

На правах рукописи

ХАЛИЛОВ ДАМИР ГАЗИНУРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА
АКТИВНОЙ ОПТОВОЛОКОННОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
ТЕРМОМЕТРИИ**

Специальность 1.6.9 - Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Пермь 2025

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| Глава I. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ИЗУЧЕННОСТЬ ВОПРОСОВ ПО ЗАЩИЩАЕМЫМ ПОЛОЖЕНИЯМ | 12 |
| 1.1. Оптическое волокно как средство измерения | 12 |
| 1.2. Геофизические исследования скважин методом оптоволоконной распределённой термометрии | 15 |
| 1.3. Информативность оптоволоконной распределённой термометрии | 20 |
| 1.4. Разработки в области геофизических исследований методом скважинной термокондуктивной дебитометрии и систем постоянного мониторинга | 24 |
| 1.4.1. Метод точечной электронной скважинной термокондуктивной дебитометрии | 25 |
| 1.4.2. Метод оптоволоконной распределённой скважинной термокондуктивной дебитометрии | 29 |
| 1.4.3. Геофизические исследования альтернативными системами постоянного мониторинга | 40 |
| 1.5. Разработки по изучению показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры | 43 |
| 1.5.1. Факторы, определяющие чувствительность оптоволоконных распределённых датчиков температуры | 44 |
| 1.5.2. Изучение пространственного разрешения оптоволоконных распределённых датчиков температуры | 48 |
| 1.5.3. Изучение постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры | 50 |
| 1.6. Разработки в области лабораторных установок, моделирующих скважинные условия | 54 |
| 1.6.1. Мобильные лабораторные установки | 55 |
| 1.6.2. Стационарные лабораторные установки | 56 |
| Глава II. СИСТЕМА ОПТОВОЛОКОННОЙ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СКВАЖИННОЙ ТЕРМОКОНДУКТИВНОЙ ДЕБИТОМЕТРИИ | 63 |
| 2.1. Оптоволоконный геофизический кабель с нагревательным элементом | 63 |
| 2.2. Новая методика проведения исследований методом оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии | 69 |
| 2.3. Создание опытной модели оптоволоконного геофизического кабеля..... | 74 |
| 2.4. Лабораторные испытания с опытной моделью оптоволоконного геофизического кабеля | 78 |
| Глава III. ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛОВОЙ ИНЕРЦИОННОСТИ ОПТОВОЛОКОННЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ В КАБЕЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ | 89 |
| 3.1. Проблемы с пространственным разрешением оптоволоконных распределённых датчиков температуры | 89 |

| | |
|---|-----|
| 3.2. Проблемы с постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры | 95 |
| 3.3. Коэффициент тепловой инерционности конструкции кабеля | 102 |
| 3.4. Лабораторные испытания по определению показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры | 106 |
| Глава IV. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ОПТОВОЛОКОННЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ | 115 |
| 4.1. Конструкция лабораторной установки-имитатора скважины | 115 |
| 4.2. Лабораторные испытания с созданной установкой-имитатором скважины | 117 |
| 4.3. Геофизические исследования в действующей добывающей скважине | 124 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 131 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 133 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Акты внедрения разработок исследователя и патентные документы | 155 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Документы, подтверждающие участие исследователя в конкурсах, связанных с разработками, приведёнными в диссертации | 160 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Важной составляющей в нефтяной промышленности являются инновационные средства контроля процессов разработки и добычи нефти посредством разнородных систем мониторинга, что способствует снижению потерь добываемой продукции, продлению срока службы глубинного оборудования и повышению интеллектуализации технологических процессов.

В последние годы с задачами мониторинга успешно справляются системы оптоволоконной распределённой термометрии. Данные системы предоставляют возможность изучать температурное поле по всей длине оптического волокна, находящегося в составе геофизического кабеля. Расширенная объёмистость и широкомасштабный характер получаемой информации способствуют как выработке оптимальных режимов эксплуатации, так и принятию предварительных мер по проведению профилактических работ и иных технологических операций.

Скважинные оптоволоконные системы распределённой термометрии применяются уже более 10 лет и сохраняют приоритетные позиции за счёт экономичности, долговременности своей эксплуатации и снижения потерь добычи. Но с совершенствованием уже применяемых оптоволоконных систем и расширением инструментария за счёт новых методов ситуация обстоит неоднозначно. Для сохранения спроса в сфере исследований оптоволоконные системы нуждаются в дальнейшем прямом и косвенном развитии.

По мнению автора, расширение инструментария связано с реализацией нестандартных решений в отношении применяемых технических средств и разработке новых схем исследований. Для сохранения и увеличения их многопрофильности имеет смысл сосредоточиться на внесении конструктивных изменений в кабельные изделия, как основополагающего средства проведения исследований, так как геофизическое производство нуждается в применении новых подходов к оценке пространственного и временного разрешения используемых систем мониторинга.

Таким образом, актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разностороннего развития систем оптоволоконной распределённой термометрии, результатом которого должно стать повышение их информативности, что является показателем их эффективности в качестве средств контроля эксплуатации нефтедобывающих скважин.

Степень научной разработанности темы исследования

Исследованиями, направленными на развитие скважинной термокондуктивной дебитометрии, и создание 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, J. M. 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 другие.

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, 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, В. Б. Шлейников, N. Arsad, 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 другие.

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 другие.

Цель диссертационной работы состоит в развитии оптоволоконной распределённой термометрии по расширению методического инструментария, последующей её адаптации к изучению динамических параметров скважинных потоков и определению детализационных показателей изучаемой среды.

Для достижения поставленной цели исследования определены следующие задачи:

1) создать оптоволоконную систему распределённой термодобитометрии, 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 термодобитометрии, обеспечивающую оперативное проведение каротажа и интерпретации 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 термодобитометрии 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. Разработанная методика количественного определения общего и поинтервального дебитов предоставляет для метода оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии 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 с показателями тепловой инерционности кабельных изделий в сравнении с другими существующими критериями.

4. Разработанный 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. Сконструированная калибровочная установка-имитатор скважины обладает комплексом функциональных возможностей, позволяющих не только проводить лабораторные испытания для реализации методики исследований, созданной автором, но и для комплексного моделирования 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, который 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 лично осуществлял подготовку и проведение теоретических исследований и лабораторных испытаний, последующую обработку и интерпретацию 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

Основные положения диссертационного исследования и выводы 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 диссертационного исследования 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, включая 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 следующим специалистам:

1) ПАО «Пермнефтегеофизика»: заместителю директора по промышленной геофизике кандидату технических наук, доценту А. Д. Савичу, директору по промышленной геофизике, доктору технических наук, доценту А. В. Шумилу, начальнику Центра научно-исследовательских и инновационных разработок А. М. Денисову и ведущему геофизику инновационно-методической группы А. Н. Некрасову – за обеспечение измерительной аппаратурой и теоретико-интерпретационное содействие;

2) ООО «ЗУРО»: заместителю директора В. Я. Шустерману, инженеру-конструктору М. М. Мирзину, начальнику по производству В. М. Силкину – за обеспечение лабораторными стендами и изготовление установки-имитатора скважины, использованных для проведения испытаний, описанных в работе;

3) ООО «Пермгеокабель»: директору А. А. Семенцову, коммерческому директору М. В. Проскурякову – за обеспечение образцами оптоволоконных распределённых датчиков температуры, использованными для проведения испытаний.

Отдельно хочу поблагодарить свою жену Халилову Анастасию Олеговну за непрерывную моральную и практическую поддержку в творческом процессе.

Глава I. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ИЗУЧЕННОСТЬ ВОПРОСОВ ПО ЗАЩИЩАЕМЫМ ПОЛОЖЕНИЯМ

Развитие в области электронно-вычислительных систем и средств передачи информации привело к распространению ранее непопулярных разновидностей каналов связи, в том числе оптоволоконных линий. Процесс расширенного апробирования данной разработки затронул множество научно-производственных направлений, включая геофизические исследования скважин, одним из вариантов которого является применение оптоволоконных распределённых датчиков температуры.

1.1. Оптическое волокно как средство измерения

Оптическое волокно (оптоволокну) представляет собой средство передачи информации, выполненное в качестве двухслойной цилиндрической кварцевой нити, состоящей из сердцевины и оболочки. Оптические волокна изготовлены из легированного кварцевого стекла, представляющего собой разновидность двуокиси кремния (SiO_2) с аморфной твердотельной структурой. Оболочка покрыта защитным слоем из акрилатного лака. Сердцевина легирована германием, поэтому её показатель преломления больше, чем у оболочки. Свет распространяется в сердцевине волокна, испытывая полное внутреннее отражение на границе с оболочкой. Он проникает в оболочку на глубину порядка длины волны, т.е. на глубину много меньше её толщины и, следовательно, не взаимодействует с покрытием из акрилатного лака. Это покрытие необходимо для защиты кварцевой оболочки от механических повреждений и воздействия воды [44, 110].

Впервые принципы передачи света (аналогичные оптоволокну) были открыты во второй половине XIX века, однако эти технологии не получили распространение ввиду недостаточного технического развития. Историю оптоволокну следует отсчитывать от первой половины XX века. В 1934 году американцем Норманом Р. Френчем был получен первый патент на телефонную систему, собранную на основе оптических технологий. В указанной системе речевые сигналы передавались по стеклянным стержням при

помощи света. Спустя 28 лет были разработаны фотодиод и полупроводниковый лазер, с помощью которых можно было передавать и принимать оптический сигнал.

Однако, при исследовании возможностей данного вида связи, учёные столкнулись с проблемой сильного затухания сигналов в оптическом канале. Они были существенно выше затухания электрических сигналов в медном кабеле. Восемь лет понадобилось учёным для доведения технологии и материалов до рабочего состояния, и в 1970 году фирмой «Corning» был начат коммерческий выпуск оптоволокна, уровень затухания сигнала в котором составил ниже 17 дБ/км. Ещё через несколько лет инженеры предприятия добились уровня затухания в 4 дБ/км. В то время по оптоволокну передавался не один, а несколько мод света (параллельных потоков оптических сигналов). Выпуск же одномодового оптоволокна освоили в 1983 году.

В Российской Федерации оптоволоконные линии впервые появились в Санкт-Петербурге. Это была волоконно-оптическая линия связи, созданная АО «Совтелеком» (современный ПАО «Ростелеком») и соединяющая Аберслунд (Дания) и Петербург [126].

Физические воздействия на оптоволокно (термические, барические, деформационные) вызывают вибрации в молекулярной решётке и тем самым меняют характеристики сигнала обратного отражения. При попадании света на термически возбуждённые молекулы происходит взаимодействие между фотонами и электронами. Таким образом, в оптоволокну происходит световое рассеяние, называемое Рамановским. Обратное световое рассеивание состоит из следующих спектральных компонент (рис. 1):

- Рэлеевское рассеивание: длина волны равна длине волны сигнала, используемого источника;
- Стоксовы компоненты Рамановского рассеивания: длина волны больше, чем у используемого лазерного источника, процесс сопровождается испусканием фотонов, интенсивность рассеивания не зависит от температуры;

- Антистоксовы компоненты Рамановского рассеивания: длина волны меньше длины волны источника, процесс сопровождается поглощением фотонов, интенсивность рассеивания определяет температура;

- Бриллюэновские линии: интенсивность может быть больше чем у Стоксовых компонент, но имеют меньший спектральный сдвиг. Этот спектральный сдвиг вызван акустическими колебаниями кристаллической решетки волокна и несет в себе информацию о механических напряжениях и температурах, воздействующих на волокно. Воздействие механических напряжений и температур приводит к изменению положения Бриллюэновской линии на шкале длин волн.

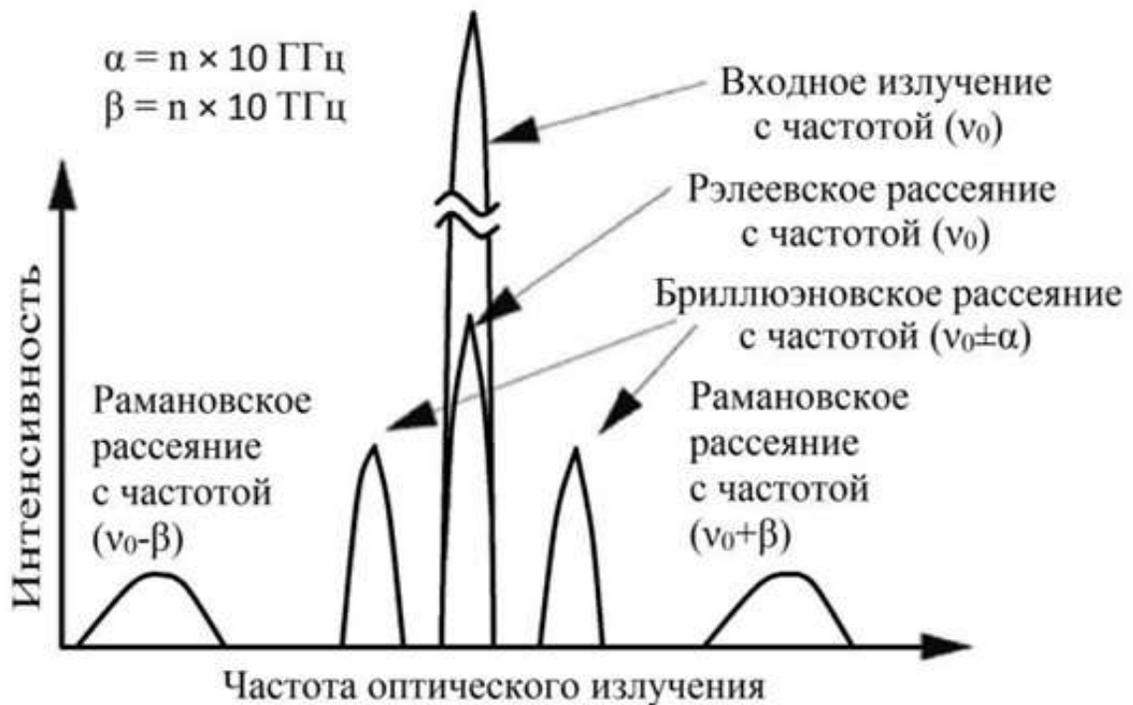


Рисунок 1 – Спектральная картина компонент оптического излучения

Волокна делятся на два типа: одномодовые и многомодовые. Для всех типов волокон, применяемых в линиях связи, диаметр кварцевой оболочки имеет стандартный размер 125 ± 1 мкм. Номинальный диаметр сердцевины у многомодовых волокон 50 или 62,5 мкм. Диаметр сердцевины у одномодовых волокон может меняться в зависимости от типа волокна в пределах от 7 до 9 мкм (рис. 2) [44].

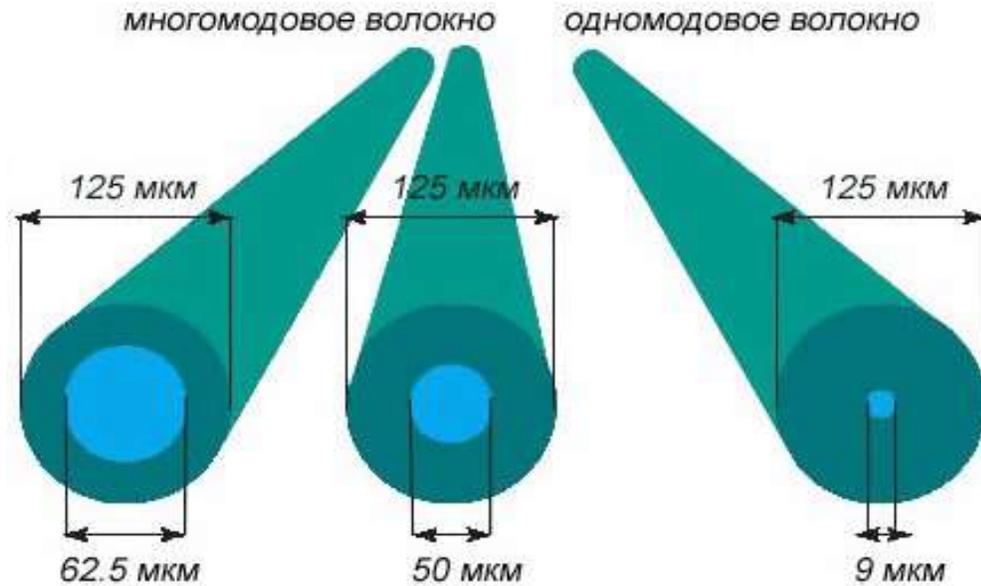


Рисунок 2 – Геометрические параметры одномодовых и многомодовых волокон

Для проведения исследований и работ с оптическим волокном применяются лазерные станции. Спецификация данной аппаратуры состоит в том, что станция каждого типа ориентирована на определённую компоненту оптического сигнала, при этом большинство станций не приспособлены для работы с обоими типами волокна. Оптоволоконный датчик соединяется со станцией специальным разъёмом (пиг-тейлом), через который по волокну посылается оптический сигнал, отражающийся от каждой точки волокна по всей его длине, на скорости, приближенной к скорости света. Оптоволоконные регистрирующие системы работают на расстоянии нескольких десятков километров. Дальность передачи сигнала составляет 100 км для одномодовых волокон, 25 км для многомодовых, что более чем достаточно для нефтедобывающих скважин [44, 45, 69, 134, 136].

1.2. Геофизические исследования скважин методом оптоволоконной распределённой термометрии

В настоящее время одним из полноценно самостоятельных оптоволоконных методов геофизических исследований является распределённая термометрия – distributed temperature sensing (DTS) [27, 29, 36, 79, 80]. В отличие от стандартной электронной разновидности метода термометрии оптоволоконный вариант позволяет изучать одновременно весь

разрез, охватываемый длиной оптоволоконного датчика, находящегося внутри геофизического кабеля (рис. 3).

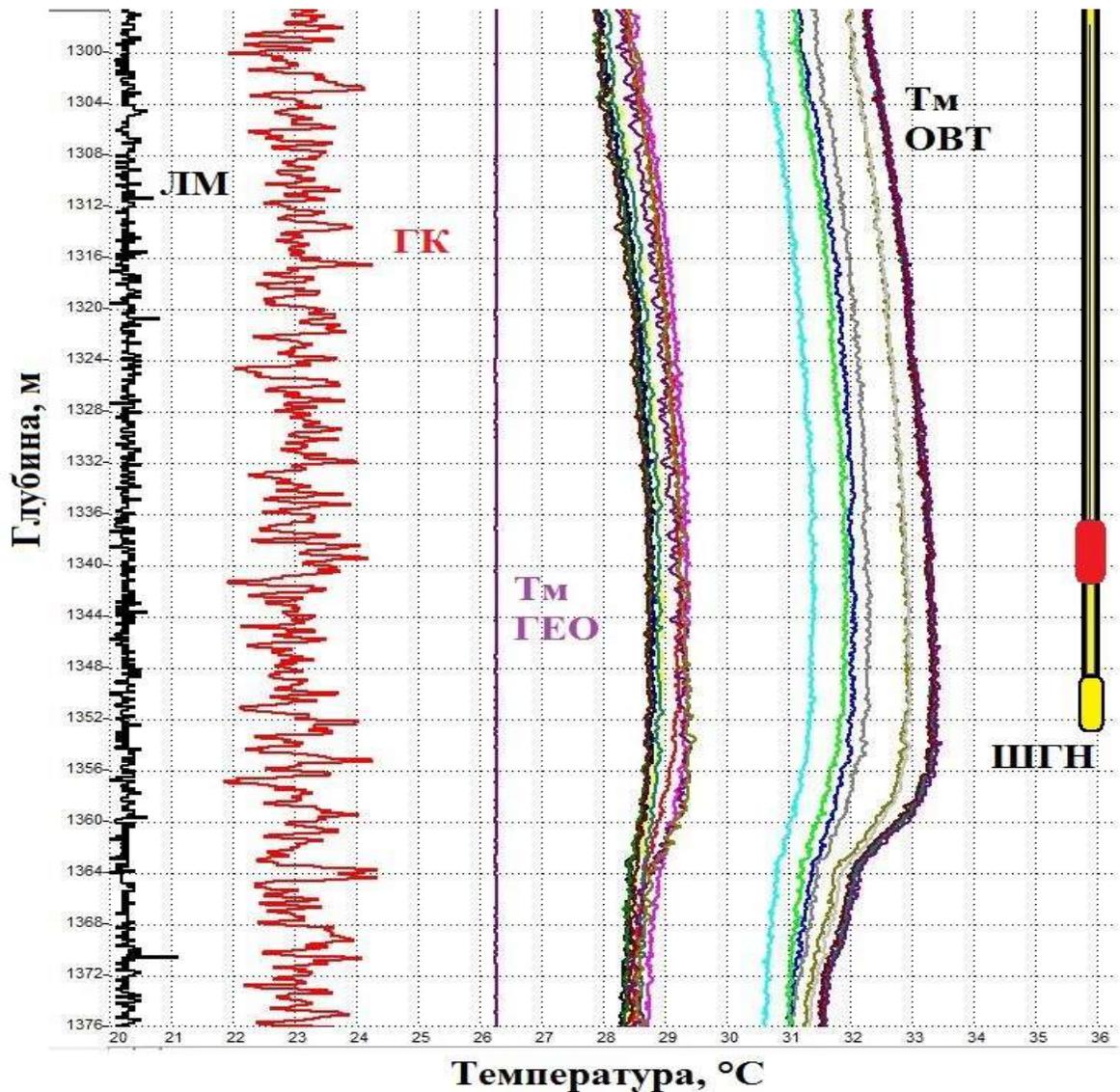


Рисунок 3 – Планшет данных электронной и оптоволоконной термометрии

В формате мониторинга преимущество оптоволоконной термометрии перед электронной точечной термометрией состоит также в отсутствии проблем, связанных с совместным применением спущенного в скважину глубинного оборудования. Проблематичность складывается из следующего ряда причин. Во-первых, существует необходимость в постоянной мобилизации геофизической партии, использующей для выполнения каждого исследования геофизический подъёмник. Во-вторых, проведение спуско-подъёмных операций в работающих скважинах сопряжено с осложнениями,

связанными с присутствием в стволе препятствий в виде компоновки (насосно-компрессорные трубы, насос и т. д.). В-третьих, геофизический прибор необходимо калибровать, а нахождение его на постоянной (полупостоянной) основе в скважине в длительном контакте с агрессивной средой сокращает срок его эффективной работы [16, 28, 54]. Для наилучшего понимания описанных преимуществ оптоволоконной распределённой разновидности термометрии рассмотрим технологические особенности её реализации как геофизического метода исследования скважин, завершающим моментом которой является постановка скважины на мониторинг.

Технологически возможны два варианта расположения оптоволоконного распределённого датчика температуры (ОРДТ): снаружи и внутри обсадной колонны. Наружное расположение кабеля является простейшим вариантом оснащения скважины, так как не требует дополнительного задействования средств его доставки и захватывает необходимую длину спускаемой компоновки [21, 120]. Данный вариант применяется как в случаях с цементируемыми колоннами, так и с не цементируемыми. Однако этот вариант постановки скважины на мониторинг сопряжён со значительным снижением чувствительности к целевым изучаемым процессам, проявляющимся в температурном поле, связанным с движением флюидов (приток, приёмистость), поэтому внимание ему уделяться не будет. Вариант постановки скважины на оптоволоконный мониторинг с расположением кабеля внутри колонны сложнее, но при этом открывает расширенные возможности для исследований температурного поля, за счёт чего и является наиболее предпочтительным для предприятия недропользователя. Сущность данного варианта состоит в последовательном проведении комплекса мероприятий на скважине, условно разделённого на три части: подготовительная, основная и заключительная.

Подготовительная часть состоит в предварительном спуске геофизического кабеля с оптическим волокном, как в отдельности, так и совместно с электронным прибором и/или перфоратором в зумпф для максимального охвата ствола для первичного изучения температурного поля.

Основная часть работы определяется целями предприятия недропользователя и особенностями объекта. Заключительная часть работ состоит в оснащении скважины оптоволоконным датчиком на постоянной основе, в ходе которой геофизический кабель (необходимой длины) фиксируется в неподвижное положение на устьевой арматуре специальными устройствами, жимками. После фиксации кабеля с барабана каротажного подъёмника выматывается запас кабеля длиной в 100 метров, отделяется от остатка, намотанного на барабан, и аккуратно собирается вблизи устьевой арматуры. Во всём процессе переменной выступает только основная часть работ, поэтому рассмотрим наиболее вероятные варианты её исполнения.

1. Исследования на репрессии (давление на забое превышает пластовое давление) при помощи оптического волокна с/без электронного прибора. В данном случае скважина является освоенной, в работу введены определённые пласты-коллекторы. Добывающее предприятие планирует продолжить эксплуатацию перфорированных пластов, в связи с этим в скважину после доставки геофизического кабеля в зумпф производится спуск глубинного оборудования, которое будет использоваться для возбуждения притока флюидов. В качестве способа вызова притока возможно применение работы насоса, компрессирование, свабирование и т.д.

2. Исследования и прострелочно-взрывные работы (ПВР) на репрессии. Привлечение оборудования для проведения ПВР, т.е. перфорации, необходимо для введения в эксплуатацию продуктивных горизонтов в рамках работ по освоению скважины (новый фонд) или по задействованию других пластов, на которых минимальным образом отразилась разработка предыдущих. В крайнем случае, осуществляется повторное вскрытие работающего интервала, реперфорация, с целью восстановления сообщения пласта со скважиной. Цикл действий в данном случае также начинается с доставки электронного прибора (в сборке с перфоратором в зумпф) для проведения фоновых исследований. Затем производится позиционирование перфоратора напротив вскрываемого интервала с последующей его инициацией. По завершении ПВР сборка

повторно спускается в зумпф, и спуско-подъёмные операции на кабеле приостанавливаются. После этого производится спуск глубинного оборудования в скважину с последующим запуском.

3. Исследования и ПВР на депрессии (пластовое давление превышает давление на забое). Отличие данного варианта работ от предыдущих состоит в обратной разнице между пластовым и забойным давлением, которая меняет порядок проведения технологических операций. Прибор с перфоратором спускается в зумпф для проведения фоновых исследований и позиционирования перфоратора. После позиционирования перфоратора (спуско-подъёмные операции на кабеле приостанавливаются) производится спуск глубинного оборудования. По завершении спуска глубинного оборудования регулируется депрессия посредством понижения уровня жидкости до расчётной отметки. После необходимого понижения уровня жидкости производится инициирование перфоратора, спуск приборов в зумпф и постановка скважины в эксплуатацию. Последующий положительный эффект от вскрытия пластов в данном режиме состоит в получении повышенного дебита флюида. При этом повышенная отдача нефтепродукта может создаваться и поддерживаться без привлечения сторонних воздействий, т.е. химической обработки, компрессирования и т. п. [16, 19, 31, 61, 75]. Но в качестве объекта исследований и работ настоятельно необходимо выбирать неперфорированный пласт [24].

Последний вариант реализации основной части работ в составе технологии постановки скважины на оптоволоконный мониторинг успешно применяется на месторождениях Пермского края и Западной Сибири. Опыт компаний ПАО «Пермнефтегеофизика» и ОАО «Когалымнефтегеофизика» показывает, что длительность работы задействованных описанным образом интервалов достигает от нескольких месяцев до нескольких лет. Однако, как и для любой технологии, сохраняющей актуальность, для оптоволоконного мониторинга остаётся открытым вопрос развития и конкуренции, опирающийся на информативность [16].

1.3. Информативность оптоволоконной распределённой термометрии

Показателем достаточной информативности для систем оптоволоконной распределённой термометрии является их способность выхода на количественные показатели среды. В случае со скважинами действующего фонда таковыми показателями являются динамические параметры потоков флюидов (расход, скорость потока). Прямая связь с динамикой потоков флюидов у оптоволоконной распределённой термометрии отсутствует. Аномалии температурного поля в отдельности являются лишь качественными (полуколичественными) индикаторами работы пластов-коллекторов (рис. 4).

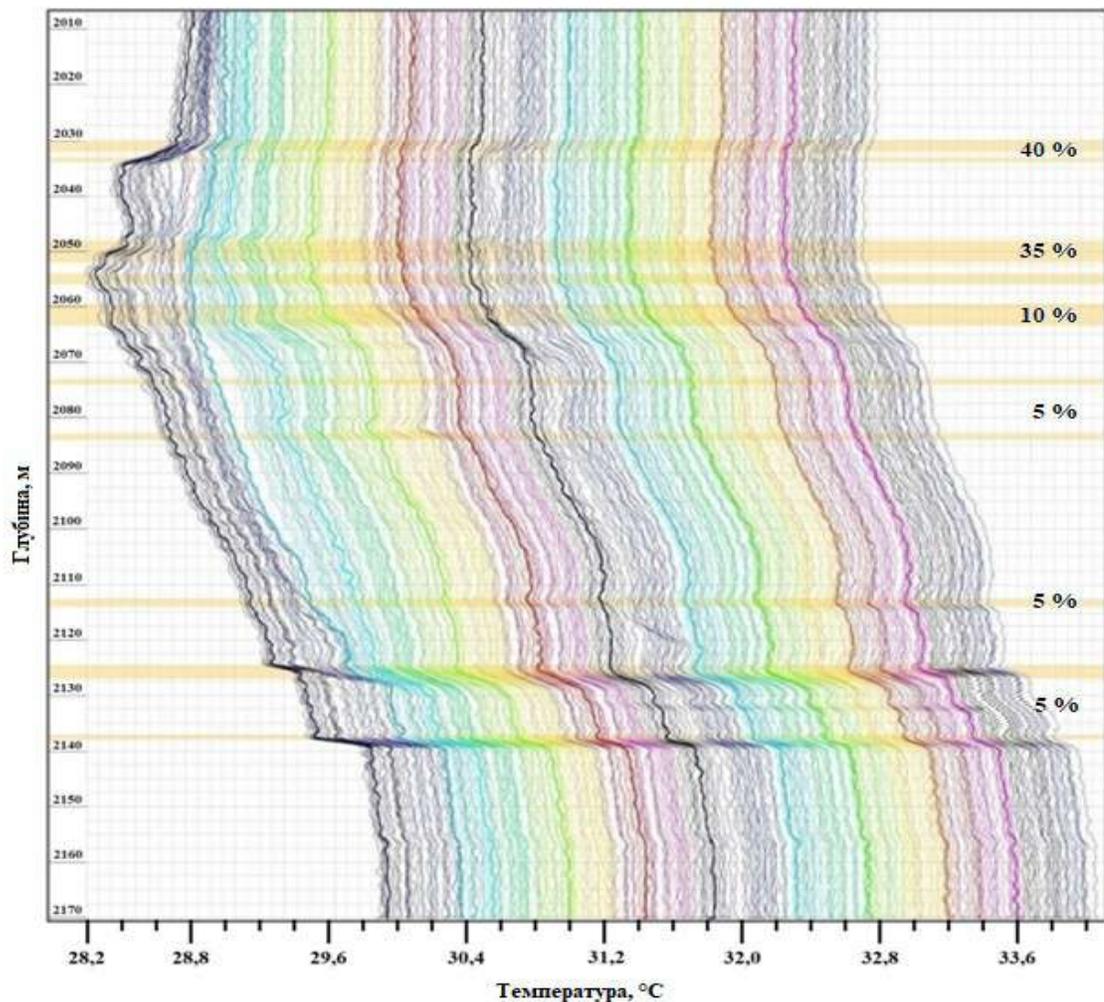


Рисунок 4 – Определение относительных дебитов по данным оптоволоконной распределённой термометрии

Получение приближенных к истине количественных показателей достигается лишь за счёт комплексирования оптоволоконной распределённой

термометрии данными точечных приборов, глубинных манометров и поверхностных расходомеров. В связи с этим, чтобы не вводить в заблуждение предприятие недропользователя выводами, построенными на вторичной информации, исследователи склоняются к выдаче заключений в относительных дебитах, в процентах [41, 66].

Несмотря на приемлемость со стороны недропользователя к предоставляемым в относительных единицах данным существует и иная проблема неявного характера, снижающая информативность и связанная с неоднозначным поведением температурного поля. В значительной мере эта неоднозначность связана с проявлением скрытых аномалий, что особенно ощутимо в горизонтальных скважинах, так как вызывает затруднения в локализации аномалий и последующей их интерпретации. Данная проблема касается как электронных, так и оптоволоконных измерительных систем. Первопричиной возникновения скрытых температурных аномалий в скважине является определённое проявление термодинамических эффектов, вызванных физическими процессами, происходящими в геологическом разрезе. Их проявление может быть как единичным, так и совместным, остановимся на основных термодинамических эффектах.

1. Эффект Джоуля-Томсона

Температурная аномалия формируется в результате движения флюида из пласта, вызванного депрессией, превышением пластового гидростатического давления над забойным давлением. Величина, определяющая количественную пропорциональность между депрессией и аномальной температурой, называется коэффициентом Джоуля-Томсона. Для нефтей он составляет 0,4 – 0,6 °К/МПа, для воды 0,235 °К/МПа, а для большинства газов он отрицателен

$$\Delta T = \zeta \cdot \Delta P; \quad (1.1)$$

где ΔT – температурная аномалия, °К; ζ – коэффициент Джоуля-Томсона, °К/МПа; ΔP – депрессия, МПа.

Известно, что пластовый флюид представляет собой конкретную комбинацию воды, нефти, и газа. Формирование скрытой аномалии в случае с

данным эффектом может быть вызвано взаимокомпенсирующим действием жидкого (положительного) и газообразного (отрицательного) потоков флюидов, проявляющегося при определённых долях содержания перечисленных компонентов в интервале притока. Сопутствующей причиной сохранения компенсирующего действия обоих потоков может служить чувствительность газа к изменению депрессии, т.е. повышенное значение коэффициента Джоуля-Томсона [3, 67, 86].

2. Эффект разгазирования нефти

Пластовый газ под давлением может находиться как в свободном газообразном состоянии, так и растворённом в нефти. При этом фактором, определяющим физическое состояние растворимого газа и значение температурной аномалии, является давление насыщения. Давление насыщения для каждого пласта индивидуально и, в сущности, является границей для забойного гидростатического давления, при недостижении которой происходит выделение растворённого газа (рис. 5).

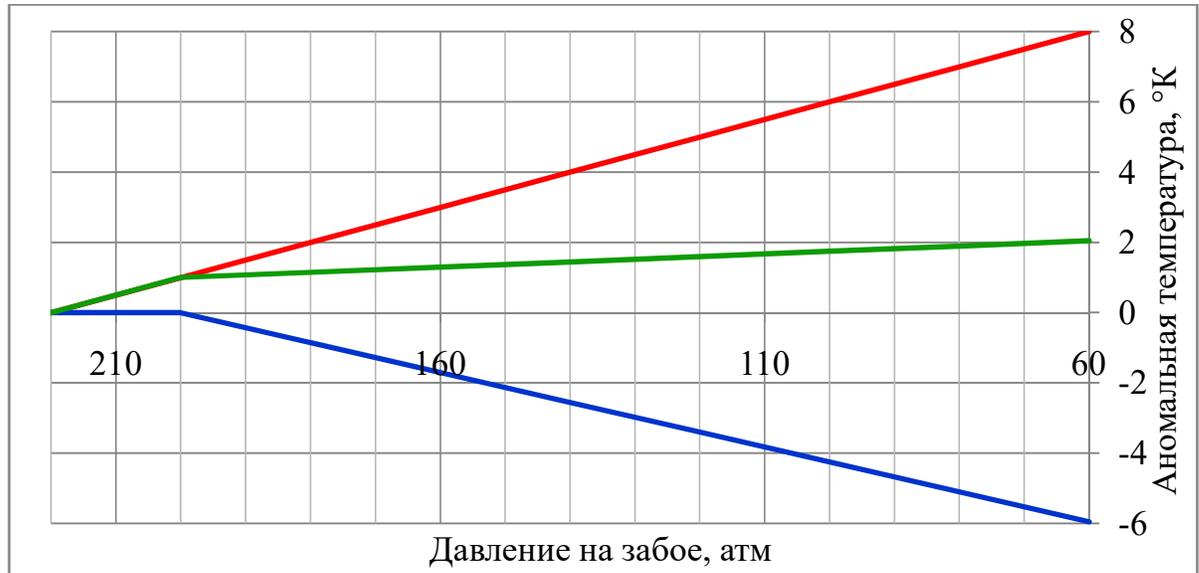


Рисунок 5 – Пример формирования скрытой температурной аномалии при разгазировании нефти. Шифры кривых: красная – аномалия нефти; синяя – аномалия растворённого газа; зелёная – суммарная аномалия

Описанный эффект во многом имеет сходство с предыдущим. Нужно понимать, что комбинация и состав растворённых в нефти газов могут

различаться. Поэтому и времена начала выделения газов, определяемые значением давления насыщения, могут выступить в качестве предохранительных условий, препятствующих локализации аномалии. Также немаловажной переменной в подобных процессах являются значения газового фактора пласта-коллектора [3, 86].

3. Калориметрический эффект

Данный эффект проявляется в местах, где происходит взаимодействие пластовых флюидов с жидкостью, находящейся в стволе скважины, т.е. напротив интервалов перфорации, негерметичностей и т.п. При смешивании двух потоков флюидов с разными температурами происходит формирование аномалии со средневзвешенным значением, зависящим от их температур, объёмных теплоёмкостей и дебитов, что выглядит следующим образом

$$T_{см} = \frac{C_1 \cdot Q_1 \cdot T_1 + C_2 \cdot Q_2 \cdot T_2}{C_1 \cdot Q_1 + C_2 \cdot Q_2}; \quad (1.2)$$

где $T_{см}$ – температура смеси потоков, °К; C_i – объёмная теплоёмкость i -го потока, Дж/(м³·°К); Q_i – дебит i -го потока, м³/сут; T_i – температура i -го потока, °К [86].

Из вышеупомянутой формулы (1.2) следует, что формирование скрытой аномалии от смешивания потоков также возможно при определённых соотношениях переменных. С большей вероятностью негативный эффект может проявиться в условиях горизонтального ствола [2, 11, 64, 65, 85, 86]. Данный вывод согласуется с теорией работы горизонтальных скважин, разработанной специалистами Башкирского государственного университета (БГУ), подтверждаемой результатами геофизических исследований на месторождениях Волго-Уральского, Западно-Сибирского и Восточно-Сибирского регионов [7, 8, 11, 62, 89, 96, 97]. Основательное изучение природы скрытых температурных аномалий позволило специалистам разработать способы их подавления. В качестве некоторых из применяемых способов борьбы со скрытыми температурными аномалиями можно привести применение методик циклических измерений (попеременное нахождение

скважины в работе и в остановке), задействование «гидродинамических стимуляторов» (промывка горизонтального ствола холодной водой) и др. [9, 11, 37, 38, 60, 97].

По мнению автора, эффективность подобных методик не должна являться основанием, отводящим внимание от вопроса необходимости прямого развития и повышения информативности оптоволоконных систем термометрии. Кроме того, распространение упомянутых выше методик на всё количество скважин, вводимых в действующий фонд и оснащаемых оптоволоконными системами, повлечёт устойчивое замедление процесса добычи, что, скорее всего, выступит неблагоприятной перспективой для добывающего предприятия. В связи с чем, необходимо применение иного подхода для выхода на динамические параметры осложнённых сред. Очевидным решением в данном случае выступает задействование модификации метода термометрии в сходном виде – скважинной термокондуктивной дебитометрии (СТД) в оптоволоконном распределённом виде, которая не только обладает устойчивостью к воздействию скрытых температурных аномалий, но и способна обеспечить выход на количественные параметры скважинных потоков.

1.4. Разработки в области геофизических исследований методом скважинной термокондуктивной дебитометрии и систем постоянного мониторинга

Здесь обозначается **первое защищаемое положение** автора в данной работе, состоящее в создании собственного варианта системы оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии. Для создания системы необходимо, во-первых, изучить и проанализировать разработки иных специалистов в данной области, во-вторых, выработать уникальную конструкцию создаваемой системы, оптимальную по физико-технологическим критериям и согласующуюся с ней индивидуальную методику исследований. В-третьих, необходимо провести лабораторные испытания, подтверждающие работоспособность создаваемой системы оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии (ОР-СТД) и методики исследований.

Данное научное направление, не является малоизученным, ранее температурными геофизическими исследованиями с нагревом занимались как отечественные, так и зарубежные специалисты. В сущности разработок каждой из групп исследователей заложены как определённые технические решения, так и методики исследований, отличающиеся между собой пространственным охватом, длительностью процесса исследований, затратностью по производственным ресурсам и степенью зависимости от сторонней информации (методической самостоятельностью). Внимание необходимо уделить ряду разработок, в число которых входят работы исследователей из областей: скважинной термодобитометрии точечной электронной и оптоволоконной распределённой разновидностей, а также технологии из области альтернативных систем постоянного мониторинга.

1.4.1. Метод точечной электронной скважинной термокондуктивной дебитометрии

СТД на кабеле с переменной скоростью записи

Одними из самых заметных разработок в направлении развития точечной электронной термодобитометрии являются труды нескольких групп специалистов Башкирского государственного университета, работающих совместно с производственными предприятиями. Первой группой специалистов, взаимодействующей с ООО «ТНГ-Групп», в числе В. Ф. Назарова, Р. С. Мухамадиева, В. К. Мухутдинова и других проведены производственные исследования по выходу СТД на количественный уровень информативности в действующих скважинах. Сущность способа выхода на динамические параметры жидкости (скорость потока) в стволе скважины состоит не в модернизации применяемой аппаратуры, а в применении нестандартной схемы записи в процессе проведения исследований. Решение заключается в проведении каротажа на переменной скорости записи (рис. 6) в направлении, соответствующем характеру работы данной скважины (добывающая/нагнетательная).

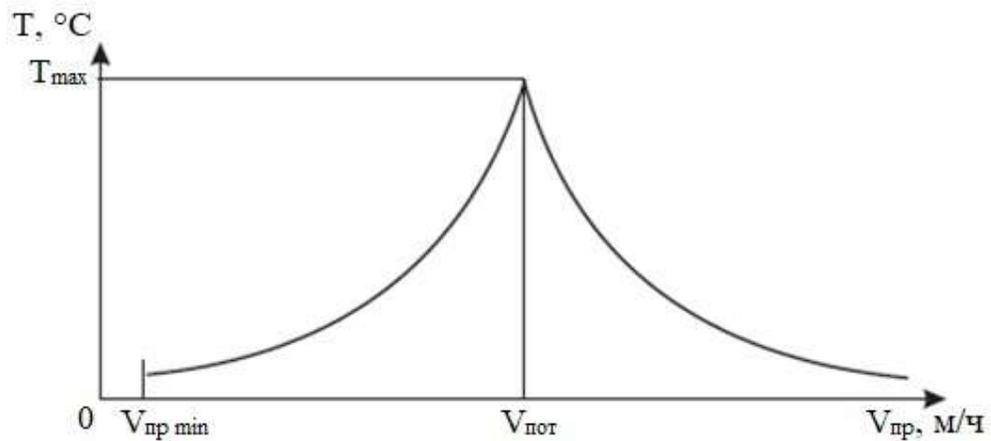


Рисунок 6 – Зависимость величины разогрева датчика СТД от скорости записи (движения прибора)

Смысл использования переменной скорости записи состоит в достижении и сохранении максимальной величины разогрева датчика СТД в интервале исследований. Максимальный разогрев датчика СТД достигается, когда скорость скважинного потока жидкости совпадает со скоростью записи, т. е. оператор производит подбор скорости записи каротажа в интервале исследований в режиме реального времени. Разработанная методика применяется как в простом виде, так и несколько усложнённом, требующем проведения дополнительных записей. По данной методике проведено множество геофизических исследований в скважинах Миннибаевской и Акбашской площадей в Республике Татарстан [47, 48, 49, 50, 51, 91, 116, 117].

Азимутально-распределённый термоанемометр

Второй группой специалистов Башкирского государственного университета в составе Р. А. Валиуллина, Р. Р. Яруллина, А. Р. Яруллина, Д. В. Космылина, Р. Ф. Шарафутдинова, Р. А. Галимова и других авторов выход метода СТД на количественный уровень обеспечивается за счёт применения обратного подхода. Решение состоит в создании и применении датчиков иного образца, обладающих расширенной пространственной чувствительностью. Специалистами создан азимутально-распределенный термоанемометр (рис. 7), способный определять направление потока и дебит жидкости. Основа его действия заключается в использовании четырёх термочувствительных

элементов, расположенных на диаметрально-противоположных сторонах поперечного сечения датчика. Нагрев термоанемометра осуществляется равномерно за счёт использования индукционного нагревателя. Измерительная схема, изображённая ниже, позволяет определять разность температур между точками, а соответственно и при наличии потока жидкости определять его направление.

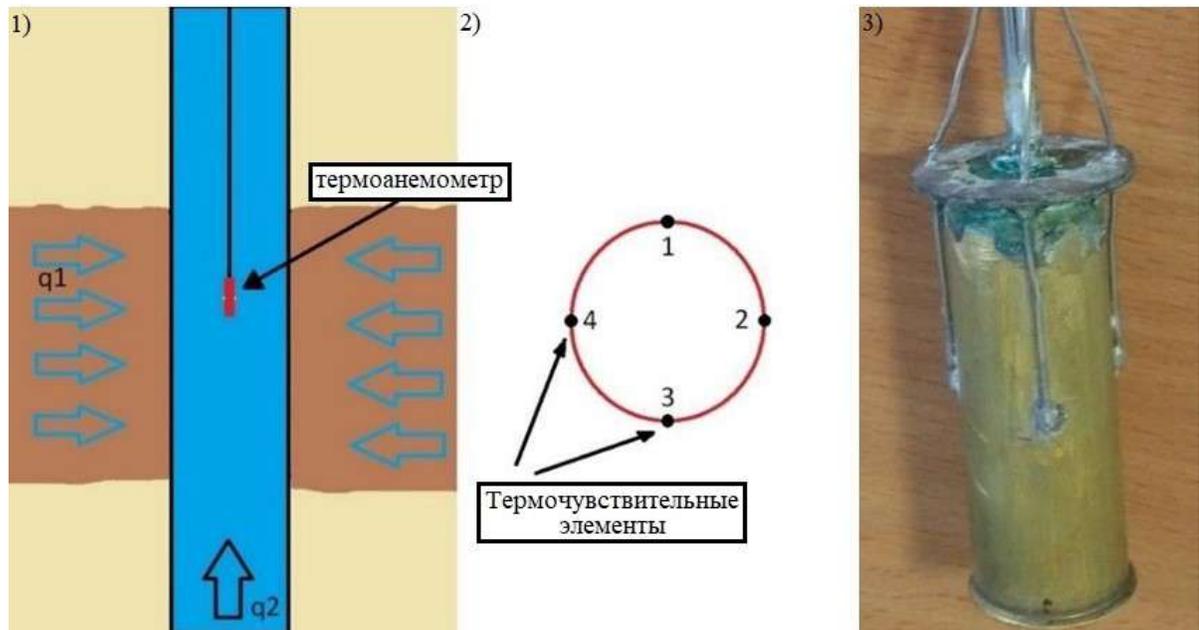


Рисунок 7 – Схематичное (1 и 2) и натуральное (3) изображения азимутально-распределенного термоанемометра

Принцип работы датчика заключается в следующем: когда в скважине присутствует только осевой поток, то все датчики температуры находятся в одинаковых условиях, и показания их разностей будут равны 0. Но если помимо осевого потока появится радиальный поток, который попадает на корпус датчика, то со стороны набегающего потока корпус будет охлаждаться интенсивнее, вследствие чего мы увидим разностную температуру между термочувствительными элементами. Чем больше при прочих равных условиях (диаметр, толщина стенок корпуса, длина) количество пар термочувствительных элементов, тем с большей достоверностью можно зарегистрировать наличие бокового потока и определить вектор его направленности. Работоспособность сконструированного датчика СТД

подтверждена серией лабораторных испытаний, проведённых авторами на ротационном стенде [33, 118, 119].

Метод температурных меток

Заслуживает внимания ещё одна разработка точечной разновидности, отличающаяся от предыдущих технологическим исполнением. Она называется «методом температурных меток», создана и внедрена специалистами Р. К. Яруллиным, Р. А. Валиуллиным, А. Р. Яруллиным, Р. Ф. Шарафутдиновым, М. С. Гаязовым, Д. В. Космылиным и другими специально для горизонтальных скважин. Сущность метода состоит в локальном точечном нагреве участка обсадной колонны, расположенного ниже исследуемых интервалов притока. Сформированная в горизонтальном стволе скважины температурная метка перемещается в направлении основного потока. Прослеживание её продвижения в потоке осуществляется многоканальными электронными приборами: радиально распределёнными термометрами, фазовыми расходомерами и т.д. В процессе исследований фиксируются аномалии, связанные с многофазным расслоением потока, фазовыми переходами и с изменением скорости потока (рис. 8). Ключевое отличие от предыдущих случаев состоит в том, что перегревается не датчик прибора, а целый участок обсадной колонны.

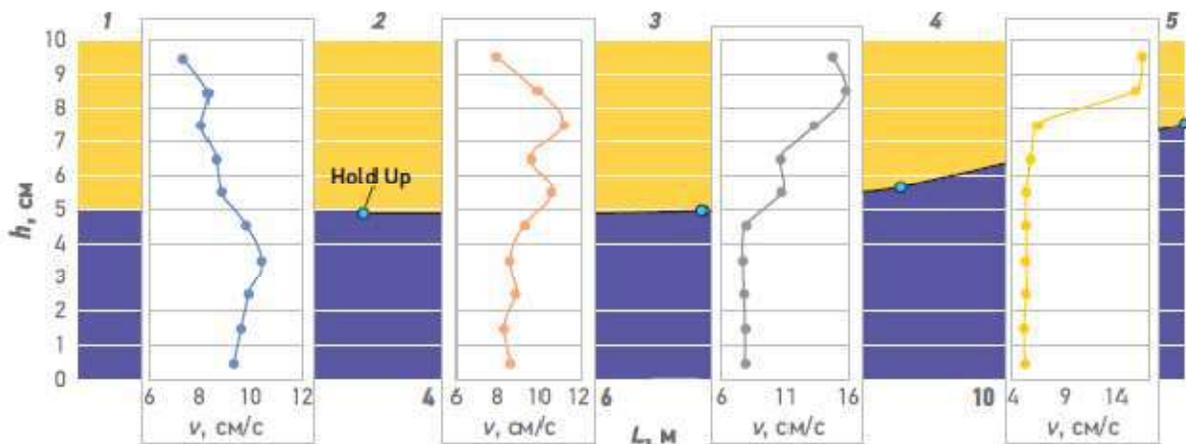


Рисунок 8 – Распределение фаз и скоростей потока по данным лабораторных испытаний на гидродинамическом стенде Башкирского государственного университета

Эффективность действия технологии подтверждена комплексом лабораторных испытаний, проведённых на гидродинамическом стенде Башкирского государственного университета. Испытания подтвердили возможность корректного определения скоростей потока и фазового распределения флюидов в стволе скважины. Отметим, что реализация процесса измерений в точечном электронном виде связана с необходимостью дискретного определения линейных скоростей потока (расхода) каждой фазы. Однако стоит отметить, что существует потенциальная возможность комплексирования данной технологии путём задействования оптоволоконных распределённых датчиков температуры, что может способствовать изменению формата исследований, сопровождающего переход метода в другую разновидность. Побочным результатом данного перехода будет являться потеря информативности по дифференциации фаз потока [17, 18, 90, 95].

1.4.2. Метод оптоволоконной распределённой скважинной термокондуктивной дебитометрии

Развитие оптоволоконной распределённой разновидности скважинной термодебитометрии в большинстве случаев носит преимущественно методический характер. Сравнимого числа кардинальных решений, состоящих в создании исключительно новых, нестандартных технических средств, образующих совместно скважинную измерительную систему и являющихся в отдельности бесполезными, не наблюдается. Самым известным таким кардинальным решением является оптоволоконная измерительная система с импульсным нагревом HPS (heat pulse system) британской компании «Silixa».

Система HPS компании «Silixa»

Данная система состоит из специализированного кабеля, в конструкции которого содержатся электрические проводники (витые медные жилы) для выработки тепла, с оптоволоконными модулями, и из наземного блока для проведения измерений и подачи импульсного переменного напряжения на упомянутый кабель. Описанная система позволяет проводить исследования методом активной оптоволоконной термометрии, именуемой за рубежом как А-

DTS (active distributed temperature sensing), что по названию аналогично оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии (рис. 9).

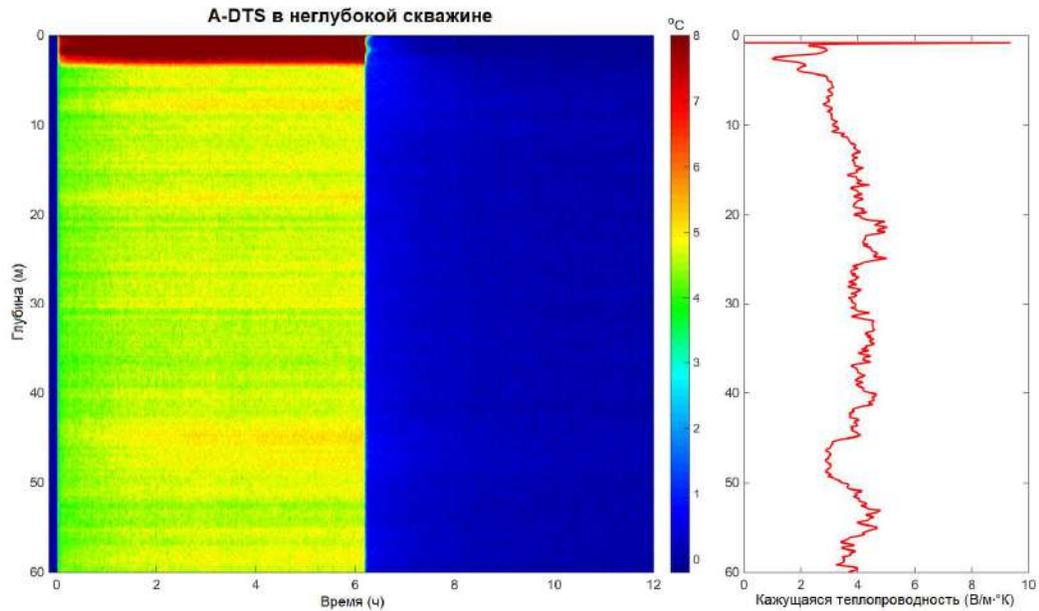


Рисунок 9 – Данные испытаний системы HPS в неглубокой скважине

Возможности системы HPS следующие: для работы системы необходим источник питания переменного напряжения от 220 до 600 В, общая длина нагревательной линии, вероятно, соответствует длине используемого кабеля, что составляет 1000 м, рабочие температурные условия среды для кабеля составляют 0 – 50 °С, система обеспечивает перегрев кабеля на 5 °С [137].

Обозначенные возможности системы отражают её существенные ограничения. Первое ограничение состоит в глубинности исследования скважин, что связано с предельной длиной кабеля в 1000 м и не позволяет им работать в современных нефтяных скважинах. Преимущественная часть исследований данной системой производилась в неглубоких скважинах, что и представлено в тексте работы [100, 104]. Удлинение или смещение линии нагрева посредством изменения строительной длины кабеля вызовет необходимость увеличивать рабочее напряжение. Второе ограничение связано с малым рабочим температурным пределом изучаемой среды. В реальных нефтяных разрезах, например в Западной Сибири, температура достигает 120 °С. Третье ограничение состоит в адекватной дифференциации дебитов

исследуемых пластов-коллекторов. В условиях высокодебитных скважин перегрев в 5 °С для некоторых методик исследований может оказаться недостаточным для интерпретации данных с оптимальной достоверностью. Желательно иметь дополнительный запас на перегрев.

Названные ограничения в системе НРС компании «Silixa» являются показателем неостребованности проявления столь масштабного подхода для реализации оптоволоконной разновидности метода СТД. Значительная часть исследователей, как упоминалось выше, занимается развитием уже имеющегося в наличии оборудования, используемого для пассивной оптоволоконной распределённой термометрии, т. е. стандартных образцов оптоволоконных геофизических кабелей, оптоволоконных измерительных станций и источников напряжения, расположенных непосредственно на кустовой площадке.

Технология проведения исследований методом оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии (ОР-СТД) относительно проста, так как базируется на двух ключевых функциональных возможностях геофизического кабеля. Первая состоит в измерении теплового поля с помощью оптоволоконного распределённого датчика температуры (ОРДТ), а вторая в выработке тепловой энергии при помощи имеющихся кабельных проводников (стальной брони, токопроводящих жил и др.). Если абстрагироваться от особенностей применяемых технических средств (конструкций кабелей, типов источников питания, исполнения нагревательного элемента и др.), то существенные различия останутся лишь в информационных основах методик исследований.

Информационные основы методик исследования максимально сопряжены с алгоритмами интерпретации, для применения которых необходимы следующие составляющие: режим работы искусственного температурного поля; уравнения, обеспечивающие переход от «сырых» данных к количественным показателям, и эталонные измерители (при их наличии). Данные составляющие формируют конкретную методику исследований. На

практике зачастую получается так, что методики, разработанные разными специалистами, обладают определённым схематическим сходством (подобием), поэтому для систематизации их целесообразно обобщать в единую категорию, именуемую как способ (вариант) проведения исследований. Рассмотрим наиболее известные способы проведения исследований.

Способы проведения исследований методом оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии

По одной из классификаций, признаваемой во всём мире, выделяется три основных способа (варианта) проведения исследований (рис. 10) методом оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии, в рамках которых применимы те или иные методики исследований. Первым способом является испытание на тепловую адвекцию.

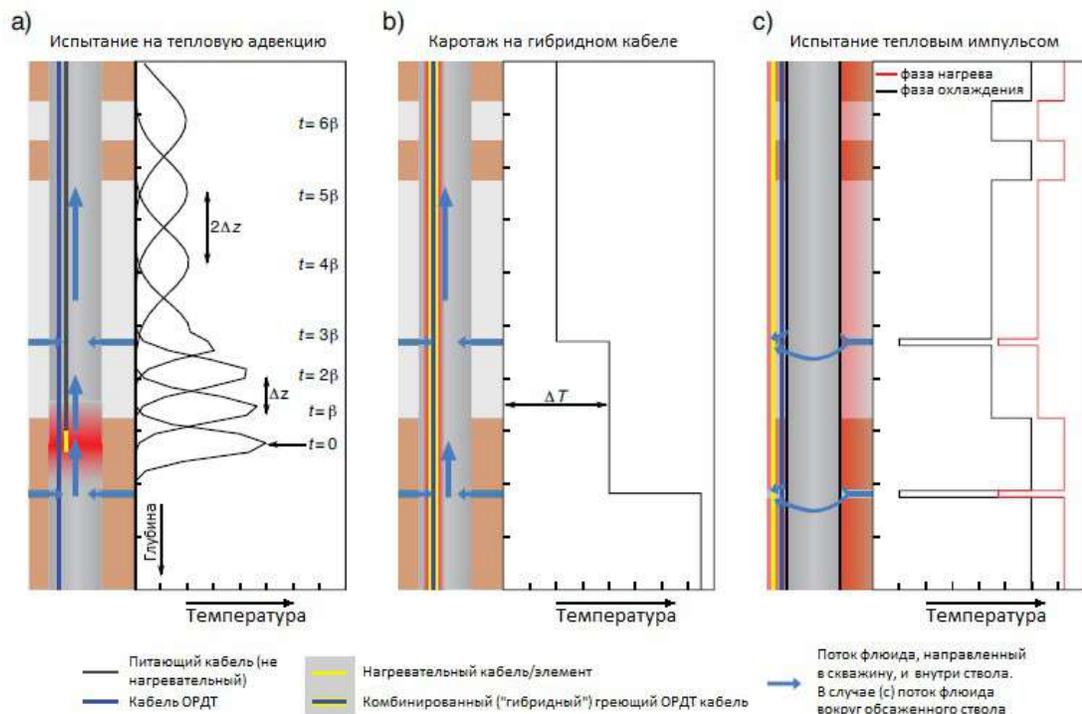


Рисунок 10 – Схематичное изображение трех способов (вариантов) проведения исследований методом активной оптоволоконной термометрии

1. Испытание на тепловую адвекцию

Способ является широко применяемым не только в оптоволоконном виде, но и в точечном электронном. Реализуемых методик по обсуждаемому способу

проведения исследований существует множество. Но однозначно принцип их действия заключается в отслеживании и анализе температурных аномалий, вызванных действием отдающих или принимающих пластов, накладывающихся на искусственно созданное локальное тепловое поле, осуществляющее передачу энергии по стволу скважины в вертикальном направлении. Искусственное тепловое поле может создаваться за счёт использования электрического точечного или распределённого источника [99].

Методика исследования ООО «Газпромнефть НТЦ»

Разработками методики исследований, схожей со способом изучения тепловой адвекции, занимались специалисты: Д. М. Лазуткин, А. И. Ипатов, М. И. Кременецкий и другие. Объектами исследования являются средне и малодобитные горизонтальные нефтяные скважины. Разработанная методика исследования предполагает использование оптоволоконного кабеля с одним или несколькими распределёнными нагревательными участками для создания регулируемого искусственного теплового поля и изучения его переноса в направлении основного потока (рис. 11). Продумано применение оптоволоконного кабеля с нагреваемыми участками и экспериментальной установки для моделирования скважинных условий. В настоящее время методика проходит лабораторные исследования [35, 39, 121].

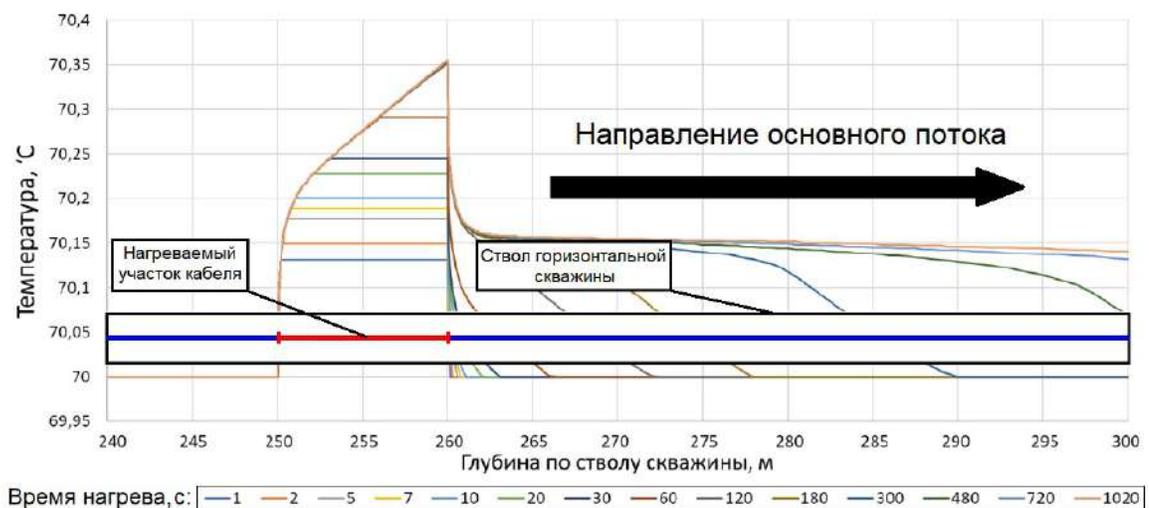


Рисунок 11 – Результаты математического моделирования и схема проведения исследований

Методика теплового индикатора

Методика разработана и применяется исследователями из Университета штата Висконсин, США (S. M. Sellwood, D. J. Hart, J. M. Bahr) и из Университета Флиндерса, Австралия (E. Banks, M. Shanafield, Peter G. Cook). Данная методика позволяет изучать скважинный поток по тепловому индикатору при помощи оптоволоконного распределённого датчика температуры (ОРДТ) (рис. 12).

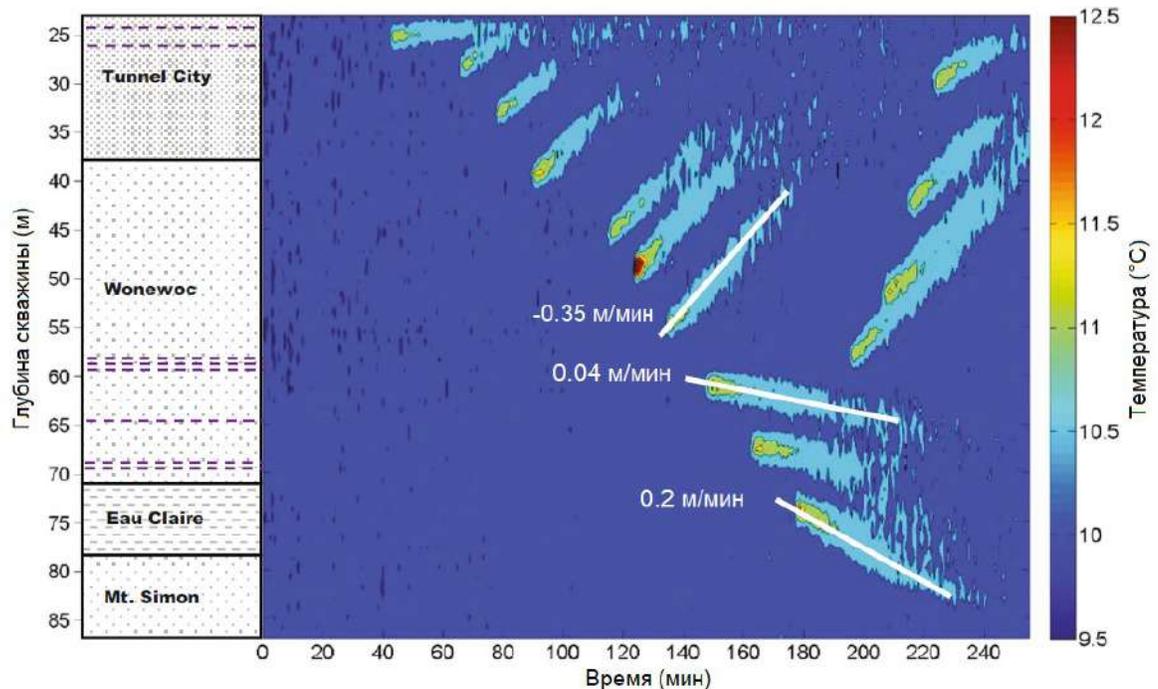


Рисунок 12 – Сводные термограммы исследований по методике теплового индикатора по скважине DN-1440 на 14 точках нагрева

Сущность методики теплового индикатора состоит в точечном прогреве некоторого количества воды на заданной глубине в стволе скважины и отслеживании её движения посредством регистрации термограмм на малом времени накопления (около 20 секунд) по оптоволоконному кабелю. Для проведения исследований в стволе скважины выбирается интервал, в данном интервале отмечается определённое количество точек нагрева. До забоя скважины спускается оптоволоконный кабель. Затем в скважину спускается другой кабель, несущий точечный нагреватель, который поочерёдно позиционируется на точках нагрева. При постановке нагревателя на точку

нагрева прогревается небольшой объём жидкости (в течение 1 – 12 минут) и в стволе скважины создаётся «тепловой пакет» жидкости. Во время и после создания «теплого пакета» производится регистрации термограмм на малом времени накопления. По завершении записей всех точек нагрева строится временная термограмма, по которой определяется кажущаяся скорость потока и его направление. Определение истинной скорости потока производится посредством применения лабораторных зависимостей, либо профильных алгоритмов расчёта.

Методика опробована в неглубоких скважинах на территории США и Австралии. Отмечается преимущество, состоящее в возможности определения направления потоков по всей длине скважины. Однако необходимость использования дополнительного кабеля для перемещения точечного нагревателя создаёт ограничение для применения методики в условиях долговременного мониторинга [98, 108, 109].

2. «Hybrid cable logging» (картаж на гибридном кабеле)

«Hybrid cable logging» представляет способ проведения исследований, для осуществления которого необходимо использовать оптоволоконный кабель с нагревательным элементом исключительно распределённого типа, а не точечного. В основе способа заложен принцип, что при нагреве кабеля с постоянной потребляемой мощностью температура внутри кабеля в установившемся режиме зависит от скорости движения жидкости. Поток жидкости с увеличением скорости истончает тепловой пограничный слой вокруг поверхности кабеля, из-за чего тепла, исходящего от нагревательного элемента, до жидкости доходит пропорционально меньше.

Методика исследования формы кривой СТД

Большинством отечественных специалистов данный способ реализуется по максимально упрощённой методике исследований, именуемой «Исследование формы кривой СТД» (рис. 13). Методика отличается простотой обработки данных и применимостью алгоритма интерпретации к кабелям

любой конструкции, так как полноценно опирается на данные эталонных поверхностных датчиков расхода.

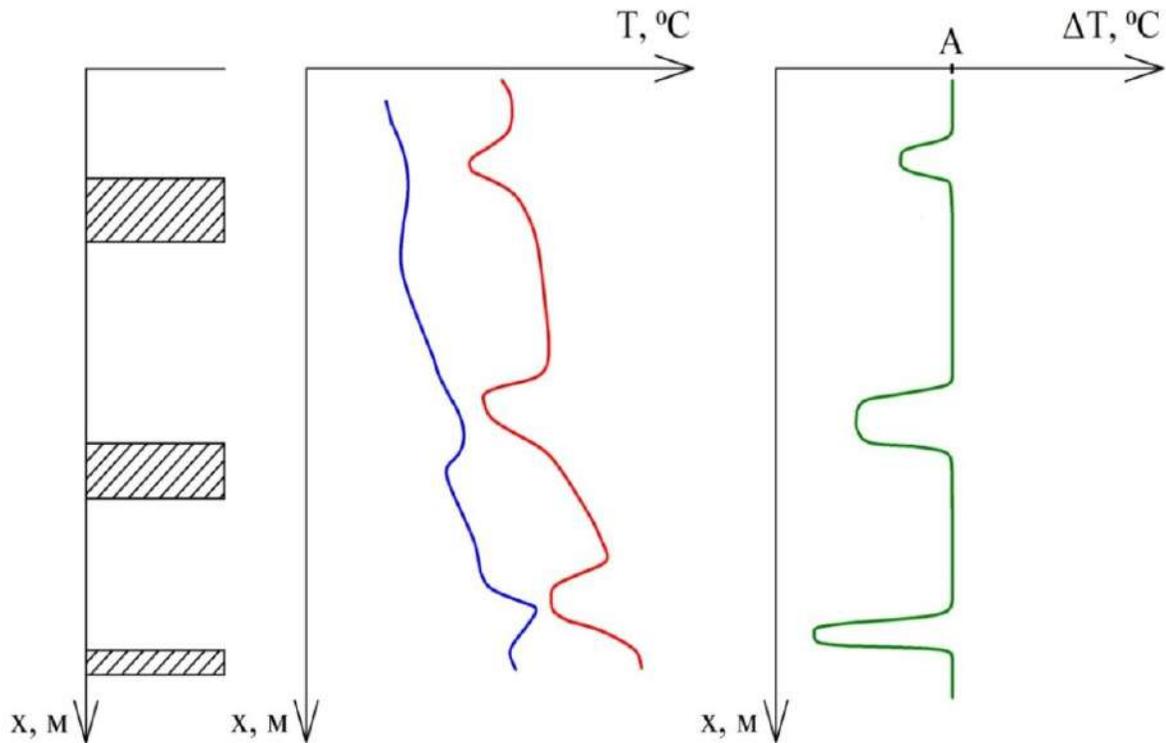


Рисунок 13 – Отображение методики геофизических исследований по форме кривой STD. Шифры кривых: синяя – фоновая кривая; красная – кривая STD; зелёная – разностная кривая

Начало процесса исследований состоит в регистрации фоновой термограммы без нагрева кабеля (синяя кривая). Параллельно осуществляется регистрация данных поверхностными расходомерами, вмонтированными в приёмную линию. Затем геофизический кабель нагревается терморезистивным способом на температуру, достаточную для проведения локализации и выборки работающих интервалов. Регистрируется термограмма с нагревом, кривая STD (красная кривая). Далее из кривой STD вычитается фоновая кривая для получения разностной кривой (зелёная кривая). Аномалии на разностной кривой посредством аппроксимации от значения общего дебита по скважине соотносятся со значениями поинтервальных дебитов

$$\frac{W_{\text{пов}}}{\sum_{i=1}^n \Delta T} = \frac{W_1}{\Delta T_1} + \frac{W_2}{\Delta T_2} + \dots + \frac{W_n}{\Delta T_n}; \quad (1.3)$$

где $W_{нов}$ – расход жидкости по скважине, измеренный на поверхности эталонными точечными датчиками, м³/сут; $\sum_{i=1}^n \Delta T$ – сумма аномалий по разностной температурной кривой, °С; W_1, W_2, W_n – расчётный расход жидкости по одиночным работающим интервалам, пропорциональный соответствующим локальным аномалиям ΔT м³/сут; $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_n$ – локальные температурные аномалии по отдельным работающим интервалам $1, 2 \dots n$, соответственно, °С [86, 88].

Методика «Hybrid cable logging»

Зарубежные специалисты для проведения исследований способом «Hybrid cable logging» используют схожую методику исследований, но применяют к ней более сложный расчёт. Например, у группы специалистов из университетов США, Нидерландов, Великобритании и Франции, в которую входят V. F. Bense, T. Read, O. Bour, T. Le Borgne, T. Coleman, S. Krause, A. Chalari, M. Mondanos, F. Ciocca, J. S. Selker, R. Hochreutener, N. Lavenant в основе применяемой методики заложена следующая формула:

$$\Delta T = \frac{Q}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha r_2} + \frac{1}{\lambda_c} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \right); \quad (1.4)$$

где ΔT – разница температур между центром кабеля и жидкостью, °К; Q – тепловой поток внутри кабеля, Вт/м; α – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°К); r_1 – радиус кабельной брони, м; r_2 – общий радиус кабеля, м; λ_c – коэффициент теплопроводности изоляционного материала между r_1 и r_2 , Вт/(м·°К).

Специалисты данной методики констатируют следующие особенности её применения. Решающей величиной в определении скорости потока выступает коэффициент теплопередачи. Данный показатель в практических условиях трудно определить, поэтому для достижения решения необходимо проводить лабораторные испытания по определению зависимости искомого коэффициента от скорости потока. Также отмечается значительное влияние расположения кабеля в скважине на результат, так как его неравномерная центрация в скважине нарушает тепловой поток. Для повышения эффективности действия

методики приходилось использовать центраторы, отстраивающие кабель от стенок скважины. Дополнительной трудозатратностью является необходимость проведения периодических калибровок оптоволоконной системы посредством записи механического расходомера и манометра для учёта и устранения влияния искажающих локальных эффектов. Подобная необходимость возникла при проведении исследований в одной из скважин (рис. 14) [99, 104].

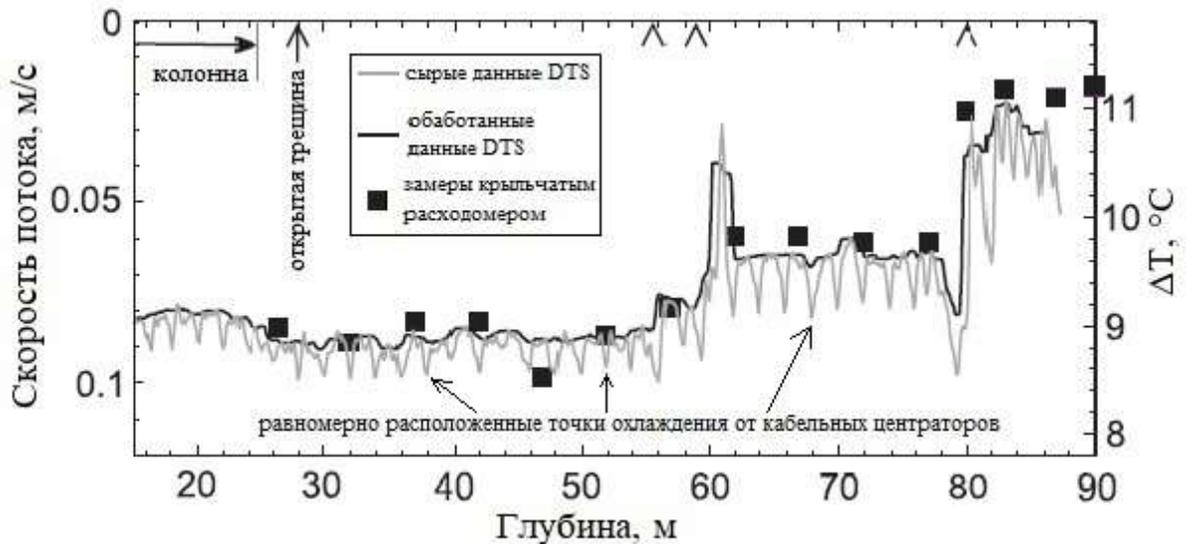


Рисунок 14 – Сравнение результатов измерения профиля притока ОРДТ по методике «Hybrid cable logging» и механическим расходомером в работающей скважине

3. «Heat pulse test» (испытание тепловым импульсом)

Способ применяется преимущественно за рубежом. Исследованиями по данному способу занимаются Т. Coleman, В. Parker, С. Maldaner, М. Mondanos. Испытание тепловым импульсом позволяет определять кажущиеся тепловые свойства пористых сред, количественно изменчивых от скорости потока протекающих в них флюидов. Принцип действия состоит в подаче постоянной выходной электрической мощности по всей длине кабеля в течение определенного периода времени и длительном мониторинге фаз его нагрева и/или охлаждения. Далее посредством анализа термограмм извлекается информация о литологических вариациях и о естественном градиентном распределении потоков. Процесс исследования описывается уравнением

$$\lambda_a = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{\ln(t_2 / t_1)}{T_2 - T_1}; \quad (1.5)$$

где λ_a – коэффициент кажущейся теплопроводности пласта, Вт/(м·°К); Q – линейная электрическая мощность на входе, Вт/м; t_1, t_2 – временные отметки 1 и 2, с; T_1, T_2 – температуры в моменты времени t_1, t_2 соответственно, °К.

Специфика интерпретации состоит в том, что для проведения расчётов необходимо предварительно знать тепловые свойства изучаемых горных пород. За счёт этого обеспечивается возможность определения кажущейся теплопроводности и последующий выход путём численного моделирования на количественную оценку расхода жидкости [99]. На рис. 15 показаны смоделированные кривые, отражающие влияние потока жидкости на данные о температуре теплового импульса, и фактические полевые данные исследований в водоносном горизонте Долостоун [100].

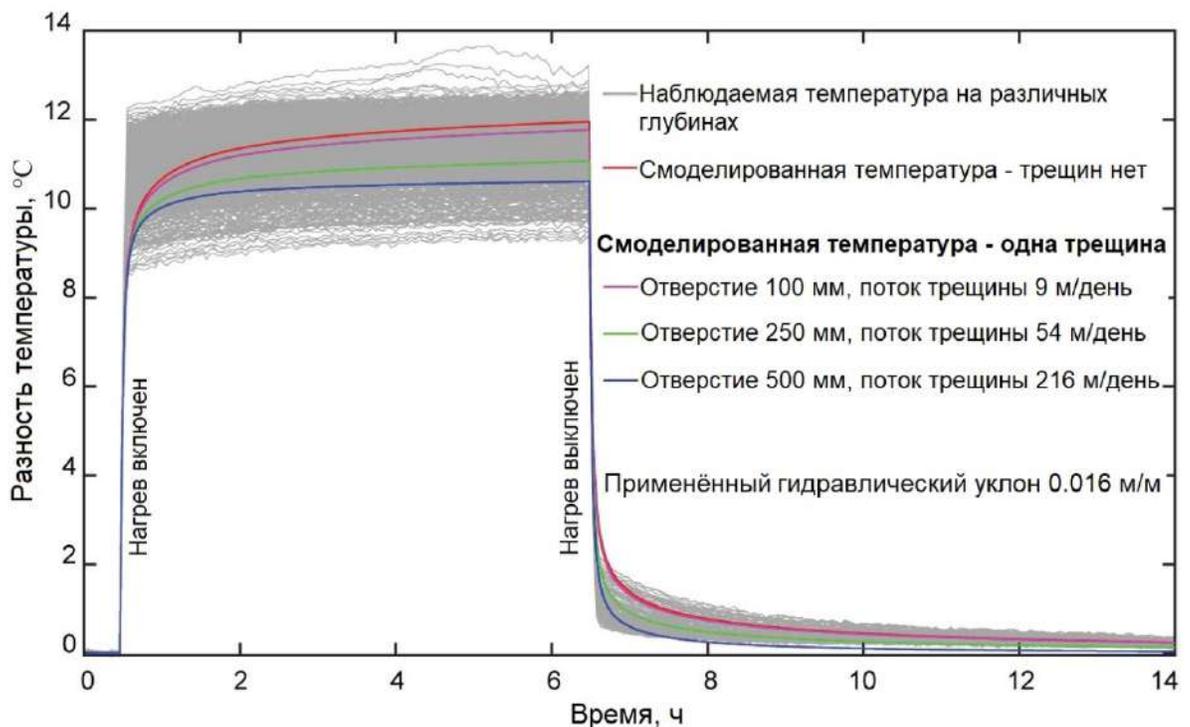


Рисунок 15 – Смоделированные и фактические полевые данные исследований испытания тепловым импульсом в водоносном горизонте Долостоун

На основе описанных разработок в области геофизических исследований методом скважинной термодобитометрии отмечается заметное (диаметральное)

расхождение в плане эффективности. Под эффективностью подразумевается степень самостоятельности метода и его выход на количественный уровень информативности. Отечественными специалистами наиболее фундаментально проработана точечная электронная разновидность метода. Оптоволоконная распределённая же разновидность скважинной термодобитометрии довольствуется полуколичественными методиками, препятствующими её развитию. Зарубежные специалисты не занимаются точечной электронной разновидностью метода, а основные ресурсы направляют на оптоволоконную разновидность. Закономерным результатом стала разработка некоторого числа классифицированных в дальнейшем методик исследования, обладающих признаками самостоятельности, но нуждающихся в использовании дополнительного массива информации: лабораторных зависимостей, данных промежуточного каротажа точечными электронными приборами и т.п.

1.4.3. Геофизические исследования альтернативными системами постоянного мониторинга

Несмотря на удобство и динамичное развитие оптоволоконных измерительных систем на рынке заметно проявляется спрос и к альтернативным электронным системам постоянного мониторинга. Данные системы представляют собой сборку последовательных модулей, оснащаемых разнообразными датчиками, связь с которыми осуществляется по проводному каналу. Из наиболее используемых на производстве систем стоит рассмотреть следующие модели.

Многозонный цифровой датчик температуры (МЦДТ)

Многозонный цифровой датчик температуры представляет собой сборку кабельных элементов, косу (рис. 16), длиной около 120 м, оборудованных термоэлектрическими преобразователями. Данные элементы расположены поочередно друг от друга на постоянном шаге (обычно 0,5 м). Разработкой и производством термических кос данного вида успешно занимается предприятие АО "НПП "Эталон". Изделие выполняется в различных вариантах, свойственных условиям применения. Запись и последующее считывание

информации производится при помощи специальных устройств, логгеров. Новые модели кос оснащены радиопередатчиками, модемами, осуществляющими передачу данных в реальном времени в радиусе 200 – 300 м. Это позволяет своевременно получать информацию о состоянии объекта мониторинга, и способствует оперативному принятию соответствующих решений на основе полученных результатов. Данные системы применяются в скважинах малой глубины (до 400 м) для контроля температуры грунтов, сложенных многолетнемёрзлыми горными породами, на которых возведены промышленные и гражданские объекты [56, 57].



Рисунок 16 – МЦДТ: коса (а), записывающие и передающие устройства (б)

Термокоса «Tota Systems»

Вариант системы постоянного мониторинга компании «Tota Systems» отличается от предыдущего улучшенным защищённым исполнением и расширенным пространственным охватом. Как и любая система мониторинга, она состоит из наземного регистратора и подземного оборудования. На поверхности регистратор осуществляет опрос скважинных датчиков и передаёт информацию при помощи модема. Подземное оборудование термокосы состоит из трубной и кабельной частей (рис. 17). Трубная часть в скважине располагается от призабойной зоны до подвешного устройства, закреплённого на электрическом центробежном насосе (ЭЦН). Трубная часть выполнена из элементов (модулей) диаметром до 40 мм, длина измерительных модулей составляет от 0,5 до 6 метров. Нарращивание длины компоновки осуществляется не только посредством измерительных модулей, но и используются также

транзитные модули: удлинительные и центрирующие. На участке подвешного устройства располагается соединение трубной части компоновки с кабельной частью. Кабель, располагаясь в затрубном пространстве, выводится через арматуру на поверхность к регистратору. Система прошла опробование в производственных условиях на одной из горизонтальных скважин Этышского месторождения (Пермский край) [71, 72].



Рисунок 17 – Термокаса «Tota Systems» в добывающей горизонтальной скважине

Основной недостаток представленных альтернативных систем состоит в ограниченных размерах зоны исследований. Преимущество данных систем мониторинга перед оптоволоконными системами состоит в единовременно достигаемой повышенной скорости опроса датчиков и точности измерения. Но главным, ранее обозначенным плюсом, данных систем выступает модульность, которая содержит в себе возможность оснащения датчиками для прямого (непосредственного) измерения динамических показателей скважинной среды. Реализация подобного варианта на практике способна изменить отношение нефтепользователей к электронным системам постоянного мониторинга.

Выводы

1. Анализ реализованных разработок отражает, что в большинстве случаев в качестве основы оптоволоконной измерительной системы

используются геофизические кабели с нагревательными элементами, имеющими проложение во всю строительную длину. При этом производственные исследования проводятся в неглубоких скважинах (до 1000 м), что, безусловно, сохраняет первичные затраты на электроэнергию. А разрабатываемая автором система оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии (ОР-СТД) должна применяться в глубоких нефтедобывающих скважинах (до 5000 м), что кратно повысит затраты на электроэнергию. В связи с этим автору необходимо реализовать конструкцию геофизического кабеля с нагревательным элементом ограниченной длины и с физическими характеристиками, позволяющими вырабатывать достаточное количество тепловой энергии;

2. В значительной части существующие методики исследования являются технологически длительными по времени и усложнёнными в плане интерпретации данных. Учитывая, что объектом изучения данных систем являются пласты-коллекторы с изменчивыми во времени показателями, и аномалии, связанные с быстропротекающими процессами, то встаёт вопрос временной актуальности данных. Поэтому необходимо в дополнение к основной разработке создать методику, обеспечивающую как оперативное проведение исследований, так и интерпретацию данных;

3. Создаваемая система оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии (ОР-СТД) должна предусматривать конструкцию кабеля, обеспечивающую возможность совместной работы оптоволоконного датчика, кабельных электронных приборов и нагревательного элемента. Данное решение способствует оптимизации технологического цикла постановки скважины на мониторинг и комплексированию оптоволоконной измерительной системы.

1.5. Разработки по изучению показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры

Тепловая инерционность как физическая величина отражает совокупное проявление теплофизических свойств материалов, входящих в состав геофизических кабелей, являющихся вмещающими изделиями для

оптоволоконных распределённых датчиков температуры. Все специалисты на практике сталкиваются с проявлением тепловой инерционности, которое выражается в искажении изучаемого температурного поля в пространственном и временном измерении. А показателями, по которым оценивается степень искажения регистрируемого температурного поля, выступают пространственное разрешение и постоянная времени, соответственно.

Пространственное разрешение – это величина, отражающая минимальные размеры объектов, которые возможно локализовать в температурном поле. Другими словами, это минимальное расстояние между двумя температурными аномалиями, при котором их возможно воспринимать как отдельные объекты.

Постоянная времени – это величина, отражающая быстроту фиксации событий, происходящих в температурном поле, для конкретного оптоволоконного распределённого датчика температуры. Иначе говоря, это константа, определяющая время, необходимое датчику для регистрации текущих изменений температуры среды, в которой он находится.

Практическое знание данных показателей способствует значительному облегчению исследовательского процесса. Однако их изучение в приближённо систематизированном виде не проводилось. В связи этим обозначилось **второе защищаемое положение**, направленное на изучение показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры. Для реализации данной цели необходимо в первую очередь выявить поэлементно решающие факторы, которые численным образом определяют упомянутые показатели детализации оптоволоконной измерительной системы, а затем сосредоточиться на тех из них, которыми исследователь в состоянии управлять.

1.5.1. Факторы, определяющие чувствительность оптоволоконных распределённых датчиков температуры

Существующее пространственное разрешение и постоянная времени оптоволоконной измерительной системы зависят от результирующего взаимодействия всех её основных элементов: оптического волокна, кабельного

изделия и измерительного блока (станции). Каждый из перечисленных элементов, будучи наделённым определёнными физико-техническими особенностями, оказывает соразмерное влияние на чувствительность системы к регистрируемому температурному полю.

1. Оптическое волокно. Не заостряя внимание на типе используемых для исследований волокон, сфокусируем внимание на их оптических параметрах передачи сигнала: показателе преломления, коэффициенте затухания и иных величинах. Данные параметры устанавливаются на этапе изготовления волокна, посредством подачи определённых легирующих компонентов в заданных дозах. Исследования специалистов показывают, что определённые комбинации легирующих компонентов способствуют соответствующей минимизации затухания и увеличению номинального качества сигнала. Безусловно, подобные решения ведут к подорожанию изготовленного волокна, из-за чего на мировом рынке его стоимость варьирует от 0,5 до 500 \$ за 1 метр. А в противном случае, при возникновении локальных отклонений параметров, пагубных воздействий групп ОНГ, нарушений целостности структуры, происходит утрата номинально заявленных оптических свойств материала, т.е. ухудшение его чувствительности. Поэтому технология изготовления высококачественной продукции у каждой из компаний, производящих оптические волокна, детально проработана [43, 135].

2. Кабельное изделие. Хрупкость оптических волокон вызывает необходимость эксплуатировать их в составе кабельных изделий. Волокна в зависимости от конструкции кабеля размещаются несколькими возможными способами (рис. 18). Чем дальше удалено оптическое волокно от периферии к центру, тем менее оно чувствительно к изменениям температурного поля во внешней среде. Конкретно снижение чувствительности оптоволоконных распределённых датчиков температуры связано напрямую с действием слоёв-теплоизоляторов, препятствующих измерителю установить непосредственный контакт с источником аномалии, который имеет конкретные размеры, местоположение и продолжительность проявления. При наличии возможности,

в качестве предварительной меры по повышению чувствительности, применяется выбор кабеля с конструкцией, обладающей повышенной теплопроводностью [30, 67, 112].

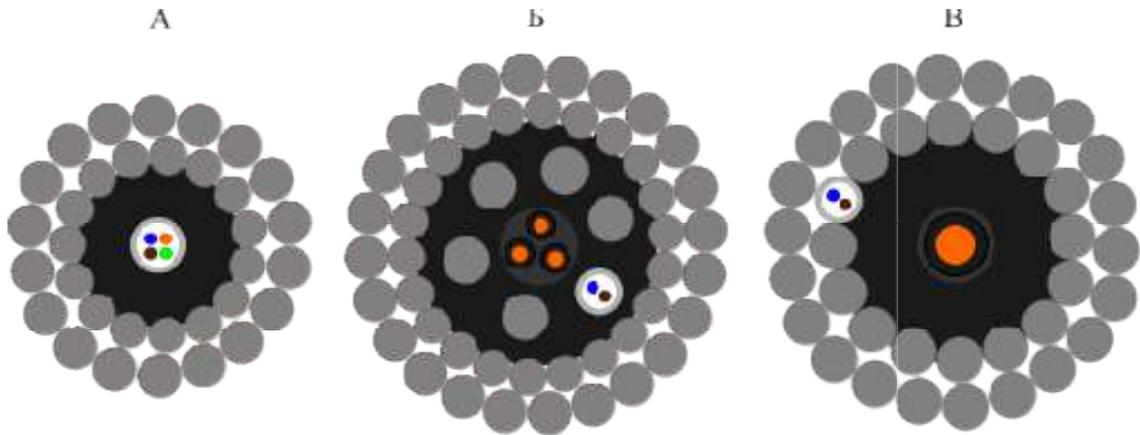


Рисунок 18 – Варианты расположения оптоволоконных модулей в кабелях: А – центральное; Б – промежуточное; В – периферийное;

3. Измерительные блоки (станции). На рынке оптоволоконной измерительной аппаратуры представлено множество образцов от различных производителей, в том числе охранные системы. Набор технических характеристик станции, таких как быстродействие вычислительных схем, устойчивость работы лазера, эффективный шаг опроса по расстоянию и по времени формируют на выходе фактическую чувствительность оптоволоконного датчика [44, 45, 54, 69, 70, 111, 134, 136].

Стратегическое направление на выбор максимально передовых по качеству компонентов оптоволоконной измерительной системы способствует достижению наилучшей детализации температурного поля. Однако реальная ситуация, связанная с экономической эффективностью геофизических исследований скважин, не оправдывает увеличение затрат на часть элементов оптоволоконной измерительной системы. Для постановки скважины на мониторинг добывающее предприятие оплачивает предприятию-исследователю расходы не только на каротажные работы, но и на оптоволоконный геофизический кабель, важнейшей составляющей которого является оптическое волокно. Поэтому со стороны предприятия недропользователя закладывать

бюджет на дорогие и сверхчувствительные оптоволоконные датчики вместо бюджетных и достаточно функциональных смысл отсутствует.

С остальными элементами оптоволоконной системы ситуация обстоит иначе, серьёзных ценовых проблем для добывающего предприятия они не создают. Кабельное изделие (точнее его конструкция) выбирается исходя из синтеза задач по обеспечению его работоспособности в текущих скважинных условиях и достижению оптимальной чувствительности оптоволоконного датчика. Выбор же измерительного блока (станции) полностью ложится на сторону исследователя, и здесь технически грамотный пользователь максимально заинтересован в выборе высококачественного оборудования. Поэтому зачастую пользователи совместно с производителями оборудования проводят тестовые измерения для подтверждения заявленных технических характеристик во избежание проблем, способных возникнуть на практике.

К сожалению, на практике, в том числе и у подготовленных исследователей, часто проявляются проблемы, связанные с отличием фактической чувствительности оптоволоконных распределённых датчиков температуры от заводских характеристик. Очевидно, что данное расхождение в пространственном разрешении и постоянной времени первично связано с тем, что изготовитель оборудования указывает цифры, полученные при проведении испытаний с оптическим волокном без вмещающих изделий, что явно способствует достижению им наилучшей чувствительности. Чувствительность оптоволоконного датчика ухудшается сразу при его помещении в кабельное изделие, и изменить ситуацию в лучшую сторону уже невозможно. Изменения в плане пространственного разрешения приводят к тому, что границы местоположения точечных объектов увеличиваются, либо две аномалии сливаются на термограмме в одну, без возможности их разделения. А увеличение постоянной времени приводит к запаздыванию регистрации датчиком изменений, происходящих в температурном поле. Проблематикой вопроса пространственного разрешения и постоянной времени занималось множество исследователей и специалистов. Для получения дополненной

картины изученности вопроса показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры необходимо ознакомиться и провести анализ существующих по ним разработок.

1.5.2. Изучение пространственного разрешения оптоволоконных распределённых датчиков температуры

Специфика вопроса изучения пространственного разрешения оптоволоконных распределённых датчиков температуры состоит в том, что большинство специалистов в этом не заинтересованно. Основное направление их деятельности ориентировано на повышение пространственной детализации метода оптоволоконной распределённой термометрии. Среди опубликованных работ по данному направлению имеется два способа решения вопроса, назовём их условно: аппаратурные и алгоритмические.

1. Аппаратурные способы повышения пространственного разрешения

Среди отечественных объединений и групп компаний ООО «Т8» и Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова известны разработки специалистов М. А. Бухарина, В. В. Горбуленко, О. Е. Нания, С. П. Никитина, В. Н. Трещикова, Э. А. Формирякова, Д. Р. Харасова по созданию когерентного рэлеевского рефлектометра, обеспечивающего пространственное разрешение в 10 – 20 м для оптоволоконных линий протяжённостью 75 км [5].

Специалистами того же объединения М. А. Тарановым, А. Э. Алексеевым и другими; создана система, способная работать совместно с рэлеевским по рамановскому рассеянию с пространственным разрешением до 1 – 2 м при одновременном измерении температуры и деформации [68].

Специалистами МГТУ (имени Н. Э. Баумана) А. О. Чернуцким, А. Б. Пневым проведены исследования, направленные на улучшение пространственного разрешения ОРДТ посредством повышения эффективности используемого источника оптического сигнала. Сравнительный анализ эффективности источников оптического сигнала в оптоволоконных системах, таких как, лазеры с модуляцией добротности, лазеры непрерывного действия с внешней модуляцией интенсивности, полупроводниковые источники и других

видов определяет выбор в пользу использования лазеров ультракоротких импульсов с синхронизацией мод. Авторами создана установка на рамановском рассеивании и проведены лабораторные испытания. Используемые параметры регистрации источника излучения: длительность импульса 238 фс, средняя мощность излучения 2,0 мВт, частота повторения 7,925 МГц. В ходе испытаний к установке был подключен ОРДТ длиной 7800 м, участок в 0,5 м от которого поместили в жидкостный термостат. Достигнутое пространственное разрешение составило 0,3 м [87].

У иностранных специалистов компании «Luna Innovations Inc.» (А. К. Sang, D. K. Gifford, S. T. Kreger, M. Froggatt) и Университета науки и технологий штата Миссури (М. Roman, D. Balogun, Y. Zhuang, R. Gerald) прогресс отражается численно лучше. Повышенное пространственное разрешение до нескольких сантиметров достигается за счёт использования оптического волокна со специальным химическим составом и без теплоизолирующих слоёв. Такой результат (рис. 19) достигнут на оптоволокне, не инсталлированном в кабельное изделие, что вероятно не обеспечит равной детализации при проведении скважинных исследований [105, 106, 107].

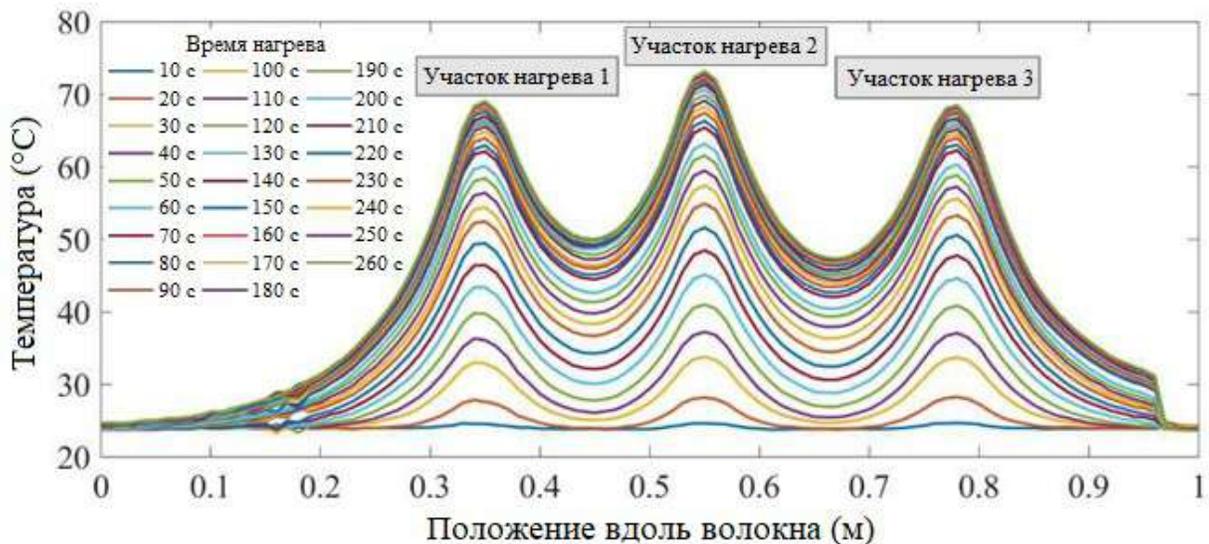


Рисунок 19 – Оптоволоконные термограммы, зарегистрированные вдоль коротких участков нагреваемой медной трубы

2. Алгоритмические способы повышения пространственного разрешения

Неотъемлемой частью любой измерительной системы являются алгоритмы обработки регистрируемых сырых данных. Математический аппарат, как оптоволоконной станции, так и программ интерпретации данных также представляет собой средство повышения пространственного разрешения. Специалистами из Национального университета Малайзии (M. Zan, M. Elgaud, A. Zainuddin, A. Kadhim, M. H. Mokhtar, N. Arsad, A. A. Bakar) при работе с оптоволоконными системами, работающими на бриллюэновском рассеянии, удалось улучшить пространственное разрешение за счёт повышения соотношения сигнал-помеха. Использование биполярного кодирования позволило добиться пространственного разрешения в 0,1 м [113].

Исследователями Y. Meng и J. Zha из Шэньчжэньского университета (Китай), также работающими с бриллюэновскими оптоволоконными системами, предложен метод восстановления имиджей (кадров). Сущность метода состоит в применении адаптивного алгоритма к необработанным данным для увеличения соотношения сигнал/помеха. Это позволяет достигнуть пространственного разрешения в пределах от 1 до 1,41 м [103].

Приведённые выше разработки в первом приближении демонстрируют эффективность аппаратных и алгоритмических способов повышения пространственного разрешения. Достигнутые результаты вынуждают оставить тему изучения пространственного разрешения оптоволоконных измерительных систем. Однако практическая сторона геофизических исследований, связанная с необходимостью эксплуатации ОРДТ во вмещающих изделиях и нерентабельность обновления существующей и результативно применяемой аппаратуры, сохраняет к обсуждаемому вопросу разносторонний интерес.

1.5.3. Изучение постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры

Изученность вопроса постоянной времени ОРДТ обстоит схожим образом, что и с пространственным разрешением. Исследования большинства

специалистов направлены не на само изучение постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры, а на достижение максимального быстродействия в регистрации изменений температурного поля. Из общего числа исследователей выделяется два сообщества. Первое из них относится к производителям оптоволоконного оборудования, ознакомимся с их разработками.

Специалистами М. А. Бухариным, В. В. Горбуленко, О. Е. Нанием из группы компаний ООО «Т8» разработана измерительная станция на рэлеевском рассеянии и проведены сравнительные исследования на предмет быстродействия регистрации изменений температурного поля (рис. 20). Эквивалентность в значениях постоянных времени у оптоволоконных распределённых датчиков (DTS – distributed temperature sensor) и электронных термопар выступает добротным результатом [5].

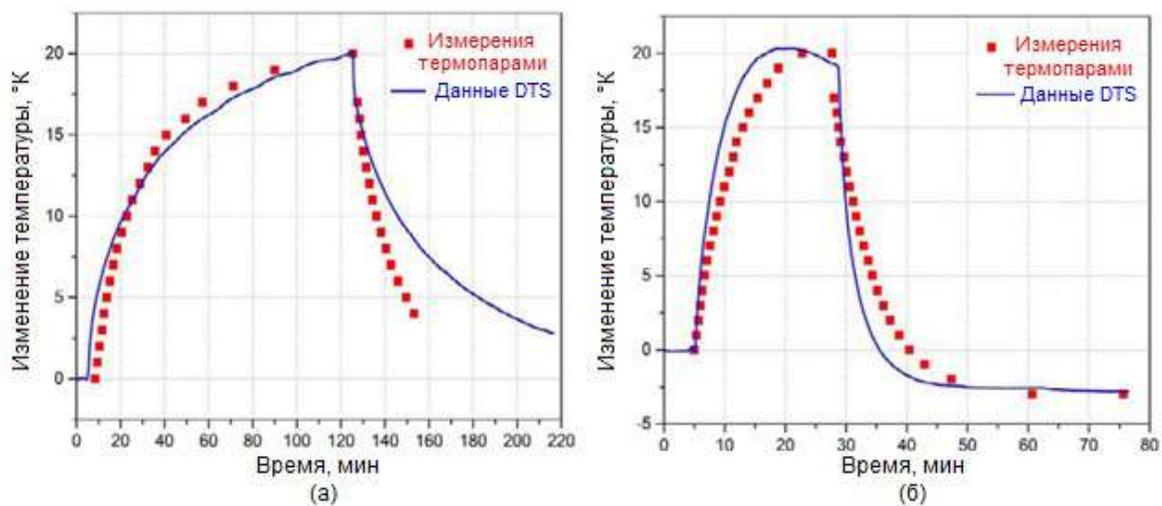


Рисунок 20 – Примеры сравнения измерений температурного поля по оптоволокну и по электронным термопарам во временном масштабе

Специалистами Университета Кентербери F. Farahi, D. C. Jones и D. A. Jackson создан высокоскоростной датчик температуры на основе интерферометра Фабри-Перо. Быстродействие оптоволоконного датчика температуры достигнуто за счёт применения ячейки Брэгга переменной частоты при фокусировке оптического сигнала на сердцевине волокна. Однако данное решение трудно реализуемо для скважинных исследований [101].

Результаты исследований другого сообщества специалистов обладают наибольшей практической пользой, чем предыдущих. В изучении постоянной времени нагрева кабельных изделий заметно отметились специалисты электромонтажной отрасли. Предметом их исследований является моделирование температурных полей в кабельных изделиях различной конструкции.

Специалистами Южно-Российского государственного политехнического университета (имени М. И. Платова) А. С. Засыпкиным мл, В. Ф. Ермаковым и А. Д. Тетериным проведены исследования постоянной времени нагрева и охлаждения проводов воздушных линий. В ходе исследований выполнен анализ нескольких методик расчёта постоянной времени и произведено сравнение расчётных значений с данными эксперимента (рис. 21), выполненного при помощи специально созданной установки, способной моделировать регулируемые условия воздействия воздушной среды на провода [22, 23].

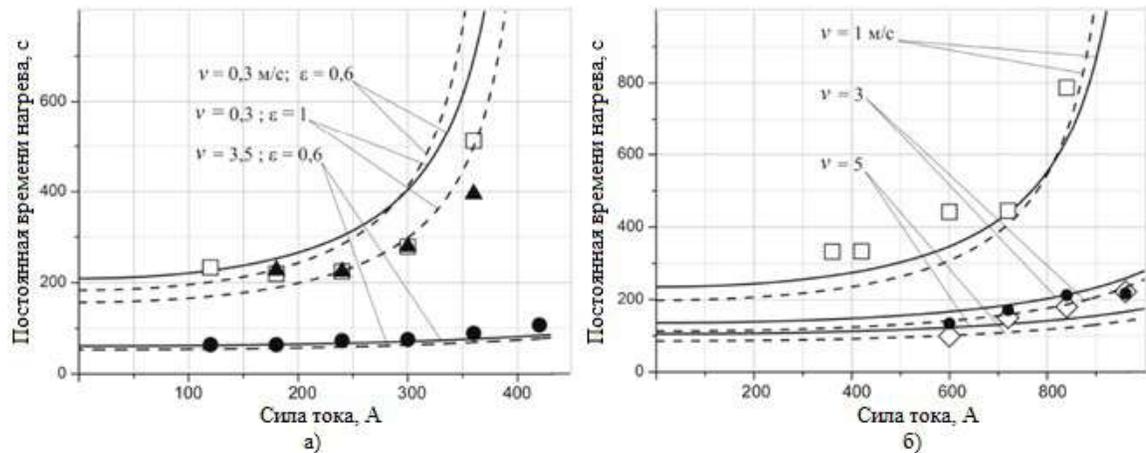


Рисунок 21 – Экспериментальные и расчётные данные для проводов АС 35/6 (а) и АС 95/16 (б): сплошные линии – расчётные кривые по упрощённой методике, пунктирные линии – расчётные кривые по уточнённой методике,

фигуры \square \blacktriangle \bullet \square \bullet \diamond – экспериментальные значения

Группой специалистов Оренбургского государственного университета под руководством В. Б. Шлейникова в числе Л. Р. Хакимовой, А. С. Скоробогатых, Я. С. Путиным и др. расширенно изучен вопрос нагрева кабелей и их элементов. Ярким производственным результатом является

создание программного обеспечения «Определение тепловых характеристик одножильных ВВГ кабелей V 2.0» (рис. 22). Изучение постоянных времени нагрева/охлаждения касается лишь электрических проводников [92, 93, 94].

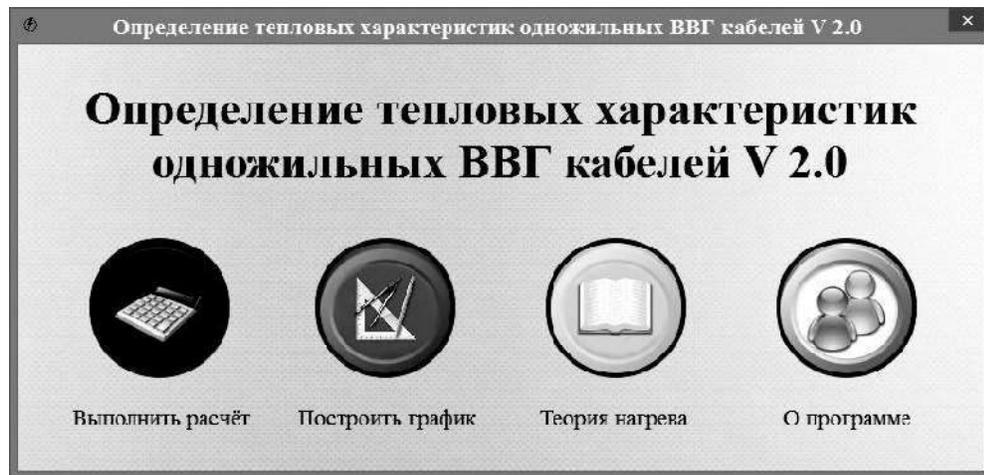


Рисунок 22 – Титульное окно программы «Определение тепловых характеристик одножильных ВВГ кабелей V 2.0»

В исследовательской работе представителя организации ООО "РосЭнергоМонтаж" М. Д. Дмитриева также задействована постоянная времени, как опорная величина. Она необходима для осуществления расчётов при прогнозировании критических ситуаций в электрических сетях. Сущность работы состоит в изучении теплового поля в кабельных линиях мощностью 6 – 500 кВ при возникновении короткого замыкания [20].

Приведённые выше разработки, относящиеся как к производителям, так и к пользователям оптоволоконной аппаратуры отражают интересы и возможности обеих категорий групп исследователей. Производители рассматривают пространственное разрешение и постоянную времени как легко регулируемые параметры регистрации и стремятся достичь их максимальной оптимизации, не учитывая зачастую условия эксплуатации кабелей в скважинах. Пользователи, к числу которых относятся исследователи-геофизики, вынуждены в скважинных исследованиях опираться на имеющееся в распоряжении оборудование, не слишком инновационное, но обладающее приемлемыми техническими характеристиками, наиболее зависимыми от моделей используемых геофизических кабелей. Последнее отчётливо

подмечено электромонтажными специалистами, сосредоточенными на численном учёте теплофизических характеристик кабельных материалов. Сосредоточение исследования в данном направлении должно обеспечить достижение наиболее достоверного результата в части диссертационной работы, выделенной на изучение показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры.

Выводы

1. Автору работы целесообразно исходить из теплофизических параметров кабельных материалов, так как постоянными техническими характеристиками обладают оптические волокна и измерительные станции, а кабельное изделие выступает качественно переменным элементом.

2. Для практического изучения показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры необходимо задействовать набор активно эксплуатируемых моделей оптоволоконных геофизических кабелей с максимально отличными друг от друга конструкциями, а соответственно дифференцированными по чувствительности.

3. Дополнительное внимание необходимо уделить методикам, используемым производителями оптоволоконного оборудования для определения показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры и при необходимости подвергнуть их критике с предложением собственных решений по конкретным моментам.

1.6. Разработки в области лабораторных установок, моделирующих скважинные условия

Производственная сторона любых методов скважинных геофизических исследований, в особенности, основанных на использовании оптоволоконных распределённых датчиков температуры, подразумевает неоднозначность в решении обратной задачи, при использовании общей физической теории, реализованной в виде многофункционального программного обеспечения. Это вызывает необходимость проведения лабораторных испытаний, причём достоверность моделирования скважинной среды в лабораторных условиях

полностью зависит от качества используемых лабораторных установок и определяется набором их функциональных возможностей. Необходимость проведения комплексного моделирования условий реальных скважинных сред, изучаемых посредством оптоволоконных датчиков и улучшения разнообразных методик исследования вызвали необходимость у автора в качестве **третьего защищаемого положения** сконструировать установку-имитатор скважины собственного образца. Для этого необходимо проанализировать существующие лабораторные стенды (установки), созданные для моделирования основных физических характеристик скважинной среды, пригодные для работы с оптоволоконными распределёнными датчиками температуры.

1.6.1. Мобильные лабораторные установки

Для изучения скважинных стационарных и квазистационарных температурных полей достаточно применения лабораторных установок типа термованн, в данной разновидности они называются жидкостными термостатами. Конструктивно они состоят из рабочего объёма (ванны), электронного регулятора температуры, эталонного датчика температуры и перемешивающего устройства. Минимальное значение шага регулирования температуры определяется техническими характеристиками электронного регулятора и эталонного термометра. Подобные стенды производятся многими предприятиями, к числу которых относится ООО «Теплоприбор-Сенсор», ООО «Электронприбор», ООО «НПО Промавтоматика» и другие (рис. 23) [53, 127, 133, 142].



Рисунок 23 – Жидкостные термостаты: слева – лабораторный термостат Т-2, справа – полевой мобильный калибровочный стенд

Такие стенды предназначены для решения простейших метрологических задач термометрии. Моделирование же сложных явлений в температурном поле возможно только при задействовании лабораторных установок классом выше, способных воспроизводить быстропротекающие события и сложный теплообмен, происходящий в интервалах притока или приёмистости.

1.6.2. Стационарные лабораторные установки

Стационарные стенды в отличие от мобильных стендов обладают большим количеством функциональных возможностей. Первой возможностью является геометрическое и конструкционное подобие реальной скважине (обсадной колонне), соответствие стволу скважины по форме, габаритам и конструкционным материалам создаёт прочную основу для приближения к физической сущности процессов, происходящих в изучаемом температурном поле.

Второй функциональной возможностью является генерация регулируемых потоков флюидов по расходу (скорости потока) и составу. Данная опция способствует воспроизведению динамики скважинной среды, что позволяет приблизиться к достоверному изучению некоторых быстропротекающих процессов. Возможность задания исследователем статических (состава) и динамических (расхода) свойств скважинной жидкости выступает механизмом, способствующим достижению предельно близкого по параметрам теплообмена между оптоволоконным распределённым датчиком температуры и скважинной средой.

Третьей функциональной возможностью является регулируемость траектории ствола скважины, что крайне важно учитывать особенно в условиях горизонтального ствола, когда траектория скважины оказывает повышенную неоднозначность в поведении температурного поля [2, 8, 10, 97]. Из наиболее известных стендов, сочетающих в себе большинство описанных выше функциональных возможностей и подходящих для работы с оптоволоконными распределёнными датчиками температуры, автор считает необходимым изучить и проанализировать инструментарий следующих аналогов.

1. Стендовая скважина

Данный стенд предназначен для моделирования аварийных ситуаций, связанных с проявлением открытых фонтанов, для отработки приёмов их ликвидации с применением разнообразных видов оборудования. Стенд изначально не является метрологическим, но при задействовании дополнительных датчиков может использоваться для моделирования температурных полей. Разработкой данной установки занимались Н. И. Кошторев, Р. Н. Самар и А. Н. Архипов в предприятии ООО «Газобезопасность». Установка условно состоит трёх основных частей: 1) скважины, представленной обсадной колонной с каналами в призабойной зоне, имитирующими пласт-коллектор, 2) платформы, снабжённой подъёмными механизмами, и 3) циркуляционной системы с линиями подачи и слива жидкости (рис. 24).

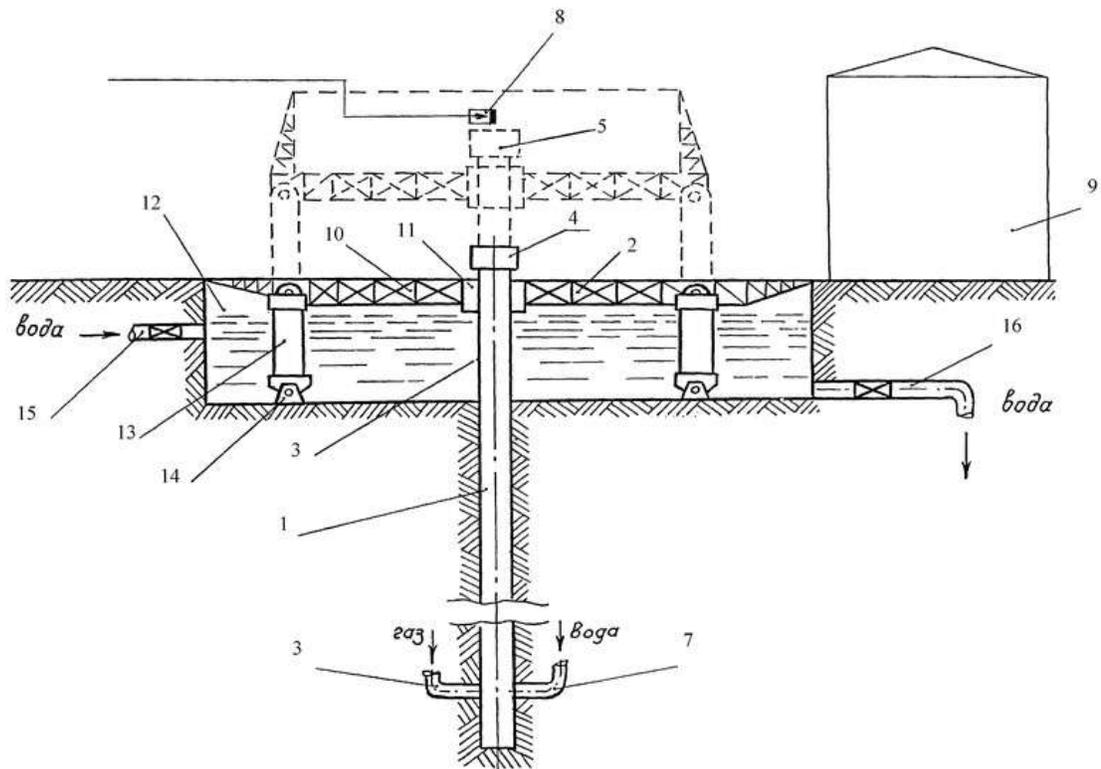


Рисунок 24 – Схема стендовой скважины: 1 – скважина; 2 – основание; 3 – обсадная колонна; 4 – устьевая головка; 5 – устьевой элемент (колонный фланец, муфта и т.д.); 6 – трубопровод подачи газа; 7 – трубопровод подачи воды; 8 – электрозапальник (имитатор пожара); 9 – запасной резервуар; 10 –

металлическая платформа; 11 – устьевой захват; 12 – приустьевой котлован; 13 – подъёмники-манипуляторы гидравлические; 14 – шарнирные опоры; 15 – линия налива воды; 16 - линия слива воды

Несомненными преимуществами установки является её масштабность воспроизведения реальных процессов и возможность проведения испытаний на разных режимах эксплуатации и исследования скважины. Можно установить работу скважины как в добывающем, так и в нагнетательном в режиме. Благодаря наличию устьевой головки существует возможность смоделировать проведение исследований не только на репрессии, но и на депрессии.

Недостатком установки является повышенная ресурсозатратность, как следствие её масштабности. Большой объём жидкости требует использования мощных насосов и нагревательных систем, что сказывается на энергопотреблении, кроме того скважинная часть является строго вертикальной и фиксированной, поэтому исключается возможность задания траектории ствола [114].

2. Многофункциональный стендовый комплекс по исследованию инновационного оборудования для добычи нефти и повышения нефтеотдачи пластов с применением установок погружных насосов

Данная разработка представляет собой в натуральную величину один из самых массивных стендов не только в России, но и в мире. Связано это с тем, что в комплексе представлено в отдельности шесть стендов: Термо, ГЖС (газожидкостной смеси), ОРЭ (одновременно-раздельной эксплуатации), Соль, АСПО (асфальто-смолисто-парафиновых отложений) и ВСВ (вибросейсмическое воздействие). Комплекс является совместной разработкой специалистов ООО «Новомет-Пермь» и РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина под руководством Е. А. Малявко, реализованной при поддержке Министерства образования и науки РФ. Созданный комплекс предназначен для тестирования глубинно-насосного оборудования (ГНО) на стойкость к агрессивным скважинным условиям, осложняющим его эксплуатацию, повышенного газосодержания, предельных температур, высоковязких жидкостей. В связи с

тем, что оптоволоконные кабели эксплуатируются в скважинах совместно с ГНО в течение длительного срока, каждый из стендов представляет интерес для моделирования ряда ситуаций и их отражения в температурном и иных геофизических полях. Большинство установок комплекса (рис. 25) состоит из трёх частей: 1) скважины глубиной 60 м со сменной рабочей колонной, 2) ёмкостных блоков, заполненных химическими реагентами и флюидами, и 3) циркуляционной системы, представленной линиями, насосами и нагревателями (либо охладителями).

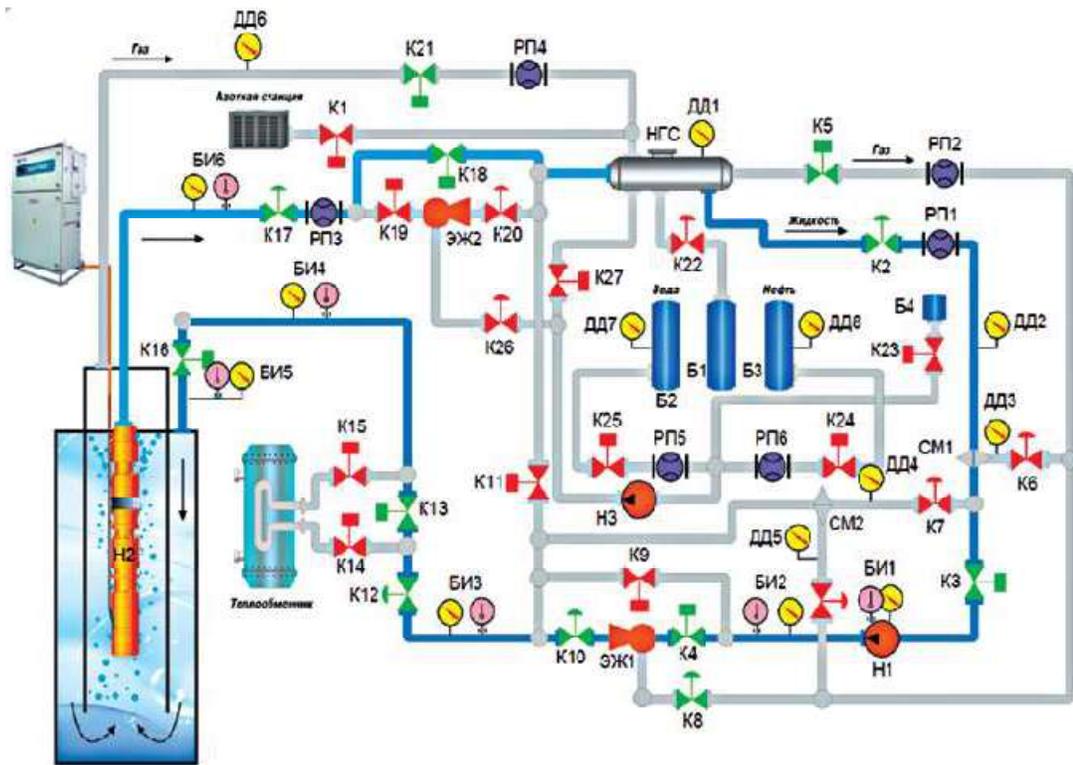


Рисунок 25 – Схема «Стенда ГЖС»

Расшифровка обозначений: НГС – нефтегазовый сепаратор; Б1, Б2, Б3, Б4 – баки с жидкостью; Н1, Н2, Н3 – насосы; ЭЖ1, ЭЖ2 – эжекторы; СМ1, СМ2 – смесители; РП1, РП3, РП5, РП6 – расходомеры жидкости; РП2, РП4 – расходомеры газа; БИ1, БИ2, БИ3, БИ4, БИ5, БИ6 – блоки измерительные (датчик давления и датчик температуры); ДД1, ДД2, ДД3, ДД4, ДД5, ДД6, ДД7, ДД8 – датчики давления; К1, К2, К3, К4, К5, К6, К7, К8, К9, К10, К11, К12, К13, К14, К15, К16, К18, К19, К20, К21 – краны; К17 – регулирующий клапан высокого давления

Преимуществом данной разработки является более широкий, в сравнении с предыдущей разработкой, диапазон моделирования ситуаций в геологическом разрезе. Также циркуляционная система обеспечивает возможность задания различных режимов эксплуатации и исследования скважины (добыча и нагнетание).

Недостатки установок комплекса состоят в узкопрофильности. По мнению автора, создателям стоило проявить комплексный подход, зацикленный на одной скважине, либо паре скважин. При экономии количества используемых скважин возникает лишь вопрос разветвления наземного оборудования, занимающего отдельные помещения. Другой недостаток состоит в неподвижности скважинной части, что не позволяет осуществлять моделирование работы подземного оборудования в скважинах с большими значениями зенитных углов, т. е. изучать влияние траектории ствола. Следует также отметить повышенную ресурсозатратность для осуществления моделирования [46, 122].

3. Гидродинамический стенд для моделирования работы горизонтальных нефтегазовых скважин

Данный стенд создан Башкирским государственным университетом конкретно для решения геофизических задач при активном участии специалистов Р. А. Валиуллина, Р. К. Яруллина, А. Р. Яруллина и др. Стенд (рис. 26) представляет собой также комбинацию трёх условных частей. Скважина представляет собой комбинацию трубных секций из прозрачного материала, установленных на домкратах. Ёмкости с тремя типами скважинных флюидов (водой, углеводородной жидкостью и газом) сообщаются со скважиной посредством циркуляционной системы, использующей для работы насосы, компрессоры и проточные нагреватели.

Преимуществами данной разработки является возможность задания необходимой траектории ствола скважины посредством использования домкратов и вспомогательных подъёмных механизмов. Также существует

возможность зрительно наблюдать процессы, происходящие в скважине, как многофазное течение и работу геофизических датчиков.

Недостатком данного стенда можно обозначить лишь несоответствие материала стенок скважины используемым на производстве сталям, что не позволяет дополнительно учесть вклад стенок скважины в процесс теплообмена [10, 13, 17, 18, 95, 123].

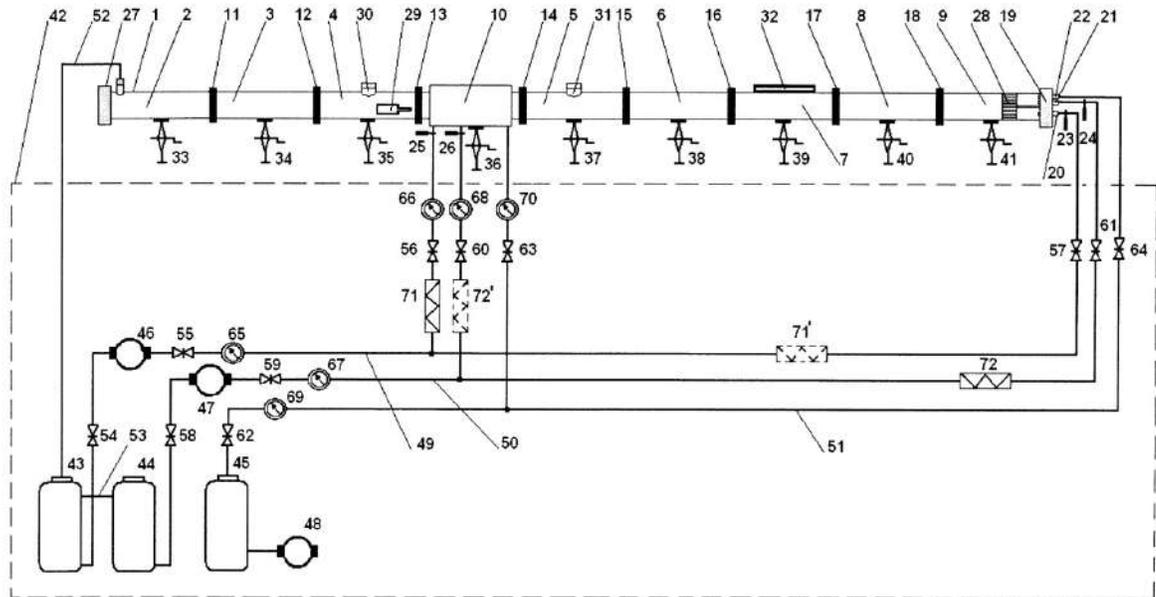


Рисунок 26 – Схема гидродинамического стенда:

1 – горизонтальная труба; 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 – последовательно соединённые секции труб; 10 – модуль интервала перфораций; 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 – соединительные муфты; 19 – съёмная крышка-заглушка на входе; 20, 21, 22 – вводы для подачи воды, углеводородной жидкости и газа; 23, 24, 25, 26 – датчики температуры; 27 – съёмная крышка-заглушка на выходе; 28 – линеризатор жидкости; 29 – видеорегистратор; 30, 31 – горловины; 32 – уровнемер; 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41 – домкраты; 42 – система подачи и регулирования расхода флюидов; 43, 44, 45 – ёмкости с водой, углеводородной жидкостью и газом; 46, 47 – насосы; 48 – компрессор; 49, 50, 51 – трубопроводы воды, углеводородной жидкости и газа; 52, 53 – выходные трубопроводы; 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64 – запорно-регулирующие

устройства; 65, 66, 67, 68 – расходомеры жидкостные; 69, 70 – счётчики газа;
71, 72 – проточные нагреватели

Из представленных выше стендов большинство отличается повышенной ресурсозатратностью по расходам на скважинную жидкость и на энергопотребление рабочих механизмов, в связи их размерами. Удалённость друг от друга рабочих механизмов рассмотренных лабораторных установок также требует привлечение дополнительного персонала при проведении испытаний. При этом ни один из представленных стендов не обладает полным набором вышеописанных функциональных возможностей: конструкционное соответствие реальной скважине, регулируемость расхода и состава скважинной жидкости, регулируемость траектории ствола скважины. Конструируемая автором установка должна выступить не только техническим средством, позволяющим работать с оптоволоконными распределёнными датчиками температуры, но устраняющим недостатки, выявленные у представленных аналогов.

Выводы

1. Для успешного совмещения полного набора функциональных возможностей в одной лабораторной установке целесообразно создать её с относительно меньшими габаритами, чем представленные стационарные стенды.

2. Желательно, чтобы габариты конструируемой установки позволяли полноценно работать с ней малому количеству персонала, что повышает объективность контроля её эксплуатации.

3. Размеры части установки, представляющей собой скважинное пространство, должны закладываться исходя из реальных показателей детализации поля у оптоволоконных распределённых датчиков температуры.

Глава II. СИСТЕМА ОПТОВОЛОКОННОЙ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СКВАЖИННОЙ ТЕРМОКОНДУКТИВНОЙ ДЕБИТОМЕТРИИ

Базовая сторона данного защищаемого положения состоит в создании собственного варианта системы оптоволоконной распределённой скважинной термодебитометрии, обеспечивающей возможность совместного проведения геофизических исследований и работ в скважинах стандартными электронными приборами и оптоволоконными датчиками с нагревом и без него. Сопутствующая сторона защищаемого положения представляет собой разработку новой методики исследований, способной вывести метод оптоволоконной распределённой скважинной термоконтдуктивной дебитометрии (ОР-СТД) на количественный уровень информативности. Достижимость обеих поставленных задач определяется пониманием видимости процесса тепломассопереноса в скважине оптоволоконными распределёнными датчиками температуры и техническим инструментарием геофизического кабеля [34, 63, 84].

2.1. Оптоволоконный геофизический кабель с нагревательным элементом

Реализация метода скважинной термодебитометрии в оптоволоконном распределённом виде не вызывает затруднений. В геофизическом кабеле необходимо присутствие измерительного элемента, в данном случае оптического волокна, и нагревательного элемента, роль которого может выполнить определённая металлическая линия, находящаяся в составе конструкции кабеля. В конструкциях геофизических кабелей предусматривается достаточно вариантов проводников, при помощи которых можно выработать тепловую энергию.

Известно, что при создании геофизических кабелей используются материалы, выполняющие роль проводного электрического канала передачи данных, удельные электрические сопротивления (УЭС) которых крайне малы: медь $0,017 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, алюминий $0,028 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, канатная сталь $0,12 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$. Эти материалы отлично подходят для работ с применением повышенных токов,

поэтому добиться оперативного перегрева таких проводников с применением стандартных источников питания (220 – 600 В) невозможно. Для достижения данной цели необходимо задействовать трансформаторы повышенного напряжения, что подразумевает необходимость привлечения персонала с повышенными уровнями допуска и дополнительные расходы на специальное оборудование и электричество.

Для приближённого представления о диапазонах значений токов, необходимых для создания перегрева упомянутых проводников, обратимся к исследованию специалистов Пермского государственного политехнического университета касательно анализа эффективности греющих кабелей. В данном исследовании производились расчёты для трёх конструкций кабелей, предназначенных для борьбы с парафиновыми отложениями в скважинах. Сечения проводящих элементов подбирались специально для оптимизации процесса выработки тепла. Но, безусловно, значения токов в 74, 126 и 101 А для каждой из моделей греющих кабелей являются избыточными величинами для выполнения задачи термодобитометрии. Проведение упрощённой аппроксимации для геофизических кабелей со стандартными конструкциями длиной около 1500 м ориентирует нас на необходимость использования питающего напряжения в пределах 1000 В и более [32].

По замыслу автора, процесс выработки тепловой энергии для эксплуатации разрабатываемой оптоволоконной системы термодобитометрии должен придерживаться пути минимизации затрат на электропитание, не приводящему к потере её работоспособности. В связи с этим, оптимальный путь создания функциональной системы состоит в соблюдении баланса между возможностями использования бытового напряжения (от 220 В до 600 В) и пространственного охвата нагревательной линией интервалов с изучаемыми пластами-коллекторами. Компромиссный вариант решения вопроса существует.

Помимо меди, алюминия и стали в кабельных конструкциях применяется ещё один металлический элемент, нержавеющая сталь. Ввиду повышенного

УЭС ($0,87 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$) данный элемент не используется в качестве канала передачи данных. В кабельные конструкции она закладывается в виде трубок, используемых в качестве вмещающего модуля для оптических волокон и капиллярного канала для передачи вязких сред в скважину и обратно [83, 125]. Введение данного элемента в цепь, например последовательным соединением с медной токопроводящей жилой, значительно повысит общее сопротивление всей линии. Сопротивление стандартной трубки из нержавеющей стали с площадью сечения 1 мм^2 составляет порядка 1000 Ом/км (с учётом примесей в проводнике). Поэтому длину проводника из нержавеющей стали необходимо ограничить до размеров зоны проложения работающих интервалов. В целом, кабельная жила может быть выполнена в виде неоднородного по длине комбинированного проводника, основу которого составит медь, переходящая в нержавеющую сталь и обратно в медь (рис. 27).

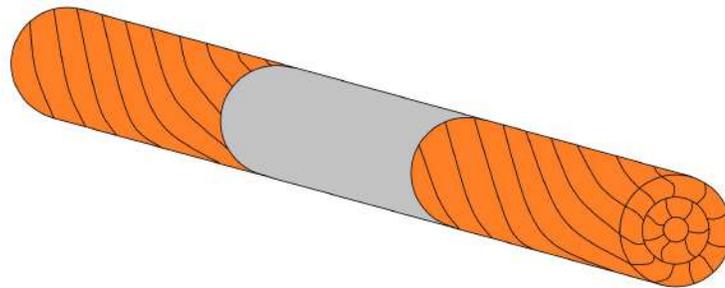


Рисунок 27 – Вид комбинированного проводника

Выбор сечений и длин медной и нержавеющей стальной частей комбинированной жилы должен исходить из задачи по минимизации электрических потерь, достаточных для эффективной работы нагревательного элемента и сохранения запаса по току в цепи. Единственным опорным источником информации для осуществления расчётов являются «Правила устройства электроустановок». Эксплуатация проводника с заданным сечением и видом изоляции требует знания значения нормированного для него тока, потому как это необходимо для управления процессом перегрева

$$\tau_i = t_{жи} - t_{срi}; \quad (2.1)$$

где i – условия эксплуатации; τ_i – перегрев проводника, °С; $t_{жи}$ – температура проводника, °С; $t_{срi}$ – температура окружающей среды, °С.

Известно, что при запитывании проводника электрическим током происходит накопление в его теле и последующее выделение тепловой энергии, иными словами, создаётся перегрев. Для каждого проводника с заданным сечением существует определённое значение силы тока, при неперевышении которого устанавливается нормированный перегрев жилы над окружающей средой. Ток при этом называется также нормированным. В случае, когда текущее значение тока превышает нормированное значение, перегрев увеличивается

$$I_{У.Н.}^2 \cdot \tau_{тек} = I_{тек}^2 \cdot \tau_{У.Н.}; \quad (2.2)$$

где $I_{У.Н.}$, $I_{тек}$ – нормированная и текущая силы тока, А; $\tau_{У.Н.}$, $\tau_{тек}$ – нормированный и текущий перегревы жилы, °С [42].

Для проведения расчётов конструкции комбинированного проводника автором определены значения нормированных токов для проводников из нержавеющей стали по формуле

$$I_{Н.С.} = \frac{\rho_M}{\rho_{Н.С.}} \cdot I_M; \quad (2.3)$$

где I_M , $I_{Н.С.}$ – нормированная сила тока для меди и нержавеющей стали соответственно, А; ρ_M , $\rho_{Н.С.}$ – удельные электрические сопротивления меди и нержавеющей стали соответственно, Ом·мм²/м.

Значения нормированных токов для проводников из меди и нержавеющей стали приведены в табл. 1

Таблица 1

Значения нормированных токов для проводников различных сечений

| Медь | | | | Нержавеющая сталь | | | |
|-----------------------------------|------|--------------------|------|----------------------------------|------|--------------------|------|
| УЭС = 0,017 Ом·мм ² /м | | | | УЭС = 0,87 Ом·мм ² /м | | | |
| S, мм ² | I, А | S, мм ² | I, А | S, мм ² | I, А | S, мм ² | I, А |
| 0,5 | 11 | 1,5 | 23 | 0,5 | 0,2 | 1,5 | 0,5 |
| 0,75 | 15 | 2,5 | 30 | 0,75 | 0,3 | 2,5 | 0,6 |
| 1 | 17 | 4 | 41 | 1 | 0,3 | 4 | 0,8 |
| 1,2 | 20 | 6 | 50 | 1,2 | 0,4 | 6 | 1 |

При проектировании габаритов составляющих частей комбинированной жилы необходимо осознавать, что в стволе расчётный перегрев частично устранится из-за охлаждающего действия скважинной жидкости. Более того, значение установленного нормированного перегрева будет зависеть от условий разреза, в котором эксплуатируется система. С повышением температуры окружающей среды значение нормированного перегрева уменьшается, поэтому эффективность действия системы в различных нефтедобывающих регионах, например в Пермском Прикамье (40 °С на забое) и в Западной Сибири (120 °С на забое), будет существенно различаться. Необходимо также, чтобы в питающей сети при подаче части напряжения оставался запас тока ($I_{зан}$) для дополнительного разогрева кабеля, определяемый по формуле

$$I_{max} = I_{у.н.нс} + I_{зан} = U / (R_{нс} + R_M); \quad (2.4)$$

где I_{max} – максимальная сила тока в цепи, А; $I_{у.н.нс}$ – нормированная сила тока для проводника из нержавеющей стали, А; $I_{зан}$ – номинальный запас по силе тока для дополнительного разогрева кабеля, А; U – напряжение питающей сети, В; $R_{нс}$ – сопротивление нержавеющей стали (нагревательного элемента), Ом; R_M – сопротивление меди, Ом.

При создании системы оптоволоконной распределённой термодобитометрии предусматривается возможность совместной работы стандартными электронными приборами и оптоволоконными датчиками с нагревом, поэтому необходимо предложить действенную схему подключений линий создаваемого кабеля. Самая базовая схема может быть реализована в случае использования трёхжильного геофизического кабеля с двумя отдельными цепями в его составе. Электрическая цепь № 1 из первой медной жилы и стальной брони будет использована для питания скважинных приборов. Дополнительная цепь № 2 из второй медной и третьей (комбинированной) жилы послужит основой для нагревательной линии, при этом замыкание цепи № 2 осуществляется предварительно в кабельном наконечнике (НКБ) (рис. 28).

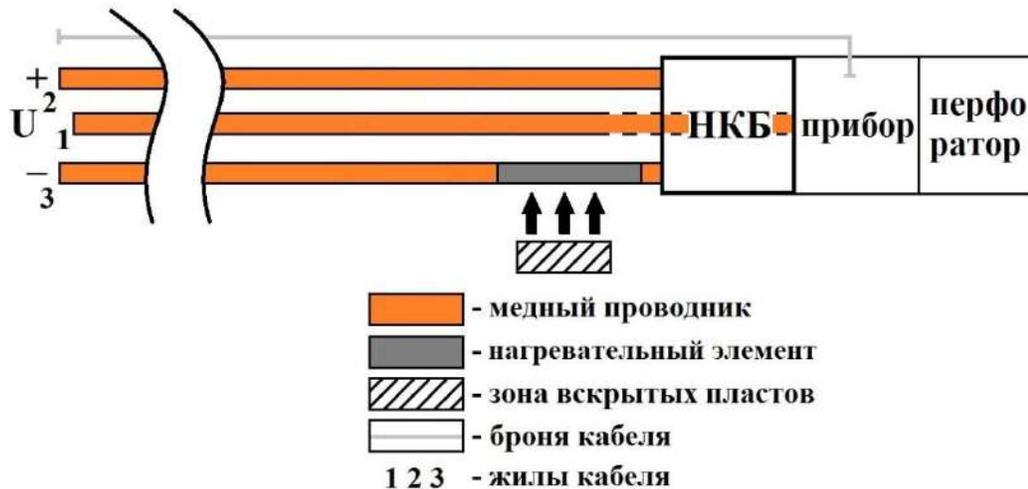


Рисунок 28 – Схема подключений для трёхжильного геофизического кабеля с одной комбинированной нагревательной жилой

Представленная схема подключений позволяет без смены геофизического подъёмника произвести прострелочно-взрывные работы в скважине и далее оставить в ней кабель для проведения долговременного мониторинга, как с глубинным оборудованием, так и без него. Технологическая схема постановки скважины на мониторинг изменениям подлежать не будет. Более того, создание кабеля с описанным набором функциональных возможностей освобождает от необходимости покупки или создания дополнительной измерительной аппаратуры. Блок-схема создаваемой системы оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии представлена на рис. 29

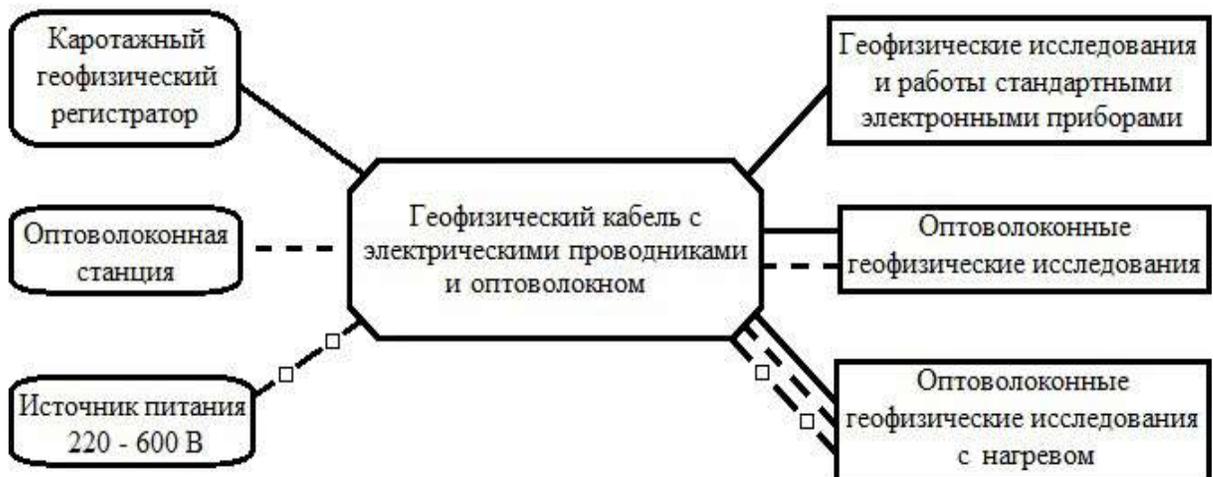


Рисунок 29 – Блок-схема создаваемой системы оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии

2.2. Новая методика проведения исследований методом оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии

В рамках создания системы оптоволоконной распределённой скважинной термокондуктивной дебитометрии автором предлагается новая методика «Исследование скорости остывания кабеля», обеспечивающая самостоятельное количественное определение общего и поинтервального дебитов, а также оперативность процесса каротажа и интерпретации данных. Для её понимания необходимо обратиться к основам метода термодобитометрии и тепломассопереноса в скважине.

Действие метода термодобитометрии основано на изучении поведения искусственного температурного поля в скважине, создаваемого специализированным модулем геофизического прибора. Точечные термокондуктивные дебитометры (расходомеры) работают по принципу термоанемометра. В поток скважинной жидкости или газа помещается элемент (спираль), нагреваемый током до температуры, превышающей температуру окружающей её среды. Данная спираль-нагреватель является одновременно датчиком расходомера. Набегающий поток флюида охлаждает спираль, изменяя её активное сопротивление. Температура датчика колеблется в зависимости от скорости движения охлаждающего потока флюидов, и её изменение можно представить формулой следующего вида

$$V_{nom} = K_1 \cdot K_2 \cdot (T_{CT} - T_{II})^{-a}; \quad (2.5)$$

где V_{nom} – скорость потока флюида, м/ч; K_1 – аппаратный коэффициент, зависящий от конструкции датчика, его размеров, потребляемой мощности; K_2 – коэффициент, зависящий от плотности, теплоёмкости, теплопроводности и вязкости среды; a – показатель, зависящий от теплофизических параметров потока [55].

Описанный процесс справедлив и для оптоволоконных распределённых термодобитометров. В сущности, процесс передачи тепла от нагревателя к потоку жидкости физически соответствует конвективному теплообмену. Поток (приёмник), контактируя, с более нагретой средой (источником) посредством

приёма тепловой энергии снижает её температуру на определённую величину. При этом интенсивность отдачи тепловой энергии зависит от таких параметров источника и приёмника как теплоёмкость, масса и скорость потока, что может быть описано уравнениями:

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (T_H - T_C); \quad (2.6)$$

$$Q = \sigma \cdot W \cdot C \cdot (T_H - T_C); \quad (2.7)$$

где Q – тепловой поток, Вт; α – коэффициент теплопередачи, Вт / (м²·°К); S – площадь поверхности, м²; T_H – температура нагревателя, °К; T_C – температура среды, °К; σ – плотность флюида, кг/м³; W – объёмный расход флюида, м³/с; C – удельная теплоёмкость флюида, Дж/(кг·°К) [6, 67].

Параметры, представленные в системе уравнений, относятся к двум составляющим, фигурирующим в процессе: к кабелю, содержащему в себе измерительный и нагревательный элементы, и к потоку жидкости. При этом теплофизические свойства кабеля известны, в то время как динамика потока неизвестна, а единственный параметр, через который мы можем зарегистрировать динамику процесса – температура геофизического кабеля, точнее её изменение во времени. В связи с этим, автор предлагает на основе описанной физической модели создать упрощённую в технологическом и интерпретационном плане методику исследований, осуществимую посредством лабораторной зависимости, разносторонним образом учитывающей теплообмен конкретным оптоволоконным кабелем.

Лабораторная зависимость для определения скорости потока (расхода) жидкости, как основа методики, получается заблаговременно перед проведением геофизических исследований посредством проведения испытаний в установках, моделирующих скважинную среду с достаточным количеством функциональных возможностей. Структура зависимости в образе формулы должна содержать две составляющие: постоянную, в виде эмпирических коэффициентов, выражающих собой численно восприятие процесса теплопередачи конкретным оптоволоконным кабелем, и переменную, в виде совокупности физических параметров, которые характеризуют условия

скважинной среды и соразмерно определяют итоговое значение функции. Последнее обусловлено тем, что переменная составляющая лабораторной зависимости комбинирует в себе две сопряжённые группы величин. Первая группа представлена одним непосредственно измеряемым параметром – интенсивностью изменения температуры кабеля по времени, т. е. скоростью остывания кабеля ($V_{ост}$). Данный показатель наиболее определённо коррелирует с динамикой потока жидкости в стволе скважины. Чем выше скорость потока (расход) флюида в стволе скважины, тем быстрее идёт процесс остывания кабеля. Однако его вклад в итоговый результат не строго однороден. Неоднородность определяется второй группой физических величин, описывающих локальные условия, в которых поток жидкости охлаждает нагретый оптоволоконный кабель (зенитный угол, фоновая температура жидкости и т. д.). Обобщённо описанную лабораторную зависимость можно представить в виде следующей формулы:

$$W = f(V_{ост}, T_L, Z, K_{CH}); \quad (2.8)$$

где W – объёмный расход жидкости, м³/сут; $V_{ост}$ – скорость остывания кабеля, °С/мин; T_L – локальная температура в интервале исследований, °С; Z – зенитный угол в интервале исследований, °; K_{CH} – коэффициент содержания нефтепродуктов в скважинной жидкости в интервале исследований, % [73, 102].

Предлагаемая методика «Исследование скорости остывания кабеля» представляет собой регистрацию процесса остывания кабеля в форме хронологически последовательных кривых на малом времени накопления. Изначально в действующей добывающей скважине оптоволоконный геофизический кабель позиционируется так, чтобы в видимости нагревательного и измерительного элемента находились работающие интервалы притока и зумпф. Затем кабель нагревается терморезистивным способом до приемлемой величины, напряжение отключается и производится запись термограмм на малом времени накопления, достаточном для фиксации динамики процесса остывания кабеля. На основе зарегистрированных данных рассчитывается кривая скорости остывания кабеля, которая в совокупности с

информацией о локальных условиях процесса его остывания, и посредством применения лабораторной зависимости используется для расчёта расхода (скорости потока) жидкости в стволе скважины (рис. 30).

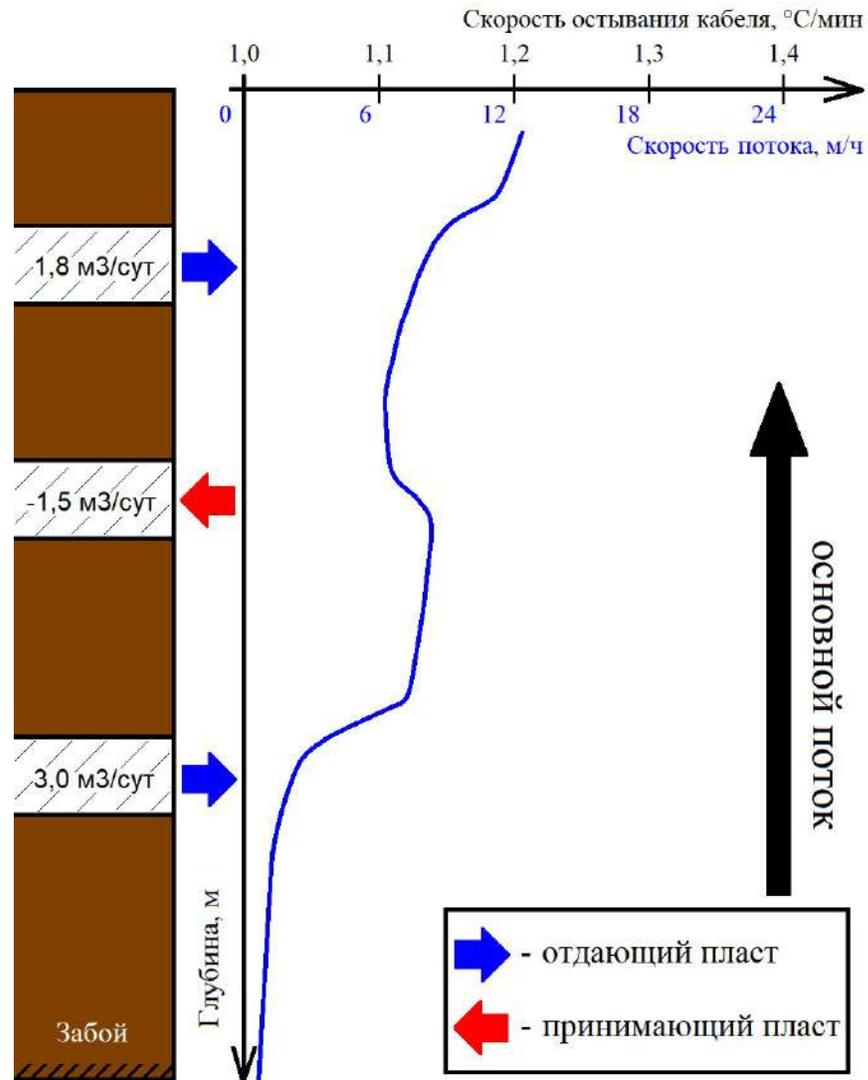


Рисунок 30 – Схема методики «Исследование скорости остывания кабеля»

Начало интерпретации данных зарегистрированного процесса остывания кабеля состоит в локализации зумпфа и работающих интервалов по глубине, по форме и по динамике зарегистрированного температурного поля. Опираясь, в первую очередь, стоит на глубину, так как аномалия смешивания локального и основного потоков обычно располагается выше, либо в области кровли интервала перфорации, а не напротив него. Затем в локализованных интервалах проводится анализ процесса остывания кабеля, в ходе которого по

последовательным термограммам определяется время остывания кабеля ($t_{ост}$). С учётом определённого времени остывания кабеля и известной величины перегрева рассчитывается скорость его остывания

$$V_{ост} = (T_{нач} - T_{кон}) / t_{ост}; \quad (2.9)$$

где $V_{ост}$ – скорость остывания кабеля, °С/мин; $T_{нач}$ – температура кабеля в нагретом состоянии, °С; $T_{кон}$ – температура кабеля в остывшем состоянии, °С; $t_{ост}$ – время остывания кабеля, мин.

После расчёта скорости остывания кабеля при помощи лабораторной зависимости (2.8), привязанной к кабелю конкретной конструкции, определяется расход (скорость потока) жидкости.

Отметим, что при использовании лабораторной зависимости крайне важно учитывать смещение нуля. Речь идёт о том, что реальные значения скоростей остывания кабеля в скважинах идентичных по конструкции, траектории и т. д. при отсутствии движения жидкости могут отличаться от значений, фигурирующих в лабораторной зависимости. При наличии данной разницы в зумпфе скважины, где отсутствует поток, на кривой расхода будет определяться либо приток, либо поглощение вместо неподвижности (рис. 31).

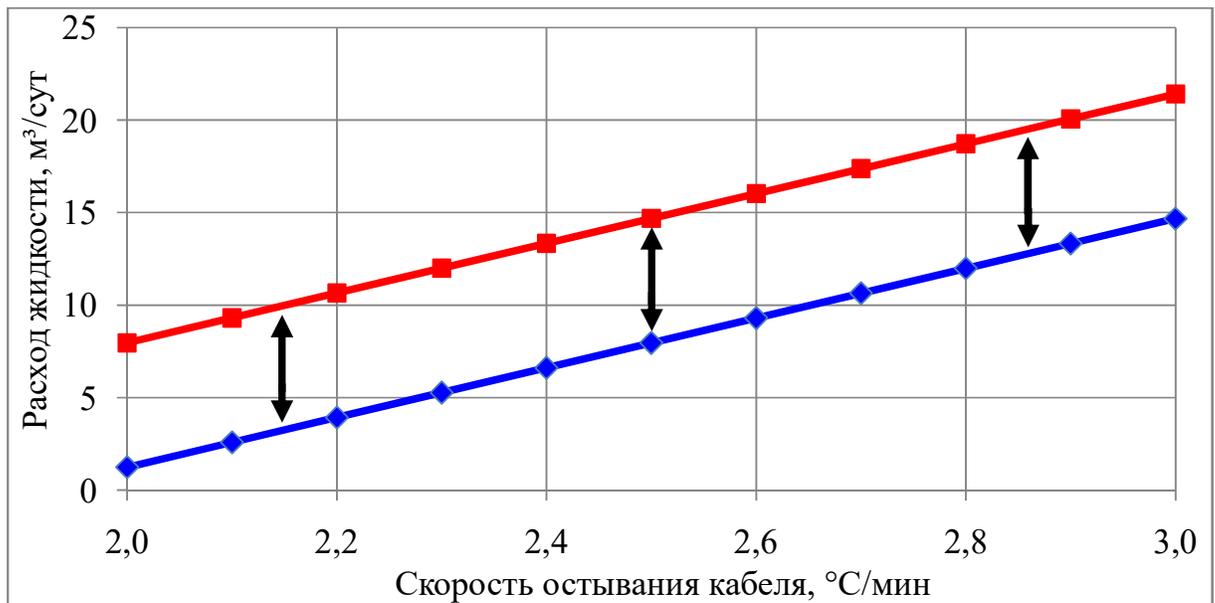


Рисунок 31 – Пример смещения нуля между фактической (красная кривая) и лабораторной (синяя кривая) зависимостями расхода жидкости от скорости остывания кабеля

Данное смещение необходимо учитывать при интерпретации в виде постоянной поправки. Поправка представляет собой отклонение (разность) по значению расхода (скорости потока) жидкости, определяемому по скорости остывания кабеля, в зумпфе скважины или в стволе при статическом режиме относительно нуля. Поправку с соответствующим знаком плюс или минус необходимо использовать при определении расхода (скорости потока) жидкости совместно с лабораторной зависимостью. Это устранит смещение нуля сразу по всей длине интервала исследований методом оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии (ОР-СТД).

2.3. Создание опытной модели оптоволоконного геофизического кабеля

Для создания авторского варианта системы оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии и разработки новой методики исследований необходимо создать сам геофизический кабель и определить его оптимальную конструкцию (в поперечном сечении). Для этого были проведены лабораторные испытания в узком формате с «сырыми» моделями оптоволоконного кабеля, обладающими диаметрально противоположными структурными особенностями. Задача испытаний состояла в выявлении модели кабеля, подтверждающей возможность локализации и дифференциации потоков жидкости по расходу.

Лабораторные испытания с «сырыми» моделями оптоволоконного геофизического кабеля

В эксперименте использовались: станция «Silixa Ultima», лабораторный автотрансформатор регулируемый (ЛАТР), лабораторная установка-имитатор скважины, циркуляционный насос и две «сырые» модели геофизического кабеля, состоящие из полиэтиленовой изоляции, трубки из нержавеющей стали сечением 1 мм² и из оптических волокон. Модель 1 – тонкий кабель с металлическим оптоволоконным модулем, внутри которого расположено оптоволокно; модель 2 – толстый кабель с полимерным оптоволоконным модулем, отдалённым от нагревателя дополнительной изоляцией (рис. 32).

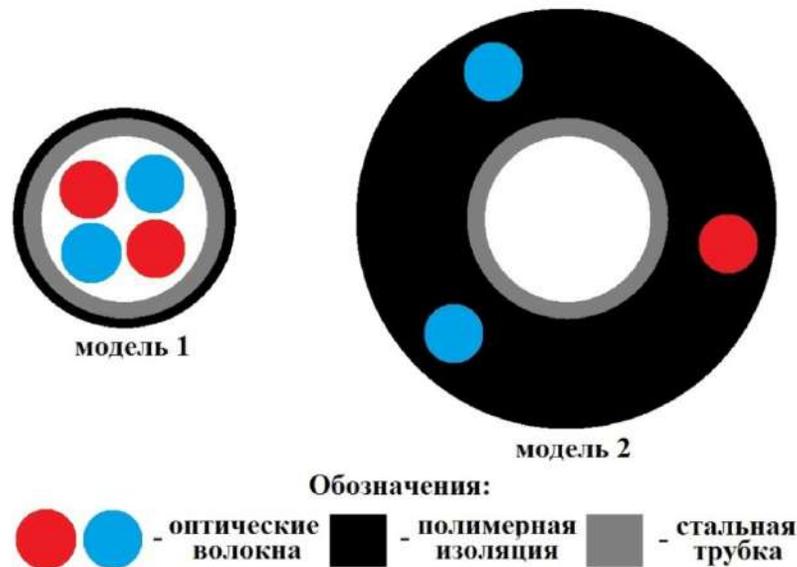


Рисунок 32 – Конструкции «сырых» моделей оптоволоконных геофизических кабелей

Лабораторная установка представляет собой трубу внешним диаметром 73 мм с двумя фланцами со сквозными герметизируемыми отверстиями для пропуска кабеля. В каждом из фланцев присутствуют циркуляционные клапаны (КП 1 и КП 2), моделирующие при совместной работе основной поток жидкости в скважине. В средней части установки присутствует третий клапан (КП 3), предназначенный для имитации локального потока и оснащённый датчиком расхода жидкости. Подача жидкости в установку осуществляется при помощи циркуляционного насоса через КП 1 и КП 3. Схема установки и процесс испытаний имеет следующий вид (рис. 33)

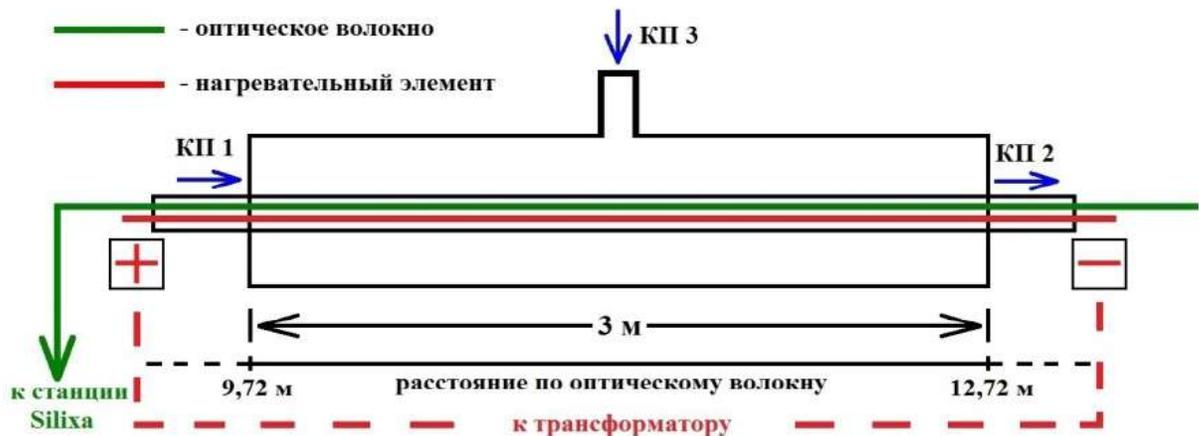


Рисунок 33 – Схема лабораторной установки

Модели кабелей предварительно помещались в установку, фланцы с отверстиями герметизировались, установка заполнялась жидкостью до предела. После заполнения установки клапан КП 1 переводился на минимальный режим притока, клапан оттока КП 2 открывался полностью для совместной имитации основного скважинного потока. Расход жидкости регулировался через клапан КП 3 в пределах от 0 до 0,51 м³/час. После задания фиксированного значения расхода кабель перегревался при помощи автотрансформатора ЛАТР выше температуры окружающей среды на 10 – 15 °С. По достижению необходимого перегрева напряжение мгновенно снималось, и производилась регистрация температуры кабеля по оптоволокну в динамике на времени накопления 30 секунд (рис. 34). По достижению исходной температуры испытания повторялись со следующим значением расхода жидкости на протяжении 4 серий измерений.

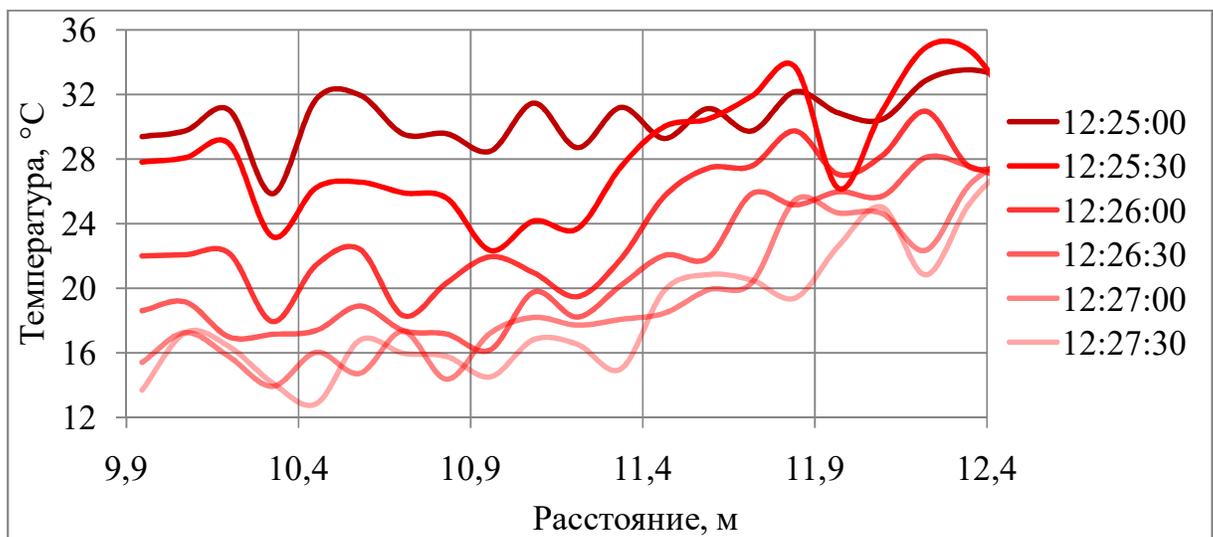


Рисунок 34 – Термограммы остывания «кабеля» при расходе 0,51 м³/час

Стоит отметить, что в модели 1 измерительная линия находилась в непосредственном контакте с нагревательной линией, покрытой полимерной изоляцией. Во время исследования, как при отсутствии расхода, так и при его наличии выявить разницу в скорости остывания кабеля не удалось. Вызвано это тем, что нержавеющая сталь, обладая повышенными показателями теплопередачи, при жидкостном охлаждении стремительно остывает, менее чем за 2 секунды. Задействование модели 2, которая отличается не только

пространственным разнесом между оптоволоконном и нагревателем, но и повышенным содержанием теплоизолирующих материалов, привело к получению положительного результата. По полученным термограммам при четырёх значениях расхода для модели 2 была определена скорость остывания кабеля и построена корреляционная зависимость (рис. 35), на основе которой сформированы выводы-рекомендации касательно конструкции создаваемого кабеля [73, 102].

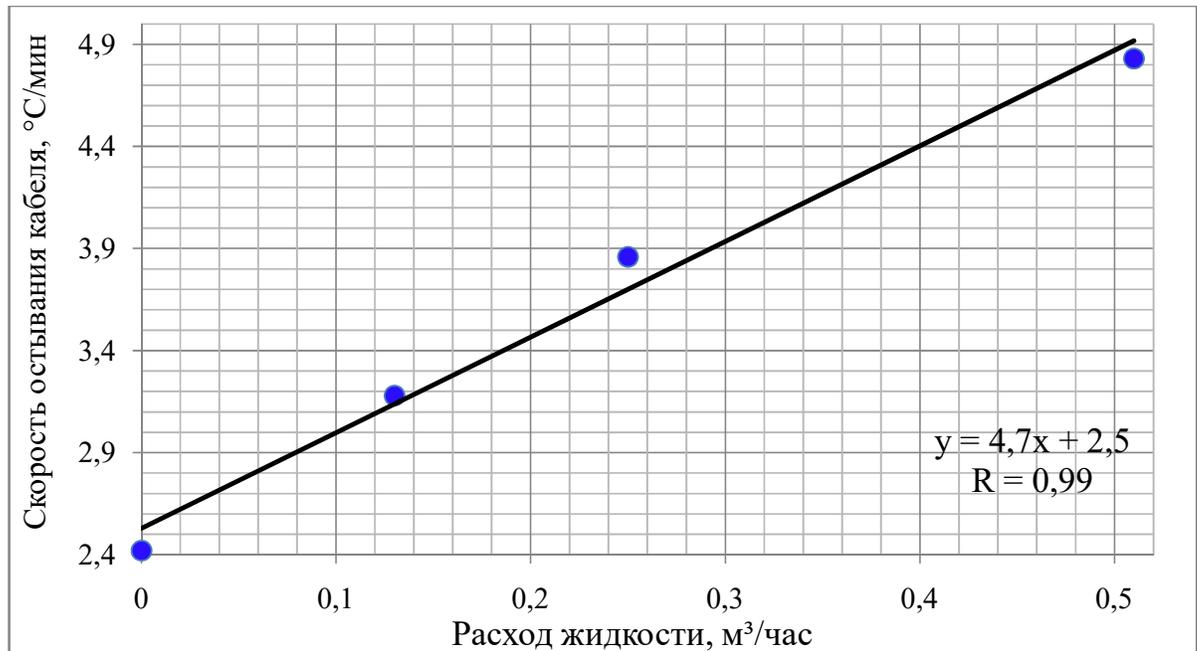


Рисунок 35 – Зависимость скорости остывания кабеля от расхода жидкости

Выводы по испытаниям

1. Конструкция создаваемого оптоволоконного геофизического кабеля должна обладать повышенным содержанием полимерных теплоизолирующих материалов, способных продолжительное время удерживать выработанную тепловую энергию и обеспечивать оптимальную детализацию процесса остывания по времени и амплитуде температуры.

2. В конструкции кабеля должен быть разнос между нагревательным элементом и оптоволоконным датчиком из полимерных материалов. Нагревательный элемент, являясь металлом, остывает очень быстро, и при непосредственном контакте с оптоволоконным датчиком будет фиксироваться

по температуре преимущественно его ускоренная потеря тепла, а не кабеля в целом [73, 102].

2.4. Лабораторные испытания с опытной моделью оптоволоконного геофизического кабеля

После получения положительных результатов с «сырой» моделью оптоволоконного геофизического кабеля и выработки рекомендаций относительно конструкции была создана опытная модель КГ4*4ОВ*3-60-200 (рис. 36). Опытный образец обладает повышенным содержанием теплоизолирующих слоёв, имеет в составе две измерительные линии: металлический модуль из нержавеющей стали, расположенный в центре, и полимерный модуль из полиизобутилена, расположенный в промежуточной части кабеля. Нагревательный элемент также располагается в промежуточной части кабеля, но на удалении от обоих оптоволоконных модулей и представляет собой жилу из двух проволок нержавеющей стали [76]

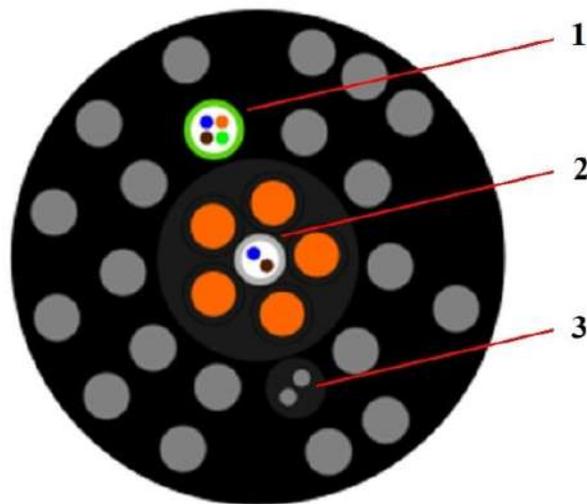


Рисунок 36 – Сечение опытной модели геофизического кабеля для оптоволоконной распределённой термодобитометрии: 1 – полимерный модуль; 2 – металлический модуль; 3 – нагревательный элемент

Данный образец был подвергнут испытаниям по аналогии с «сырой» моделью, однако в данном случае использовался уже более усложнённый вариант лабораторной установки-имитатора скважины (рис. 37), созданный на основе трубы обсадной колонны диаметром 168 мм.

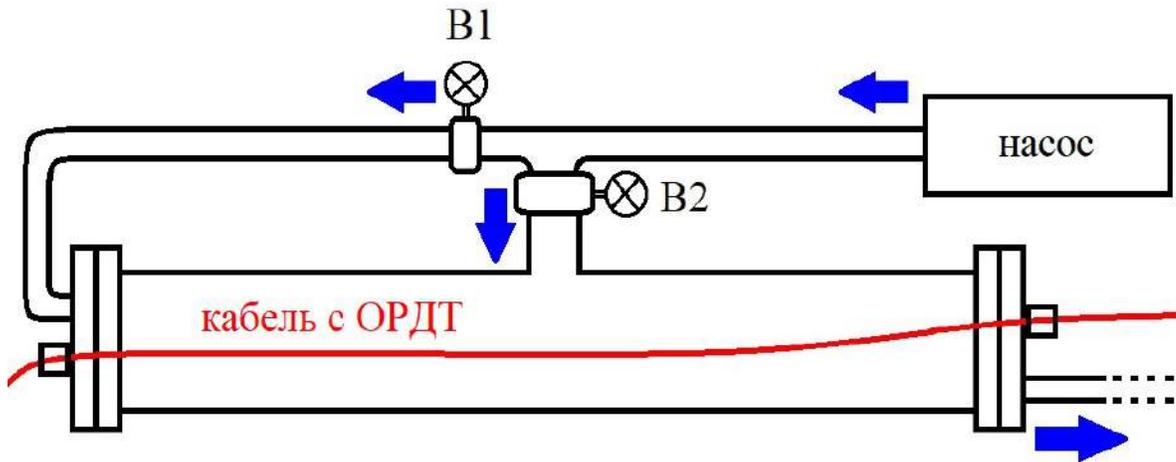


Рисунок 37 – Схема лабораторной установки-имитатора скважины на основе трубы обсадной колонны диаметром 168 мм

Усложнённый вариант лабораторной установки представляет собой трубу внешним диаметром 168 мм, расположенную в фиксированном горизонтальном положении, с одним циркуляционным отверстием посередине трубы и двумя фланцами, каждый из которых оснащён одним циркуляционным каналом.

Схема циркуляции жидкости построена так, что в установке присутствуют 2 приточных и 1 выходное отверстие, расположенное в одном из упомянутых фланцев. Подача жидкости в установку осуществляется при помощи циркуляционного насоса. Каждый из фланцев имеет отдельные технологические герметизируемые отверстия для пропуска геофизического кабеля. Регулировка расхода осуществляется при помощи вентилях (B1 и B2), моделирующих работу основного и локального потоков скважинной жидкости соответственно.

Лабораторные испытания проводились с использованием того же оборудования, только вместо «сырых» моделей использовалась опытная модель геофизического кабеля. Измерения температуры производились с использованием одновременно двух оптоволоконных модулей: из нержавеющей стали (НС) и полиизобутилена (ПБТ). Цель испытаний состояла в подтверждении работоспособности созданной опытной модели оптоволоконного геофизического кабеля, возможности с его помощью

локализовывать и дифференцировать потоки жидкости по расходу. Испытания выполнялись на одинаковых диапазонах значений расхода жидкости, но по двум отличным схемам, связанным с разными методиками исследований: формы кривой STD и скорости остывания кабеля. Тем самым демонстрировалась пригодность созданной модели кабеля для исследований как по уже существующей и широко применяемой методике исследований, так и по новой, разрабатываемой автором.

1. Схема испытаний для методики исследования формы кривой STD

Испытания проводились следующим образом, установка заполнялась жидкостью на водной основе. Вентиль В1 не использовался, а посредством вентиля В2 устанавливалось фиксированное значение расхода жидкости в диапазоне от 0,0 до 17,8 м³/сут. При установке первого значения расхода жидкости в 0,0 м³/сут производилась регистрация температуры по оптоволокну в установке без нагрева. Затем на кабель подавалось фиксированное напряжение порядка 75 В для его перегрева. По достижению максимального перегрева кабеля и одновременно при отсутствии динамики потока производилась повторная регистрация температуры. Далее определялась разница между средними температурами кабеля в установке в нагретом состоянии и без нагрева. Полученная разница демонстрирует величину перегрева при отсутствии потока, и она же эквивалентна амплитуде в 0 °С на разностной кривой, численно отражающей охлаждение кабеля.

Далее, без снятия напряжения с кабеля, устанавливалось следующее значение расхода в установке, и спустя время необходимое на установление температурного поля производилась регистрация следующей термограммы и определение разницы полученного значения перегрева с первым (в статическом состоянии). Процедура повторялась вплоть до достижения последнего значения расхода жидкости в установке, время накопления при регистрации термограмм составляло 5 минут. По окончании испытаний получено 10 разностей температур, являющихся амплитудами охлаждения кабеля, и связанных с конкретным значением расхода жидкости (табл. 2).

Амплитуды охлаждения опытной модели оптоволоконного геофизического кабеля при различных значениях расхода жидкости

| Расход жидкости, м ³ /сут | 0,0 | 1,4 | 3,3 | 5,7 | 8,2 | 10,9 | 12,3 | 15,0 | 16,6 | 17,8 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| Амплитуда охлаждения кабеля по модулю НС, °С | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,6 | 1,5 | 1,9 | 2,3 | 2,3 | 2,2 |
| Амплитуда охлаждения кабеля по модулю ПБТ, °С | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 1,4 | 1,2 |

По полученным данным построены корреляционные зависимости, отражающие прочную связь амплитуд охлаждения опытной модели оптоволоконного геофизического кабеля с расходами жидкости, заданными при эксперименте в установке (рис. 38).

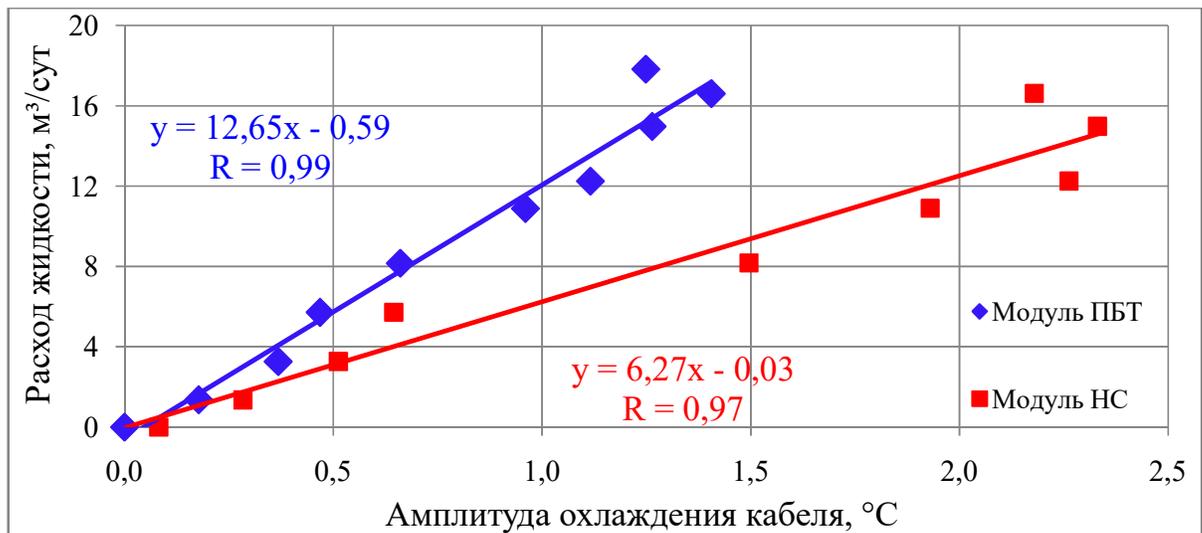


Рисунок 38 – Корреляционные зависимости между зарегистрированными амплитудами охлаждения кабеля и расходом жидкости

2. Схема испытаний для методики исследования скорости остывания кабеля

Испытания по созданной автором методике проводились с сохранением предыдущей схемы циркуляции жидкости в установке с единственным активным вентилем В2 и диапазоном расхода жидкости от 0,0 до 17,8 м³/сут. Исследования состояли в следующем, при установленном значении расхода жидкости кабель перегревался терморезистивным способом примерно на 10 °С. При достижении необходимого перегрева напряжение отключалось, и

производилась регистрация процесса остывания кабеля на времени накопления 20 секунд вплоть до его полного остывания. Далее устанавливалось следующее значение расхода жидкости, и процесс повторялся до достижения последнего значения расхода.

По полученным последовательным термограммам динамики процесса остывания кабеля были определены средние значения температуры в установке и вычислены скорости остывания кабеля при каждом расходе жидкости. Результаты лабораторного испытания отражены в таблице 3

Таблица 3

Скорости остывания опытной модели оптоволоконного геофизического кабеля при различных значениях расхода жидкости

| Расход жидкости, м ³ /сут | 17,8 | 16,6 | 15,0 | 12,3 | 10,9 | 8,2 | 5,7 | 3,3 | 1,4 | 0,0 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Скорость остывания кабеля по модулю НС, °С/мин | 2,10 | 1,74 | 1,74 | 1,57 | 1,49 | 1,51 | 1,54 | 1,42 | 1,07 | 0,98 |
| Скорость остывания кабеля по модулю ПБТ, °С/мин | 1,20 | 0,99 | 0,99 | 0,82 | 0,82 | 0,80 | 0,84 | 0,78 | 0,59 | 0,57 |

На основе лабораторных испытаний по каждому из оптоволоконных модулей построены корреляционные зависимости между расходом жидкости и скоростью остывания кабеля (рис. 39).

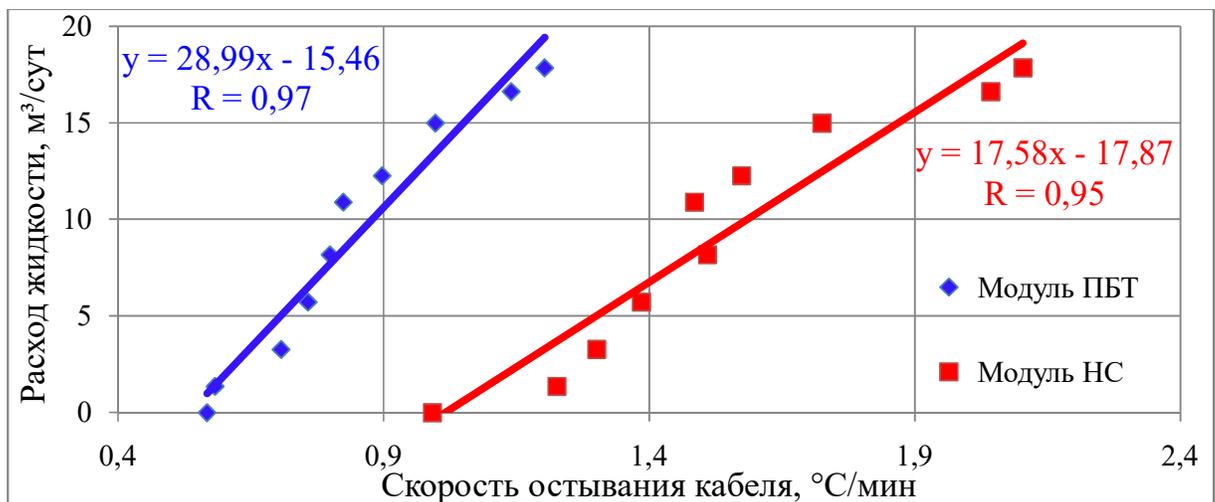


Рисунок 39 – Корреляционные зависимости между расходом жидкости и скоростью остывания геофизического кабеля

Данные уравнения имеют максимально упрощенный вид, в связи с тем, что для проведения лабораторных испытаний применялась установка,

обладающая минимальным количеством функциональных возможностей в плане моделирования скважинных условий.

Выводы по испытаниям

1. Положительные результаты лабораторных испытаний, проведённых по двум разным методикам исследований подтверждают работоспособность созданной опытной модели оптоволоконного геофизического кабеля.

2. Созданная автором методика «Исследование скорости остывания кабеля» пригодна для практического применения, но нуждается в дальнейшем совершенствовании с использованием установки, обладающей сравнительно большим количеством функциональных возможностей по моделированию скважинных условий.

Неопределённость в измерении динамических параметров скважинных потоков

Единственный параметр, по которому возможно рассчитать неопределённость созданной методики исследования – это температура, точнее её флуктуации. Флуктуации температурного поля, измеряемого оптоволоконным датчиком, могут быть вызваны двумя источниками. Первый это метрологическая погрешность непосредственно самого средства измерения $\pm 0,01$ °C при длине оптоволоконного кабеля не более 10 км [138]. Вторым источником является возрастающий уровень помех, вызванный увеличением длины ОРДТ и недостаточной машинной скоростью опроса по расстоянию применяемых оптоволоконных станций. Иными словами, причина состоит в недостаточном времени накопления данных по оптоволоконному кабелю для получения достаточно точной термограммы. Опросить однородные оптоволоконные датчики с протяжённостью, отличающейся на порядки, при фиксированном малом времени накопления с одинаковой погрешностью невозможно. Равнозначна и обратная ситуация, также невозможно достичь одинаковой погрешности измерения для одного оптоволоконного распределённого датчика температуры фиксированной длины при использовании разных времён накопления (рис. 40) [74].

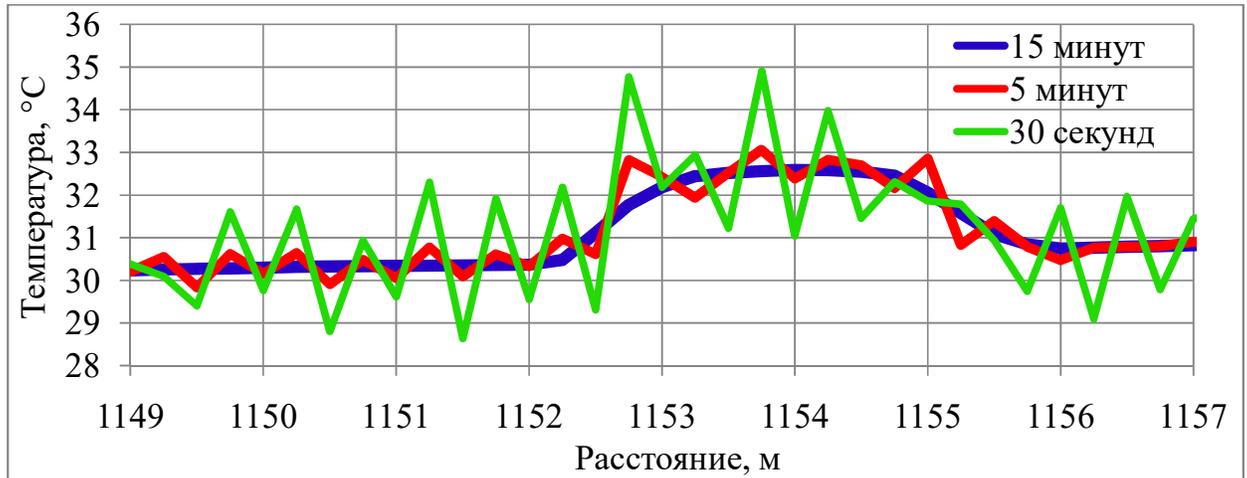


Рисунок 40 – Пример проявления флуктуаций температурного поля на больших длинах при использовании разных времён накопления

Обычно, для снижения уровня флуктуаций и подавления помех операторы увеличивают время накопления. Но применительно к методике «Исследования скорости остывания кабеля» в условиях регистрации быстропротекающих процессов увеличение времени накопления имеет предел. Конечно, кривую, зарегистрированную на малом времени накопления, в процессе интерпретации приводят в рабочий вид, но первичная неопределённость по факту сохраняется. Для получения конкретных величин необходимо обращаться к лабораторным зависимостям, полученным по каждому из оптоволоконных модулей опытной модели кабеля:

$$W (no HC) = 17,58 \cdot V_{ост} - 17,87; \quad (2.10)$$

$$W (no ПБТ) = 28,99 \cdot V_{ост} - 15,46; \quad (2.11)$$

где W – объёмный расход жидкости, м³/сут; $V_{ост}$ – скорость остывания кабеля, °C/мин.

Предварительно точность работы данных формул можно оценить путём определения эквивалентности, т. е. рассчитать насколько неопределённость в градусах Цельсия (единицах температуры) будет соответствовать единицам расхода жидкости. При использовании в полученных формулах разницы аргумента в 1 градус Цельсия получим следующее: эквивалентность составляет $\pm 17,58$ (м³/сут)/°C по модулю HC, а по модулю ПБТ равна $\pm 28,99$ (м³/сут)/°C. Теперь, когда определены опорные значения эквивалентностей флуктуаций

температуры в значениях расхода, для получения итоговой неопределённости необходимо исходить из фактических показателей флуктуации температуры используемых оптоволоконных распределённых датчиков температуры.

Конкретная опытная модель оптоволоконного кабеля использовалась для проведения геофизических исследований в скважине Б-1132, более подробно о данных исследованиях будет изложено в четвёртой главе работы. Общая длина оптоволоконного распределённого датчика температуры, подключенная к измерительной станции, составляла 2200 м. Для проведения исследований (по техническим причинам) использовался только металлический оптоволоконный модуль, предварительная регистрация температурного поля осуществлялась на больших (15 минут) и малых временах накопления (20 – 30 секунд) для оценки фактической детализации температурного поля. Так автором были произведены расчёты абсолютных отклонений температуры по 10 термограммам, полученным на малых временах накопления относительно одной эталонной термограммы, зарегистрированной на времени накопления 15 минут, с распределением по глубине. Затем полученные отклонения температуры были осреднены и использованы для построения корреляционной зависимости (рис. 41) уровня флуктуаций температурного поля от длины оптоволоконного распределённого датчика температуры (ОРДТ).

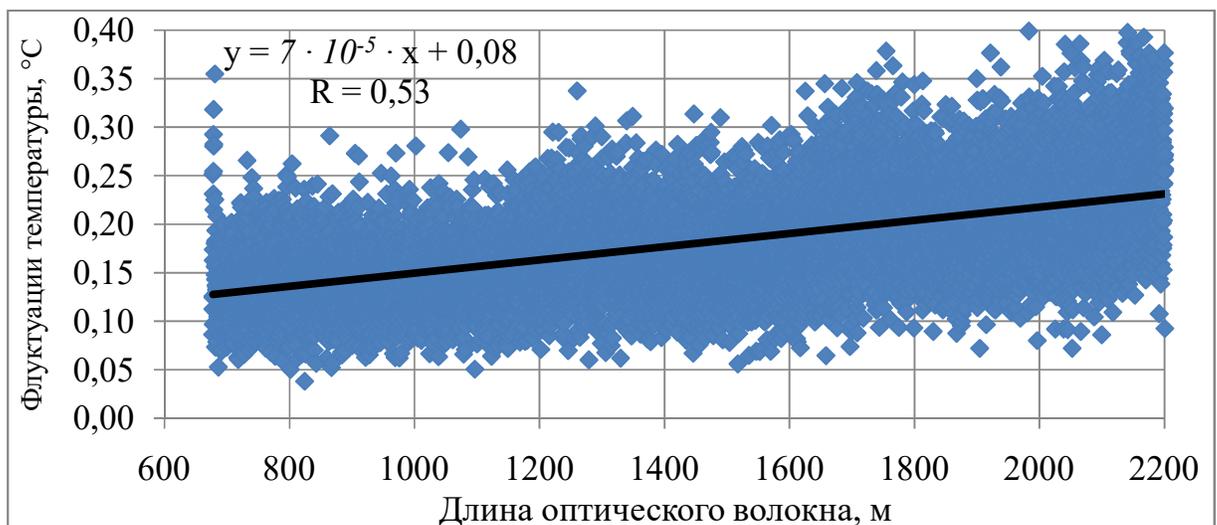


Рисунок 41 – График изменения флуктуаций температурного поля в зависимости от длины оптического волокна

Полученное уравнение позволяет определить фактический уровень флуктуаций температуры на любом отрезке длины оптоволоконного датчика при использовании малых времён накопления. В случае со скважиной Б-1132 при определённой ранее эквивалентности расхода жидкости флуктуациям температуры ($\pm 17,58 \text{ (м}^3/\text{сут)}/^\circ\text{C}$) неопределённость методики «Исследование скорости остывания кабеля» при общей длине конца оптического волокна в **2200 м** (что соответствует глубине по стволу в 1522,8 м) составляет

$$\begin{aligned} \delta W &= (7 \cdot 10^{-5} \cdot l + 0,08) \cdot \Theta_{НС} = (7 \cdot 10^{-5} \cdot 2200 + 0,08) \cdot \pm 17,58 = \\ &= 0,24 \cdot 17,58 = \pm 4,22 \text{ м}^3/\text{сут}; \end{aligned} \quad (2.12)$$

где δW – неопределённость по значению расхода жидкости методики «Исследование скорости остывания кабеля», $\text{м}^3/\text{сут}$; l – длина оптоволоконного распределённого датчика температуры, м; $\Theta_{НС}$ – эквивалентность расхода жидкости флуктуациям температуры по оптоволоконному модулю из нержавеющей стали, $(\text{м}^3/\text{сут})/^\circ\text{C}$.

Созданная автором система оптоволоконной распределённой скважинной термокондуктивной дебитометрии (ОР-СТД), включающая в себя специализированную модель геофизического кабеля и оперативную методику исследований, была подвергнута сопоставлению с изученными ранее научно-техническими разработками других специалистов. Сравнительная оценка разработок производилась по физико-технологическим критериям, приведённым в таблице 4: 1) охват скважинного пространства при долговременном мониторинге (длина ствола, непосредственно участвующая в проведении геофизических исследований методом термодэбитометрии), 2) оперативность проведения исследований (длительность методики по времени), 3) зависимость от сторонних данных (способность методики не опираться на иные источники данных о расходе жидкости в скважине), 4) практическое применение (последняя известная стадия применения созданной научно-технической разработки на производственном уровне). Цветовое разделение оценок критериев следующее: красный – не эффективна; жёлтый – приемлема; зелёный – эффективна.

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 оптоволоконна | Умеренная | Независимая | Лабораторные испытания |
| Испытание на тепловую адвекцию (S. M. Sellwood и др.) | Во всю длину оптоволоконна | 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. Vense и др.) | Во всю длину нагревательного элемента | Ускоренная | Частично зависимая | Неглубокие скважины |
| Испытание тепловым импульсом (Т. 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 |

Выводы по первому защищаемому положению

1. Разработан авторский вариант системы оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии на основе геофизического кабеля, обеспечивающего возможность совместного проведения исследований

стандартными точечными электронными приборами и оптоволоконными датчиками с нагревом и без него.

Система отличается от существующих разработок-аналогов наличием нагревательного элемента распределённого типа ограниченной длины, способного оперативно и с запасом по мощности вырабатывать регулируемое количество тепловой энергии, а также открывает возможности для исследования глубокозалегающих горизонтов.

2. Разработана и опробована в ограниченном формате новая методика проведения исследований методом оптоволоконной распределённой скважинной термокондуктивной дебитометрии «Исследование скорости остывания кабеля». Методика отличается оперативностью проведения исследований и интерпретации данных, а также самостоятельностью в количественной оценке общего и поинтервального дебитов. Важной особенностью методики является её универсальность, она применима не только с созданным вариантом системы оптоволоконной термодебитометрии, но и с иными аналогами.

С практической стороны обсуждаемая разработка требует повышения достоверности до уровня реальной скважины, проведения новых лабораторных испытаний в расширенном формате с моделированием дополнительных свойств скважинной среды и получения лабораторной зависимости для опытной модели геофизического кабеля качественно иного уровня сложности.

Глава III. ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛОЙ ИНЕРЦИОННОСТИ ОПТОВОЛОКОННЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ, ИНТЕГРИРОВАННЫХ В КАБЕЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Изучение показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры представляет собой направление, которому не уделялось достаточного внимания. Со стороны пользователей оптоволоконного оборудования возникает множество вопросов о причинах изменчивости пространственного разрешения и постоянной времени. В связи с этим первоочередной задачей **второго защищаемого положения** стало подробное изучение природы данной проблемы с применением системного подхода.

Практическое расхождение в значениях пространственного разрешения и постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры с цифрами, указанными предприятиями изготовителями, первично связано с тем, что указываются значения, полученные при проведении испытаний с оптическим волокном без вмещающих кабельных изделий. Это явным образом устраняет тепловую инерцию, создаваемую теплоизолирующими слоями кабеля. Поэтому оптоволоконные распределённые датчики температуры официально вписываются в нормы, предъявляемые регламентами и руководящими документами по точности измерения температуры, как составляющей пространственной детализации поля, и по постоянной времени [58, 138]. После того как оптоволоконный датчик включается в конструкцию кабельного изделия изменить его чувствительность в лучшую сторону становится невозможно [40]. На практике для каждого из показателей это приводит к следующим проблемам.

3.1. Проблемы с пространственным разрешением оптоволоконных распределённых датчиков температуры

Применительно к пространственному разрешению ситуация обстоит следующим образом. При изучении скважинных диаграмм оптоволоконной распределённой термометрии множеству исследователей, включая автора, не

представлялось случаев выделить объекты, размеры которых приближены к значению пространственного разрешения, заявленного предприятием-производителем измерительного оборудования (табл. 5).

Таблица 5

Локализованные малоразмерные температурные аномалии по данным оптоволоконной распределённой термометрии

| Месторождение, скважина | Интервал перфорации, м | Работающая часть, м |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Я 105-2 | 1702,0 – 1714,0 | 1713,6 – 1714,1 (0,5) |
| Н 115 | 1522,0 – 1525,0 | 1522,4 – 1523,5 (1,1) |
| Т 122 | 1411,0 – 1414,0 | 1413,0 – 1414,0 (1,0) |
| П 207 | 2341,0 – 2344,0 | 2342,0 – 2343,0 (1,0) |
| С 502 | 2262,14 (клапан) | 2260,0 – 2261,0 (1,0) |
| Т 1012 | 1573,5 – 1579,0 | 1578,0 – 1578,9 (0,9) |

Данные оптоволоконных скважинных исследований, проведённых на месторождениях Пермского края станциями «Silixa Ultima», которые считаются высококачественными и имеют паспортное значение пространственного разрешения в 0,25 м, не позволили локализовать объекты подобных размеров. Отметим, что источниками локализованных аномалий являлись протяжённые интервалы перфорации и точечные объекты, как циркуляционные клапаны (скважина С 502). В последнем случае детализация работы циркуляционного клапана в температурном поле пространственно эквивалентна аномалии от пласта (пропластка) мощностью в 1,0 м (рис. 42). Объект минимальных размеров был выявлен в скважине Я 105-2 протяжённостью 0,5 м, в качестве вмещающего изделия для оптоволоконного датчика использовался бронированный кабель малого диаметра (КГЗ*0,35-2ОВ-40-90), обладающий повышенной теплопроводностью [40, 77].

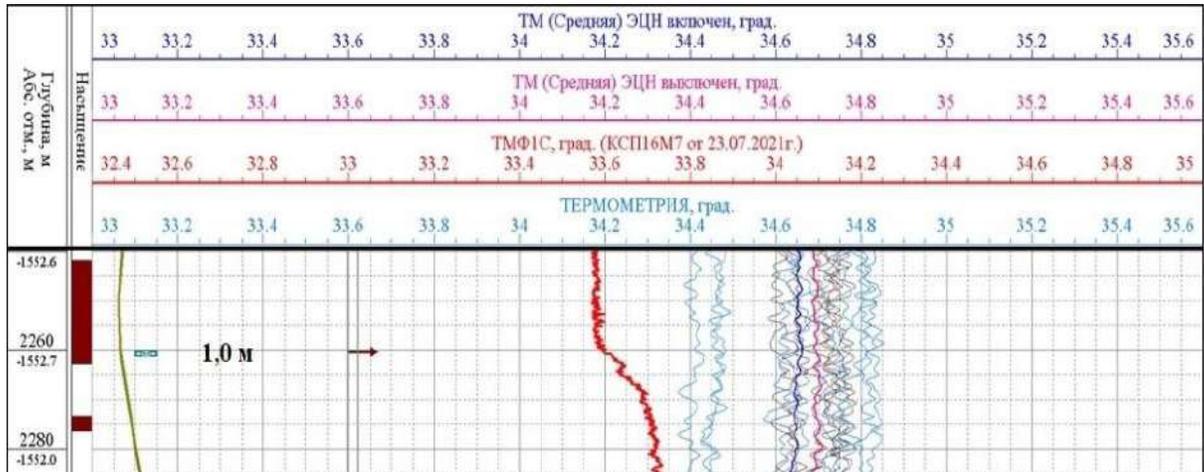


Рисунок 42 – Визуализация работы циркуляционного клапана по данным оптоволоконной распределённой термометрии

Критерии для определения пространственного разрешения

Вне зависимости от тепловой изолированности оптоволоконных распределённых датчиков температуры, второй момент связан с используемыми критериями для определения их пространственного разрешения. Существует два критерия для определения пространственного разрешения: Рэлея и ступенеобразный (рис. 43). Для их применения необходимо эмпирическим путём при помощи оптоволоконного распределённого датчика температуры (ОРДТ) создать аномалии температурного поля определённой формы и провести их анализ.

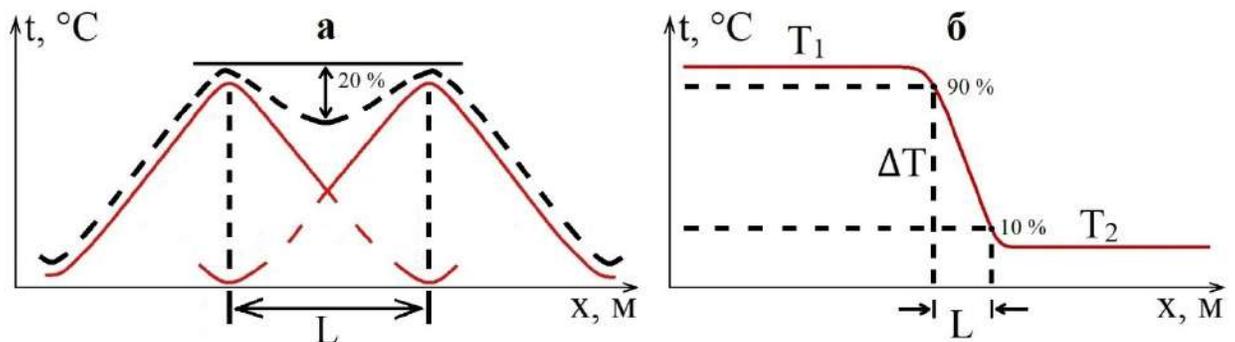


Рисунок 43 – Критерии для определения пространственного разрешения: а – критерий Рэлея, б – критерий ступенеобразный

1. *Критерий Рэлея.* Основан на модели поля, создаваемого двумя близлежащими точечными источниками с равными интенсивностями. Объекты считаются полностью разрешёнными (наблюдаемыми порознь), если значение

«провала» на графике между ними составляет не менее 20 % от интенсивности аномалий. Отрезок на оси расстояний на термограмме при данном наложении аномалий между максимумами (рис. 43, а) принимается за значение пространственного разрешения [52].

2. *Критерий ступенеобразный.* На производстве используется шире предыдущего, связан с графическим анализом ступенеобразных аномалий (рис. 43, б). Поле создаётся посредством проложения оптического волокна из одной среды в другую, обладающих разными температурными характеристиками (T_1 , T_2). При этом перепад температур между средами (ΔT) является опорным значением. Величина пространственного разрешения выражается как расстояние на графике между двумя точками, расположенными непосредственно в градиентной зоне. Первая точка соответствует 10 % превышению относительно опорного значения над минимальной асимптотой, вторая – 90 % превышению [110, 111, 112].

Если с позиций оптики в приемлемости данных критериев не возникает сомнений, то в отношении геофизики сложность состоит не столько в средствах моделирования, сколько в реалистичности применения графико-физической сущности данных критериев к оптоволоконным распределённым датчикам температуры, в особенности с критерием Рэля (рис. 44).

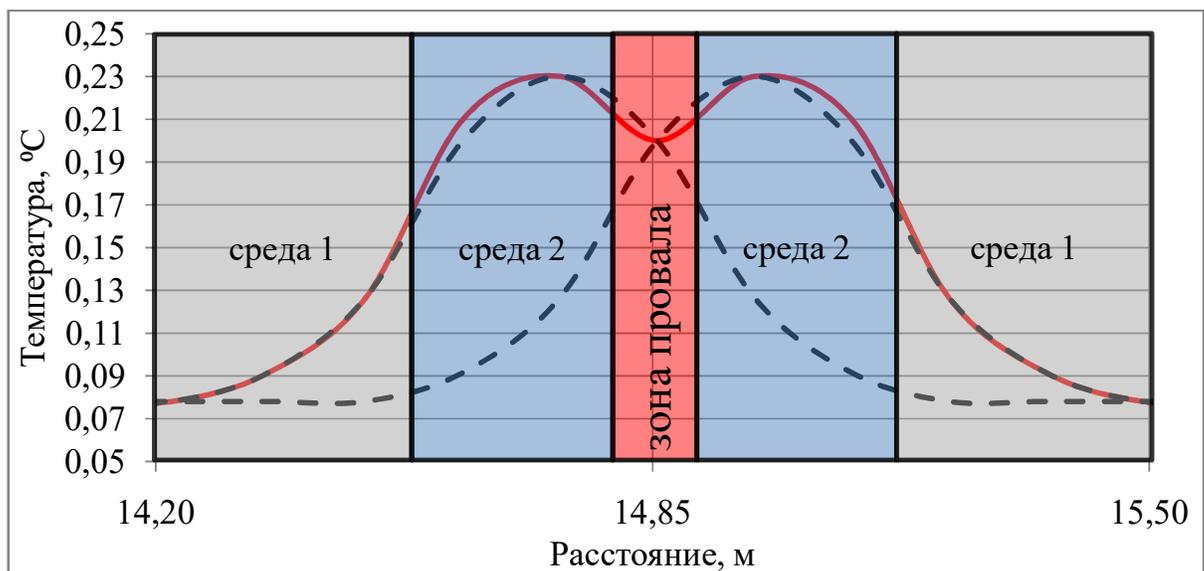


Рисунок 44 – Распределение источников аномалий в модели критерия Рэля

При использовании критерия Рэлея необходимо воспроизвести два сближенных точечных тела, используя минимальные участки длины по телу оптоволоконного датчика. При этом между двумя телами необходимо воспроизвести третье тело с пониженной амплитудой температурного поля. Проблема состоит в том, что область «провала» должна занять на кабеле меньше длины, чем два предыдущих тела в отдельности, что крайне сомнительно. Тем более что, при попытке воспроизвести график близость источников и интегрирующие свойства кабеля сильно воспрепятствуют разделению аномалий. Такой подход не оправдан и в плане погрешности, при использовании критерия к малоамплитудным аномалиям, порядка $0,2 \div 1,0$ °С, «провал» будет восприниматься не как тело, а как флуктуация.

В ступенеобразном критерии, в отличие от предыдущего, с воспроизведением не возникает проблем, так как источники аномалий – два полубесконечных тела. Проблема состоит в другом: в модели физически присутствуют только два тела, а градиентная зона пространственно ни к чему не привязана, нет конкретного третьего тела (рис. 45).

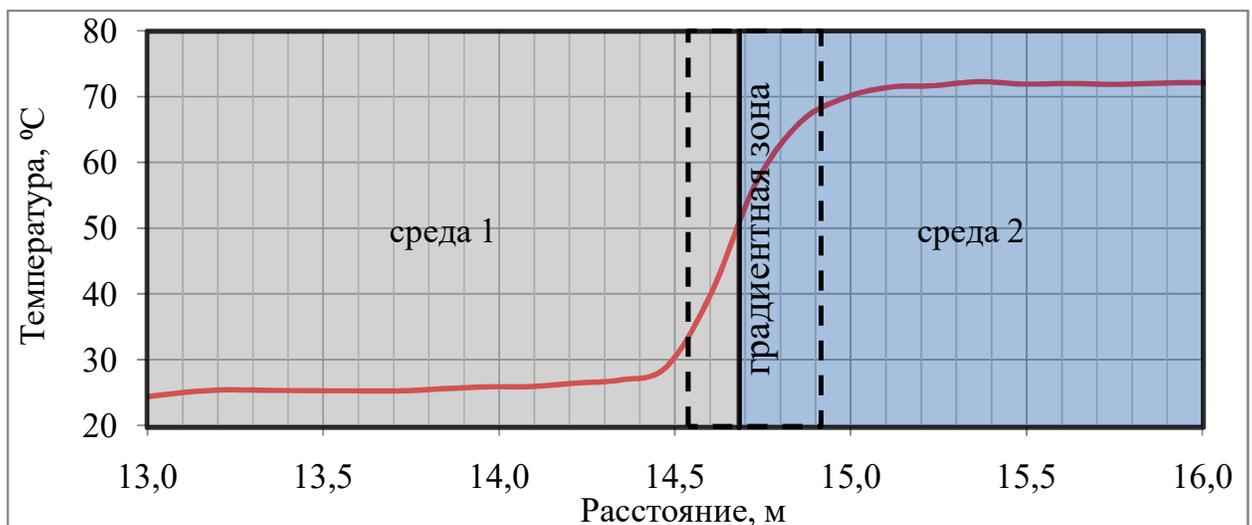


Рисунок 45 – Распределение источников аномалий в модели ступенеобразного критерия

К тому же, размеры градиентной зоны при использовании одного и того же кабеля изменчивы, так как зависят от двух параметров: от перепада температур между средами и от времени накопления при регистрации поля.

Повышая перепад температур и время накопления, можно искусственно понизить значение пространственного разрешения по данному критерию.

Посредственно опираясь только на названные критерии, в процессе интерпретации данных возможно получить ложные выводы, при обработке температурных кривых можно принять за достоверную аномалию малоразмерную флуктуацию, вызванную, например, дефектом в оптическом волокне, либо программной ошибкой. Подобный негативный результат не исключим из-за того, что упомянутые критерии не учитывают интегрирующие свойства геофизического оптоволоконного кабеля [81, 124].

Автор предлагает использовать новый критерий под названием «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 оптоволоконного датчика (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. 46).

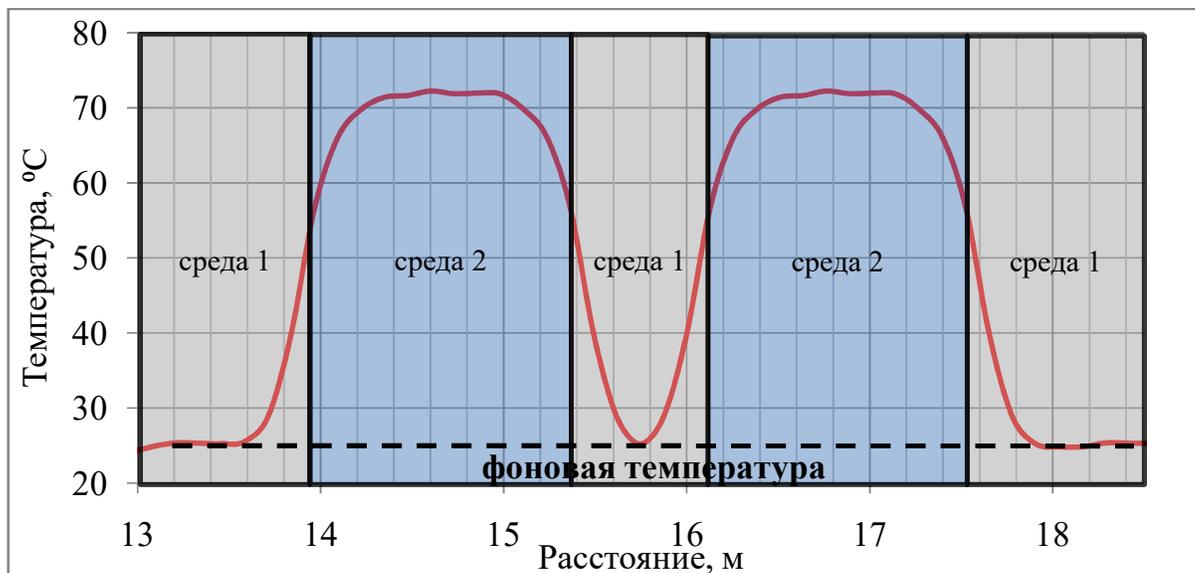


Рисунок 46 – Распределение источников аномалий при моделировании температурного поля по критерию «Проявление фона»

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

Для устранения противоречий необходимо произвести сравнение фактической детализации по существующему и внедряемому критерию для определения пространственного разрешения, выбрав из них наиболее подходящий для оптоволоконных распределённых датчиков температуры, используемых для геофизических исследований. Основным показателем пригодности выступит наличие корреляции между пространственным разрешением и теплофизическими свойствами кабельного изделия.

3.2. Проблемы с постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры

Ситуация с постоянной времени обстоит не так однозначно как с пространственным разрешением и зависит от вида изучаемого температурного поля. При изучении квазистационарных полей значение постоянной времени ОРДТ не создаёт ощутимых препятствий, т. к. исследования данных полей как в добывающих, так и в нагнетательных скважинах выполняются в виде непрерывного продолжительного мониторинга. Происходит это следующим образом, в течение суток (и более) при различных режимах работы скважины осуществляется проведение циклических замеров через 20 – 30 минут, за это время оптоволоконная система накапливает информацию по всей длине кабеля и впоследствии использует её для получения одной осреднённой термограммы с оптимальной пространственной детализацией температурного поля. Таким образом, за сутки накапливается от 48 до 72 последовательных по времени кривых. Технологические операции, как например смена режимов работы скважины или закачка реагентов, происходят во время регистрации данных, поэтому все необратимые события, как целевые, так и вторичные, которые произошли за время одного цикла накопления, вне зависимости от их продолжительности, отразятся в сформированной температурной кривой [4, 41].

В случаях же изучения нестационарных полей постоянная времени оптоволоконного датчика в твёрдой форме определяет информативность и целесообразность проведения исследований быстропротекающих процессов. Формат подобных исследований значительно отличается от стандартного мониторинга. Список направлений, связанных с быстропротекающими процессами, включает в себя оптоволоконную распределённую скважинную термодобитометрию [73], контроль эксплуатации кабельных нагревательных систем [14, 115], интенсификацию притока и другие задачи, требующие задействования оптоволоконных средств контроля [1, 12, 26, 59, 78]. В данном случае регистрация данных по всей длине кабеля производится на минимальных временах накопления, чтобы не только не пропустить момент происхождения события, но и зафиксировать его развитие в динамике.

В связи с этим возникают вопросы: подходящими ли показателями инерционности обладает конкретный оптоволоконный датчик, и какие лучше (пониженной или повышенной чувствительности) использовать оптоволоконные распределённые датчики температуры для исследования быстропротекающих процессов. Определённая часть исследователей склоняется к практической проверке свойств используемых датчиков, а другая совершает поворот в ошибочном направлении, отказываясь от предварительных экспериментов и полагаясь на физическую теорию, пытается определить постоянную времени оптоволоконного распределённого датчика температуры (ОРДТ) исключительно расчётным способом.

Проблема теоретического определения постоянной времени

Конечно, в разных геофизических кабелях используются теплоизоляционные материалы со сходными физическими характеристиками, которые за счёт задания геометрии конструкции вызывают пропорциональное изменение постоянной времени оптоволоконных датчиков, находящихся в составе кабельного изделия. Действительно, масса кабеля, связанная с геометрией конструкции, и удельная теплоёмкость его слоёв численно произведением способны отразить тепловую инерционность конкретной

модели. При этом возникает мысль, что можно вычислить время нагрева, которое в четырёхкратной пропорции связано с постоянной времени. Из-за этого, создаётся видимость, что зная количество теплоты, которое необходимо передать телу для нагрева на заданную температуру, и мощность теплового потока от источника, можно рассчитать время, за которое это произойдёт, по следующей формуле:

$$t = \frac{\Delta T \cdot \sum C_i \cdot m_i}{Q_{II}} = \frac{\Delta T \cdot \sum C_i \cdot \sigma_i \cdot S_i \cdot L}{Q_{II}} = \frac{Q_H}{Q_{II}}; \quad (3.1)$$

$$t \approx 4 \cdot \beta; \quad (3.2)$$

где t – время нагрева геофизического кабеля до местоположения ОРДТ, с; ΔT – разность между конечной и начальной температурой оптоволокна, °К (°С); C_i – удельная теплоёмкость слоя i , Дж/кг·°К; m_i – масса слоя i , кг; Q_{II} – мощность теплового потока от источника, Вт (Дж/с); S_i – площадь сечения слоя i , м²; σ_i – плотность слоя i , кг/м³; L – строительная длина геофизического кабеля, м; Q_H – количество теплоты, необходимое кабелю для нагрева на ΔT градусов Кельвина или Цельсия, Дж; β – постоянная времени нагрева геофизического кабеля с ОРДТ, с.

Однако данный вариант заведомо является провальным по ряду причин. Во-первых, потому, что линейности в формуле (3.1), в процессе нагрева на практике не отмечается. С течением процесса передачи тепла последовательно изменяется приращение теплового потока по времени, что и объясняет экспоненциальный характер явления.

Во-вторых, при проведении исследований методом оптоволоконной распределённой термометрии тепловой поток не измеряется, его значение и распределение можно определить только посредством моделирования. К тому же, изотропности и постоянства распределения теплового потока в реальных условиях, в отличие от модельных, не существует. В-третьих, несмотря на то, что время нагрева и постоянная времени это физические величины, имеющие одну размерность, одинаково зависящие от физических свойств теплоизолирующих слоёв, покрывающих ОРДТ, они коренным образом

различаются. Постоянная времени это константа, не зависящая ни от перепада температур, который необходимо преодолеть тепловому потоку, ни от мощности самого теплового потока и ни от строительной длины кабеля. Поэтому пытаться искать связь с расчётным временем нагрева кабеля не нужно, необходимо начать с определения постоянной времени любым из практических способов [6, 25, 30].

Способы определения постоянной времени датчика температуры

Все практические способы определения постоянной времени датчиков температуры сводятся к выполнению одного и того же начального действия: записи кривой перегрева или остывания. Для получения данного графика необходимо выбрать образец оптоволоконного кабеля конкретной марки и выдержать его некоторое время в среде с одной температурой, а затем немедленно переместить в среду с отличной температурой, зарегистрировав процесс нагрева/охлаждения по времени с приемлемым шагом квантования. Для имитации сред с отличными температурами достаточно использовать установки типа термованна. При этом необходимо отметить два момента, которые вызывают у пользователей вопросы, но не оказывают значительного влияния на итоговую постоянную времени используемого оптоволоконного датчика, находящегося в составе кабельного изделия.

Во-первых, направление процесса тепломассопереноса не играет роли, так как при нагреве и при охлаждении постоянная времени будет неотъемлемо фигурировать в происходящем процессе. В некоторых литературных источниках, которые описывают способы определения постоянной времени, используются исключительно словосочетания «постоянная времени нагрева», совместно с графиками нагрева и формулами их анализа. Необходимо понимать, что данная, измеряемая постоянная времени датчика, будет равнозначно фигурировать и в случае с обратным процессом – охлаждения, но, безусловно, с зеркальной трансформацией графиков и привязанных к ним формулам.

Во-вторых, для определения постоянной времени можно использовать оптические волокна любого типа из присутствующих в одном оптоволоконном модуле. Как известно, время прихода отражённого сигнала по оптоволокну определяется значением его группового показателя преломления, у одномодовых и многомодовых волокон и их разновидностей между собой данный параметр отличается. У одномодовых волокон групповой показатель преломления составляет 1,467, а у многомодовых – в среднем 1,481, из-за этого в первых сигнал распространяется относительно быстрее. Разность во времени прихода сигнала между волокнами двух типов, например для расстояния 5000 м (что присуще скважинным глубинам), составляет микросекунды времени, а разница ещё меньше и определяется по формуле

$$\begin{aligned} \delta t &= \frac{2L \cdot n_{MM}}{c} - \frac{2L \cdot n_{SM}}{c} = \frac{10000 \cdot 1,481}{3 \cdot 10^8} - \frac{10000 \cdot 1,467}{3 \cdot 10^8} = \\ &= (49,4 - 48,9) \cdot 10^{-6} = 0,5 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (3.3)$$

где δt – разность во времени прихода сигнала между многомодовым и одномодовым оптоволоконном, с; L – длина оптического волокна, м; n_{SM} , n_{MM} – групповые показатели преломления для одномодового и многомодового волокон; c – скорость света в вакууме = $3 \cdot 10^8$ м/с [44, 131].

Рассмотрим алгоритмы интерпретации экспериментальных графиков, каждый из которых формирует отдельный способ определения постоянной времени. Существуют следующие способы.

1. *Способ двух третьих.* Известно, что процесс перегрева протекает по экспоненциальному закону:

$$\tau_{тек} = \tau_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta}}\right); \quad (3.4)$$

$$\tau_{тек} = \tau_{max} \cdot (1 - e^{-1}) \approx 0,63 \cdot \tau_{max}; \quad (3.5)$$

где $\tau_{тек}$, τ_{max} – перегрев текущий и максимальный, соответственно, °К (°С); t – время с начала нагрева, с; β – постоянная времени, с; e – основание натурального логарифма $\approx 2,72$ [15, 30, 140].

В момент времени, равный значению постоянной времени, значение перегрева достигает приблизительно $2/3$ или $0,63$ от максимального. Исходя из этого, на кривой перегрева определяются максимум и значение искомой постоянной.

2. *Способ касательных.* Данный способ связан с предыдущим и по сути является его модификацией. Сначала к кривой (рис. 47) проводится касательная от точки начала нагрева до асимптоты, соответствующей значению конечного перегрева. При этом точка пересечения касательной с асимптотой должна соответствовать времени, при котором перегрев составляет $2/3$ от максимума. Проекция касательной на оси времени отсекается и принимается за постоянную времени, и на данное смещение на кривой нагрева отмечается точка. Затем из полученной на кривой нагревания точки повторяется процедура построения касательной до трёх раз, в зависимости от погрешности измерения. По итогам полученные постоянные времени усредняются [30, 140].

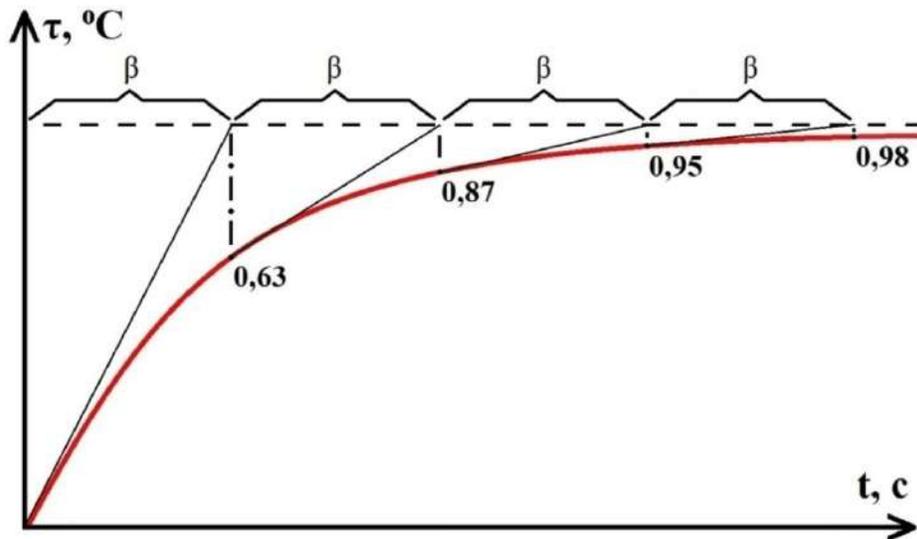


Рисунок 47 – Способ касательных

3. *Способ тангенсов.* На экспериментальной кривой (рис. 48, а) выделяется некоторый участок ab в верхней части. В точках a и b проводятся касательные к кривой нагревания и находятся тангенсы углов α_1 и α_2 либо путем измерения, либо из соотношения катетов прямоугольных треугольников apq и $bp'q'$. В любом приемлемом масштабе на прямых, параллельных оси

абсцисс и проходящих через точки a и b , откладываются найденные значения тангенсов в виде отрезков fc и mn

$$fc = tg\alpha_1 = \frac{pq}{aq}; \quad (3.6)$$

$$mn = tg\alpha_2 = \frac{p'q'}{bq'}; \quad (3.7)$$

где fc , mn – отрезки, равные значениям тангенсов, мм; α_1 и α_2 – углы между касательными и асимптотами f и m , °; pq и $p'q'$ – противолежащие катеты, мм; aq и bq' – прилежащие катеты, мм.

Через полученные точки c и n проводится прямая до пересечения с осями абсцисс и ординат. Эта прямая пересечёт ось ординат в точке $\tau_{уст}$ (отрезок OD). При этом, постоянная времени нагрева определяется как отношение

$$\beta = \frac{OD \cdot m_\tau}{OF \cdot m_{tg}}; \quad (3.8)$$

где β – постоянная времени, с; OD – отрезок на оси ординат, мм; OF – отрезок на оси абсцисс, мм; m_τ – масштаб температуры, °К/мм (°С/мм); m_{tg} – масштаб тангенсов, мм⁻¹.

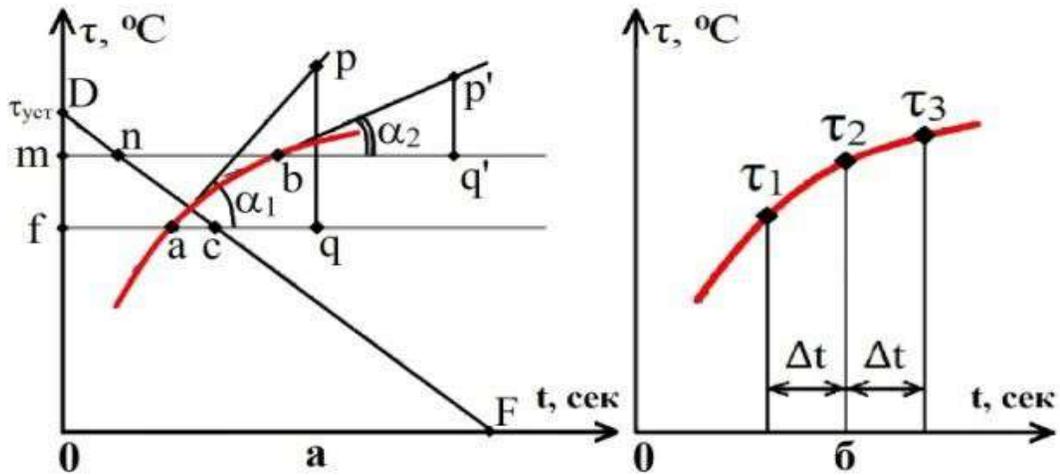


Рисунок 48 – Графические способы определения постоянной времени: а – способ тангенсов; б – способ трёх точек

4. *Способ трёх точек.* На кривой нагревания берутся три точки, отстоящие друг от друга на равные промежутки времени Δt (рис. 48, б). А постоянная времени в этом случае будет определяться по формуле:

$$\beta = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}\right)}; \quad (3.9)$$

где β – постоянная времени, с; Δt – промежуток на оси времени, с; τ_1, τ_2, τ_3 – значения перегрева в точках 1, 2, 3, соответственно, °К (°С) [140].

Несмотря на разнообразие описанных способов, они не всегда оказываются приемлемыми. Большинство реальных процессов нагрева и охлаждения имеют графический вид, который далёк от идеальной экспоненциальной зависимости. Поэтому на практике автор решил отдать предпочтение упрощённой методике – способу двух третьих.

3.3. Коэффициент тепловой инерционности конструкции кабеля

Для установления численной связи между показателями тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры (пространственным разрешением и постоянной времени) и конструкцией кабельных изделий, в которые они интегрированы, необходимо конструкцию представить в конкретном количественном виде. Для этого автор предлагает ввести удельный комплексный параметр – коэффициент тепловой инерционности конструкции кабеля, сущность которого состоит в следующем. Известно, что кабельное изделие представляет собой неоднородное тело, состоящее из некоторого количества теплоизолирующих слоёв, которые состоят из твёрдых материалов, обладающих как минимум тремя устойчивыми физическими параметрами, сохраняемыми на протяжении всей строительной длины изделия: площадью поперечного сечения, удельной теплоёмкостью и плотностью.

Коэффициент тепловой инерционности конструкции кабельного изделия представит собой сумму произведений упомянутых параметров по каждому из его слоёв, отстраняющих оптоволоконный датчик от внешней среды

$$K_{\text{кон}} = \sum S_i \cdot C_i \cdot \sigma_i; \quad (3.10)$$

где $K_{кон}$ – 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.

При этом учитывать площадь сечения необходимо в зависимости от конструктивного расположения оптоволоконного модуля, площадь сечения должна контурно повторять фигуру поперечного сечения кабеля. Для оптоволоконных геофизических исследований, в основном, используются кабели круглого поперечного сечения, в отношении кабелей типа КРБП (кабель погружной бронированный плоский) вопрос временно остаётся открытым [128, 130]. В случае не центрального расположения оптоволоконного модуля принимаемая в расчёт фигура должна захватывать крайнюю кромку оптоволоконного модуля, приближенную к центру, как показано в варианте а на рис. 49

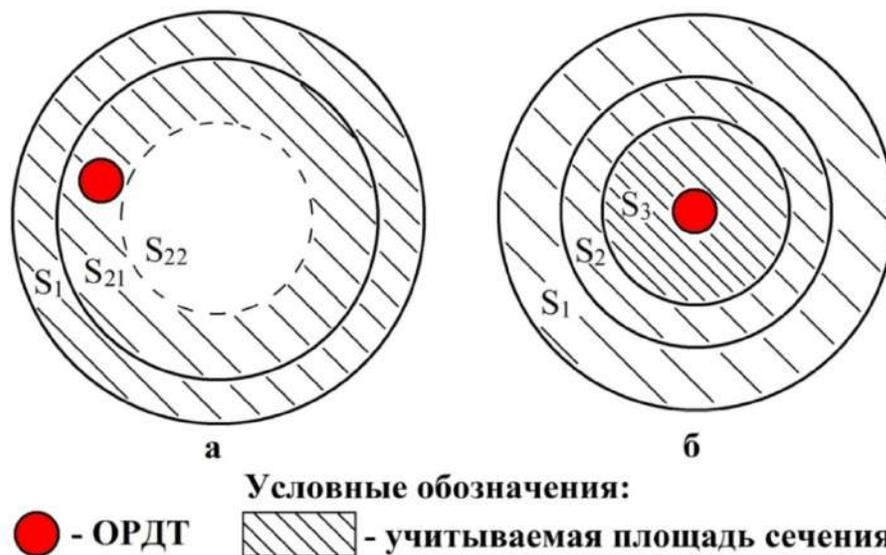


Рисунок 49 – Учёт формы площади сечения при расчёте коэффициента тепловой инерционности конструкции кабеля при различных расположениях ОРДТ

Для проведения последующих лабораторных испытаний автор подготовил 12 образцов оптоволоконных кабелей и модулей, широко используемых для проведения скважинных геофизических исследований (рис. 50).

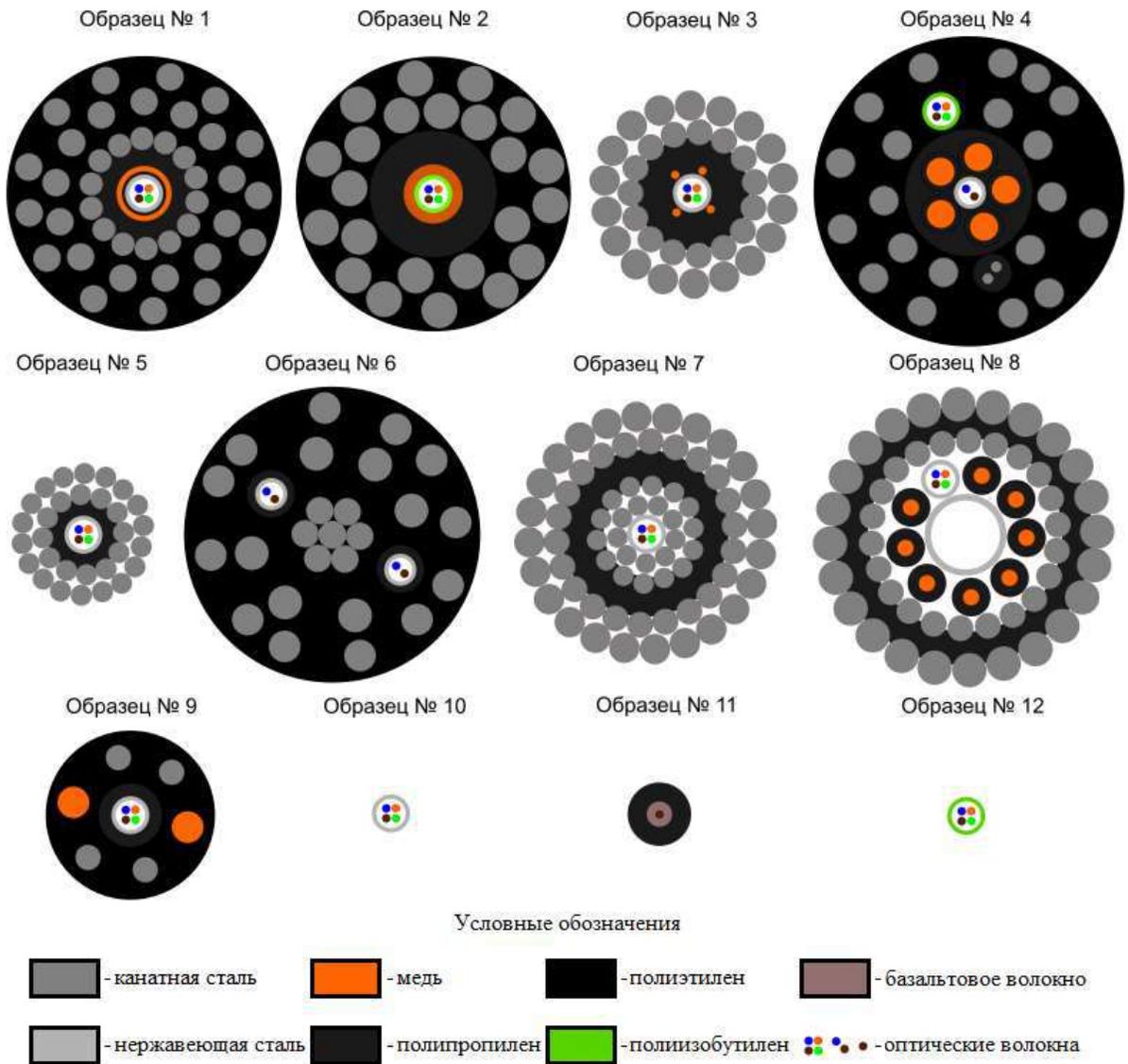


Рисунок 50 – Поперечные сечения испытанных образцов оптоволоконных кабелей и модулей

В число отобранных моделей входят армированные и бронированные кабели, а также металлические и полимерные оптоволоконные модули, эксплуатируемые в составе первых. Длина отобранных образцов оптоволоконных кабелей и модулей составляет от 5 до 12 м. В наборе для исследований присутствует также опытная модель оптоволоконного геофизического кабеля, созданного в **первом защищаемом положении** работы, имеющего два измерительных модуля в составе.

Таким образом, был обеспечен широкий диапазон показателей тепловой инерционности ОРДТ. Коэффициенты тепловой инерционности конструкции

кабеля для каждого из образцов рассчитаны на основе известных данных, поперечные сечения материалов определены посредством прямых измерений. В кабелях с центральным расположением оптоволоконного модуля учитывалась всё его сечение, в кабелях с промежуточным и периферическим расположением волокна учитывалось сечение, начинающееся от внешней среды до кромки оптоволоконного модуля, приближенной к центру кабеля. Наличие пустот в оптоволоконных модулях и пространстве между проволоками брони учитывалось, но при суммарном расчёте сводилось к 0. В модуле, заполненном базальтовым волокном, пустоты отсутствуют. В табл. 6 приведены материалы, использованные для изготовления испытанных образцов, и их удельные теплоёмкости, плотности (при 20 °С) согласно данным стандартов, находящихся в открытом информационном доступе [129, 132, 139, 141, 143, 144].

Таблица 6

Физические свойства материалов кабельных слоёв

| Материал | Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·°К) | Плотность, кг/м ³ |
|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) | 2450 | 920 |
| Полиэтилен низкого давления (ПЭНД) | 1780 | 950,5 |
| Полипропилен | 1930 | 900 |
| Полиизобутилен (ПБТ) | 1900 | 1300 |
| Сталь 7372-79 | 460 | 7800 |
| Сталь-А304 | 500 | 7855 |
| Медь | 385 | 8933 |
| Базальт | 820 | 2745 |

Для изготовления армированных образцов использовались полиэтилены разного давления, низкого (ПЭНД) и высокого (ПЭВД), что заметно отразилось на тепловой инерционности изделий. Оболочки металлических оптоволоконных модулей изготовлены из нержавеющей стали марки А304, оболочка полимерных оптоволоконных модулей – из полиизобутилена (ПБТ), исключение составляет модуль с базальтовыми волокнами (№ 11), его оболочка

изготовлена из полипропилена. Вычисленные коэффициенты тепловой инерционности конструкции всех образцов представлены в табл. 7

Таблица 7

Коэффициенты тепловой инерционности конструкции образцов
оптоволоконных кабелей и модулей

| | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| Образец | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 (1/2) | № 5 | № 6 |
| $K_{\text{кон}}, \text{Дж}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{К})$ | 370,2 | 328,9 | 194,6 | 286,7 / 345,6 | 112,5 | 274,4 |
| Образец | № 7 | № 8 | № 9 | № 10 | № 11 | № 12 |
| $K_{\text{кон}}, \text{Дж}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{К})$ | 322,8 | 346,7 | 99,6 | 3,9 | 12,9 | 2,5 |

3.4. Лабораторные испытания по определению показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры

Для определения показателей тепловой инерционности оптоволоконных распределённых датчиков температуры были проведены лабораторные испытания с использованием следующего оборудования: 12 образцов оптоволоконных кабелей и модулей с ОРДТ, установки типа термованна [53], дополнительной специальной ёмкости и станции «Silixa Ultima».

Определение пространственного разрешения

Сущность лабораторных испытаний состояла в определении значений пространственного разрешения образцов оптоволоконных датчиков по критерию, созданному автором, по ступенеобразному критерию и в проведении сравнительного анализа полученных результатов с данными скважинных исследований. Установка-термованна заполнялась жидкостью на водной основе, которая нагревалась до температуры 75 °С с удержанием нагрева, температура окружающей воздушной среды составляла 20 °С. Были смоделированы 2 среды с разными температурными характеристиками. Последовательно по одному образцы размещались в термованне так, чтобы можно было определять пространственное разрешение одновременно по двум критериям: по «Проявлению фона» и по ступенеобразному (рис. 51). После размещения образцов производилась регистрация термограмм на временах накопления 2, 5, 10, 15 и 20 минут и замер длины промежуточной части кабеля,

находящейся не в водной среде. Это позволило отразить изменение размеров градиентной зоны ступенеобразной аномалии, в то время как длина промежуточного участка кабеля, привязанная к конкретной части физического тела оставалась неизменной.

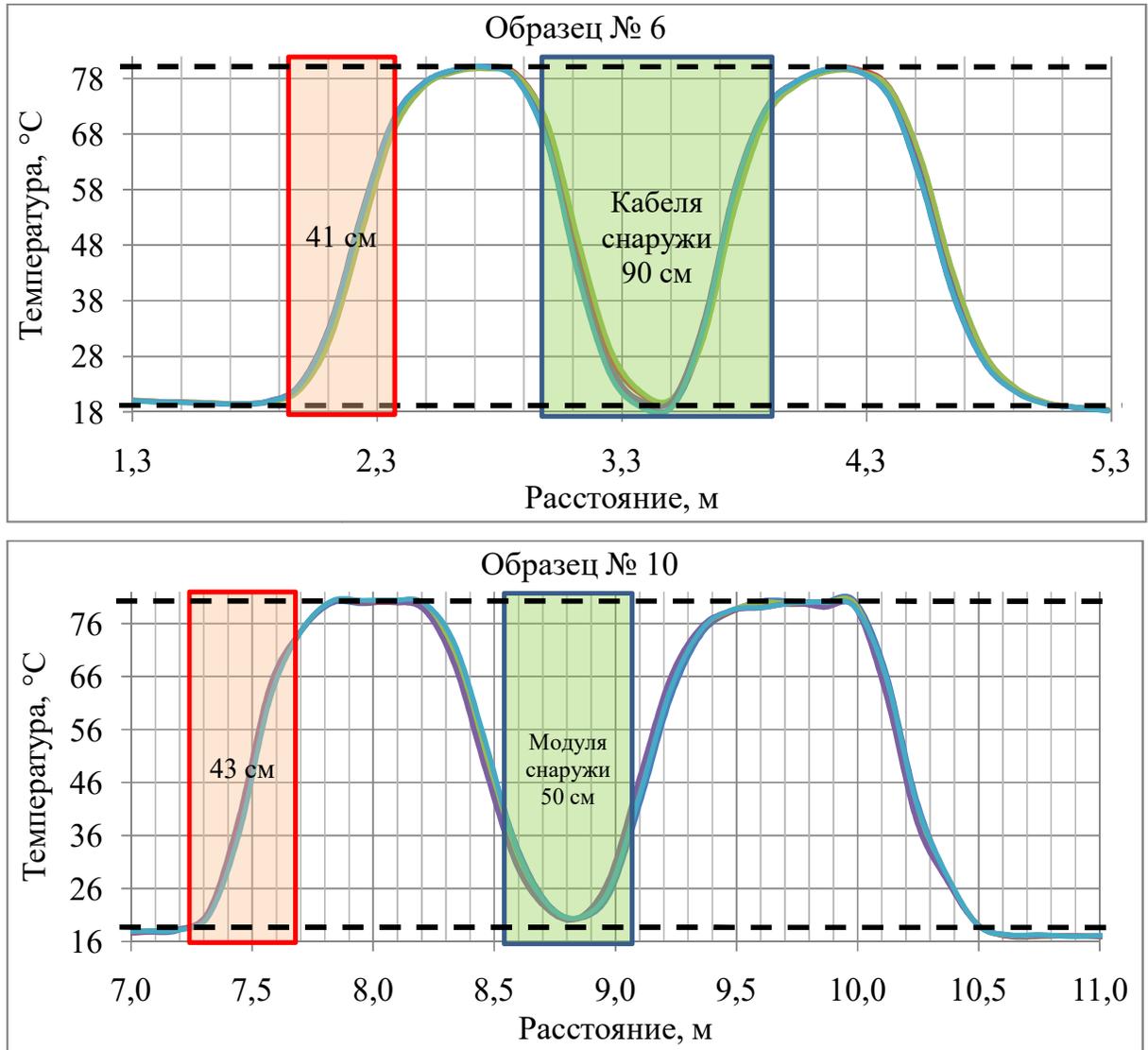


Рисунок 51 – Термограммы при определении пространственного разрешения для образцов № 6 и 10: красная область – значение по ступенеобразному критерию; зелёная область – по критерию «Проявление фона»

Результаты измерений пространственного разрешения для каждого образца представлены в табл. 8. Во-первых, что заметно, значения пространственного разрешения, полученные по критерию «Проявления фона»,

наиболее близки по численному диапазону к данным оптоволоконных геофизических исследований, представленных ранее [77].

Таблица 8

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

| Образец | $K_{\text{кон}},$ Дж/(м·°К) | По критерию ступенеобразному, м | | | | | По критерию проявления 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 используемых оптоволоконных кабелей и модулей построены корреляционные зависимости между их индивидуальными коэффициентами тепловой инерционности конструкции и результатами лабораторных испытаний (табл. 2). По ступенеобразному критерию для построения зависимости выбраны минимальные значения пространственного разрешения.

И здесь фигурирует второй момент, на графиках (рис. 52) отчётливо прослеживается, что пространственное разрешение ОРДТ по ступенеобразному критерию представляет собой число, не имеющее связи с теплофизическими свойствами кабельных изделий, в которых они эксплуатируются. А значения

пространственного разрешения по критерию «Проявления фона» наоборот, наибольшим образом отталкиваются от конфигураций конструкций использованных образцов. Следовательно, критерий «Проявление фона» может считаться пригодным для определения пространственного разрешения ОРДТ.

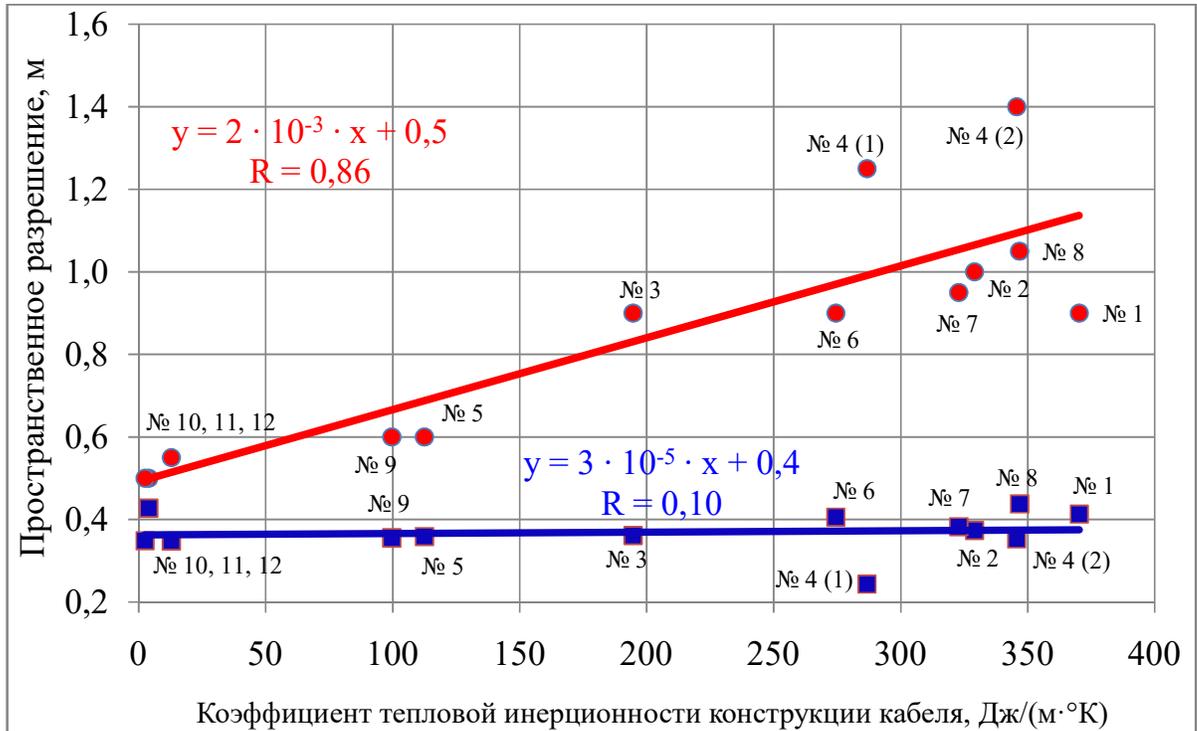


Рисунок 52 – Корреляционные зависимости между пространственным разрешением и коэффициентом тепловой инерционности конструкций оптоволоконных кабелей: синий – по критерию ступенеобразному, красный – по критерию «Проявление фона»

Полученное уравнение связи конструкции оптоволоконного кабеля со значением пространственного разрешения ОРДТ позволяет определять номинальную пространственную детализацию для испытанных образцов и также для ещё не созданных кабелей, используя лишь проектные данные, заложенные в их конструкцию

$$\psi = 2 \cdot 10^{-3} \cdot K_{кон} + 0,5; \quad (3.11)$$

где ψ – пространственное разрешение оптоволоконного распределённого датчика температуры в составе кабельного изделия, м; $K_{кон}$ – коэффициент тепловой инерционности конструкции кабеля, Дж/(м·°К) [77].

Определение постоянной времени

В лабораторных испытаниях по определению постоянных времени образцов оптоволоконных кабелей и модулей процесс проходил следующим образом. При помощи специальной ёмкости и установки-термованны, заполненных водой, имитировались две среды с различными температурами. В спецёмкости содержалась охлаждённая вода с постоянной комнатной температурой, а в термованне перегретая на 10 – 15 °С для создания ощутимого перепада. После создания перепада температур образцы оптоволоконных кабелей и модулей каждый поочерёдно сначала оттаивались в спецёмкости, а затем мгновенно перемещались в термованну для регистрации процесса нагрева (рис. 53). После нагрева спустя срок, превышающий четыре постоянных времени, образец немедленно перемещался из термованны обратно в спецёмкость для регистрации процесса охлаждения. Далее процедуры регистрации нагрева и охлаждения образца повторялись.

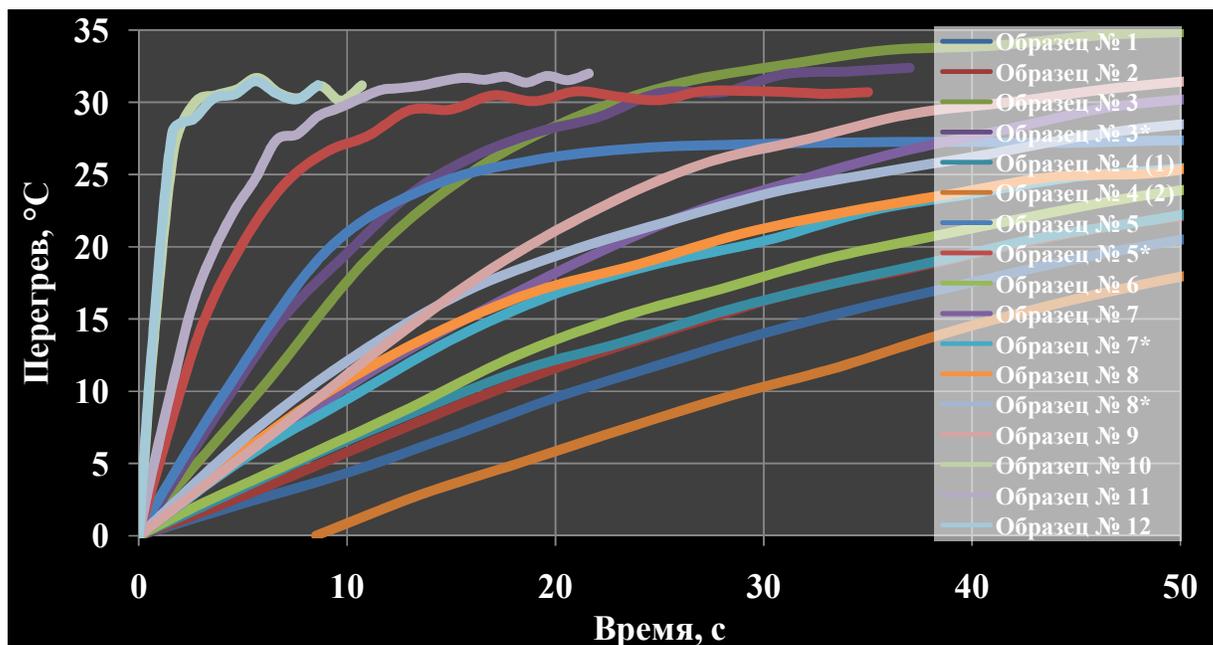


Рисунок 53 – Экспериментальные кривые перегрева образцов оптоволоконных кабелей и модулей

После испытания всех образцов при одном перепаде температур вода в термованне нагревалась ещё на 10 °С. Затем при новом температурном перепаде упомянутые образцы подвергались повторным испытаниям, и так, в

общем, при пяти значениях перепада от 10 до 50 °С с шагом 10 °С. Регистрация производилась на временах накопления 1 и 2 секунды для оптоволоконных модулей (образцы № 10, 11, 12), 3 и 5 секунд – для бронированных кабелей (образцы № 3, 5, 7, 8) и армированных кабелей (образцы № 1, 2, 4, 6, 9). Методом двух третьих по зарегистрированным кривым были определены постоянные времени для каждого образца и по итогам усреднены и сведены в табл. 9.

Таблица 9

Значения постоянных времени образцов оптоволоконных кабелей и модулей за серии замеров нагрева-остывания при фиксированных перепадах температуры

| Образцы | K _{кон} , Дж/(м·°К) | Серии замеров постоянной времени, с | | | | | | | | | | β, с |
|---------|---------------------------------|-------------------------------------|------|----------|------|-----------|------|----------|------|---------|------|-------------|
| | | Серия I | | Серия II | | Серия III | | Серия IV | | Серия V | | |
| № 1 | 370,2 | 47,5 | 53,7 | 49,6 | 48,4 | 50,2 | 46,2 | 48,4 | 48,3 | 49,2 | 49,3 | 49,1 |
| № 2 | 328,9 | 40,4 | 42,0 | 42,6 | 40,4 | 39,3 | 39,2 | 40,0 | 38,4 | 38,2 | 39,7 | 40,0 |
| № 3 | 194,6 | 17,2 | 16,9 | 15,3 | 16,4 | 15,9 | 15,5 | 14,8 | 15,3 | 15,9 | 14,3 | 15,7 |
| № 3* | 95,2 | 12,1 | 11,8 | 11,1 | 11,3 | 11,9 | 11,8 | 11,4 | 11,4 | 11,6 | 11,9 | 11,6 |
| № 4 (1) | 286,7 | 47,9 | 47,7 | 48,0 | 47,0 | 47,7 | 47,2 | 47,1 | 47,4 | 49,7 | 49,6 | 47,9 |
| № 4 (2) | 345,6 | 65,2 | 64,7 | 64,2 | 65,0 | 64,8 | 65,4 | 66,0 | 65,7 | 65,9 | 65,5 | 65,2 |
| № 5 | 112,5 | 8,8 | 8,3 | 8,7 | 8,7 | 7,4 | 7,1 | 7,1 | 6,9 | 7,5 | 7,2 | 7,8 |
| № 5* | 51,1 | 4,9 | 5,0 | 5,2 | 5,0 | 5,0 | 4,7 | 5,1 | 5,0 | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| № 6 | 274,4 | 41,5 | 42,6 | 42,5 | 43,3 | 44,5 | 44,9 | 45,6 | 43,4 | 45,3 | 46,4 | 44,0 |
| № 7 | 322,8 | 29,2 | 31,0 | 30,0 | 29,9 | 31,0 | 30,1 | 32,0 | 30,1 | 30,9 | 30,8 | 30,5 |
| № 7* | 190,3 | 26,7 | 27,5 | 25,8 | 26,9 | 27,8 | 26,1 | 29,1 | 28,7 | 28,6 | 28,8 | 27,6 |
| № 8 | 346,7 | 28,3 | 30,4 | 29,6 | 31,4 | 29,4 | 31,3 | 30,9 | 33,6 | 29,8 | 30,8 | 30,5 |
| № 8* | 173,7 | 23,6 | 21,7 | 24,0 | 24,7 | 24,0 | 22,8 | 22,7 | 23,4 | 23,5 | 24,8 | 23,5 |
| № 9 | 99,6 | 20,6 | 20,0 | 21,9 | 21,1 | 21,4 | 21,7 | 21,7 | 21,3 | 21,6 | 22,4 | 21,4 |
| № 10 | 3,9 | 1,3 | 1,5 | 1,1 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,2 |
| № 11 | 12,9 | 3,9 | 3,9 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 4,4 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 4,0 | 4,1 |
| № 12 | 2,5 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,0 |

После сопоставления рассчитанных коэффициентов тепловой инерционности конструкции испытанных образцов с полученными

осреднёнными значениями постоянных времени сформирована корреляционная зависимость (рис. 54).

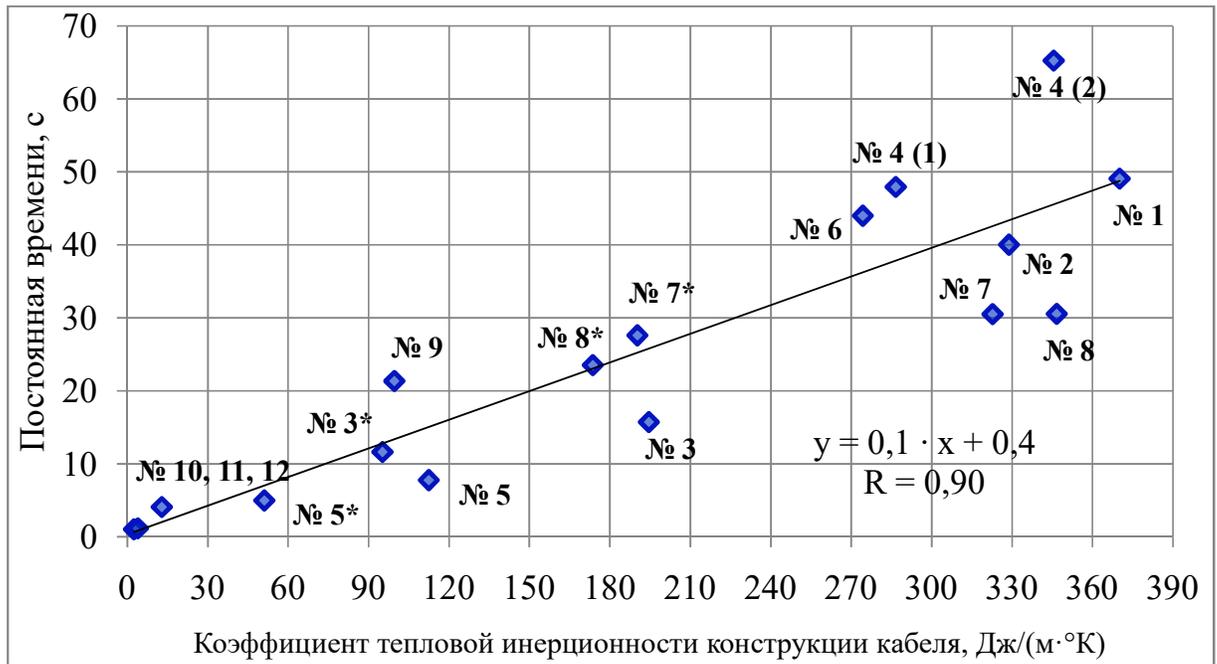


Рисунок 54 – Зависимость постоянной времени нагрева от коэффициента тепловой инерционности конструкции кабеля

Высокий коэффициент корреляции ($R = 0,90$) подтвердил эффективность выбранного подхода, предполагающего возможность определения постоянной времени ОРДТ по данной формуле:

$$\beta = 0,1 \cdot K_{кон} + 0,4 = 0,1 \cdot \sum (S_i \cdot C_i \cdot \sigma_i) + 0,4; \quad (3.12)$$

где β – постоянная времени оптоволоконного распределённого датчика температуры, с; $K_{кон}$ – 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.

Заметим, что в табл. 9 приведены позиции некоторых образцов со знаком *, показывающие заметные отклонения от общего тренда моделей бронированных кабелей (образцы № 3, 5, 7, 8). Данные образцы имеют отличную от остальных кабелей структуру, их покрытие (внешняя броня) не является сплошным слоем, а состоит из завитых стальных проволок круглого сечения. Бронированные кабели обладают меньшей поверхностной

герметичностью, чем армированные, поэтому и встал вопрос о фактических проявлениях теплоизолирующих свойств слоёв внешней брони.

В дальнейшем с бронированных образцов были сняты слои внешней брони для проведения дополнительных повторных испытаний. Коэффициенты тепловой инерционности конструкций данных образцов рассчитаны и представлены на графиках и в таблицах со знаком *. Результаты дополнительных испытаний опровергли сомнение, показав наличие вклада слоёв внешней брони в общую тепловую инерцию кабеля.

Вероятно, отклонение от общего тренда бронированных кабелей связано с совокупным действием их вещественного состава и геометрической формы. Повышенное содержание металлов в конструкции и наличие «оребрения» поверхностей образцов привело к снижению тепловой инерционности данных моделей. Для корректировки выведенной формулы (3.12) в исходные коэффициенты тепловой инерционности конструкции для бронированных моделей автором введена поправка 0,6, что и повысило коэффициент корреляции до 0,96 в искомой зависимости (рис. 55).

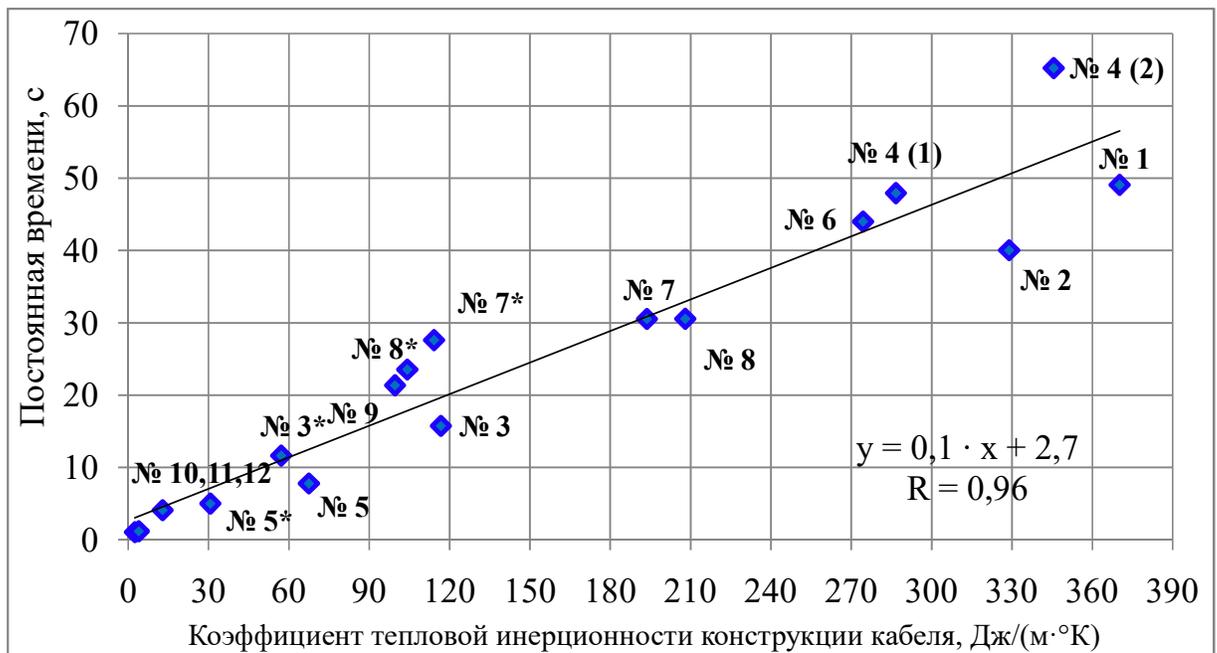


Рисунок 55 – Зависимость постоянной времени нагрева от коэффициента тепловой инерционности конструкции кабеля с введённой поправкой для бронированных моделей

После корректировки, формула, по которой на основе удельного параметра, содержащего данные о конструкции кабеля, можно определить номинальное значение постоянной времени оптоволоконного распределённого датчика температуры, приобрела следующий вид:

$$\beta = 0,1 \cdot K_{кон} \cdot K_{Б.К.} + 2,7 = 0,1 \cdot \sum (S_i \cdot C_i \cdot \sigma_i) \cdot K_{Б.К.} + 2,7; \quad (3.13)$$

где β – постоянная времени оптоволоконного распределённого датчика температуры, с; $K_{кон}$ – коэффициент тепловой инерционности конструкции кабеля, Дж/(м·°К); $K_{Б.К.}$ – поправочный коэффициент для бронированных кабелей = 0,6 (если кабель не является бронированным, то коэффициент = 1,0); S_i – площадь сечения слоя i , м²; C_i – удельная теплоёмкость слоя i , Дж/кг·°К; σ_i – плотность слоя i , кг/м³ [74].

Выводы по второму защищаемому положению

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, интегрированных в кабельные изделия. Результаты практического опробования данного критерия демонстрируют его наибольшую приемлемость для направления геофизических исследований скважин, в отличие от иных существующих критериев.

3. На основании экспериментальных данных обоснован способ определения пространственного разрешения и постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры посредством формул, связывающих данные показатели с конструкцией кабельных изделий, в которые они интегрированы. Применение данных формул позволяет не только определять возможности существующих моделей оптоволоконных кабелей, но и закладывать оптимальные показатели пространственной и временной детализации температурного поля на этапе проектирования кабеля.

Глава IV. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ОПТОВОЛОКОННЫХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Важность многостороннего моделирования процессов теплообмена в реальной скважине на уровне лабораторных испытаний состоит в том, что достоверность реальных исследований зависит целиком и полностью от функциональных возможностей используемых установок (стендов). На основе стендов-аналогов, представленных в первой главе работы, автор выделил ряд ключевых опций лабораторных установок, которые необходимо объединить в одном стенде: конструктивное исполнение обсадной колонны (рабочего объёма) в виде металлических труб, регулирование расхода и состава жидкости (в плане процентного содержания нефтепродуктов), регулирование траектории ствола. Изученные образцы лабораторных установок, ввиду особенностей их технического исполнения, не обладают полным набором упомянутых возможностей, крайне необходимых для полноценного учёта изменчивости восприятия температурного поля оптоволоконными распределёнными датчиками [46, 114, 123]. Главным образом данная необходимость связана с высоким приоритетом задачи по реализации созданной автором методики «Исследование скорости остывания кабеля» в максимально достоверном виде. Таким образом, для выполнения **третьего защищаемого положения** автором была сконструирована лабораторная установка-имитатор скважины.

4.1. Конструкция лабораторной установки-имитатора скважины

Лабораторная установка-имитатор скважины 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 в количестве трёх: 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, посредством вращающегося осевого механизма, позволяющего 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. Рабочий диапазон расхода циркуляционного насоса составляет от 0,0 до 19,2 м³/сут. Контроль нагрева жидкости обеспечивается посредством электронного блока управления (ЭБУ), соединённого с тэнами и датчиком температуры. Установка с насосом и с резервным баком объединены в единый контур циркуляционными каналами, оснащёнными промежуточными вентилями и кранами [76]. Схематически установка представлена на рис. 56.

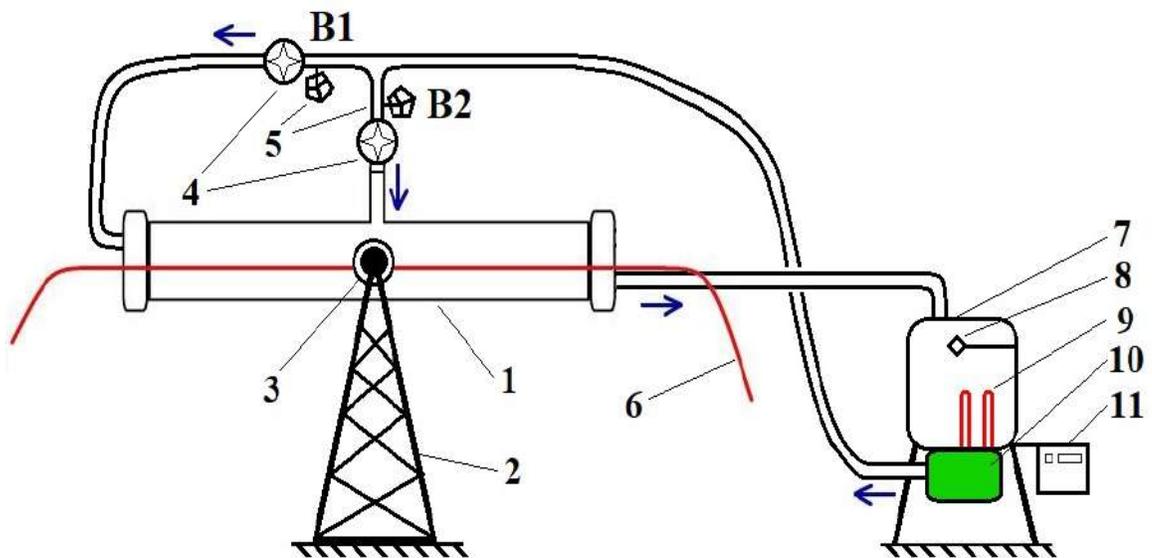


Рисунок 56 – Схема лабораторной установки-имитатора скважины: 1 – труба Ø 168 мм; 2 – опорные стойки; 3 – осевой механизм регулировки зенитного угла; 4 – датчики расхода жидкости; 5 – регулировочные вентили; 6 – геофизический кабель; 7 – резервный бак; 8 – эталонный термометр; 9 – тэны; 10 – насос; 11 – ЭБУ

Длина рабочего объёма установки в 3 м обеспечивает оптимальную детализацию моделируемых процессов для оптоволоконного распределённого датчика температуры. В предыдущем разделе для оптоволоконных датчиков, эксплуатируемых в кабельных изделиях различных моделей, были определены значения пространственного разрешения. У образцов, обладающих максимальным содержанием теплоизолирующих слоёв, данный показатель не

превышает половину длины данной трубы [77]. Соотношение расхода и скорости потока жидкости определяется через пересчётный геометрический коэффициент $2,36 \text{ сут}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Данный коэффициент учитывает всё свободное сечение трубы при внутреннем её диаметре в 150 мм. При заполнении установки различными элементами пересчётный геометрический коэффициент будет определяться в зависимости от габаритов объектов, заполняющих пространство трубы, по формуле

$$K_{\text{ПГ}} = \frac{V}{W} = \frac{W}{S_{\text{своб}} \cdot W \cdot 24} = \frac{1}{24 \cdot S_{\text{своб}}}; \quad (4.1)$$

где $K_{\text{ПГ}}$ – пересчётный геометрический коэффициент для перевода скорости потока в расход, $\text{сут}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; V – скорость потока в трубе, м/ч; W – расход жидкости в установке, $\text{м}^3/\text{сут}$; $S_{\text{своб}}$ – свободная площадь сечения трубы, м^2 .

4.2. Лабораторные испытания с созданной установкой-имитатором скважины

При помощи созданной лабораторной установки-имитатора скважины произведены вариативные испытания опытного образца геофизического кабеля, предназначенного для исследований скважин методом ОР-СТД. Задача испытаний в каждой из вариаций состояла в получении корреляционных зависимостей при фиксированном зенитном угле, фоновой температуре и содержании нефтепродуктов, но с переменным расходом (дебитом). В качестве дополнительного оборудования использовалось: станция «Silixa Ultima» и лабораторный автотрансформатор регулируемый (ЛАТР). Соотношение расхода и скорости потока жидкости определялось исходя из свободного сечения трубы при учёте её внутреннего диаметра в 150 мм и внешнего диаметра опытного образца геофизического кабеля в 14,5 мм. Пересчётный геометрический коэффициент составил $2,38 \text{ сут}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Схема циркуляции жидкости в установке установлена продольная, т. е. вентиль В2 находится в закрытом состоянии на постоянной основе, а подача и регулировка расхода жидкости осуществляется только через вентиль В1. Это связано с тем, что в скважине температурная аномалия от смешивания локального потока из

интервала притока с основным потоком жидкости в скважине локализуется по глубине выше относительно местоположения работающего интервала. Таким образом, событие в установке будет регистрироваться полностью, за счёт чего устраняется возможность частичной утраты информативности при проведении лабораторных испытаний.

Порядок проведения испытаний выглядел следующим образом. Опытный образец геофизического кабеля предварительно помещался в установку, заполненную до предела жидкостью на водной основе, после этого она фиксировалась в положении зенитного угла 0° . Запускался насос и ЭБУ для нагрева и поддержания первой фоновой температуры в установке (15°C). Посредством вентиля В1 последовательно устанавливался регулируемый расход в диапазоне от 0,0 до $19,2\text{ м}^3/\text{сут}$, соответствующий диапазону скоростей потока от 0,0 до 45,7 м/ч. После задания расхода вентилем В1 кабель нагревался на 10°C при помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТР). При достижении необходимого перегрева напряжение снималось, и производилась регистрация процесса остывания кабеля на времени накопления 20 секунд по ОРДТ одновременно в двух модулях: из нержавеющей стали (НС) и полиизобутиленовом (ПБТ). При остывании кабеля до фонового значения температуры – вентилем В1 устанавливалось следующее значение расхода и испытания повторялись. После регистрации процесса остывания кабеля на заданном диапазоне расходов при зенитном угле в 0° , испытания повторялись при зенитных углах 45° и 90° .

После лабораторных испытаний в трёх вариациях фоновая температура жидкости в установке повышалась до 45°C для повторения измерений в аналогичном порядке. По завершении лабораторных испытаний при двух фоновых температурах на воде установка проходила процедуру осушения и замены воды на дизельное топливо (ДТ), используемого в качестве эквивалента нефти (содержание нефтепродуктов в скважинной жидкости = 100 %). После заполнения установки дизельным топливом испытания повторялись в том же порядке, что и на воде. Результаты испытаний представлены в табл. 10

Данные испытаний опытной модели геофизического кабеля на воде и на
дизельном топливе

| Модуль ОРДТ | | НС | | | | | | ПБТ | | | | | | |
|----------------------|------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $T_{\text{д}}$, °C | | 15 | | | 45 | | | 15 | | | 45 | | | |
| Зенитный угол, ° | | 0 | 45 | 90 | 0 | 45 | 90 | 0 | 45 | 90 | 0 | 45 | 90 | |
| Скорость потока, м/ч | | Скорости остывания кабеля на воде ($K_{CH} = 0\%$), °C/мин | | | | | | | | | | | | |
| | | 45,7 | 2,64 | 2,99 | 3,26 | 2,86 | 3,10 | 3,34 | 1,48 | 1,73 | 1,85 | 1,60 | 1,78 | 1,83 |
| | | 40,0 | 2,53 | 2,84 | 3,08 | 2,74 | 2,95 | 3,16 | 1,43 | 1,64 | 1,75 | 1,54 | 1,70 | 1,75 |
| | | 33,9 | 2,42 | 2,68 | 2,88 | 2,62 | 2,80 | 2,97 | 1,37 | 1,56 | 1,65 | 1,48 | 1,61 | 1,65 |
| | | 27,1 | 2,29 | 2,50 | 2,66 | 2,47 | 2,62 | 2,75 | 1,31 | 1,45 | 1,53 | 1,41 | 1,51 | 1,55 |
| | | 20,6 | 2,17 | 2,33 | 2,45 | 2,34 | 2,45 | 2,55 | 1,25 | 1,36 | 1,41 | 1,34 | 1,42 | 1,44 |
| | | 13,7 | 2,04 | 2,15 | 2,23 | 2,19 | 2,27 | 2,34 | 1,18 | 1,26 | 1,29 | 1,27 | 1,32 | 1,34 |
| | | 7,2 | 1,92 | 1,98 | 2,02 | 2,06 | 2,10 | 2,13 | 1,12 | 1,16 | 1,18 | 1,20 | 1,23 | 1,24 |
| 0,0 | 1,79 | 1,79 | 1,79 | 1,91 | 1,91 | 1,91 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,12 | 1,12 | 1,12 | | |
| Зенитный угол, ° | | 0 | 45 | 90 | 0 | 45 | 90 | 0 | 45 | 90 | 0 | 45 | 90 | |
| Скорость потока, м/ч | | Скорости остывания кабеля на дизельном топливе ($K_{CH} = 100\%$), °C/мин | | | | | | | | | | | | |
| | | 45,7 | 1,37 | 1,45 | 1,52 | 1,48 | 1,57 | 1,65 | 0,92 | 0,96 | 0,99 | 0,97 | 1,04 | 1,07 |
| | | 40,0 | 1,34 | 1,42 | 1,47 | 1,46 | 1,54 | 1,61 | 0,90 | 0,94 | 0,97 | 0,96 | 1,02 | 1,05 |
| | | 33,9 | 1,32 | 1,38 | 1,43 | 1,44 | 1,50 | 1,57 | 0,89 | 0,92 | 0,95 | 0,95 | 1,00 | 1,03 |
| | | 27,1 | 1,29 | 1,34 | 1,37 | 1,41 | 1,46 | 1,51 | 0,87 | 0,90 | 0,92 | 0,94 | 0,98 | 1,00 |
| | | 20,6 | 1,26 | 1,29 | 1,32 | 1,39 | 1,43 | 1,46 | 0,86 | 0,88 | 0,89 | 0,93 | 0,96 | 0,98 |
| | | 13,7 | 1,23 | 1,25 | 1,27 | 1,36 | 1,39 | 1,41 | 0,84 | 0,85 | 0,86 | 0,92 | 0,94 | 0,95 |
| | | 7,2 | 1,20 | 1,21 | 1,22 | 1,34 | 1,35 | 1,36 | 0,83 | 0,83 | 0,84 | 0,91 | 0,92 | 0,93 |
| 0,0 | 1,16 | 1,16 | 1,16 | 1,31 | 1,31 | 1,31 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | | |

Данные испытаний опытной модели кабеля согласуются с результатами экспериментов, проведённых ранее [73, 76, 102]. Подтверждена возможность локализации интервалов притока флюидов и дифференциации их по расходу. Показано, что при разных фоновых температурах на процесс остывания кабеля оказывает влияние траектория ствола. На представленных графиках (рис. 57) чётко отображено, что с ростом зенитного угла остывание происходит быстрее, и использование дизельного топлива позволило выявить влияние содержания нефтепродуктов в скважинной жидкости на процесс потери тепла кабелем. Группы графиков, полученные на воде и на дизельном топливе, находятся на заметном отдалении друг от друга, что обусловлено различием теплофизических свойств данных жидкостей, которые необходимо учитывать для корректного определения расхода.

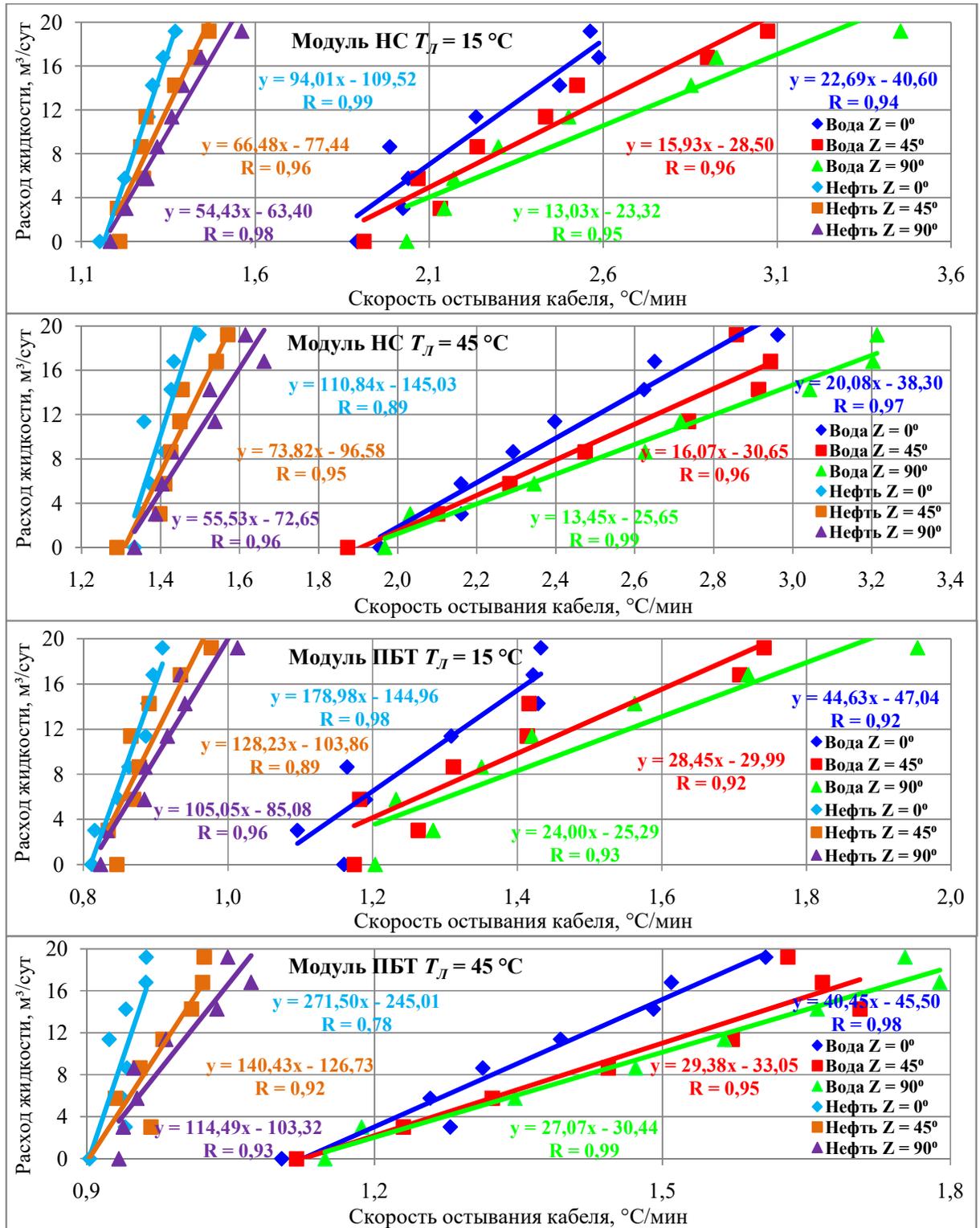


Рисунок 57 – Корреляционные зависимости расхода жидкости от скорости остывания кабеля при фоновых температурах (T_L) 15 и 45 °C, зенитных углах (Z) 0°, 45°, 90° для ОРДТ в модулях НС и ПБТ, полученных на воде ($K_{CH} = 0\%$) и на дизельном топливе ($K_{CH} = 100\%$)

В результате испытаний получено 2 набора корреляционных зависимостей, состоящих каждый из 12 уравнений типа « $y = A \cdot x - B$ » для двух оптоволоконных модулей на жидкостях, в одной из которых отсутствуют нефтепродукты, а в другой их содержание максимальное. Экспериментальные коэффициенты A и B данных уравнений приведены в табл. 11.

Таблица 11

Коэффициенты уравнений корреляционных зависимостей для модулей ОРДТ из нержавеющей стали (НС) и полиизобутилена (ПБТ)

| Модуль ОРДТ | | НС | | | | ПБТ | | | |
|--------------|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $K_{сн}, \%$ | $T_{л}, ^\circ\text{C}$ | 15 | | 45 | | 15 | | 45 | |
| | $Z, ^\circ$ | A | B | A | B | A | B | A | B |
| 0 | 0 | 22,69 | 40,60 | 20,08 | 38,30 | 44,63 | 47,04 | 40,45 | 45,50 |
| | 45 | 15,93 | 28,50 | 16,07 | 30,65 | 28,45 | 29,99 | 29,38 | 33,05 |
| | 90 | 13,03 | 23,32 | 13,45 | 25,65 | 24,00 | 25,29 | 27,07 | 30,44 |
| 100 | 0 | 94,01 | 109,52 | 110,84 | 145,03 | 178,98 | 144,96 | 271,50 | 245,01 |
| | 45 | 66,48 | 77,44 | 73,82 | 96,58 | 128,23 | 103,86 | 140,43 | 126,73 |
| | 90 | 54,43 | 63,40 | 55,53 | 72,65 | 105,05 | 85,08 | 114,49 | 103,32 |

Для вывода объединённых рабочих формул для каждого оптоволоконного модуля к коэффициентам A и B из названных уравнений применён метод множественной регрессии по двум переменным: фоновой температуре и зенитному углу. На выходе получены промежуточные уравнения на воде и дизельном топливе (ДТ) для модулей из нержавеющей стали (НС) и полиизобутилена (ПБТ):

$$W(\text{НС на воде}) = (22,14 - 8,04 \cdot \sin Z - 0,02 \cdot T_{л}) \cdot V_{осм} - (38,86 - 14,76 \cdot \sin Z + 0,02 \cdot T_{л}); \quad (4.2)$$

$$W(\text{НС на ДТ}) = (94,26 - 47,08 \cdot \sin Z + 0,28 \cdot T_{л}) \cdot V_{осм} - (106,30 - 58,77 \cdot \sin Z + 0,71 \cdot T_{л}); \quad (4.3)$$

$$W(\text{ПБТ на воде}) = (42,32 - 17,42 \cdot \sin Z - 0,002 \cdot T_{л}) \cdot V_{осм} - (43,74 - 18,85 \cdot \sin Z + 0,07 \cdot T_{л}); \quad (4.4)$$

$$W(\text{ПБТ на ДТ}) = (185,56 - 117,83 \cdot \sin Z + 1,27 \cdot T_{л}) \cdot V_{осм} - (146,45 - 102,94 \cdot \sin Z + 1,57 \cdot T_{л}); \quad (4.5)$$

где W – объёмный расход жидкости, м³/сут; $V_{ост}$ – скорость остывания кабеля, °С/мин; $T_{л}$ – локальная температура в интервале исследований, °С; Z – зенитный угол в интервале исследований, °.

В промежуточных уравнениях по каждому из оптоволоконных модулей прослеживается шесть коэффициентов (табл. 12). Для обеспечения возможности учёта состава жидкости в стволе скважины в каждом коэффициенте произведена линейная корреляция от K_{CH} . Уравнения корреляции включены в конечные формулы.

Таблица 12

Коэффициенты промежуточных уравнений

| Модуль ОРДТ | $K_{CH}, \%$ | Коэффициенты, п/п | | | | | |
|-------------|--------------|-------------------|---------|--------|--------|---------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| НС | 0 | 22,14 | -8,04 | -0,02 | 38,86 | -14,76 | 0,02 |
| | 100 | 94,26 | -47,08 | 0,28 | 106,30 | -58,77 | 0,71 |
| ПБТ | 0 | 42,32 | -17,42 | -0,002 | 43,74 | -18,85 | 0,07 |
| | 100 | 185,56 | -117,83 | 1,27 | 146,45 | -102,94 | 1,57 |

Сопряжение двенадцати экспериментальных уравнений в одно, в котором фигурирует скорость остывания, температура фона, зенитный угол и содержание нефтепродуктов, неминуемо приведёт к нестабильной работе конечных формул. Для нормализации работы в конечные формулы введены, так называемые стабилизационные члены уравнения, и добавлена общая поправка по расходу (скорости потока) за сдвиг нуля скорости остывания кабеля, о которой упоминалось во второй главе работы. Для универсализации формул в отношении скважин любого используемого диаметра расход преобразован в скорость потока посредством пересчётного геометрического коэффициента установки 2,38 сут/(м² · ч):

$$\begin{aligned}
 V_{ном} (НС) = & 2,38 \cdot [(0,71 \cdot K_{CH} + 22,14 - (0,39 \cdot K_{CH} + 8,04) \cdot \sin Z + \\
 & + (0,003 \cdot K_{CH} - 0,02) \cdot T_{л}) \cdot V_{ост} \cdot (1,03 - 0,002 \cdot T_{л}) - (0,67 \cdot K_{CH} + \\
 & + 38,86 - (0,44 \cdot K_{CH} + 14,76) \cdot \sin Z + (0,003 \cdot K_{CH} - 0,02) \cdot T_{л}) - \\
 & - (0,11 \cdot K_{CH} \cdot (0,1 + 0,02 \cdot T_{л})) + 0,02 \cdot e^{0,10 \cdot T_{л}} - 1,8 \cdot \sin Z + \Delta W];
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

$$\begin{aligned}
 V_{nom} (ПБТ) = & 2,38 \cdot [(1,43 \cdot K_{CH} + 42,32 - (1,00 \cdot K_{CH} + 17,42) \cdot \sin Z + \\
 & + (0,01 \cdot K_{CH} - 0,002) \cdot T_L] \cdot V_{ocm} \cdot (1 - (T_L - 15) \cdot 0,001) - (1,03 \cdot K_{CH} + \\
 & + 43,74 - (0,84 \cdot K_{CH} + 18,85) \cdot \sin Z + (0,01 \cdot K_{CH} - 0,002) \cdot T_L) - 10 \cdot \\
 & \cdot K_{CH} / 100 \cdot (1 - ((45 - T_L) / 30) \cdot 0,6) + K_{CH} \cdot (T_L \cdot 0,02 \cdot (45 - T_L) / 30) - 2 \cdot \\
 & \cdot (45 - T_L) / 30 \cdot \sin Z - 0,02 \cdot (100 - K_{CH}) \cdot (T_L - 15) / 30 + \Delta W];
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

где V_{nom} – скорость потока жидкости, м/ч; W – объёмный расход жидкости, м³/сут; V_{ocm} – скорость остывания кабеля, °С/мин; T_L – локальная температура в интервале исследований, °С; Z – зенитный угол в интервале исследований, °; K_{CH} – коэффициент содержания нефтепродуктов в скважинной жидкости в интервале исследований, %; ΔW – поправка по расходу за сдвиг нуля скорости остывания, м³/сут, e – число иррациональное $\approx 2,72$.

Полученные конечные формулы подверглись сравнительной оценке с номинальными значениями скорости потока, использованными при проведении лабораторных испытаний. Достигнуты следующие результаты (табл. 13, 14)

Таблица 13

Погрешность работы выведенной конечной формулы для модуля НС

| Отклонения от номинальных значений скорости потока, м/ч | | | | | | | | | | |
|---|--------------|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Z° | $K_{CH}, \%$ | $T_L, ^\circ C$ | Номинальные значения скорости потока, м/ч | | | | | | | |
| | | | 45,7 | 40,0 | 33,9 | 27,1 | 20,6 | 13,7 | 7,2 | 0,0 |
| 0 | 0 | 15 | 0,42 | 0,20 | -0,04 | -0,31 | -0,57 | -0,83 | -1,09 | -1,37 |
| 45 | 0 | 15 | 0,48 | 0,55 | 0,62 | 0,70 | 0,77 | 0,86 | 0,93 | 1,02 |
| 90 | 0 | 15 | -0,55 | -0,23 | 0,11 | 0,49 | 0,86 | 1,24 | 1,60 | 2,00 |
| 0 | 0 | 45 | -3,82 | -3,88 | -3,95 | -4,03 | -4,11 | -4,19 | -4,26 | -4,35 |
| 45 | 0 | 45 | 2,54 | 1,99 | 1,40 | 0,73 | 0,10 | -0,57 | -1,20 | -1,90 |
| 90 | 0 | 45 | 3,03 | 2,54 | 2,02 | 1,43 | 0,87 | 0,29 | -0,27 | -0,89 |
| 0 | 100 | 15 | 1,40 | 1,61 | 1,83 | 2,08 | 2,31 | 2,56 | 2,80 | 3,06 |
| 45 | 100 | 15 | 1,08 | 0,88 | 0,67 | 0,42 | 0,19 | -0,05 | -0,28 | -0,53 |
| 90 | 100 | 15 | 1,41 | 0,99 | 0,53 | 0,02 | -0,47 | -0,99 | -1,48 | -2,02 |
| 0 | 100 | 45 | -0,20 | -0,79 | -1,42 | -2,12 | -2,80 | -3,50 | -4,18 | -4,92 |
| 45 | 100 | 45 | 0,19 | -0,26 | -0,73 | -1,26 | -1,76 | -2,29 | -2,80 | -3,35 |
| 90 | 100 | 45 | -2,39 | -2,43 | -2,48 | -2,52 | -2,57 | -2,62 | -2,66 | -2,71 |
| Средняя абсолютная погрешность работы формулы, м/ч | | | | | | | | | ±1,61 | |

Погрешность работы выведенной конечной формулы для модуля ПБТ

| Отклонения от номинальных значений скорости потока, м/ч | | | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Z° | $K_{сн}, \%$ | $T_{л}, ^{\circ}C$ | Номинальные значения скорости потока, м/ч | | | | | | | |
| | | | 45,7 | 40,0 | 33,9 | 27,1 | 20,6 | 13,7 | 7,2 | 0,0 |
| 0 | 0 | 15 | 0,34 | 0,04 | -0,28 | -0,64 | -0,98 | -1,34 | -1,68 | -2,06 |
| 45 | 0 | 15 | -1,95 | -1,64 | -1,32 | -0,96 | -0,61 | -0,24 | 0,11 | 0,49 |
| 90 | 0 | 15 | -0,12 | 0,09 | 0,31 | 0,56 | 0,79 | 1,04 | 1,28 | 1,54 |
| 0 | 0 | 45 | -3,04 | -2,91 | -2,78 | -2,63 | -2,48 | -2,33 | -2,19 | -2,03 |
| 45 | 0 | 45 | -1,32 | -1,34 | -1,36 | -1,38 | -1,40 | -1,43 | -1,45 | -1,47 |
| 90 | 0 | 45 | 3,45 | 2,86 | 2,24 | 1,54 | 0,87 | 0,17 | -0,50 | -1,24 |
| 0 | 100 | 15 | -2,31 | -1,49 | -0,63 | 0,35 | 1,28 | 2,26 | 3,20 | 4,23 |
| 45 | 100 | 15 | -1,17 | -1,48 | -1,81 | -2,18 | -2,54 | -2,91 | -3,26 | -3,65 |
| 90 | 100 | 15 | 3,85 | 2,85 | 1,80 | 0,60 | -0,53 | -1,72 | -2,86 | -4,11 |
| 0 | 100 | 45 | 3,72 | 3,00 | 2,25 | 1,39 | 0,57 | -0,28 | -1,10 | -2,00 |
| 45 | 100 | 45 | -5,10 | -4,47 | -3,80 | -3,04 | -2,32 | -1,57 | -0,84 | -0,05 |
| 90 | 100 | 45 | -2,30 | -1,92 | -1,51 | -1,05 | -0,62 | -0,16 | 0,28 | 0,76 |
| Средняя абсолютная погрешность работы формулы, м/ч | | | | | | | | | ±1,69 | |

Средние значения абсолютных погрешностей формул в определении скоростей потока для модулей НС и ПБТ составляют $\pm 1,61$ и $\pm 1,69$ м/ч соответственно, погрешности в пересчёте на расход жидкости составляют $\pm 0,68$ и $\pm 0,71$ м³/сут соответственно, что свидетельствует о добротности действия формул. Дальнейшим этапом проверки эффективности полученных формул является их применение при исследованиях в действующей скважине.

4.3. Геофизические исследования в действующей добывающей скважине

Опытная модель геофизического кабеля использовалась для проведения исследований методом оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии (ОР-СТД) на территории Пермского края в действующей нефтедобывающей скважине Б-1132. Исследования проводились в процессе постановки скважины на мониторинг, с предварительным спуском геофизического кабеля под глубинное оборудование, штанговый глубинный

насос (ШГН). Посредством работы ШГН скважина выводилась на рабочий режим, и в данный временной цикл осуществлялось проведение исследований методом ОР-СТД.

Измерения производились по металлическому оптоволоконному модулю (НС), использовались две методики: исследование формы кривой СТД и исследование скорости остывания кабеля. Здесь следует уточнить относительно свободного пространства в зоне оптоволоконных исследований с нагревом. Внутренний диаметр эксплуатационной колонны в данной скважине составлял 130,6 мм, диаметр используемого оптоволоконного кабеля остался прежним (14,5 мм). Нижняя часть глубинного оборудования, размещённого в стволе, находилась выше зоны расположения нагревательного элемента в геофизическом кабеле.

Для пересчёта скорости потока жидкости, определённой по выведенной ранее формуле (4.6), в расход жидкости для колонны с текущим диаметром использовалось следующее значение коэффициента (K_{III}):

$$K_{III} = \frac{1}{24 \cdot S_{своб}} = \frac{1}{24 \cdot (3,14 \cdot 0,0653^2 - 3,14 \cdot 0,00725^2)} = 3,15; \quad (4.8)$$

где K_{III} – пересчётный геометрический коэффициент для перевода скорости потока в расход, сут/(м² · ч); $S_{своб}$ – свободная площадь сечения трубы, м².

Сначала была применена методика исследования формы кривой СТД, регистрация термограммы произведена без перегрева кабеля. Затем произведён перегрев кабеля на 3 °С относительно температуры окружающей среды, что обеспечило оптимальную локализацию работы интервалов перфорации. По достижении стабильного перегрева кабеля зарегистрирована термограмма, отражающая эффект нагрева – кривая СТД. По форме кривой СТД выделено четыре интенсивно работающих интервала: 1449,5 – 1453,0 м, 1471,0 – 1472,5 м, 1486,0 – 1488,0 м и 1519,0 – 1524,0 м. Все интервалы определены как отдающие, и кроме них в зоне видимости нагреваемого участка кабеля присутствует также пятый интервал 1460,0 – 1464,5 м, который является изолированным по данным предприятия недропользователя, и по применённой

методике он также определён как нерабочий (рис. 58). После записи кривой с нагревом рассчитана разностная температурная кривая, по которой осуществлена аппроксимация дебитов по работающим интервалам относительно общего дебита скважины по данным эталонного измерителя. В качестве эталона использовался поверхностный датчик расхода, при интерпретации данных это привело к закономерному результату [76].

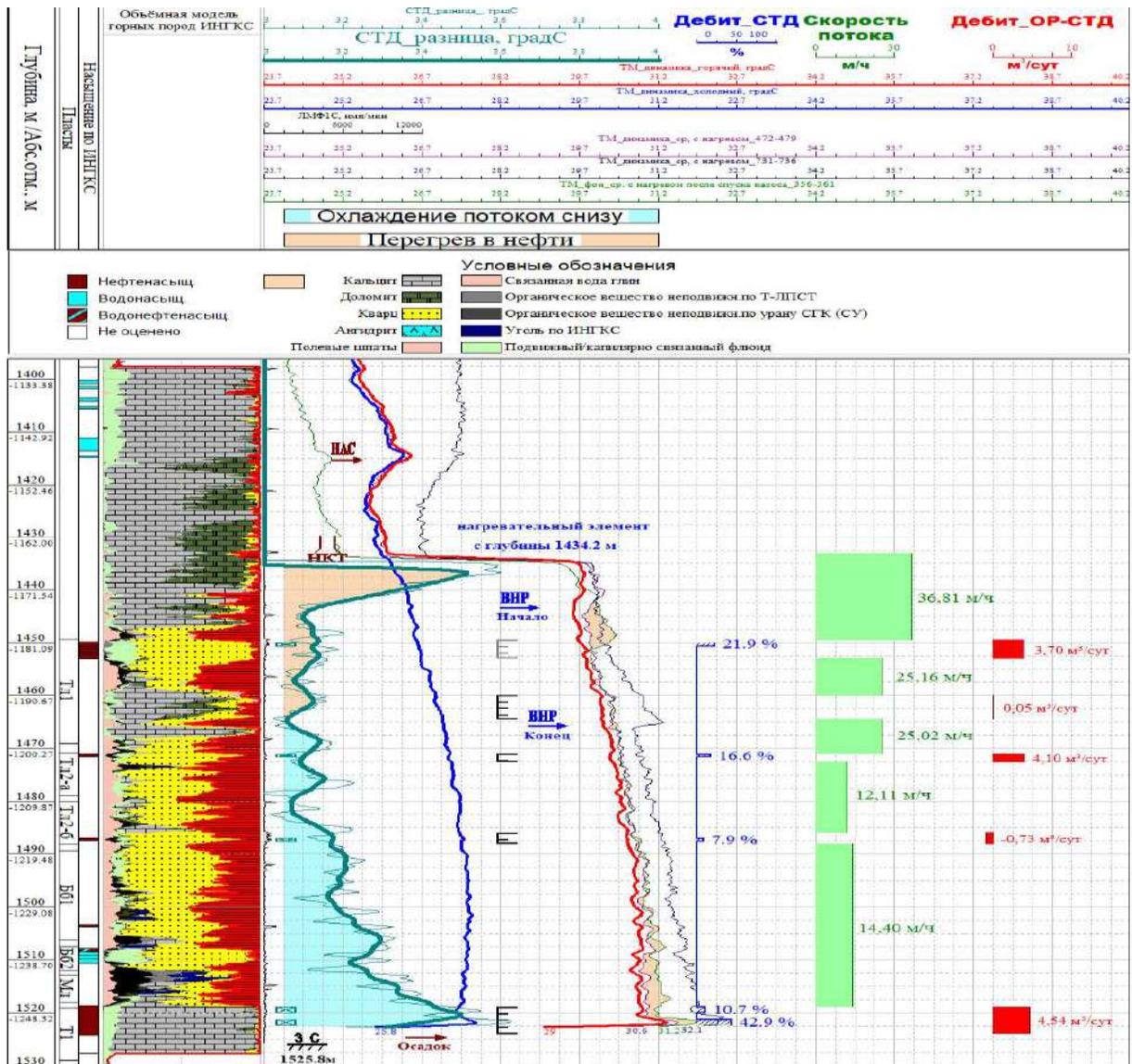


Рисунок 58 – Планшет данных исследований методом ОР-СТД в скважине Б-1132

Общий дебит по скважине был распределён по четырём локализованным рабочим интервалам перфорации пропорционально значениям их температурных аномалий (табл. 15).

Поинтервальный и общий дебит всех интервалов перфорации в скважине
Б-1132 по методике исследования формы кривой СТД

| Интервал перфорации, м | Общий дебит, м ³ /сут | Поинтервальный дебит, м ³ /сут |
|------------------------|----------------------------------|---|
| 1449,5 - 1453,0 | 11,6 | 2,7 |
| 1460,0 - 1464,5 | 8,9 | 0,0 |
| 1471,0 - 1472,5 | 8,9 | 1,3 |
| 1486,0 - 1488,0 | 7,6 | 1,0 |
| 1519,0 - 1524,0 | 6,6 | 6,6 |

Затем были проведены работы по методике исследования скорости остывания кабеля. В отличие от предыдущего случая использовалась максимальная мощность источника питания для нагрева кабеля, что обеспечило перегрев около 4 °С относительно температуры окружающей среды. По достижении стабильного перегрева произведено отключение напряжения для регистрации процесса остывания кабеля на времени накопления 30 секунд в виде хронологически последовательных термограмм (рис. 59).

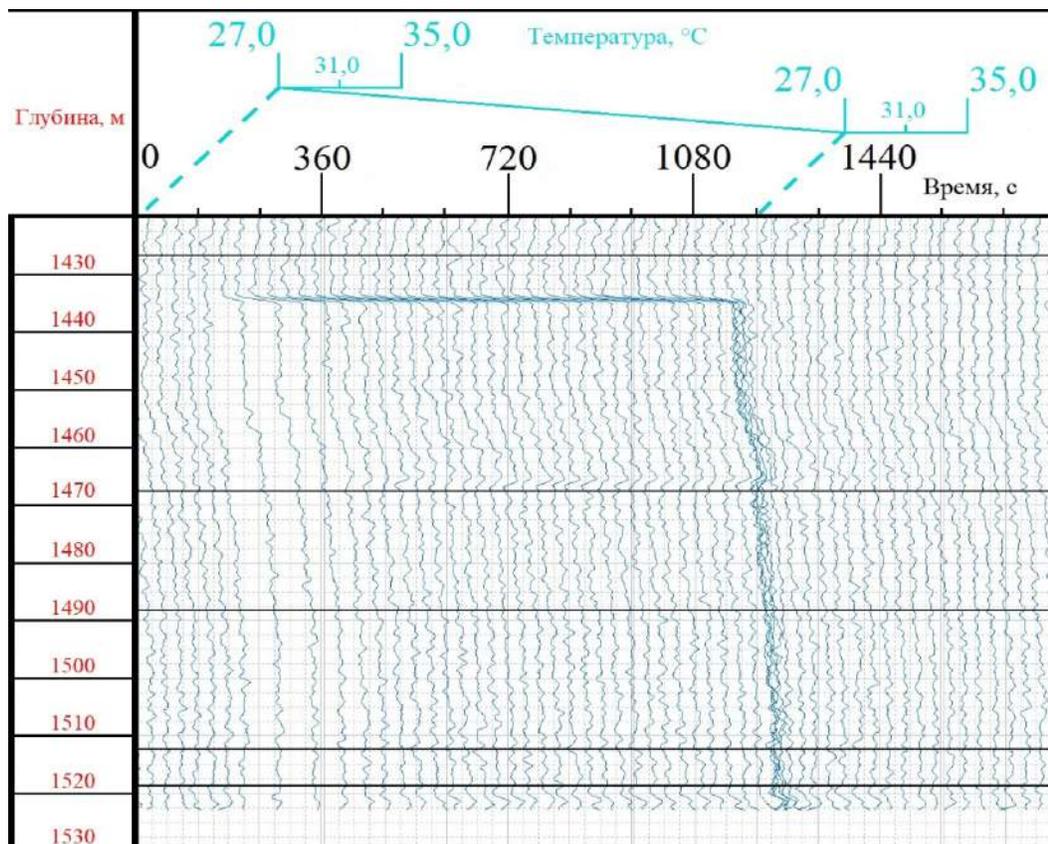


Рисунок 59 – Последовательные по времени термограммы остывания кабеля

Интерпретация выполнялась по конечной формуле (4.6), конкретизированной к опытной модели оптоволоконного геофизического кабеля. Для работы данной формулы необходимо четыре переменных, поэтому их нахождение осуществлялось следующим образом:

1) в пределах зон, расположенных выше каждого из существующих пяти интервалов перфорации и в зумпфе скважины выделены временные окна в 150 секунд. Начало окна отсчитывается с момента снятия напряжения с нагревательного элемента в кабеле, а конец – с завершения видимости процесса его остывания. В выделенных шести окнах рассчитаны **скорости остывания кабеля** за счёт определения соотношения суммарных потерь температуры и продолжительности временного интервала окна (150 секунд). Относительно скорости остывания определённой в зумпфе скважины внесена поправка за сдвиг нуля;

2) данные инклинометрии, **зенитный угол**, получены из архивных данных по скважине;

3) значения **локальной температуры в интервале исследований** определены при помощи используемого оптоволоконного распределённого датчика температуры по данным термограмм без перегрева кабеля;

4) **содержание нефтепродуктов** в скважинной жидкости напротив каждого из интервалов перфорации задано автором на основе данных исследований оптоволоконной распределённой термометрии, проведённых параллельно и допускающих конкретное распределение фаз воды и нефти в стволе скважины на момент исследований с нагревом.

Использование всех переменных привело к получению следующих значений скорости потока жидкости, пересчитанных в суммарные и поинтервальные расходы (дебиты) (табл. 16). Согласно расчётам интервал 1486,0 – 1488,0 м определён как поглощающий, в отличие от предыдущей методики. При этом характер работы данного интервала подтверждается термограммами оптоволоконной распределённой термометрии, зарегистрированными после проведения исследований методом ОР-СТД.

Изолированный интервал 1460,0 – 1464,5 м определён как нерабочий, что соответствует предварительным данным по скважине. Остальные три интервала являются отдающими с отличающимися значениями дебитов, причём значение суммарного дебита по разработанной методике в 11,69 м³/сут является близким к данным предприятия недропользователя (11,6 м³/сут), что является практическим подтверждением добротности авторской методики исследования и полученной для её применения формулы (4.6) [82].

Таблица 16

Поинтервальный и общий дебит всех интервалов перфорации в скважине Б-1132 по методике исследования скорости остывания кабеля

| Интервал перфорации, м | $V_{ост}$, °C/мин | T_L , °C | K_{CH} , % | Z , ° | $V_{ном}$, м/ч | Общий дебит, м ³ /сут | Поинтервальный дебит, м ³ /сут |
|------------------------|--------------------|------------|--------------|---------|-----------------|----------------------------------|---|
| 1449,5 - 1453,0 | 1,28 | 27,1 | 50 | 16,2 | 36,81 | 11,69 | 3,70 |
| 1460,0 - 1464,5 | 1,21 | 27,1 | 40 | 16,2 | 25,16 | 7,99 | 0,05 |
| 1471,0 - 1472,5 | 1,21 | 27,5 | 40 | 16,2 | 25,02 | 7,94 | 4,10 |
| 1486,0 - 1488,0 | 1,14 | 28,5 | 0 | 16,2 | 12,11 | 3,84 | -0,73 |
| 1519,0 - 1524,0 | 1,19 | 28,8 | 0 | 16,2 | 14,40 | 4,57 | 4,54 |
| Зумпф | 0,87 | 28,8 | 0 | 16,2 | 0,10 | 0,03 | - |

Выводы по третьему защищаемому положению

1. Сконструирована лабораторная установка, обладающая достаточным количеством функциональных возможностей для моделирования регулируемых физических условий скважинной среды, таких как: зенитный угол, расход (скорость потока), фоновая температура среды и содержание нефтепродуктов в скважинной жидкости; что обеспечивает оптимальный учёт изменчивости восприятия оптоволоконными распределёнными датчиками температурного поля в реальной скважине.

2. Произведено апробирование созданной лабораторной установки-имитатора скважины, особенность которого состояла в повышении достоверности и дополнительном подтверждении пригодности разработанной автором методики количественного определения общего и поинтервального дебитов «Исследование скорости остывания кабеля», достигнутых за счёт

задействования полного комплекса функциональных возможностей используемой установки. Разработанная методика позволяет, главным образом, определить характер работы интервалов перфорации, что не учитывается при использовании методики исследования формы кривой СТД. Учёт состава скважинной жидкости при интерпретации данных позволяет точнее оценить вклад пластов с разной нефтенасыщенностью в общий дебит по скважине.

Полученные формулы, учитывающие состав флюида для интерпретации данных оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии по скорости остывания кабеля, имеют диапазон применимости в геологических разрезах с температурными условиями до 45 °С и средними дебитами пластов. Для дальнейшего развития методики исследования по скорости остывания кабеля и созданной лабораторной установки необходимо расширить диапазоны её функциональных возможностей. Возможность моделирования температуры до 120 °С и генерации повышенных расходов позволит повысить информативность оптоволоконных систем и подготовить их для работы в других нефтедобывающих регионах, например, в Западной Сибири.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Разработан авторский вариант системы оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии на основе геофизического кабеля, обеспечивающего возможность проведения исследований стандартными точечными электронными приборами и оптоволоконными распределёнными датчиками температуры совместно с нагревом и без него.

2. Разработана и опробована в ограниченном формате новая методика проведения исследований методом оптоволоконной распределённой скважинной термокондуктивной дебитометрии «Исследование скорости остывания кабеля», которая отличается оперативностью проведения исследований и интерпретации данных, а также самостоятельностью в количественной оценке общего и поинтервального дебитов.

3. Определены показатели детализации, пространственное разрешение и постоянная времени, оптоволоконных распределённых датчиков температуры, интегрированных в кабельные изделия, широко применяемые для долговременного мониторинга в нефтедобывающих скважинах.

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

5. На основании экспериментальных данных обоснован способ определения пространственного разрешения и постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры посредством формул, связывающих данные показатели с конструкцией кабельных изделий, в которые они интегрированы. Полученные формулы позволяют прогнозировать возможности существующих оптоволоконных датчиков и закладывать

необходимые показатели детализации в создаваемые оптоволоконные геофизические кабели на этапе их проектирования.

6. Сконструирована лабораторная установка, обладающая достаточным количеством функциональных возможностей для моделирования регулируемых физических условий скважинной среды, таких как: зенитный угол, расход (скорость потока), фоновая температура среды и содержание нефтепродуктов в скважинной жидкости; что обеспечивает оптимальный учёт изменчивости восприятия оптоволоконными распределёнными датчиками температурного поля в реальной скважине.

7. Произведено апробирование созданной лабораторной установки-имитатора скважины, особенность которого состояла в повышении достоверности и дополнительном подтверждении пригодности разработанной автором методики количественного определения общего и поинтервального дебитов «Исследование скорости остывания кабеля», достигнутых за счёт задействования полного комплекса функциональных возможностей используемой установки.

Таким образом, цель диссертационной работы, состоящая в развитии оптоволоконной распределённой термометрии по расширению методического инструментария, последующей её адаптации к изучению динамических параметров скважинных потоков и определению детализационных показателей изучаемой среды, по совокупности решённых задач считается достигнутой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Российские источники:

1. Агафонов, Д. С. Оптимизация технологии паронагнетания при разработке залежей высоковязкой нефти / Д. С. Агафонов, Р. И. Сулейманов // Современные технологии в нефтегазовом деле - 2015: Сборник трудов международной научно-технической конференции: в 2 томах, Октябрьский, 13 марта 2015 года / Ответственный редактор В. Ш. Мухаметшин. Том 2. – Октябрьский: Аркаим (Уфа), 2015. – С. 3-9. – EDN UYEEJD.
2. Билинчук, А. В. Промыслово-геофизический контроль разработки низкопроницаемых пластов в скважинах со сложным заканчиванием. Опыт компании "Газпром нефть" / А. В. Билинчук, А. И. Ипатов, М. И. Кременецкий, А. Н. Ситников, А. А. Яковлев, А. В. Шурунов, Р. Р. Галеев, М. В. Колесников // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 12. – С. 34-37. – DOI 10.24887/0028-2448-2018-12-34-37. – EDN YPXOFF.
3. Буджогра, С. Исследование влияния равновесной конденсации на температурное поле в газоконденсатном пласте с учётом баротермического эффекта / С. Буджогра, Р. Ф. Шарафутдинов, И. В. Канафин // Тепловые процессы в технике. – 2024. – Т. 16, № 9. – С. 436-444. – EDN IAIUZP.
4. Буймистряк, Г. Я. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем: монография / Г. Я. Буймистряк. – СПб: ИВА, ГРОЦ Минатома, 2005. – 191 с.
5. Бухарин, М. А. Когерентный рэлеевский рефлектометр. Теперь и измерение температуры / М. А. Бухарин, В. В. Горбуленко, О. Е. Наний, С. П. Никитин, В. Н. Трещиков, Э. А. Фомиряков, Д. Р. Харасов // Фотон-экспресс. – 2019. – № 2 (154). – С. 14-19. – EDN KIISKF.
6. Бухмиров, В. В. Тепломассообмен: Учебное пособие / В. В. Бухмиров: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 2014. – 360 с.
7. Валиуллин, Р. А. Возможности формирования тепловой метки при двухфазном течении нефти и воды в горизонтальной скважине / Р. А.

Валиуллин, Р. Ф. Шарафутдинов, М. Ф. Закиров // НТВ "Каротажник". – 2014. – № 9 (243). – С. 27-31. – EDN SNHGAZ.

8. Валиуллин, Р. А. Геофизическое сопровождение методов увеличения нефтеотдачи длительно работающих горизонтальных скважин / Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин, Ю. В. Лукьянов // НТВ "Каротажник". – 2008. – № 10 (175). – С. 31-36. – EDN KDMNQZ.

9. Валиуллин, Р. А. Количественная интерпретация данных термогидродинамических исследований скважин при многофазных потоках / Р. А. Валиуллин, Р. Ф. Шарафутдинов, А. Ш. Рамазанов, Т. Р. Хабиров, В. В. Баженов, А. И. Имаев, О. Р. Привалова // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 61-65. – DOI 10.24887/0028-2448-2022-3-61-65. – EDN HZRRSU.

10. Валиуллин, Р. А. Особенности геофизических исследований действующих горизонтальных скважин / Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. – 2014. – Т. 19, № 1. – С. 21-28. – EDN RYBNIV.

11. Валиуллин, Р. А. Особенности проведения промыслово-геофизических исследований действующих горизонтальных скважин на Верхнечонском нефтегазоконденсатном месторождении / Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин, Я. И. Гордеев, С. О. Маслов // НТВ "Каротажник". – 2012. – № 10 (220). – С. 12-29. – EDN PDRUHH.

12. Валиуллин, Р. А. Оценка технического состояния паронагнетательной скважины по данным кратковременных динамических температурных исследований / Р. А. Валиуллин, Р. Ф. Шарафутдинов, Т. Р. Хабиров, Р. И. Рюков, П. А. Лютоев, П. С. Лагунов, П. Н. Гуляев, А. С. Петухов, А. И. Губина // Нефтепромысловое дело. – 2024. – № 5 (665). – С. 17-22. – EDN SDTAIH.

13. Валиуллин, Р. А. Тестирование скважинной аппаратуры на стенде – как обязательный элемент испытания при разработке и передаче её в производство / Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин, А. Р. Яруллин // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". – 2012. – № 3. – С. 300-308. – EDN RPFCAZ.

14. Васильев, А. Н. Возможности применения новой технологии греющего кабеля для предупреждения образования АСПО и ВВЭ на месторождениях Удмуртии / А. Н. Васильев // Сборник тезисов X Международной научно-практической конференции: СБОРНИК ТЕЗИСОВ КОНФЕРЕНЦИИ, Ижевск, 14 апреля 2020 года. – Ижевск: Издательский дом "Удмуртский университет", 2020. – С. 275-280. – EDN XBJBAZ.

15. Власов, А. И. Учет постоянной времени нагрева при разработке электростартера для запуска газотурбинных установок / А. И. Власов, Д. В. Коньшев, И. В. Коротков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 1. – С. 20-23. – EDN YZOTTV.

16. Гайворонский, И. Н. Повышение эффективности вторичного вскрытия продуктивных пластов / И. Н. Гайворонский, В. И. Костицын, А. Д. Савич, И. А. Черных, А. В. Шумилов // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 10. – С. 62-65. – EDN WZSTNH.

17. Гаязов, М. С. Оптимизация измерительной вазы тепловых меточных расходомеров / М. С. Гаязов, Р. К. Яруллин, Д. В. Космылин // Наука. Инновации. Технологии. – 2020. – № 1. – С. 33-46. – DOI 10.37493/2308-4758.2020.1.3. – EDN LTFHVV.

18. Гаязов, М. С. Применение метода 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. – DOI 10.21684/2411-7978-2020-6-1-150-165. – EDN BILJHR.

19. 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: Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, Пермь, 22-23 ноября 2018

года. Том Выпуск 1 (6). – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. – С. 155-161. – EDN YXPUWD.

20. Дмитриев, М. Д. Кабельные линии 6 – 500 кВ. Тепловой расчёт при коротком замыкании / М. Д. Дмитриев // Новости электротехники. – 2014. – № 5 (89). – С. 2-5.

21. Еремин, Н. А. Применение оптоволоконных технологий при нефтегазодобыче и обеспечении безопасности производственных объектов / Н. А. Еремин, В. Е. Столяров, Е. А. Сафарова, М. А. Бухарин, Д. А. Остапенко // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2022. – № 10 (591). – С. 5-17. – DOI 10.33285/2782-604X-2022-10(591)-5-17. – EDN NJQPLL.

22. Ермаков, В. Ф. Экспериментальные исследования постоянных времени нагрева и охлаждения изолированного проводника / В. Ф. Ермаков, А. С. Засыпкин // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: Материалы 14-ой Международной научно-практической конференции, Новочеркасск, 30 августа 2017 года. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, 2018. – С. 19-23. – EDN XWVPBJ.

23. Засыпкин, А. С. м. Постоянные времена нагрева и охлаждения проводов ВЛ: расчёт и эксперимент / А. С. м. Засыпкин, А. Д. Тетерин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 2. – С. 76-81. – DOI 10.17213/0136-3360-2015-2-76-81. – EDN TPIDTZ.

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: сборник научных трудов, Пермь, 19-20 ноября 2020 года. Том Выпуск 3 (8). – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. – С. 99-106. – EDN TVNANS.

25. Ивлев, В. И. Термический анализ. Ч. 1: Методы термического анализа: Учебное пособие / В. И. Ивлев, Н. Е. Фомин, В. А. Юдин – Саранск: Издательство Мордовского университета, 2017. – 44 с.

26. Ипатов, А. И. Промыслово-геофизический контроль эксплуатации горизонтальных скважин с помощью распределенных оптоволоконных стационарных измерительных систем / А. И. Ипатов, М. И. Кременецкий, И. С. Каешков, А. В. Буянов // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 12. – С. 69-71. – EDN XWOJEN.

27. Ипатов, А. И. Результативность глубинного распределенного оптоволоконного мониторинга работы горизонтальных скважин, оборудованных установками электроцентробежного насоса, в «Газпром нефти» / А. И. Ипатов, М. И. Кременецкий, Э. Р. Худиев, А. Ю. Губарев, С. А. Скопинов, В. В. Соловьёва, Д. Н. Гуляев // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № 12. – С. 58-63. – DOI 10.24887/0028-2448-2027-12-58-63. – EDN RRMZKS.

28. Ипатов, А. И. Стационарный мониторинг геофизических параметров при контроле разработки месторождений. Возможности, проблемы и перспективы использования / А. И. Ипатов, М. И. Кременецкий, И. С. Каешков, А. В. Буянов // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – № 2 (21). – С. 12. – DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-21.art12. – EDN VKTOEG.

29. Ипатов, А. И. Цифровые решения в области инструментального контроля разработки месторождений на основе распределенных оптоволоконных измерительных систем / А. И. Ипатов, М. И. Кременецкий, А. В. Андриановский, А. В. Трусов, Д. Н. Гуляев, В. В. Соловьёва // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 54-60. – DOI 10.24887/0028-2448-2022-3-54-60. – EDN FLEDTW.

30. Кабышев А. В. Электроснабжение объектов. Ч.1. Расчёт электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования: учебное пособие / А.В. Кабышев. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 185 с.

31. Квитченко, Г. В. Проведение ПВР на депрессии на скважинах Салымской группы месторождений / Г. В. Квитченко // Недропользование XXI век. – 2015. – № 6 (56). – С. 78-83. – EDN VVCLSV.

32. Ковригин, Л. А. Сравнительный анализ эффективности применения самонесущих греющих кабелей в САУ нефтяной скважиной с парафиновыми отложениями / Л. А. Ковригин, И. Б. Кухарчук // Прикладная математика, механика и процессы управления. – 2013. – Т. 1. – С. 322-329. – EDN TKLYEV.

33. Космылин, Д. В. Изучение распределения теплового поля точечного источника тепла при наличии радиального потока / Д. В. Космылин, Р. А. Валиуллин, Р. Ф. Шарафутдинов, Р. А. Галимов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 6 (160). – С. 4-12. – DOI 10.26730/1999-4125-2023-6-4-12. – EDN OJNSZQ.

34. Костицын, В. И. Комплексование 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. – DOI 10.24887/0028-2448-2019-9-108-113. – EDN USNJSE.

35. Кременецкий, М. И. Применение промыслово-геофизического контроля для оптимизации разработки месторождений нефти и газа. Том 2. Роль гидродинамико-геофизического мониторинга в управлении разработкой: монография / М. И. Кременецкий, А. И. Ипатов. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2020. – 756 с.

36. Кременецкий, М. И. Результативность долговременного температурного мониторинга при оценке расхода в добывающих и нагнетательных скважинах / М. И. Кременецкий, В. М. Кричевский, В. В. Соловьева, А. Н. Никонорова // Георесурсы. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 151-162. – DOI 10.18599/grs.2023.3.19. – EDN SMEARY.

37. 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. – EDN YQQNJV.

38. 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. – EDN WWONXF.

39. Лазуткин, Д. М. Информативность оптоволоконной измерительной системы для количественной оценки расхода в нефтяных скважинах / Д. М. Лазуткин, А. И. Ипатов, М. И. Кременецкий // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: материалы конференции, Новосибирск, 19-23 ноября 2018 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2018. – С. 293-295. – EDN PPRKGL.

40. 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. – DOI 10.24887/0028-2448-2022-8-94-99. – EDN ERJIMB.

41. Лапшина, Ю. В. Результат применения оптоволоконных технологий распределенной термометрии при освоении скважины с помощью ЭЦН / Ю. В. Лапшина, В. Ф. Рыбка // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – № 7 (32). – С. 13-16. – EDN RNLYSV.

42. Лившиц, Д. С. Нагрев проводников и защита предохранителями в электросетях до 1000 В / Д. С. Лившиц. – М.: Издательство «Энергия», 1959. – 43 с.

43. Листвин, А. В. Оптические волокна для линий связи / А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д. В. Швырков. – М.: Издательство «ЛЕСАРарт», 2003. – 106 с.

44. Листвин, А. В. Рефлектометрия оптических волокон / А. В. Листвин, В. Н. Листвин. – М.: Издательство «ЛЕСАРарт», 2005. – 208 с.

45. Малкина, В. Д. Инновационная комплексная система мониторинга скважин "ПетроЛайт" / В. Д. Малкина, Т. И. Галимов, С. И. Васютинская, А. Г. Киселев // Научный журнал Российского газового общества. – 2015. – № 2-3. – С. 59-64. – EDN VEAJLX.

46. Малявко, Е. А. Многофункциональный стендовый комплекс по исследованию инновационного оборудования для добычи нефти и повышения нефтеотдачи пластов с применением установок погружных насосов / Е. А. Малявко // Бурение и нефть. – 2014. – № 2. – С. 50-54. – EDN RWLGWB.

47. Назаров, В. Ф. Дальнейшее развитие термодобитометрии при определении скорости потока жидкости в скважине / В. Ф. Назаров, Р. С. Мухамадиев // НТБ "Каротажник". – 2011. – № 1 (199). – С. 59-65. – EDN NCGGDT.

48. Назаров, В. Ф. Еще раз о скорости и направлении регистрации термограмм вдоль ствола и об определении скорости потока жидкости в скважине / В. Ф. Назаров // НТБ "Каротажник". – 2007. – № 4 (157). – С. 100-112. – EDN HZTQEX.

49. Назаров, В. Ф. К определению экстремальных скоростей потока жидкости в нагнетательных скважинах по измерениям термоанемометром / В. Ф. Назаров, В. К. Мухутдинов // Наука в современном информационном обществе: Материалы X международной научно-практической конференции: в 3-х томах, North Charleston, USA, 28-29 ноября 2016 года / Научно-издательский центр «Академический». Том 3. – North Charleston, USA: CreateSpace, 2016. – С. 81-83. – EDN XHSYIT.

50. Назаров, В. Ф. Определение скорости потока жидкости в скважине / В. Ф. Назаров, Р. С. Мухамадиев // НТБ "Каротажник". – 2010. – № 8 (197). – С. 118-126. – EDN TJWUEZ.

51. Назаров, В. Ф. Определение скорости потока закачиваемой воды в нагнетательных скважинах по результатам измерений механическим расходомером / В. Ф. Назаров, В. К. Мухутдинов // Нефтепромысловое дело. – 2012. – № 9. – С. 34-37. – EDN PDQPMD.

52. Парамонов, А. В. Физика. Оптика: Учебное пособие в 2 частях: Часть 2. Волновая оптика. Издание второе, переработанное и дополненное / А. В. Парамонов, Л. В. Никольская, И. А. Клепинина, А. В. Ермолов: Издательство Тульского государственного педагогического университета им. Л. Н. Толстого; – Тула, 2013. – 109 с.

53. Петухов, А. С. Стенд для калибровки распределенных оптоволоконных систем контроля температуры в полевых условиях / А. С. Петухов, П. С. Лагунов, А. Н. Никонов, В. И. Луппов // НТВ "Каротажник". – 2019. – № 5 (299). – С. 106-119. – EDN QRGBMA.

54. Поляков, А. В. Автоматизированная оптоэлектронная измерительная система / А. В. Поляков, Т. Д. Прокопенкова // Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии: материалы международного научного конгресса, Минск, 24-27 октября 2016 года / С. В. Абламейко (гл. редактор). – Минск: Белорусский государственный университет, 2016. – С. 793-797. – EDN XWMUTX.

55. Поносов, В. А. Геофизические методы контроля разработки нефтяных и газовых месторождений: учебно-методическое пособие по специальности 011200 «Геофизика» / В. А. Поносов, С. В. Горожанцев, А. С. Некрасов: Пермский университет; – Пермь, 2006. – 189 с.

56. Пугач, В. Н. Опыт эксплуатации и перспективы развития систем мониторинга температуры вечномёрзлых грунтов / В. Н. Пугач, С. В. Дергачев, Д. Ю. Кропачев, Д. И. Михальченко // Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика: Материалы международной научно-практической конференции: в 3 частях, Новосибирск, 19-20 октября 2017 года. Том Часть 1. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 99-110. – EDN XSTWFF.

57. Пугач, В. Н. Преобразователь интеллектуальный с радиомодемом (ПИ РМ) / В. Н. Пугач, Е. Л. Воронин // Метрология, стандартизация, качество: теория и практика: материалы Международной научно-технической

конференции, Омск, 14-16 ноября 2017 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2017. – С. 62-68. – EDN YKVSRY.

58. РД 153-39.0-072-01: Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах. – Москва, 2002. – 271 с.

59. Рузин, Л. М. Методы повышения нефтеотдачи пластов (теория и практика): Учебное пособие / Л. М. Рузин, О. А. Морозюк – Ухта: УГТУ, 2014. – 127 с.

60. Рюков, Р. И. Оценка профиля приемистости в паронагнетательной скважине при помощи термогидродинамического симулятора / Р. И. Рюков, Т. Р. Хабиров, Р. Ф. Шарафутдинов, Р. А. Валиуллин, Г. Р. Вахитова, П. А. Лютое, П. С. Лагунов, П. Н. Гуляев, А. С. Петухов // НТВ "Каротажник". – 2023. – № 2 (322). – С. 20-33. – EDN XEDAXS

61. 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. – EDN YLTJCH.

62. 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. – DOI 10.30713/0130-3872-2018-10-5-12. – EDN YCNEXB.

63. Савич, А. Д. Комплексование 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. – EDN LZPAIY.

64. Савич, А. Д. Проблемы эксплуатации жёсткого геофизического кабеля / А. Д. Савич, Д. Г. Халилов // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: Материалы Международной научно-практической конференции,

посвященной юбилейным датам предприятий Пермнефтегеофизика, ЧЕГИС, Пермгеокабель, ФХС-ПНГ, ГЕОЛАЙН, Пермь, 26-27 ноября 2015 года / Пермский государственный национальный исследовательский университет; Главный редактор В. И. Костицын. – Пермь: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Пермский государственный национальный исследовательский университет", 2015. – С. 163-167. – EDN VDGUSV.

65. Савич, А. Д. Совершенствование технологий геофизических исследований в горизонтальных скважинах / А. Д. Савич, Д. Г. Халилов // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Пермского университета, 85-летию геологического факультета, 65-летию специальности "Геофизика", 90-летию со дня рождения профессора Б. К. Матвеева, Пермь, 24-25 ноября 2016 года / Главный редактор В. И. Костицын. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2016. – С. 186-193. – EDN YYWKIL.

66. Сальникова, О. Л. Мониторинг работы пластов и оборудования в эксплуатационных скважинах с оптико-волоконным кабелем / О. Л. Сальникова, А. В. Шумилов, В. И. Луппов, И. А. Черных // НТВ "Каротажник". – 2020. – № 6 (306). – С. 72-81. – EDN YWUNAC.

67. Скрыбин, В. И. Курс лекций по теплотехнике / В. И. Скрыбин: ОрёлГТУ, г. Орёл, 82 с.

68. Таранов, М. А. Волоконно-оптический низкокогерентный рэлеевский рефлектометр для распределенных измерений относительной деформации и температуры: специальность 01.04.03 "Радиофизика": диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Таранов Михаил Александрович, 2021. – 153 с. – EDN PAZLVL.

69. Турбин, А. И. Система комплексного мониторинга скважин: инновационный инструмент для оперативного принятия управленческих

решений / А. И. Турбин, В. В. Милокумов, Е. М. Подерин // Русский инженер. – 2015. – № 2 (45). – С. 43-48. – EDN VJVCIN.

70. Турбин, А. И. Система мониторинга протяженных объектов "Омега": новые возможности волоконно-оптических датчиков / А. И. Турбин, В. О. Калас, С. И. Васютинская // Русский инженер. – 2015. – № 4 (47). – С. 27-31. – EDN VJVBUX.

71. Филатова, О. С. Результаты проведения опытно-промышленных испытаний Технологии Tota Systems TS-1 по адресному направлению добычи горизонтальной скважины, разделённой на два сегмента в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / О. С. Филатова, В. С. Баканеев // Нефть и газ – 2022: тезисы докладов 76-ой международной молодежной научной конференции, Москва, 25-29 апреля 2022 года / Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина. Том 1. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, 2022. – С. 292-293. – EDN RNZBVQ.

72. Филатова, О. С. Результаты проведения опытно-промышленных испытаний Технологии Tota Systems TS-1 по адресному направлению добычи горизонтальной скважины, разделённой на два сегмента в ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / О. С. Филатова, В. С. Баканеев // Нефть и газ – 2022: Материалы 76-ой Международной молодежной научной конференции, Москва, 25–29 апреля 2022 года / Отв. редактор В. Г. Мартынов, сост. А. Ф. Максименко, А. Н. Комков, Р. Р. Фатхутдинов. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, 2022. – С. 495-503. – EDN JHVTUE.

73. Халилов, Д. Г. Волоконно-оптическая система активной термометрии / Д. Г. Халилов // НТВ "Каротажник". – 2021. – № 3 (309). – С. 139-151. – EDN HJBFVX.

74. 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. – DOI 10.33285/2413-5011-2023-7(379)-27-36. – EDN EAJBEJ.

75. 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: Сборник научных трудов. Том Выпуск 2 (7). – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. – С. 270-278. – EDN RQRPBV.

76. Халилов, Д. Г. Количественное определение дебита добывающих скважин по данным оптоволоконной распределенной термодобитометрии (схема и методика) / Д. Г. Халилов, А. Н. Некрасов, А. Д. Савич, В. И. Костицын // НТВ "Каротажник". – 2024. – № 5 (331). – С. 56-74. – EDN LZHJXU.

77. 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. – EDN HDISVD.

78. 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. – EDN YYOLVT.

79. Халилов, Д. Г. Потенциал волоконно-оптических технологий / Д. Г. Халилов // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, Пермь, 22-23 ноября 2018 года. Том Выпуск 1 (6). – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. – С. 295-302. – EDN YXPVGH.

80. Халилов, Д. Г. Применение оптоволоконных технологий в скважинной геофизике / Д. Г. Халилов // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию Первой Всесоюзной геофизической конференции, Пермь, 24 ноября 2017 года / гл. ред. В. И. Костицын. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2017. – С. 208-212. – EDN YRCIMD.

81. Халилов, Д. Г. Результаты опытно промышленных исследований геофизических оптоволоконных кабельных систем, разрабатываемых для длительного 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: Сборник научных трудов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пермь, 24-25 ноября 2022 года / Гл. редактор В. И. Костицын. Том Выпуск 5 (10). – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2022. – С. 207-216. – EDN MOHYCK.

82. Халилов, Д. Г. Совершенствование методики количественного определения дебитов скважин по данным оптоволоконной распределённой термодебитометрии / Д. Г. Халилов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2025. – № 9 (405). – С. 46-59.

83. 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. – EDN NLGXCV.

84. 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 : Сборник научных трудов IX международной научно-практической конференции, Пермь, 18-19 ноября 2021 года. Том Выпуск 4 (9). –

Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. – С. 172-182. – EDN AJHNTN.

85. 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. – EDN UGVUVL.

86. Чекалюк, Э. Б. Термодинамика нефтяного пласта / Э. Б. Чекалюк. – М.: Недра, 1965. – 240 с.

87. Чернуцкий, А. О. Оптико-электронная система измерения температуры на основе распределенных волоконно-оптических датчиков: специальность 22.60.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чернуцкий Антон Олегович, 2022. – 155 с. – EDN SKORAO.

88. Чудинов, П. Ю. Определение дебита скважин и учет добычи с использованием оптоволоконных технологий / П. Ю. Чудинов // НТВ "Каротажник". – 2023. – № 6 (326). – С. 87-96. – EDN JNQOIX.

89. 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. – EDN SGNPVL.

90. Шарафутдинов, Р. Ф. Исследование температурного поля окрестности перфорированных интервалов в стволе работающей скважины / Р. Ф. Шарафутдинов, Р. А. Валиуллин, А. Ш. Рамазанов, Т. Р. Хабиров, А. А. Садретдинов // НТВ "Каротажник". – 2025. – № 1 (333). – С. 107-118. – EDN AGSQUY.

91. Шафиков, Д. С. Определение скорости потока жидкости в нагнетательной скважине с учетом инерционности датчика термоанемометра при переменной скорости движения прибора / Д. С. Шафиков, В. К. Мухутдинов // Геолого-геофизические исследования нефтегазовых пластов: сборник научных статей по материалам VI Всероссийской молодежной научно-

практической конференции, Уфа, 27 мая 2021 года. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2021. – С. 37-41. – EDN SHGNVJ.

92. Шлейников, В. Б. Выбор метода измерения температуры изоляции проводника для лабораторного стенда по определению его температурного износа / В. Б. Шлейников, Я. С. Путинин // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Труды XI Всероссийской научно-технической конференции, Оренбург, 01 января – 31 декабря 2020 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2020. – С. 131-134. – EDN CVKTBC.

93. Шлейников, В. Б. Компьютерное моделирование нагрева одножильных кабелей с ПВХ изоляцией / В. Б. Шлейников, Д. А. Базлов, Д. К. Байкаменов, М. А. Сулеев // International Scientific Review. – 2016. – № 18 (28). – С. 40-45. – EDN WYBEKX.

94. Шлейников, В. Б. Постоянная времени нагрева для проводников из различных материалов / В. Б. Шлейников, Л. Р. Хакимова, А. С. Скоробогатых // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Труды XI Всероссийской научно-технической конференции, Оренбург, 01 января – 31 декабря 2020 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2020. – С. 94-95. – EDN LMGHCU.

95. Яруллин, Р. К. Концепция применения метода температурных меток в горизонтальных скважинах в условиях многофазного потока / Р. К. Яруллин, А. Р. Яруллин, М. С. Гаязов // PRОнефть. Профессионально о нефти. – 2019. – № 1 (11). – С. 7-11. – DOI 10.24887/2587-7399-2019-1-7-11. – EDN PTQIDD.

96. Яруллин, Р. К. Оптоволоконные технологии контроля технического состояния добывающих скважин / Р. К. Яруллин, Р. А. Валиуллин, Д. А. Семикин, М. В. Ракитин, А. В. Сурмаев // НТВ "Каротажник". – 2014. – № 9 (243). – С. 47-55. – EDN SNHGCD.

97. Яруллин, Р. К. Оптоволоконные технологии мониторинга действующих горизонтальных скважин / Р. К. Яруллин, Р. А. Валиуллин, А. А. Садретдинов, Д. А. Семикин, М. В. Ракитин, А. В. Сурмаев // НТВ "Каротажник". – 2014. – № 9 (243). – С. 38-46. – EDN SNHGBT.

Иностраннные источники:

98. Banks, Eddie & Shanafield, Margaret & Cook, Peter. (2014). Induced Temperature Gradients to Examine Groundwater Flowpaths in Open Boreholes. *Ground water*. 52. 10.1111/gwat.12157.

99. Bense, Victor & Read, T. & Bour, Olivier & Borgne, Tanguy & Coleman, T. & Krause, Stefan & Chalari, Athena & Mondanos, M. & Ciocca, F. & Selker, John. (2016). Distributed Temperature Sensing as a downhole tool in hydrogeology. *Water Resources Research*. 52. 10.1002/2016WR018869.

100. Coleman, Thomas & Parker, Beth & Maldaner, Carlos & Mondanos, Michael. (2015). Groundwater flow characterization in a fractured bedrock aquifer using active DTS tests in sealed boreholes. *Journal of Hydrology*. 528. 449-462. 10.1016/j.jhydrol.2015.06.061.

101. Farahi F., Jones J. D. C., Jackson D. A. High-speed fiber-optic temperature sensor. *Opt Lett*. 1991 Nov 15;16(22):1800-2. doi: 10.1364/ol.16.001800. PMID: 19784145.

102. 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. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28086-3_24.

103. Meng, Y., Zha, J. Intensifying the SNR of BOTDA using adaptive constrained least squares filtering / Y. Meng, J. Zha // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 437. – P. 219.

104. Read, T. & Bour, Olivier & Selker, John & Bense, Victor & Borgne, Tanguy & Hochreutener, Rebecca & Lavenant, Nicolas. (2014). Active-Distributed Temperature Sensing to continuously quantify vertical flow in boreholes. *Water Resources Research*. 50. 10.1002/2014WR015273.

105. Roman, Muhammad & Balogun, Damilola & Zhuang, Yiyang & Gerald, Rex & Bartlett, Laura & O'Malley, Ronald & Huang, Jie. (2020). A Spatially Distributed Fiber-Optic Temperature Sensor for Applications in the Steel Industry. *Sensors*. 20. 3900. 10.3390/s20143900.

106. Sang, A. K. & Froggatt, Mark & Gifford, D. K. & Dickerson, B. D. (2007). One Centimeter Spatial Resolution Temperature Measurements from 25 to 850°C Using Rayleigh Scatter in Gold Coated Fiber. 1 - 2. 10.1109/CLEO.2007.4453533.

107. Sang, Alex & Froggatt, Mark & Gifford, Dawn & Kreger, Stephen & Dickerson, Bryan. (2008). One Centimeter Spatial Resolution Temperature Measurements in a Nuclear Reactor Using Rayleigh Scatter in Optical Fiber. *Sensors Journal, IEEE*. 8. 1375 - 1380. 10.1109/JSEN.2008.927247.

108. Sellwood, Stephen & Hart, D. & Bahr, Jean. (2015). An in-well heat-tracer-test method for evaluating borehole flow conditions. *Hydrogeology Journal*. 23. 10.1007/s10040-015-1304-8.

109. Sellwood, Stephen & Hart, D. & Bahr, Jean. (2015). Evaluating the Use of In-Well Heat Tracer Tests to Measure Borehole Flow Rates. *Ground Water Monitoring and Remediation*. 35. 85-94. 10.1111/gwmr.12134.

110. Smolen, J. J., and A. van der Spek, A DTS primer for oil and gas production, Technical Report EP 2003-7100, Shell International Exploration and Production B.V., The Hague, Netherlands, 2003. – P. 97.

111. Soto M. A., Bolognini G., Di Pasquale F., Thévenaz L. Distributed strain and temperature sensing over 50 km of SMF with 1 m spatial resolution employing BOTDA and optical pulse coding // 20th international conference on optical fiber sensors. – 2009. – P. 750383-4.

112. Soto M. A., Bolognini G., Di Pasquale F., Thévenaz L. Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range // *Optics letters*. – 2010. – № 2. – pp. 259-261.

113. Zan, M. Simulation Analysis on the Simultaneous Deployment of Brillouin Gain and Loss in Coded Brillouin Optical Time Domain Analysis

(BOTDA) Fiber Sensor / M. Zan, M. Elgaud, A. Zainuddin, A. Kadhim, M. H. Mokhtar, N. Arsad, A. A. Bakar // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1892. – P. 012034.

Патентные источники:

114. Патент № 2194147 С2 Российская Федерация, МПК E21В 33/03. стендовая скважина: № 2000126437/03: заявл. 20.10.2000: опубл. 10.12.2002 / Н. И. Кошторев, Р. Н. Самар, А. Н. Архипов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Газобезопасность". – EDN EALXPD.

115. Патент № 2273725 С2 Российская Федерация, МПК E21В 37/06, E21В 43/24. Устройство и способ депарафинизации нефтегазовых скважин: № 2004118649/03: заявл. 18.06.2004: опубл. 10.04.2006 / А. В. Робин. – EDN HVAJFA.

116. Патент № 2399760 С2 Российская Федерация, МПК E21В 47/10, G01P 5/10. Способ определения скорости потока жидкости в скважине (варианты): № 2008111527/03: заявл. 25.03.2008: опубл. 20.09.2010 / В. Ф. Назаров. – EDN QKNR XR.

117. Патент № 2441153 С2 Российская Федерация, МПК E21В 47/10, G01P 5/10. Способ определения экстремальных скоростей потока жидкости в скважине (варианты): № 2010101096/03: заявл. 14.01.2010: опубл. 27.01.2012 / В. Ф. Назаров, Р. С. Мухамадиев. – EDN VJQHZE.

118. Патент № 2450277 С2 Российская Федерация, МПК G01P 5/12, G01K 13/02. Термоанемометр для измерения скорости потока жидкости или газа: № 2009139884/28: заявл. 28.10.2009: опубл. 10.05.2012 / Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин, А. Р. Яруллин; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Башкирский государственный университет" (ГОУ ВПО БашГУ). – EDN ZTVCNE.

119. Патент № 2498061 С1 Российская Федерация, МПК E21В 47/10, G01P 5/01, G01K 7/00. скважинный датчик: № 2012123866/03: заявл. 09.06.2012: опубл. 10.11.2013 / Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин, А. Р. Яруллин, А. В.

Паршин, В. В. Шако, С. С. Сафонов; заявитель Шлюмберже Текнолоджи Б.В. – EDN XTGWHN.

120. Патент № 2561009 С2 Российская Федерация, МПК G01V 1/28, G01V 8/00, E21B 47/14. Волоконно-оптическая скважинная сейсмическая система измерения на основе рэлеевского обратного рассеяния: № 2013149857/28: заявл. 30.03.2012: опубл. 20.08.2015 / Д. Ласкомб, Э. М. Самсон, Д. Л. Майда; заявитель ХЭЛЛИБЕРТОН ЭНЕРДЖИ СЕРВИСИЗ, ИНК.. – EDN SNEINQ.

121. Патент № 2702042 С1 Российская Федерация, МПК E21B 47/103. Способ количественной оценки профиля притока в мало- и среднедебитных горизонтальных нефтяных скважинах с МГРП: № 2018141026: заявл. 21.11.2018: опубл. 03.10.2019 / А. И. Ипатов, М. И. Кременецкий, Д. М. Лазуткин; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Газпромнефть Научно-Технический Центр" (ООО "Газпромнефть НТЦ"). – EDN NTQNQJ.

122. Патент № 2802764 С1 Российская Федерация, МПК G01N 13/00, G01N 17/00. Лабораторный испытательный стенд для воспроизведения эксплуатационных условий внутри погруженной в нефтяную скважину колонны насосно-компрессорных труб при испытаниях различных методов противодействия коррозии и седиментации: № 2022134462: заявл. 26.12.2022: опубл. 01.09.2023 / А. В. Максимук, П. Е. Юдин, А. Г. Веревкин, М. В. Желдак, М. В. Богатов, Д. В. Берков, Д. А. Крысина, Д. С. Вязгин, А. В. Иванов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственный центр "Самара". – EDN PCCVWA.

123. Патент на полезную модель № 134581 U1 Российская Федерация, МПК E21B 47/00. Гидродинамический стенд для моделирования работы горизонтальных нефтегазовых скважин: № 2013121496/03: заявл. 07.05.2013: опубл. 20.11.2013 / Р. А. Валиуллин, Р. К. Яруллин, А. Р. Яруллин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Башкирский государственный университет". – EDN HUFFML.

124. Патент на полезную модель № 196039 U1 Российская Федерация, МПК Н01В 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 Общество с ограниченной ответственностью "Предприятие "ФХС-ПНГ". – EDN YMLGYW.

125. Патент на полезную модель № 202982 U1 Российская Федерация, МПК Н01В 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 Общество с ограниченной ответственностью "Предприятие "ФХС-ПНГ". – EDN PSSCVS.

Интернет-источники:

126. <https://история-вещей.рф/materialyi/istoriya-optovolokna.html> (по состоянию на 19.12.2024 г).

127. <https://теплоприбор.рф/catalog/t2-zhidkostnoj-termostat-t-2/> (по состоянию на 23.10.2025 г).

128. https://cable.ru/cable/groupkpbp_description.php?ysclid=m9pimie349245474004 (по состоянию на 19.12.2024 г).

129. <https://interchim.ru/docs/polimery%20dlya%20kabeley/ME%206052.pdf> (по состоянию на 23.10.2025 г).

130. <https://kabel-s.ru/blog/primenenie-kabeley-i-provodov/kabel-dlya-neftyanoy-promyshlennosti/?ysclid=m9pih4ge9d209564266> (по состоянию на 23.10.2025 г).

131. <https://learn.trudmore.ru/optika/osnovnye-karakteristiki-opticheskogo-volokna/> (по состоянию на 23.10.2025 г).

132. <https://mplast.by/encyklopedia/polietilen-vyisokogo-davleniya-pevd/> (по состоянию на 23.10.2025 г).

133. <https://npo-proma.ru/katalog/techpribor/metrologicheskoe-oborudovanie-dlya-poverki-sredstv-izmereni/metrologicheskie-termostaty/> (по состоянию на 23.10.2025 г).

134. <https://optel.ru/sistemi-monitoringa-obektov/sistema-monitoringa-temperaturi-optiko-volokonnoego-kabelja> (по состоянию на 23.10.2025 г).

135. <https://siblec.ru/telekommunikatsii/volokonno-opticheskie-kabeli-i-linii-svyazi/2-osnovnye-printipy-dejstviya-volokonnykh-svetovodov-parametry-opticheskikh-volokon#2.1> (по состоянию на 23.10.2025 г).

136. <https://silixa.com/technology/ultima-dts/> (по состоянию на 23.10.2025 г).

137. https://silixa.com/wp-content/uploads/Heat_Pulse_System_spec_sheet_2024.pdf (по состоянию на 23.10.2025 г).

138. https://silixa.com/wp-content/uploads/ULTIMA_DTS_Datasheet_2024-1.pdf (по состоянию на 23.10.2025 г).

139. <https://stankiexpert.ru/spravochnik/materialovedenie/stal-aisi-304.html> (по состоянию на 23.10.2025 г).

140. <https://studfile.net/preview/2893233/page:2/> (по состоянию на 23.10.2025 г).

141. <https://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/plastmassa-i-plastik/teploprovodnost-plastikov-i-plastmass-fizicheskie-svoystva-polimerov> (по состоянию на 23.10.2025 г).

142. <https://www.electronpribor.ru/files/products/t2.pdf> (по состоянию на 23.10.2025 г).

143. <https://www.interlens.ru/gost3.html> (по состоянию на 23.10.2025 г).

144. <https://yandex.ru/search/?text=теплоёмкость+плотность+базальт&lr=118359&clid=2486826&win=392> (по состоянию на 23.10.2025 г).

Публичное акционерное общество

«Пермнефтегеофизика»

614090, г. Пермь, ул. Лодыгина, д.34

телефон: +7 (342) - 241 44 23

+7 (342) - 24291 35

e-mail: pngf@rusgeology.ru

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор

ПАО "Пермнефтегеофизика"

Лаптев А.П.

« 28 » октября 2025 г.



АКТ

о внедрении и практическом использовании результатов
диссертационной работы Халилова Дамира Газинуровича
«Развитие геофизического метода оптоволоконной распределённой
термометрии»

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель директора по промышленной геофизике Савич А. Д., главный геолог Центра обработки и интерпретации промышленно-геофизических данных (ЦОИ ПГД) Сальникова О. Л., начальник Центра научно-технического и инновационного развития (ЦНТ ИР) Денисов А. М., составили настоящий акт о том, что следующие результаты диссертационной работы Халилова Дамира Газинуровича на соискание степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика с 2023 года внедрены и используются практическим образом на производстве в ПАО «Пермнефтегеофизика»:

- Вариант системы оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии, основанный на использовании геофизического кабеля, предусматривающего возможность совместного проведения исследований стандартными электронными приборами и оптоволоконными датчиками с нагревом и без него в скважинах действующего фонда;

- Методика количественного определения общего и поинтервального дебитов для метода оптоволоконной распределённой скважинной термодобитометрии, которая основана на нагреве оптоволоконного геофизического кабеля и определении скорости его остывания, связанной посредством лабораторной зависимости со скоростью потока (расходом) скважинной жидкости.

Разработки применены при проведении опытно-промышленных работ на территории Пермского края в нефтедобывающих скважинах Батырбайского и Судановского месторождений.

Заместитель директора по промышленной геофизике

Савич А. Д.



Главный геолог ЦОИ ПГД

Сальникова О. Л.



Начальник ЦНТ ИР

Денисов А. М.





Общество с ограниченной
ответственностью «Западно-Уральское
общество развития прикладных
исследований»
614016, г. Пермь, ул. Куйбышева, д. 47, офис
104/2
телефон: +7 (342) - 219 53 40
e-mail: zuro.perm@rambler.ru

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО "ЗУРО"
Мухаметсафин М. Т.
Мухаметсафин 2025 г.

АКТ

о внедрении и практическом использовании результатов
диссертационной работы Халилова Дамира Газинуровича
«Развитие геофизического метода оптоволоконной распределённой
термометрии»

Мы, нижеподписавшиеся, руководитель проекта Маринкин В. Е.,
начальник по производству Силкин В. М., составили настоящий акт о том, что
результат диссертационной работы Халилова Дамира Газинуровича на
соискание степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 –
Геофизика, «Лабораторная установка для калибровки оптоволоконных
распределённых датчиков температуры», с 2023 года внедрён и используется
практическим образом на производстве в ООО «ЗУРО» в качестве
разновидности выпускаемой продукции.

Руководитель проекта

Маринкин
Маринкин В. Е.

Начальник по производству

Силкин
Силкин В. М.



Общество с ограниченной
ответственностью «Пермгеокабель»
617060, г. Краснокамск, ул. Геофизиков, д. 14,
корпус 2
телефон: +7 (34273) - 43852
+7 (34273) - 43757
e-mail: geokvant1@yandex.ru



УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО "Пермгеокабель"

Семенцов А. А.

«22» АВГУСТ 2025 г.

АКТ

о внедрении и практическом использовании результатов
диссертационной работы Халилова Дамира Газинуровича
«Развитие геофизического метода оптоволоконной распределённой
термометрии»

Мы, нижеподписавшиеся, коммерческий директор Проскуряков М. В., главный инженер Мазяр В. В., составили настоящий акт о том, что следующие результаты диссертационной работы Халилова Дамира Газинуровича на соискание степени кандидата технических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика с 2021 года внедрены и используются практическим образом на производстве в ООО «Пермгеокабель»:

- Модель геофизического кабеля, обеспечивающая возможность совместного проведения исследований электрическими приборами и оптоволоконными распределёнными датчиками температуры с нагревом КГ4×4ОВ×3-60-200;

- Новый критерий для определения пространственного разрешения оптоволоконных распределённых датчиков температуры «Проявление фона»;

- Способ определения номинальных значений пространственного разрешения и постоянной времени оптоволоконных распределённых датчиков температуры на основе данных о конструкции кабельных изделий, в которых они эксплуатируются.

Коммерческий директор

Проскуряков М. В.

Главный инженер

Мазяр В. В.



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H01B 11/22 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019135119, 31.10.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
31.10.2019

Дата регистрации:
14.02.2020

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 31.10.2019

(45) Опубликовано: 14.02.2020 Бюл. № 5

Адрес для переписки:
614017, г. Пермь, а/я 39, Патентное бюро
"ОНОРИН", пат. пов. Онорину А.А., рег. N126

(72) Автор(ы):

Исаев Виктор Алексеевич (RU),
Савич Анатолий Данилович (RU),
Семенов Анатолий Анатольевич (RU),
Халилов Дамир Газинурович (RU),
Шумилов Александр Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью
"Предприятие "ФХС-ПНГ" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 131897 U1, 27.08.2013. RU 156786
U1, 20.11.2015. RU 159036 U1, 27.01.2016. US
8623787 B2, 07.01.2014.

(54) Геофизический волоконно-оптический стабилизированный кабель

(57) Реферат:

Полезная модель относится к геофизике и нефтяной промышленности и предназначена для повышения точности определения расстояний при смежном и раздельном проведении геофизических исследований и работ в скважинах с волоконно-оптическим каналом, а также к конструкции кабеля.

Геофизический оптоволоконный кабель включает внешнюю 1 и внутреннюю 2 броню, состоящую из металлических проволок со слоем изоляции 3 между ними, и как минимум один оптоволоконный модуль 4. Один или более волоконных модулей 4 размещены в повиве внутренней брони 2, каждый из которых выполнен в виде металлической трубки 5 с оптическими волокнами 6 внутри с избытком длины, а в центре кабеля расположенными электрическими проводниками 7 в полимерной изоляции 8 с наполнителем 9.

Диаметр трубки 5 оптоволоконного модуля

4 равен диаметру проволок внутренней брони 2.

Для создания волоконно-оптического канала используют одномодовые оптические волокна, или многомодовые оптические волокна, или произвольную комбинацию одномодовых и многомодовых оптических волокон, или произвольную комбинацию одномодовых и многомодовых оптических волокон, причем часть волокон имеют нанесенные лазером решетки Брэгга.

Технический результат - создание конструкции геофизического кабеля с волоконно-оптическими каналами, позволяющей проходить под нагрузкой стабилизацию кабеля, обеспечивая увязку расстояний, измеренных по двум способам: по оптоволокну по времени прихода сигнала и по физической длине кабеля, что дает точное определение местоположения геофизических событий по глубине скважины. 5 з.п. ф-лы, 2 ил.

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H01B 11/22 (2021.01)

(21)(22) Заявка: 2020108226, 25.02.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.02.2020

Дата регистрации:
17.03.2021

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 25.02.2020

(45) Опубликовано: 17.03.2021 Бюл. № 8

Адрес для переписки:
614017, г.Пермь, а/я 39, Патентное бюро
"ОНОРИН", пат. пов. Онорину А.А., рег. N126

(72) Автор(ы):
Савич Анатолий Данилович (RU),
Семенцов Анатолий Анатольевич (RU),
Халилов Дамир Газинурович (RU),
Шумилов Александр Владимирович (RU),
Будник Денис Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Общество с ограниченной ответственностью
"Предприятие "ФХС-ПНГ" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 35035 U1, 20.12.2003. RU 196039
U1, 14.02.2020. RU 2368755 C1, 27.09.2006. RU
156786 U1, 19.02.2015. RU 131897 U1, 27.08.2013.
US 8326386 B2, 04.12.2012.

(54) Геофизический кабель с оптическим волокном и капиллярной трубкой

(57) Реферат:

Полезная модель относится к геофизике и нефтяной промышленности и предназначена для закачки жидких химических соединений при одновременном и отдельном проведении геофизических исследований и работ в скважинах. Геофизический кабель содержит броню 1, токопроводящие жилы 2, изоляцию 3 и центральную трубку/капилляр 4, обеспечивающий гидродинамический канал связи. Броня 1 имеет наружный 5 и внутренний 6 проволочные слои. Кабель дополнительно снабжен оптоволоконным модулем, оптические волокна 7 которого размещены в одной или нескольких металлических трубках 8, выполненных в виде одной или нескольких проволок внутреннего слоя 6 брони. Токопроводящие жилы 2 расположены

в слое изоляции 3 вокруг центральной трубки/капилляра 4.

Технический результат - расширение арсенала технических средств, т.е. в создании конструкции геофизического кабеля, позволяющей производить его стабилизацию под нагрузкой без нарушения целостности оптического волокна и капиллярного канала, при этом обеспечивается передача вязких сред с поверхности в скважину и обратно, проведение измерений посредством оптического волокна для контроля технологических процессов в скважине с изучением температурного поля разреза, а также работа приборами с электрическим каналом связи, альтернативного устройству прототипу и свободного от его недостатков. 2 ил.

№ 256 от 06.10.2025

Халилову Д. Г.

Об участии

СПРАВКА

Настоящая справка подтверждает активное участие Халилова Дамира Газинуровича в Конкурсе молодых работников и молодых специалистов на лучшую научно-техническую разработку и его достижения, согласно выданным ему дипломам.

Дополнительные сведения:

- В 2021 году Халилов Д.Г. занял 3 место с работой, посвященной разработке комплексной скважинной оптоволоконной кабельной системы термодобитометрии.
- В 2023 году Халилов Д.Г. был награжден дипломом за разработку оптимизация методов кабельной оптоволоконной распределительной телеметрии.

Сведения основаны на предоставленной информации о выданных дипломах.

Председатель совета
молодых специалистов
ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»



Ю.А. Чернова

Чернова Юлия Алексеевна
(08342) 56576, +7 (342) 2356576



**КОНКУРС МОЛОДЫХ РАБОТНИКОВ
НА ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ
РАЗРАБОТКУ**



**СОВЕТ
МОЛОДЫХ
СПЕЦИАЛИСТОВ**
ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

ДИПЛОМ

за 3 место

награждается

**Халилов
Дамир Газинурович**

Геофизик Центра научно-технического и инновационного развития
ПАО «Пермнефтегеофизика»

за работу

Комплексная скважинная оптоволоконная
кабельная система термодобитометрии

Генеральный директор
ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

О.В. Третьяков



2021



**XX КОНКУРС МОЛОДЫХ РАБОТНИКОВ
НА ЛУЧШУЮ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКУЮ
РАЗРАБОТКУ**



ДИПЛОМ

награждается

**Халилов
Дамир Газинурович**

Геофизик Центра научно технического и инновационного развития ПАО
"Пермнефтегеофизика"

за работу

Оптимизация методов кабельной оптоволоконной распределенной
термометрии

Генеральный директор
ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

О.В. Третьяков



23-25 X
2024

ОНЛАЙН-ФОРУМ
«ИННОВАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ СОПРОВОЖДЕНИЯ
НЕФТЕГАЗОВЫХ АКТИВОВ»

15 лет

 **ЛУКОЙЛ**
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ЛУКОЙЛ-Инжиниринг

БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

ХАЛИЛОВУ
Дамиру Газинуровичу

ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» выражает Вам искреннюю благодарность за проявленный интерес и участие в онлайн-форуме «**Инновации для повышения эффективности сопровождения нефтегазовых активов**», посвященному 15-летию ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». Доклад, подготовленный Вами, вызвал глубочайший интерес у гостей и спикеров. Надеемся, что участие в мероприятии вызвало взаимный интерес с Вашей стороны!

С уважением,
Генеральный директор
Д.В. Роженцев