



На правах рукописи

ХАЛИЛОВ ДАМИР ГАЗИНУРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА
АКТИВНОЙ ОПТОВОЛОКОННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
ТЕРМОМЕТРИИ**

Специальность 1.6.9 - Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Пермь 2026

Работа выполнена на кафедре геофизики геологического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)

Научный руководитель: **Костицын Владимир Ильич,**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геофизики Пермского государственного национального исследовательского университета

Официальные оппоненты: **Шарафутдинов Рамиль Фаизырович,**
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры геофизики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Гуляев Данила Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры геофизических информационных систем ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (ПФИЦ УрО РАН), г. Пермь

Защита диссертации состоится «19» марта 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.358.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» и на сайте университета www.psu.ru.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью, в двух экземплярах направлять по адресу: 614068, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15, ПГНИУ, учёному секретарю диссертационного совета Огородовой Ирине Владимировне.

E-mail: dissovet.geophys@psu.ru.

Автореферат диссертации разослан «_____» января 2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.2.358.01,
кандидат геолого-минералогических наук, доцент

И. В. Огородова



I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Важной составляющей в нефтяной промышленности являются инновационные средства контроля добычи нефти, способствующие оптимизации технологических процессов. В последние годы с задачами мониторинга успешно справляются системы оптоволоконной распределённой термометрии, которые предоставляют возможность изучать температурное поле по всей длине оптоволоконного кабеля, спущенного в скважину. Для дальнейшего сохранения спроса в сфере геофизических исследований оптоволоконные системы нуждаются в расширении инструментария, реализации новых методик исследований и применении новых подходов к оценке пространственной и временной детализации температурных полей. Именно необходимость разностороннего развития систем оптоволоконной распределённой термометрии, ведущего к повышению их информативности и эффективности, определяет в своей основе актуальность данного исследования.

Степень научной разработанности темы исследования

Исследованиями, направленными на развитие скважинной термокондуктивной дебитометрии, и созданием альтернативных систем постоянного мониторинга занимались: С. М. Аксельрод, А. А. Арбузов, В. С. Баканеева, Р. А. Валиуллин, Е. Л. Воронин, И. Н. Гайворонский, Р. А. Галимов, М. С. Гаязов, Д. Н. Гуляев, В. Н. Даниленко, С. В. Дергачёв, А. И. Ипатов, А. Г. Исаевич, Б. П. Казаков, А. М. Киреев, М. И. Кременецкий, Д. В. Космылин, Д. Ю. Кропачев, Д. М. Лазуткин, Л. Ю. Левин, В. М. Лобанков, Д. И. Михальченко, Р. С. Мухамадиев, В. К. Мухутдинов, В. Ф. Назаров, А. С. Некрасов, А. П. Потапов, В. Н. Пугач, В. Ф. Рыбка, А. Д. Савич, О. Л. Сальникова, В. К. Теплухин, Г. З. Файнбург, О. С. Филатова, И. А. Черных, А. В. Шалимов, Р. Ф. Шарафутдинов, М. И. Эпов, А. В. Шумилов, А. Р. Яруллин, Р. К. Яруллин, Й. М. Bahr, V. F. Bense, O. Bour, A. Chalari, F. Ciocca, T. Coleman, D. J. Hart, R. Hochreutener, S. Krause, T. Le Borgne, C. Maldaner, M. Mondanos, N. Lavenant, B. Parker, T. Read, J. S. Selker, S. M. Sellwood и др.

В области изучения и улучшения показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры: пространственного разрешения и постоянной времени; исследования проводили А. Э. Алексеев, М. А. Бухарин, В. В. Горбуленко, М. Д. Дмитриев, В. Ф. Ермаков, В. А. Исаев, А. С. Засыпкин мл, О. Е. Наний, С. П. Никитин, А. Б. Пнёв, Я. С. Путинин, А. С. Скоробогатых, М. А. Таранов, А. Д. Тетерин, В. Н. Трещиков, Э. А. Формиряков, Л. Р. Хакимова, Д. Р. Харасов, А. О. Чернуцкий, А. В. Чугаев, В. Б. Шлейников, N. Arsal, A. A. Bakar, D. Balogun, M. Elgaud, F. Farahi, M. Froggatt, R. Gerald, D. K. Gifford, D. A. Jackson, D. C. Jones, A. Kadhim, S. T. Kreger, Y. Meng, M. H. Mokhtar, M. Roman, A. K. Sang, M. Zan, A. Zainuddin, J. Zha, Y. Zhuang и др.

Созданием лабораторных установок, способных моделировать физические условия скважинной среды, изучаемой оптоволоконными распределёнными датчиками температуры, занимались: А. Н. Архипов, Р. А. Валиуллин, Н. И. Кошторев, П. С. Лагунов, В. И. Луппов, Е. А. Малявко, А. Н. Никонов, А. С. Петухов, Р. Н. Самар, А. Р. Яруллин, Р. К. Яруллин и др.

Цель диссертационной работы состоит в разработке геофизического метода активной оптоволоконной распределенной термометрии, включающего систему распределённой термодебитометрии, методику количественного определения дебитов и создание лабораторной установки для моделирования физических условий скважинной среды с оптимальным количеством функциональных возможностей.

Для достижения поставленной цели исследования определены следующие задачи:

1) создать оптоволоконную систему распределённой термодебитометрии, предусматривающую возможность совместного проведения геофизических исследований и работ в скважинах действующего фонда стандартными электронными приборами и оптоволоконными распределёнными датчиками температуры с нагревом и без него;

2) разработать методику количественного определения общего и поинтервального дебитов методом оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии, обеспечивающую оперативное проведение каротажа и интерпретацию данных;

3) изучить тепловую инерционность оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в кабельные изделия, определив их показатели детализации (пространственное разрешение и постоянную времени), используя модели кабелей, широко применяемые для долговременного мониторинга в нефтедобывающих скважинах;

4) разработать критерий для определения пространственного разрешения оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в кабельные изделия, наиболее подходящий для геофизических исследований скважин;

5) обосновать на основании экспериментальных данных способ определения пространственного разрешения и постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в кабельные изделия;

6) сконструировать лабораторную установку, предназначенную для моделирования физических условий скважинной среды, изучаемой посредством оптоволоконных распределённых датчиков температуры, с оптимальным количеством функциональных возможностей;

7) апробировать сконструированную лабораторную установку посредством моделирования различных скважинных условий для повышения достоверности

разработанной автором методики исследований, обеспечивающей выход на количественное определение общего и поинтервального дебитов.

Научная новизна диссертационной работы:

- создан отечественный вариант системы оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии за счёт создания модели геофизического кабеля, конструкция которого обеспечивает одновременную работу точечных электронных приборов, измерение температурного поля по оптоволокну и выработку тепловой энергии нагревательным элементом;

- разработана методика количественного определения общего и поинтервального дебитов для метода оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии;

- разработан новый критерий для определения пространственного разрешения оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в кабельные изделия, наиболее подходящий для геофизических исследований скважин;

- разработан теоретический способ определения показателей детализации температурного поля, регистрируемого оптоволоконными распределёнными датчиками температуры, пространственной и временной разрешающей способности, осуществляемый посредством использования формул, полученных экспериментальным путём;

- сконструирована установка-имитатор скважины, пригодная для калибровки оптоволоконных распределённых датчиков температуры, обладающая рядом функциональных возможностей для реализации созданной методики количественного определения общего и поинтервального дебитов.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Созданный отечественный вариант системы оптоволоконной распределённой термодебитометрии является многофункциональным средством измерения и контроля. Его основа, геофизический кабель, позволяет одновременно проводить исследования в скважине точечными электронными приборами, оптоволоконными распределёнными датчиками температуры, как в отдельности, так и совместно с нагревательным элементом.

2. Методика количественного определения общего и поинтервального дебитов предоставляет для метода оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии возможность обретения самостоятельности в плане информационной независимости от дополнительных средств измерения и методов, используемых для мониторинга в нефтедобывающих скважинах.

3. Разработанный критерий для определения пространственного разрешения оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в кабельные изделия, по практическим результатам наиболее согласуется не только с данными геофизических исследований в реальных скважинах, но и с

показателями тепловой инерционности кабельных изделий в сравнении с другими существующими критериями.

4. Способ теоретического определения пространственного разрешения и постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры на основе данных о конструкции изделия-носителя (кабеля) позволяет заблаговременно оценивать возможности используемых систем оптоволоконного мониторинга и создавать кабели для заранее запланированных объектов и целей исследования.

5. Калибровочная установка-имитатор скважины обладает комплексом функциональных возможностей, позволяющих не только проводить лабораторные испытания для реализации методики исследований, созданной автором, но и осуществлять комплексное моделирование множества иных процессов, происходящих в скважинной среде.

Методологическая основа исследования

Выполнены теоретические и модельные исследования, проведен анализ опубликованных данных, выполнены экспериментальные исследования с использованием образцов оптоволоконных распределённых датчиков температуры для моделирования скважинных условий, обобщены результаты полевых производственных и опытно-методических исследований. Установлены преимущества и недостатки разработок других специалистов, на основе которых определены оптимальные направления для решения поставленных задач.

Положения, выносимые на защиту

1. Система оптоволоконной распределённой скважинной термокондуктивной дебитометрии, основанная на использовании геофизического кабеля, позволяет выполнять исследования и работы в скважинах действующего фонда стандартными электронными приборами и оптоволоконными распределёнными датчиками температуры совместно с нагревом и без него.

2. Показатели тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в кабельные изделия, предлагается использовать при проведении геофизических исследований и мониторинге в нефтедобывающих скважинах.

3. Лабораторная установка для калибровки оптоволоконных распределённых датчиков температуры, предназначенная для моделирования регулируемой скорости потока (дебита) жидкости, зенитного угла скважины, фоновой температуры и содержания нефтепродуктов в скважинной жидкости, опробована на материалах геофизических исследований в нефтедобывающей скважине.

Личный вклад автора

Автор выполнял теоретические исследования, проводил лабораторные испытания, осуществлял обработку и интерпретацию всей полученной информации. Создал комплексную скважинную систему оптоволоконной

распределённой термокондуктивной дебитометрии, осуществлял определение показателей тепловой инерционности модельного ряда оптоволоконных распределённых датчиков температуры. Сконструировал лабораторную установку для апробирования созданной методики исследований и комплексного моделирования реальной скважинной среды, изучаемой посредством оптоволоконных распределённых датчиков температуры.

Апробация работы

Результаты диссертационного исследования отражены в 26 научных публикациях автора, из которых 3 в журналах перечня Scopus, 11 в журналах перечня ВАК, 12 в журналах перечня РИНЦ, а также в 2 патентах на полезную модель.

Основные положения диссертации обсуждались на следующих научно-практических конференциях: «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» (Пермь, 2021, 2022), на онлайн-конференции Springer «Science and Global Challenges of the 21st Century» (Пермь, 2022), на конкурсах молодых работников в ПАО «ЛУКОЙЛ-Пермь» на лучшую научно-техническую разработку (Пермь, 2021, 2023), на онлайн-форуме «Инновации для повышения эффективности сопровождения нефтегазовых активов» ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» (Москва, 2024).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Содержание работы изложено на 163 страницах, включает 16 таблиц, 59 рисунков и содержит список литературных источников из 144 наименований.

Благодарности

Автор выражает благодарность профессору кафедры геофизики Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ), доктору технических наук В. И. Костицыну за научное руководство в написании данной работы.

Особую благодарность выражаю за содействие в реализации технической стороны лабораторных испытаний специалистам:

- 1) ПАО «Пермнефтегеофизика» – за обеспечение измерительной аппаратурой и теоретико-интерпретационное содействие;
- 2) ООО «ЗУРО» – за обеспечение лабораторными стендами и изготовление установки-имитатора скважины, использованными для исследований;
- 3) ООО «Пермгеокабель» – за обеспечение образцами оптоволоконных распределённых датчиков температуры для испытаний.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первым направлением развития систем оптоволоконной распределённой термометрии является создание отечественного варианта системы оптоволоконной распределённой термокондуктивной дебитометрии, обладающей

устойчивостью к воздействию скрытых температурных аномалий и способной на количественное определение динамических параметров потоков скважинной жидкости без помощи сторонних измерителей в процессе исследований.

Вторым направлением развития систем оптоволоконной распределённой термометрии является изучение показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры, входящих в состав геофизических кабелей.

Третьим направлением развития является моделирование скважинных температурных полей посредством использования лабораторных установок, способных воспроизводить определённые физические параметры реальной скважинной среды и оптимизировать процесс интерпретации данных.

Первое защищаемое положение. *Система оптоволоконной распределённой скважинной термокондуктивной дебитометрии, основанная на использовании геофизического кабеля, позволяет выполнять исследования и работы в скважинах действующего фонда стандартными электронными приборами и оптоволоконными распределёнными датчиками температуры совместно с нагревом и без него [1, 3–9, 15–25, 28].*

Востребованность применения в действующих скважинах модификации метода оптоволоконной распределённой термометрии – оптоволоконной распределённой термокондуктивной дебитометрии – связано с её устойчивостью к воздействию скрытых аномалий и наличием прямой связи с динамическими параметрами потоков жидкости. Основным компонентом в создаваемой системе оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии служит кабель.

Основной компонент создаваемой системы

В геофизическом кабеле необходимо наличие двух составляющих: измерительного (оптоволокна) и нагревательного элемента. Главным вопросом является выбор нагревательного элемента. В конструкции геофизических кабелей, в основном, закладываются электрические проводники с крайне малыми сопротивлениями: медь ($0,017 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$), алюминий ($0,028 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$), сталь ($0,12 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$); и добиться от них оперативного перегрева с применением стандартных источников питания (до 600 В) невозможно. В связи с этим автором предлагается использование проводника комбинированной разновидности, основу которого составит медь, переходящая в нержавеющую сталь ($0,87 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) и обратно в медь. Применение в конструкции геофизического кабеля комбинированной жилы с активным участком ограниченной заданной длины, обычных однородных проводников и оптоволокна позволит проводить исследования стандартными электронными приборами и оптоволоконными датчиками, как с нагревом, так и без него. В качестве дополнительной аппаратуры может быть использована любая оптоволоконная станция и типовой источник питания.

Новая методика проведения исследований

В рамках создания системы оптоволоконной распределённой скважинной термокондуктивной дебитометрии (СТД) автором предлагается методика «Исследование скорости остывания кабеля», обеспечивающая самостоятельное количественное определение общего и поинтервального дебитов, оперативность процесса каротажа и интерпретации данных, и представляющая собой регистрацию процесса остывания кабеля в форме хронологически последовательных кривых (рис. 1).

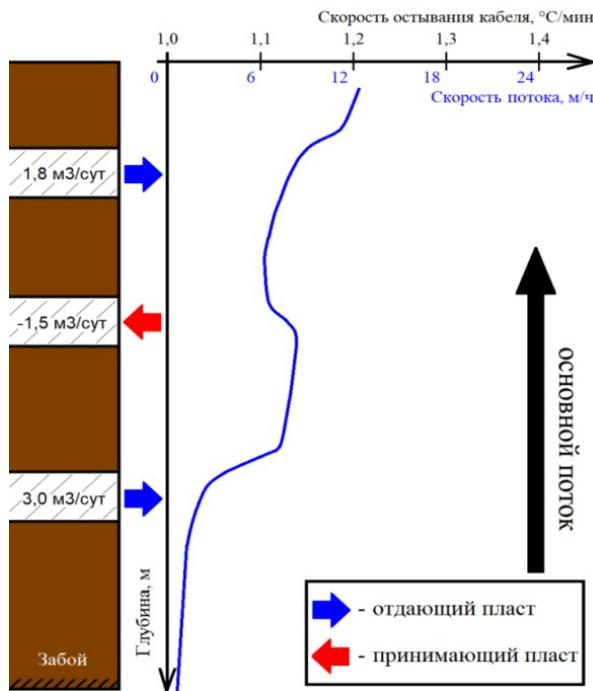


Рисунок 1 – Схема методики «Исследование скорости остывания кабеля»

Изначально в действующей добывающей скважине оптоволоконный геофизический кабель позиционируется так, чтобы в видимости нагревательного элемента находились работающие интервалы и зумпф. Затем кабель перегревается терморезистивным способом до приемлемой величины. По готовности напряжение отключается и производится запись термограмм на малом времени накопления для фиксации процесса потери тепла кабелем, т. е. для определения кривой скорости его остывания. Чем выше скорость потока (расход) жидкости в скважине, тем быстрее остывает кабель.

Процесс передачи тепла от кабеля к потоку жидкости относится к категории конвективного теплообмена. Поток (приёмник), контактируя с геофизическим кабелем (источником), снижает его температуру пропорционально расходу, что описывается системой уравнений:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (T_H - T_C),$$

$$Q = \sigma \cdot W \cdot C \cdot (T_H - T_C),$$

где Q – тепловой поток, Вт; α – коэффициент теплопередачи, Вт / ($\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К}$); S – площадь поверхности, м^2 ; T_H – температура нагревателя, $^\circ\text{К}$; T_C – температура среды, $^\circ\text{К}$; σ – плотность флюида, $\text{кг}/\text{м}^3$; W – объёмный расход флюида, $\text{м}^3/\text{с}$; C – удельная теплоёмкость флюида, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{К})$.

В системе уравнений фигурируют две составляющие процесса – кабель и поток жидкости. Техофизические свойства кабеля известны, в то время как динамика потока неизвестна, а единственный параметр, через который можно выйти на расход (на скорость потока) жидкости, – изменение температуры по времени. В связи с этим автор предлагает методику исследований, упрощённую в технологическом и интерпретационном плане, осуществимую посредством зависимости, учитывающей теплообмен в стволе скважины конкретным оптоволоконным кабелем, типа

$$W = f(V_{ocm}, T_L, Z, K_{CH}),$$

где W – объёмный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{сут}$; V_{ocm} – скорость остыния кабеля, $^\circ\text{С}/\text{мин}$; T_L – локальная температура в интервале исследований, $^\circ\text{С}$; Z – зенитный угол в интервале исследований, $^\circ$; K_{CH} – коэффициент содержания нефтепродуктов в скважинной жидкости, %.

Интерпретация данных процесса остыния кабеля довольно проста и начинается с локализации зумпфа и работающих интервалов перфорации. Далее в выделенных объектах определяется время остыния кабеля (t_{ocm}), и с учётом известной величины перегрева рассчитывается скорость его остыния:

$$V_{ocm} = (T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}}) / t_{ocm},$$

где V_{ocm} – скорость остыния кабеля, $^\circ\text{С}/\text{мин}$; $T_{\text{нач}}$ – температура кабеля в нагретом состоянии, $^\circ\text{С}$; $T_{\text{кон}}$ – температура кабеля в остывшем состоянии, $^\circ\text{С}$; t_{ocm} – время остыния кабеля, мин.

После расчёта скорости остыния кабеля (V_{ocm}) по приведённой зависимости определяется расход (скорость потока) жидкости.

Опытная модель геофизического кабеля

На основе рекомендаций, выработанных экспериментальным способом, состоящих в повышенном содержании теплоизолирующих элементов и пространственном разносе нагревательной и измерительной линий, создана опытная модель геофизического кабеля (рис. 2). Кабель подвергся лабораторным испытаниям для проверки его работоспособности и применимости созданной методики «Исследование скорости остыния кабеля» при помощи установки, моделирующей переменный расход скважинной жидкости.

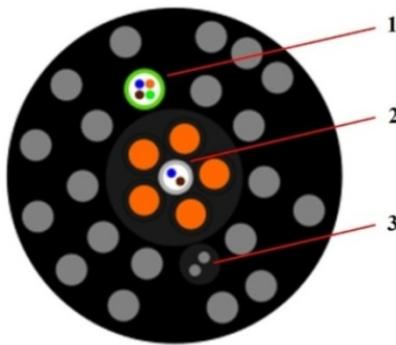


Рисунок 2 – Сечение опытной модели геофизического кабеля для оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии:
1 – полимерный модуль; 2 – металлический модуль; 3 – нагревательный элемент

Корреляционные зависимости (рис. 3), построенные на основе данных лабораторных испытаний, подтверждают работоспособность опытной модели оптоволоконного геофизического кабеля и применимость созданной методики исследования.

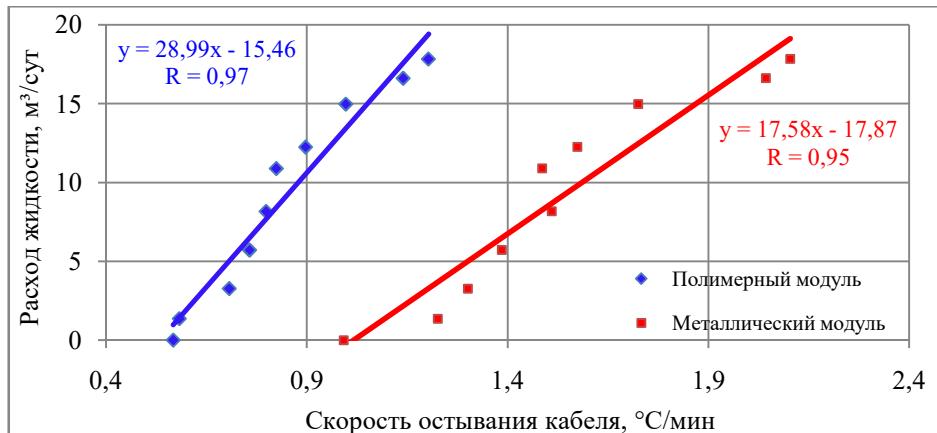


Рисунок 3 – Корреляционные зависимости между расходом жидкости и скоростью остывания геофизического кабеля

Анализ эффективности созданной автором системы оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии и методики исследований в сравнении с разработками других авторов приведён в таблице 1.

Таблица 1

Анализ эффективности научно-технических разработок по физико-технологическим критериям

Научно-техническая разработка	Охват скважинного пространства при долговременном мониторинге	Оперативность проведения исследований	Зависимость от сторонних данных	Практическое применение
СТД на переменной скорости (В. Ф. Назаров и др.)	Точечный	Умеренная	Независимая	Глубокие скважины
Азимутальный датчик СТД (Р. А. Валиуллин и др.)	Точечный	Умеренная	Независимая	Лабораторные испытания
Температурные метки (Р. К. Яруллин и др.)	Точечный	Ускоренная	Независимая	Глубокие скважины
Методика ООО «Газпромнефть НТЦ» (Д. М. Лазуткин и др.)	Во всю длину оптоволокна	Умеренная	Независимая	Лабораторные испытания
Испытание на тепловую адvectionю (S. M. Sellwood и др.)	Во всю длину оптоволокна	Ускоренная	Частично зависимая	Неглубокие скважины
Исследование формы кривой СТД (Российские компании)	Во всю длину нагревательного элемента	Ускоренная	Зависимая	Глубокие скважины
Каротаж на гибридном кабеле (V. F. Bense и др.)	Во всю длину нагревательного элемента	Ускоренная	Частично зависимая	Неглубокие скважины
Испытание тепловым импульсом (T. Coleman и др.)	Во всю длину нагревательного элемента	Длительная	Частично зависимая	Неглубокие скважины
Исследование скорости остывания кабеля (авторская)	Во всю длину нагревательного элемента	Ускоренная	Независимая	Глубокие скважины

Примечание – цветовая градация оценок: красный – не эффективна; жёлтый – приемлема; зелёный – эффективна.

По первому защищаемому положению решены следующие задачи:

1) разработан авторский вариант системы оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии на основе геофизического кабеля, обеспечивающего возможность проведения исследований электронными приборами и оптоволоконными датчиками с нагревом и без него;

2) разработана и опробована в ограниченном формате методика «Исследование скорости остывания кабеля», отличающаяся оперативностью проведения каротажа и интерпретации данных, а также самостоятельностью в количественной оценке общего и поинтервального дебитов, в рамках метода оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии.

Таким образом, полученные результаты исследований подтверждают, что первое защищаемое положение обосновано и доказано.

Второе защищаемое положение. Показатели тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в

кабельные изделия, предлагаются использовать при проведении геофизических исследований и мониторинге в нефтедобывающих скважинах [2, 10–12, 26, 27].

Тепловая инерционность – это свойство оптоволоконных распределённых датчиков температуры, проявление которого состоит в искажении изучаемого температурного поля в пространственном и временном измерении из-за влияния теплоизолирующих слоёв кабельного изделия, в составе которого они эксплуатируются. Численно тепловая инерционность выражается через физические величины – пространственное разрешение и постоянную времени.

Пространственное разрешение

Пространственное разрешение является величиной, отражающей минимальные размеры объектов, которые возможно локализовать. В производственной практике скважинных оптоволоконных исследований не представлялись случаи выделения объектов, соразмерных пространственному разрешению, заявляемому производителями измерительного оборудования. Данное расхождение в показателях детализации связано с непригодностью для направления геофизических исследований существующих критериев для определения пространственного разрешения оптоволоконных датчиков.

Для устранения противоречий автор предлагает создать иной, наиболее подходящий критерий «Проявление фона». Сущность его состоит в воспроизведении температурного поля с увеличением расстояния. Для этого выбирается небольшой участок оптоволоконного датчика (кабеля), условно разделённый на три части, и две среды с различными температурными характеристиками. Первая и третья части кабеля помещаются в более нагретую среду (среда 2), а вторая, промежуточная часть, остаётся в другой среде (среда 1). При этом длина промежуточной части кабеля должна обеспечивать достижение на графике температуры среды 1 не более чем в одной точке (рис. 4).

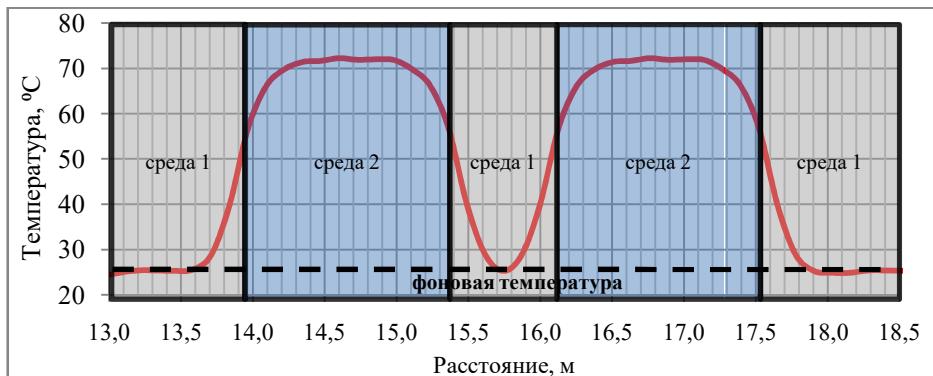


Рисунок 4 – Распределение источников аномалий при моделировании температурного поля по критерию «Проявление фона»

При получении графика, представленного выше, замеряется фактическая физическая длина промежуточной части оптоволоконного датчика (кабеля), которая принимается за значение пространственного разрешения.

Для изучения фактической детализации и опробования внедряемого критерия (посредством проведения лабораторных испытаний) автором подготовлены 12 образцов оптоволоконных кабелей и модулей, широко используемых для проведения геофизических исследований (рис. 5).

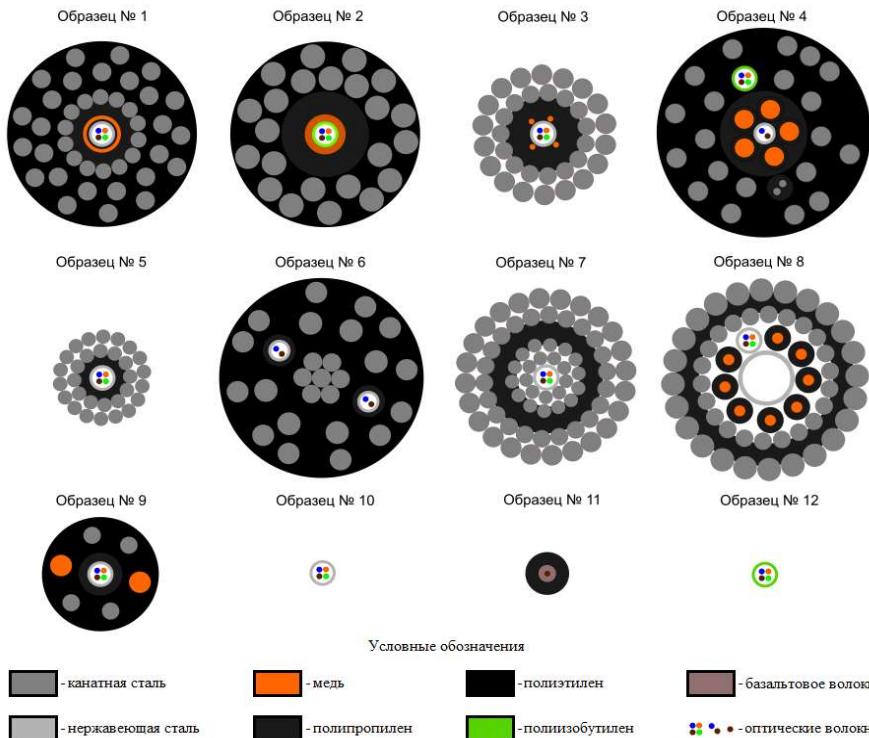


Рисунок 5 – Поперечные сечения испытанных образцов оптоволоконных кабелей и модулей

Коэффициент тепловой инерционности конструкции кабеля

Для установления численно выраженной связи пространственного разрешения и постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры с конструкцией вмещающих их кабельных изделий необходимо саму конструкцию представить в количественном виде, используя специальную величину – коэффициент тепловой инерционности конструкции кабеля:

$$K_{\text{кон}} = \sum S_i \cdot C_i \cdot \sigma_i$$

где $K_{\text{кон}}$ – коэффициент тепловой инерционности конструкции кабеля, Дж/(м·°К); S_i – площадь сечения слоя i , м²; C_i – удельная теплоёмкость слоя i , Дж/кг·°К; σ_i – плотность слоя i , кг/м³.

Сравнение критериев для определения пространственного разрешения

Для определения пригодности предлагаемого автором критерия проведены лабораторные испытания. Сущность данных испытаний состояла в определении пространственного разрешения образцов оптоволоконных датчиков одновременно по уже существующему критерию, ступенеобразному, и по внедряемому авторскому критерию, «Проявление фона», с последующим сравнением результатов испытаний как между собой, так и с данными скважинных геофизических исследований.

В лабораторных испытаниях использовались линейка образцов оптоволоконных кабелей и модулей, установка типа термованна и станция «Silixa Ultima». Коэффициенты тепловой инерционности конструкций для каждого из образцов рассчитаны посредством использования табличных данных о кабельных материалах и прямых измерений. Результаты исследований представлены в таблице 2.

Таблица 2
Результаты лабораторных испытаний с образцами оптоволоконных кабелей и модулей по двум критериям

Образец	$K_{\text{кон}}$ Дж/(м·°К)	Пространственное разрешение, м					
		По критерию ступенеобразному, м					По критерию «Проявление фона», м
		На временах накопления					
		2 мин	5 мин	10 мин	15 мин	20 мин	
№ 1	370,2	0,43	0,43	0,42	0,42	0,41	0,90
№ 2	328,9	0,40	0,40	0,39	0,38	0,37	1,00
№ 3	194,6	0,40	0,39	0,38	0,36	0,36	0,90
№ 4 (1)	286,7	0,28	0,28	0,27	0,26	0,24	1,25
№ 4 (2)	345,6	0,39	0,39	0,38	0,37	0,35	1,40
№ 5	112,5	0,37	0,36	0,36	0,36	0,36	0,60
№ 6	274,4	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,90
№ 7	322,8	0,41	0,41	0,41	0,40	0,38	0,95
№ 8	346,7	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	1,05
№ 9	99,6	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,60
№ 10	3,9	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,50
№ 11	12,9	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,55
№ 12	2,5	0,36	0,36	0,35	0,35	0,35	0,50

Для установления связи между пространственным разрешением и конструкцией оптоволоконных кабелей по результатам лабораторных испытаний построены корреляционные зависимости (рис. 6).

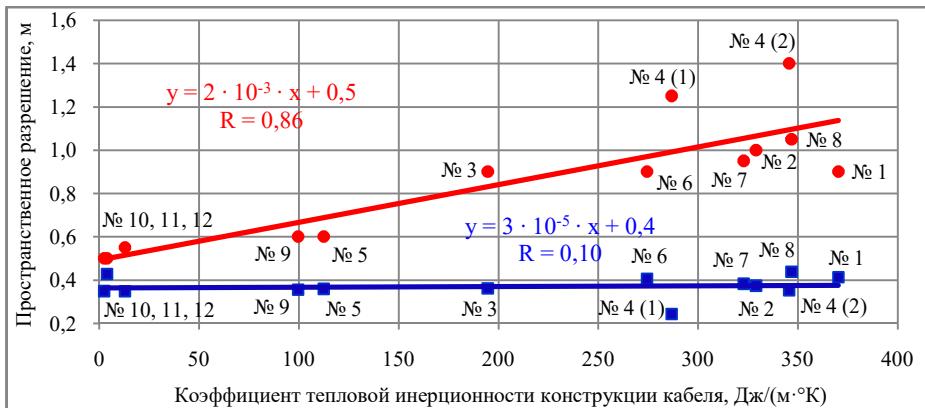


Рисунок 6 – Корреляционные зависимости пространственного разрешения образцов оптоволоконных распределённых датчиков температуры от коэффициентов тепловой инерционности конструкции кабеля: синий – по критерию ступенеобразному, красный – по критерию «Проявление фона»

По приведённым зависимостям (рис. 6) видно, что коэффициент корреляции пространственного разрешения по ступенеобразному критерию составляет 0,10, т. е. отсутствует связь с конструкцией кабельных изделий, в то время как по авторскому критерию «Проявление фона» коэффициент корреляции равен 0,86. Более того, значения по авторскому критерию предельно близки к данным реальных геофизических исследований.

Полученная формула полезна тем, что позволяет определять номинальное пространственное разрешение не только для испытанных образцов, но также для ещё не созданных моделей оптоволоконных кабелей

$$\psi = 2 \cdot 10^{-3} \cdot K_{\text{кон}} + 0,5,$$

где ψ – пространственное разрешение оптоволоконного распределённого датчика температуры, м; $K_{\text{кон}}$ – коэффициент тепловой инерционности конструкции кабеля, $\text{Дж}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{К})$.

Постоянная времени

Постоянная времени является показателем, отражающим быстроту фиксации событий, происходящих в температурном поле, конкретным оптоволоконным распределённым датчиком температуры. Чтобы выбрать оптимальную модель оптоволоконного кабеля, например, для изучения быстропротекающих процессов, необходимо исходить из его фактической чувствительности, оцениваемой по значению постоянной времени.

Для определения постоянных времени образцов оптоволоконных распределённых датчиков температуры, представленных на рис. 5, проведены лабораторные испытания с использованием установки типа термованна,

специальной ёмкости для холодной воды и станции «Silixa Ultima». Итоговые значения постоянных времени испытанных образцов использованы для построения корреляционной зависимости с коэффициентами тепловой инерционности конструкции (рис. 7).

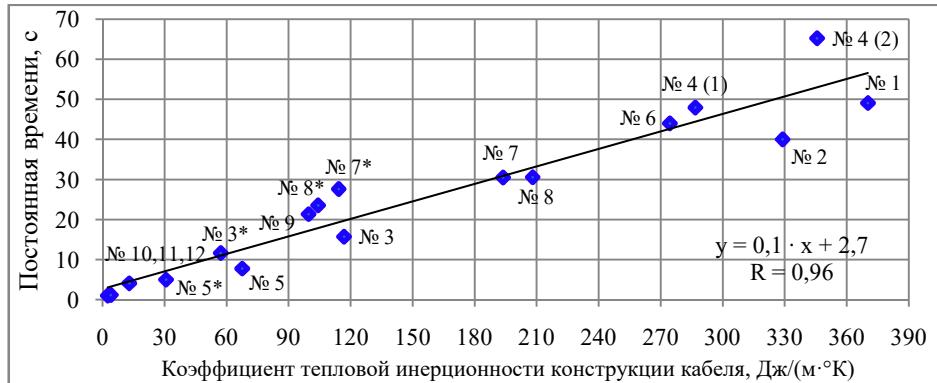


Рисунок 7 – Корреляционная зависимость постоянной времени образцов оптоволоконных распределённых датчиков температуры от коэффициентов тепловой инерционности конструкции кабеля

Наличие на графике позиций со знаком * связано с тем, что от общего тренда заметно отклонились модели бронированных кабелей (образцы № 3, 5, 7, 8). Данные образцы подверглись дополнительным испытаниям без слоёв внешней брони, после которых в формулу определения постоянной времени был добавлен поправочный коэффициент 0,6 для бронированных кабелей

$$\beta = 0,1 \cdot K_{\text{кон}} \cdot K_{\text{Б.К.}} + 2,7 = 0,1 \cdot \sum (S_i \cdot C_i \cdot \sigma_i) \cdot K_{\text{Б.К.}} + 2,7,$$

где β – постоянная времени оптоволоконного распределённого датчика температуры, с; $K_{\text{кон}}$ – коэффициент тепловой инерционности конструкции кабеля, $\text{Дж}/(\text{м} \cdot \text{°К})$; $K_{\text{Б.К.}}$ – поправочный коэффициент для бронированных кабелей, равен 0,6 (если кабель не является бронированным, то коэффициент составляет 1,0); S_i – площадь сечения слоя i , м^2 ; C_i – удельная теплоёмкость слоя i , $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°К})$; σ_i – плотность слоя i , $\text{кг}/\text{м}^3$.

По второму защищаемому положению решены следующие задачи:

1) определены показатели детализации, пространственное разрешение и постоянная времени, оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в кабельные изделия, широко применяемые для долговременного мониторинга в нефтедобывающих скважинах;

2) разработан и опробован новый критерий для определения пространственного разрешения оптоволоконных распределённых датчиков температуры, наиболее приемлемый для геофизических исследований скважин;

3) обоснован способ определения пространственного разрешения и постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры на основании экспериментальных данных по формулам для конкретных конструкций кабелей, в которые они интегрированы.

Таким образом, полученные результаты исследований подтверждают, что второе защищаемое положение обосновано и доказано.

Третье защищаемое положение. *Лабораторная установка для калибровки оптоволоконных распределённых датчиков температуры, предназначенная для моделирования регулируемой скорости потока (дебита) жидкости, зенитного угла скважины, фоновой температуры и содержания нефтепродуктов в скважинной жидкости, опробована на материалах геофизических исследований в нефтедобывающей скважине [13, 14].*

Достоверность моделирования скважинной среды в лабораторных условиях полностью зависит от качества используемых стендов (установок), которое определяется набором их функциональных возможностей. Потребности в комплексном моделировании условий реальной скважинной среды, изучаемой посредством оптоволоконных датчиков, и в повышении возможностей авторской методики исследования, разработанной в первом защищаемом положении, вызвали необходимость сконструировать установку-имитатор скважины.

Установка-имитатор скважины

Установка-имитатор скважины (рис. 8) представляет собой трубу обсадной колонны длиной 3 м и внешним диаметром 168 мм с двумя фланцами, оборудованными герметизируемыми отверстиями для пропуска геофизического кабеля и циркуляционными отверстиями.

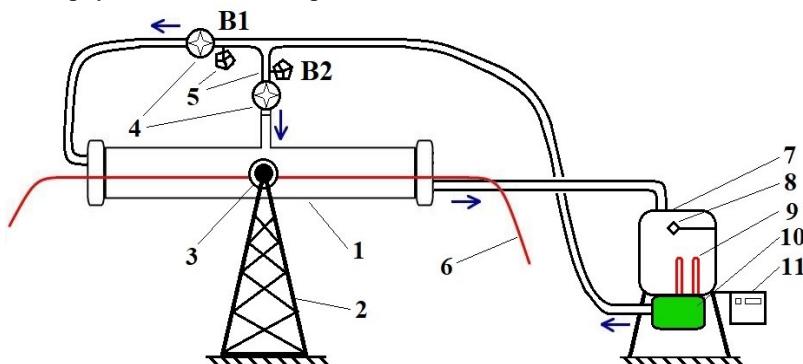


Рисунок 8 – Схема лабораторной установки-имитатора скважины: 1 – труба Ø 168 мм; 2 – опорные стойки; 3 – осевой механизм регулировки зенитного угла; 4 – датчики расхода жидкости; 5 – регулировочные вентили; 6 – геофизический кабель; 7 – резервный бак; 8 – эталонный термометр; 9 – тэнсы; 10 – насос; 11 – ЭБУ

В трубе имеется три циркуляционных отверстия: два приточных отверстия, посередине трубы и снизу, оснащённых датчиками расхода с вентилями В1 и В2 (для регулировки расхода), и одно – отточное, в верхней части трубы. Труба располагается в подвешенном состоянии на стойках, где посредством вращающегося осевого механизма можно регулировать зенитный угол установки в диапазоне от 0 до 90°. Циркуляция жидкости обеспечивается работой насоса, объединённого с резервным баком, оборудованным трубчатыми электронагревателями (тэнами) и эталонным датчиком температуры. Контроль нагрева жидкости обеспечивается посредством электронного блока управления (ЭБУ), соединённого с упомянутыми тэнами и датчиком температуры. В единый контур установка с насосом и с резервным баком объединена циркуляционными каналами, оснащёнными промежуточными вентилями и кранами.

При помощи установки-имитатора скважины проведены лабораторные испытания, задача которых состояла в получении определённых зависимостей, обеспечивающих возможность проведения исследований по авторской методике «Исследование скорости остывания кабеля» в полноценном формате. В процессе лабораторных испытаний производились серии нагрева кабеля и последующие измерения скорости его остывания (V_{ocm}) при зенитных углах (Z) 0°, 45° и 90°, при фоновых (локальных) температурах в установке (T_L), в 15 и 45 °C, с регулируемым расходом от 0,0 до 19,2 $m^3/сут$ (скоростями потока от 0,0 до 45,7 $m/ч$), с использованием воды и дизельного топлива для моделирования содержания нефтепродуктов в скважинной жидкости (K_{CH}) в 0 и 100 % соответственно. В конечном итоге, это позволило получить формулы для определения скорости потока жидкости, опробованные в действующей добывающей скважине.

Исследования в действующей добывающей скважине

Исследования проводились по двум методикам: исследование формы кривой СТД и исследование скорости остывания кабеля – по технологии совместного спуска геофизического кабеля под штанговый глубинный насос.

По методике исследования формы кривой СТД выделено четыре интенсивно работающих интервала (1449,5–1453,0; 1471,0–1472,5; 1486,0–1488,0; 1519,0–1524,0 м), все определены как отдающие. Рассчитана разностная кривая температуры, по которой осуществлена аппроксимация дебитов по работающим интервалам относительно общего дебита скважины, полученного по данным эталонного поверхностного датчика расхода. Кроме четырёх интервалов перфорации, в зоне видимости нагреваемого участка оптоволоконного геофизического кабеля присутствует пятый интервал 1460,0–1464,5 м, который является изолированным (по данным предприятия-недропользователя), и по применённой методике он определён как нерабочий.

По методике исследования скорости остывания кабеля с использованием полученной формулы с заданными коэффициентами содержания нефтепродуктов

в скважинной жидкости (K_{CH}) получены хорошие результаты (табл. 3). Интервал 1486,0–1488,0 м определён как поглощающий, в отличие от предыдущей методики. Изолированный интервал 1460,0–1464,5 м также определён как нерабочий. Остальные интервалы определены как отдающие, но с отличающимися значениями дебитов. Значение общего дебита по скважине близко к данным предприятия-недропользователя.

Таблица 3

Поинтервальный дебит интервалов перфорации по данным оптоволоконной распределённой термодебитометрии по скважине Б-1132

Интервал перфорации, м	$V_{ост}$, °С/мин	T_L , °С	K_{CH} , %	Z , °	Дебит по форме кривой СТД, м ³ /сут	Дебит по скорости остыния кабеля, м ³ /сут
1449,5 - 1453,0	1,28	27,1	50	16,2	2,7	3,70
1460,0 - 1464,5	1,21	27,1	40	16,2	0,0	0,05
1471,0 - 1472,5	1,21	27,5	40	16,2	1,3	4,10
1486,0 - 1488,0	1,14	28,5	0	16,2	1,0	-0,73
1519,0 - 1524,0	1,19	28,8	0	16,2	6,6	4,54
Зумпф	0,87	28,8	0	16,2	0,0	0,03
Общий дебит, м³/сут					11,6	11,69

По третьему защищаемому положению решены следующие задачи:

1) сконструирована лабораторная установка, обладающая достаточным количеством функциональных возможностей для моделирования физических условий скважинной среды (T_L , Z , K_{CH}), что обеспечивает оптимальный учёт температурного поля оптоволоконными датчиками в реальной скважине;

2) выполнено апробирование созданной лабораторной установки-имитатора скважины, особенность которого состояла в повышении достоверности разработанной методики «Исследование скорости остыния кабеля», достигнутого благодаря функциональным возможностям установки.

Таким образом, полученные результаты исследований подтверждают, что третье защищаемое положение обосновано и доказано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований по разработке геофизического метода активной оптоволоконной распределённой термометрии получены следующие результаты:

1. Разработан авторский вариант системы оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии на основе геофизического кабеля, обеспечивающего возможность проведения исследований электронными приборами и оптоволоконными датчиками с нагревом и без него.

2. Разработана и опробована методика «Исследование скорости остыния кабеля», отличающаяся оперативностью проведения каротажа и интерпретации

данных, а также самостоятельностью в количественной оценке общего и поинтервального дебитов, что значительно повышает возможности метода оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии.

3. Определены показатели детализации, пространственное разрешение и постоянная времени, оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в кабельные изделия, что позволяет выполнять долговременный мониторинг в нефтедобывающих скважинах.

4. Разработан и опробован новый критерий для определения пространственного разрешения оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в кабельные изделия, являющийся наиболее приемлемым для направления геофизических исследований в скважинах.

5. Обоснован способ определения пространственного разрешения и постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры на основании экспериментальных данных по формулам для конкретных конструкций кабелей, в которые они интегрированы.

6. Сконструирована лабораторная установка, обладающая достаточным количеством функциональных возможностей для моделирования физических условий скважинной среды ($T_{\text{л}}, Z, K_{\text{CH}}$), что обеспечивает оптимальный учёт температурного поля оптоволоконными датчиками в реальной скважине.

7. Произведено апробирование созданной лабораторной установки-имитатора скважины, особенность которого состояла в повышении достоверности разработанной методики «Исследование скорости остывания кабеля», достигнутого благодаря функциональным возможностям установки.

Таким образом, цель диссертационной работы, состоящая в разработке геофизического метода активной оптоволоконной распределенной термометрии, включающей создание комплексной измерительной системы, методики исследований и установки для моделирования условий скважинной среды, по совокупности решённых задач считана достигнутой.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

I. Публикации в научных журналах и изданиях Scopus

1. Костицын, В. И. Комплексирование геофизических технологий вторичного вскрытия и долговременного мониторинга работы пластов / В. И. Костицын, А. Д. Савич, А. В. Шумилов, О. Л. Сальникова, А. С. Чухлов, Д. Г. Халилов // Нефтяное хозяйство. 2019. № 9. С. 108–113 (вклад автора 16 %).

2. Лаптев, А. П. Применение оптоволоконных систем при реализации комплексных технологий заканчивания и долговременного мониторинга работы скважин / А. П. Лаптев, А. Д. Савич, В. И. Костицын, А. В. Шумилов, О. Л. Сальникова, Д. Г. Халилов // Нефтяное хозяйство. 2022. № 8. С. 94–99 (вклад автора 16 %).

3. Kostitsyn, V. I., Savich, A. D., Shumilov, A. V., Laptev, A. P., Khalilov, D. G. (2023). Innovative Geophysical Techniques for Permanent Type Completion and Long-Term Operating Monitoring of Oil-And-Gas Wells. In: Isaeva, E., Rocha, Á. (eds) Science and Global Challenges of the 21st Century – Innovations and Technologies in Interdisciplinary Applications. Perm Forum 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 622. Springer, Cham (вклад автора 20 %).

II. Публикации в научных журналах и изданиях ВАК

4. Крючатов, Д. Н. Совершенствование технологий геофизических исследований горизонтальных скважин / Д. Н. Крючатов, Д. Г. Халилов, А. Д. Савич, Д. А. Будник // НТВ "Каротажник". 2016. № 10 (268). С. 16–29 (вклад автора 25 %).
5. Савич, А. Д. Импортозамещающие технологии геофизических исследований в горизонтальных скважинах / А. Д. Савич, А. В. Шумилов, Д. А. Будник, А. С. Чухлов, Д. Н. Крючатов, Д. Г. Халилов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 10. С. 5–12 (вклад автора 16 %).
6. Савич, А. Д. Геофизические исследования в горизонтальных скважинах, оборудованных хвостовиками, содержащими устройства для проведения многостадийного гидроразрыва пласта / А. Д. Савич, Д. Г. Халилов, А. С. Чухлов, А. М. Денисов // НТВ "Каротажник". 2018. № 10 (292). С. 48–60 (вклад автора 25 %).
7. Халилов, Д. Г. Совершенствование методов вторичного вскрытия, информационного обеспечения разработки и технологий эксплуатации скважин с применением специализированного кабеля / Д. Г. Халилов, А. Д. Савич, А. А. Семенцов, Д. А. Будник, В. А. Исаев // НТВ "Каротажник". 2019. № 5 (299). С. 91–105 (вклад автора 20 %).
8. Халилов, Д. Г. Волоконно-оптическая система активной термометрии / Д. Г. Халилов // НТВ "Каротажник". 2021. № 3 (309). С. 139–151 (вклад автора 100 %).
9. Савич, А. Д. Комплексирование геофизических технологий освоения нефтяных скважин и долговременного мониторинга их работы / А. Д. Савич, А. В. Шумилов, Д. Г. Халилов, Д. А. Будник, А. А. Шадрунов // Геофизика. 2022. № 5. С. 99–107. (вклад автора 20 %).
10. Халилов, Д. Г. Изучение тепловой инерции геофизических кабелей. Определение постоянной времени нагрева оптоволоконных распределённых датчиков температуры / Д. Г. Халилов, А. Д. Савич, А. М. Денисов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2023. № 7 (379). С. 27–36 (вклад автора 35 %).
11. Халилов, Д. Г. Определение пространственной разрешающей способности оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в геофизические кабели / Д. Г. Халилов, А. Д. Савич, О. Л. Сальникова, В. И. Костицын, И. А. Черных, В. И. Черных // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2024. № 4 (388). С. 45–54 (вклад автора 16 %).
12. Халилов, Д. Г. Оптоволоконный термоанемометр / Д. Г. Халилов, А. Д. Савич, А. М. Денисов, С. В. Белов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2024. № 5 (389). С. 33–39 (вклад автора 25 %).
13. Халилов, Д. Г. Количественное определение дебита добывающих скважин по данным оптоволоконной распределенной термодебитометрии (схема и методика) / Д. Г. Халилов, А. Н. Некрасов, А. Д. Савич, В. И. Костицын // НТВ "Каротажник". 2024. № 5 (331). С. 56–74 (вклад автора 25 %).
14. Халилов, Д. Г. Совершенствование методики количественного определения дебитов скважин по данным оптоволоконной распределенной термодебитометрии / Д. Г. Халилов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2025. № 9 (405). С. 46–59 (вклад автора 100 %).

III. Публикации в других научных журналах и изданиях РИНЦ:

15. Чухлов, А. С. Расчет усилий доставки приборов к забоям горизонтальных скважин и осевых усилий при работе технологического комплекса "Латераль-2007" / А. С. Чухлов, Д. Г. Халилов // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2014. № 14. С. 155–158 (вклад автора 50 %).

16. **Халилов, Д. Г.** Технологии исследований горизонтальных скважин действующего фонда в России / Д. Г. **Халилов** // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2015. № 15. С. 252–257 (вклад автора 100 %).
17. Савич, А. Д. Проблемы эксплуатации жёсткого геофизического кабеля / А. Д. Савич, Д. Г. **Халилов** // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. 2015. С. 163–167 (вклад автора 50 %).
18. Крючатов, Д. Н. Применение технологии колтюбинг в горизонтальных скважинах действующего фонда / Д. Н. Крючатов, А. Д. Савич, Д. Г. **Халилов** // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2017. № 17. С. 159–163 (вклад автора 35 %).
19. Савич, А. Д. Совершенствование технологий геофизических исследований в горизонтальных скважинах / А. Д. Савич, Д. Г. **Халилов** // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. 2016. С. 186–193 (вклад автора 50 %).
20. **Халилов, Д. Г.** Применение оптоволоконных технологий в скважинной геофизике / Д. Г. **Халилов** // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. 2017. С. 208–212 (вклад автора 100 %).
21. Денисов, А. М. Особенности исследований скважин, оборудованных хвостовиками для проведения многостадийного гидроразрыва пласта / А. М. Денисов, А. Д. Савич, Д. Г. **Халилов** // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Вып. 1 (6). 2018. С. 155–161 (вклад автора 35 %).
22. **Халилов, Д. Г.** Потенциал волоконно-оптических технологий / Д. Г. **Халилов** // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Вып. 1 (6). 2018. С. 295–302 (вклад автора 100 %).
23. **Халилов, Д. Г.** Инновационные геофизические технологии заканчивания добывающих нефтяных скважин и увеличения их межремонтного периода / Д. Г. **Халилов**, В. И. Костицын, А. Д. Савич, Д. А. Будник // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Вып. 2 (7). 2019. – С. 270–278 (вклад автора 25 %).
24. Зиянгиров, Р. М. Анализ результатов измерений избыточных давлений при кумулятивной перфорации пластов, в том числе при динамической депрессии / Р. М. Зиянгиров, А. Д. Савич, Д. Г. **Халилов**, А. С. Чухлов // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Вып. 3 (8). 2020. С. 99–106 (вклад автора 25 %).
25. **Халилов, Д. Г.** Теоретическое обоснование и разработка системы скважинной волоконно-оптической термодебитометрии / Д. Г. **Халилов**, А. Д. Савич, В. И. Костицын, Д. А. Будник // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Вып. 4 (9). 2021. С. 172–182 (вклад автора 25 %).
26. **Халилов, Д. Г.** Результаты опытно промышленных исследований геофизических оптоволоконных кабельных систем, разрабатываемых для долговременного мониторинга работы скважин / Д. Г. **Халилов**, Д. А. Будник, А. Д. Савич, С. В. Галкин, А. В. Шумилов // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Вып. 5 (10). 2022. С. 207–216 (вклад автора 20 %).

IV. Патенты на полезные модели

27. Патент на полезную модель № 196039 U1 Российская Федерация, МПК H01B 11/22. Геофизический волоконно-оптический стабилизированный кабель: № 2019135119: заявл. 31.10.2019: опубл. 14.02.2020 / В. А. Исаев, А. Д. Савич, А. А. Семенцов, Д. Г. **Халилов**, А. В. Шумилов; заявитель ООО "Предприятие "ФХС-ПНГ" (вклад автора 20 %).
28. Патент на полезную модель № 202982 U1 Российская Федерация, МПК H01B 11/22. Геофизический кабель с оптическим волокном и капиллярной трубкой: № 2020108226: заявл. 25.02.2020: опубл. 17.03.2021 / А. Д. Савич, А. А. Семенцов, Д. Г. **Халилов**, А. В. Шумилов, Д. А. Будник; заявитель ООО "Предприятие "ФХС-ПНГ" (вклад автора 20 %).