составляет более 1 К. Указанный эффект объективно осложняет локализацию положения фронта тепловой метки по показаниям температурных датчиков. Наличие температурных флуктуаций увеличивает погрешность определения времени прихода температурной метки и расхода жидкости.



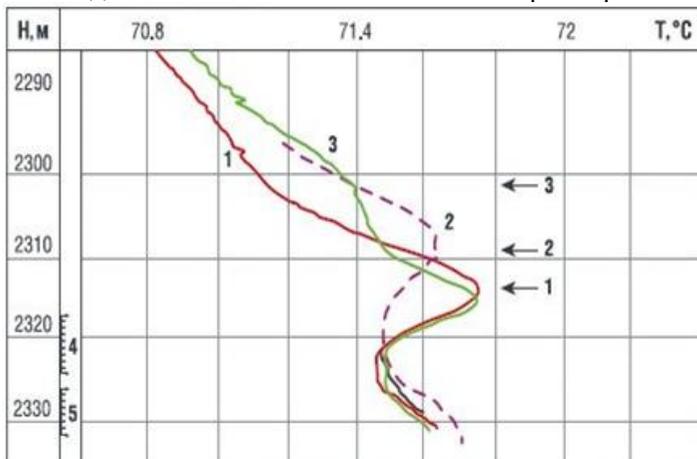
*Рис. 6. Динамики температуры в жидкости после начала индукционного нагрева с учетом влияния ЕТК при радиальном расстоянии 20, 10, 0 мм (а, б, в соответственно) от стенки обсадной колонны, расход жидкости 5 м<sup>3</sup>/сут.*

Степень влияния естественной тепловой конвекции на характер движения жидкости во многом зависит от ее расхода. При средней скорости потока порядка 2 см/мин (50 м<sup>3</sup>/сут в колонне диаметром 150 мм) влияние ЕТК становится пренебрежительно малым.

В четвертой главе также приведены примеры исследования скважин аппаратурой активной термометрии при оценке дебита и приемистости скважин месторождений Западной Сибири и Урало-Поволжья при компрессорном опробовании добывающих скважин и нагнетательных скважинах при закачке после остановки.

На определенной глубине проводилось кратковременное индукционное воздействие на обсадную колонну, таким образом была создана тепловая метка. Далее проводилась серия замеров

распределения температуры по стволу скважины после прекращения работы компрессора. Скорость движения тепловой метки оценивается по длине перемещения термоаномалии за определенный промежуток времени. Пример определения расхода жидкости по перемещению тепловой метки в процессе компрессорного опробования показан на рис. 7, где кривые 1, 2 и 3 зарегистрированы в различные моменты времени движения тепловой метки по стволу скважины в процессе восстановления давления после отключения компрессора.



*Рис. 7. Распределение температуры по стволу скважины после индукционного нагрева при компрессорном освоении. Термограммы и положения тепловой метки на момент времени 1 - 10 ч 25 мин, 2 - 10 ч 39 мин, 3 - 11 ч 5 мин. 4, 5 - интервалы перфорации. Оценка дебита по 1 и 2 - 6,4 м<sup>3</sup>/сут. По 2 и 3 5,4 м<sup>3</sup>/сут*

В момент времени 10 ч 25 мин тепловая метка находилась на глубине 2313.8 м, в 10 ч 39 мин тепловая метка достигла глубины 2309 м, а в 11 ч 5 мин глубины 2301.5 м. Оцененный дебит по кривым 1 и 2 составил 6.4 м<sup>3</sup>/сут, а по кривым 2 и 3 значение 5.4 м<sup>3</sup>/сут. Наблюдается уменьшение дебита притока в процессе восстановления давления.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для изучения неизотермического многофазного потока жидкости в трубе, обеспечивающего контролируемую циркуляцию потока жидкостей и газа в диапазоне скоростей от 0,1 м/мин до 16 м/мин и углов наклона трубы от  $-3^\circ$  до  $23^\circ$ . Установка имеет автоматизированную систему управления и контроля технологических процессов. Система гидравлической обвязки позволяет моделировать потоки в добывающей и нагнетательной скважине.

2. Исследована эволюция метки для различных параметров одно - и двухфазного потоков. Установлено, что для восходящего (нисходящего) потока проявляется эффект возрастания (уменьшения) скорости движения тепловой метки с уменьшением (увеличением) площади эффективного сечения движения разогретой жидкости и наличие застойных зон в интервалах изменения траектории ствола скважины.

3. Показано, что скорость движения тепловой метки определяется с большей достоверностью по переднему фронту температурной аномалии, чем по положению её максимума. Это наиболее ярко проявляется для участков с нисходящими потоками.

4. Экспериментальные испытания показали, что при индукционном воздействии на стальную колонну с мощностью тепловыделения 1кВт величина нагрева стальной колонны при скорости движения воды внутри колонны 4,5 м/мин превышает 4 К. что достаточно для создания регистрируемых тепловых меток.

5. Сравнение аналитической модели с результатами экспериментальных исследований в диапазоне расходов от 5 до 50 м<sup>3</sup>/сут продемонстрировали высокую сходимость кривых динамики изменения температуры зоны разогрева с относительным отклонением модельных и экспериментальных кривых не более 4%, что подтверждает возможность использования моделирования при интерпретации данных активной термометрии.

6. Предложен алгоритм обработки данных наблюдения за эволюцией тепловой метки. Испытания на экспериментальной установке показали его высокую точность (относительное отклонение

расчетных и задаваемых расходов не превышает 20%, при плотности распределения датчиков температуры с шагом 1 см) в диапазоне расходов от 3.5 до 55 м<sup>3</sup>/сут.

7. Исследованы оптимальные параметры нагрева при создании тепловой метки. Установлено, что интервалы включения и выключения нагревателя должны соотноситься как 1:3. Общее количество включений/выключений при записи одного пакета данных должно быть не менее трёх. Длительность нагрева практически не влияет на распределение локальных скоростей потока.

8. Исследовано влияние эффекта свободной конвекции на эволюцию тепловой метки. Показано, что при определении эпюры скоростей неизотермического потока влияние естественной тепловой конвекции значительно при средней скорости менее 2 см/мин.

9. Представлены примеры промысловых геофизических исследований с применением метода активной термометрии при определении расходных параметров в нагнетательной и добывающей скважинах.

10. Даны рекомендации по практическому применению тепловых меток для определения расходных параметров при освоении и эксплуатации малодебитных скважин.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### ***Публикации в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов (перечень ВАК):***

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

2. Гаязов М. С. Применение регулярных температурных меток для измерения фазовых расходов в низкодебитных горизонтальных скважинах / М. С. Гаязов, Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2020. – Т. 6, № 1 (21). – С. 150-165.

3. Космылин Д. В. Экспериментальное исследование теплового поля в скважине в процессе индукционного воздействия / Д. В. Космылин, Ф. Ф. Давлетшин, Д. Ф. Исламов, В. Я. Федотов, М. С. Гаязов // Нефтегазовое дело. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 56-64.

4. Гаязов М. С. Особенности теплового поля в горизонтальной скважине применительно к определению расхода жидкости методом активной термометрии / М. С. Гаязов, Ф. Ф. Давлетшин, Р. А. Валиуллин, А. Р. Яруллин, Д. Ф. Исламов, И. В. Канафин // Нефтегазовое дело. – 2023. – Т. 21, № 5. – С. 6-18.

***Статьи в материалах конференций, входящих в международные базы Scopus и/или Web of Science:***

5. Yarullin A. R. Experimental study of non-isothermal multiphase flow, in conditions of running horizontal wells / A. R. Yarullin, R. A. Valiullin, R. K. Yarullin, M. S. Gayazov // Horizontal Wells 2017. Challenges and Opportunities. – Kazan, 15-19 May 2017.

6. Sharafutdinov R. F. Investigation of temperature field in horizontal wells with heat source / R. F. Sharafutdinov, R. A. Valiullin, A. Sh. Ramazanov, T. R. Khabirov, R. K. Yarullin, I. G. Nizaeva, M. S. Gayazov, A. A. Popov // Society of petroleum engineers - SPE Russian Petroleum Technology Conference 2018. – Moscow, 15-17 October 2018.

***Патенты:***

7. Патент № 169085, Российская Федерация. Прибор для измерения скорости и расхода флюида в горизонтальной скважине / Р. А. Валиуллин, М. С. Гаязов, Р. К. Яруллин, А. Р. Яруллин; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования "Башкирский государственный университет" (RU); заявл. 15.11.2016 № 2016144780; опубл. 02.03.2017.

8. Патент № 2751528 С1, Российская Федерация. Способ определения скорости потока жидкости в скважине / Р. К. Яруллин, Р. А. Валиуллин, А. Р. Яруллин, М. С. Гаязов; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Башкирский государственный университет" (RU); заявл. 23.11.2020 № 2020138389; опубл. 14.07.2021.

### *Другие публикации по теме диссертации:*

9. Яруллин Р. К. Концепция применения метода температурных меток в горизонтальных скважинах в условиях многофазного потока / Р. К. Яруллин, А. Р. Яруллин, М. С. Гаязов // ПРОнефть. Профессионально о нефти. – 2019. – № 1 (11). – С. 7-11.

10. Гаязов М. С. Метод температурных меток оценки скорости потока и общего расхода применительно к условиям действующих горизонтальных скважин / М. С. Гаязов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. – 2017. – № 2. – С. 44-55.

11. Гаязов М. С. Оптимизация измерительной базы тепловых меточных расходомеров / М. С. Гаязов, Р. К. Яруллин, Д. В. Космыллин // Наука. Инновации. Технологии. – 2020. – № 1. – С. 22-46.

12. Гаязов М. С. Экспериментальное изучение температурных аномалий в условиях горизонтальных, наклонных и вертикальных каналов / М. С. Гаязов // Сборник статей международной молодежной научно-практической конференции «Тенденции и инновации современной науки». – Нефтекамск: Наука и просвещение, 2015. – С. 44-55.

13. Гаязов М. С. Метод температурных меток оценки скорости потока и общего расхода применительно к условиям действующих

горизонтальных скважин / М. С. Гаязов, Р. К. Яруллин // Материалы ежегодной научно-практической конференции посвященной Дню геолога. – Уфа: БашГУ, 2016. – С. 25-26.

14. Гаязов М. С. Метод меченой жидкости при оценке линейных скоростей неизотермического горизонтального и субгоризонтального потоков / М. С. Гаязов // Тезисы докладов XXII Научно-практической конференции «Новая геофизическая техника и технологии для решения задач нефтегазовых и сервисных компаний». – Уфа: Новтек Бизнес, 2016. – С. 116-117.