

На правах рукописи



ФЕОФИЛАКТОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
ВНУТРИСКВАЖИННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ
С ДИСКРЕТНЫМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ
НА ОСНОВЕ ДВУХЭЛЕМЕНТНЫХ БРЭГГОВСКИХ СТРУКТУР**

Специальность: 05.11.13 –
«Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева» (КНИТУ-КАИ) на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем КНИТУ-КАИ.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Сахабутдинов Айрат Жавдатович

Официальные оппоненты: **Овчинников Марат Николаевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроники» Института физики ФГАОУ ВО «Казанского (Поволжского) федерального университета», г. Казань

Пономарев Роман Сергеевич,
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры «Физики твердого тела», заместитель
директора Института интегральной оптики и
нанотехнологий ФГБОУ ВО «Пермского государственного национального исследовательского университета», г. Пермь

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»**, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «24» июня 2019 года в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.09 при КНИТУ-КАИ по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 31/7 (учебное здание №5, ауд. 301).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КНИТУ-КАИ. Электронный вариант автореферата размещен на сайте КНИТУ-КАИ (www.kai.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.079.09.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.079.09,

кандидат технических наук

Денисов Евгений Сергеевич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Условия залегания и добычи нефти в нефтяных скважинах, такие как давление и температура, важны для разведки нефтяных залежей и управления эксплуатацией пласта. Однако только некоторые типы датчиков могут использоваться для внутрискважинной телеметрии (ВСТ) в тяжелых условиях, определяемых высокими давлением и температурой в нефтяных скважинах. Волоконно-оптические датчики (ВОД) широко используются в ВСТ, поскольку обладают такими преимуществами, как устойчивость к тяжелым условиям эксплуатации, малый размер и высокое разрешение. Среди широкого класса используемых ВОД следует выделить распределенные рамановские и бриллюэновские, а также точечные на основе интерферометров Фабри-Перо (ИФП) и волоконных брэгговских решеток (ВБР). При этом последние могут быть использованы в массиве для создания квази-распределенных систем ВСТ.

Приборы для детектирования информации с распределенных датчиков, интеррогаторы для опроса массивов ВБР и специальное волокно в кабелях для тяжелых условий эксплуатации являются основными статьями затрат при построении систем волоконно-оптической ВСТ. Для оптимизации структуры систем и снижения их стоимости было предложено несколько комбинированных решений разного уровня интеграции. В простейшем случае – это комбинация ВБР и ИФП датчиков, на второй ступени это комбинация рамановских или бриллюэновских датчиков с ВБР и/или ИФП, и на высшей ступени используются распределенные датчики в купе с массивом точечных и с учетом рэлеевского рассеяния. Если первые предназначены для решения динамических точечных задач, то вторые и третьи для статических распределенных и динамических дискретных по стволу скважины в ее ключевых точках.

В комбинированных системах, как правило, рассматривается ВСТ, основанная на принципах некогерентной частотной рефлектометрии с использованием одночастотного непрерывного лазера. Она приходит на смену импульсным временным системам, как более гибкая в плане формирования различных зондирующих излучений в системах с комбинированной физикой. Указанная гибкость достигается за счет использования модуляционных преобразований оптической несущей, адаптированных к различным типам датчиков. Как правило, это линейная частотная модуляция и ее разновидности. При этом следует учесть, что основное внимание в ВСТ уделяется измерению температуры, таких датчиков на порядок больше в комбинированных системах. Кроме того, показания термометров используются как компенсирующие для всех других измерений.

С одной стороны, статическая температура или деформация не могут быть точно измерены ВБР и ИФП датчиками в силу наличия зоны неопределенности вокруг пика их спектральной характеристики и возможных уходов длины волны лазерного излучения. С другой, их применение позволяет быстро перестраивать общую измерительную характеристику комбинированных систем по наклону и диапазону при уточнении данных измерений бриллюэновских и рамановских ВОД, а также прецизионно калибровать указанные системы, поскольку реально достижимая точность и разрешающая способность измерений ВБР по температуре на порядок выше. Для бриллюэновских и рамановских ВОД указанные величины составляют соответственно 2–3 °С и 0,1 °С, для ВБР – 0,1 °С и 0,02–0,03 °С.

Исследованиям комбинированных систем ВСТ посвящены труды зарубежных ученых P.C. Wait, T.P. Newson, F. Zaidi, K. Krebber, K. Chen, K. Miah, D.K. Potter, M. Yang и др., ведущих исследования в университетах Англии, Канады, США, Италии, Китая и др. Известны разработки российских ученых, в том числе Горшкова О.Ю., Потапова В.Т., Бурдина В.А., Бурдина А.В., Султанова А.Х., Виноградовой И.Л., Листвина В.Н., Наний О.Е., Трещикова В.Н., Глаголева С.Ф., Былиной М.С., Евдокимова Ю.К. и других. Практически все ведущие фирмы мира, например, Weatherford, Halliburton, Baker Hughes, Luna Sense Technologies, ИРЭ РАН, ПНППК, Омега, Петрофайбер, НЦВО РАН, ИРЗ-ТЭК и другие занимаются разработкой ВСТ различного назначения.

Особенностью работ представленных авторов, фирм и научно-исследовательских групп, как указывалось выше, является применение в качестве датчиков температуры классических ВБР с гауссовой аподизацией, а для их интеррогации спектральных технологий.

Указанные выше предельные значения достигаются либо с использованием сверх дорогостоящей спектральной аппаратуры опроса датчиков, либо методами накопления и статистической обработки данных, которые занимают от десятков минут до единиц часов. Кроме того, они, как правило, не позволяют получать спектральную информацию оперативно и с высоким разрешением. Если целевая функция комбинированных систем ВСТ по точности измерений в 0,1 °С достигнута за счет уточнения данных с помощью ВБР термометров, то для разрешающей способности измерений, используемой для оперативного регулирования измерительных характеристик, достигнутых величин недостаточно. Целевое значение должно составлять, как минимум, 0,01 °С, а как максимум, 0,001 °С. Причиной сложившейся ситуации является устоявшийся подход к комбинированным системам ВСТ как к классическим оптико-электронным системам, измерительное преобразование в которых проходит в оптическом диапазоне, а после оптико-электронного преобразования с прямым детектиро-

ванием роль играют только мощностные характеристики электрического сигнала в сложной шумовой обстановке.

Радиофотонный полигармонический и адресный подходы, представленные в работах научной школы КНИТУ-КАИ (Морозов О.Г., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж. и др.), позволили разработать ряд сенсорных волоконно-оптических систем, отличающихся высокими чувствительностью и точностью измерений, а также высокими технико-экономическими показателями. Отличие полигармонических радиофотонных систем от других, которым посвящен ряд работ зарубежных авторов Weaver T., Gagliardi G., Bennion I., Yao J. и др., заключается в том, что при измерении отсутствует необходимость зондирования пика ВБР, а обработка оптической информации ведется в радиодиапазоне по огибающей биений двух (или более) зондирующих частот на их разностной частоте в области минимальных шумов фотоприемника, причем указанная разностная частота известна и не формируется оптоэлектронным генератором. В развитие данного подхода были созданы спектрально адресные двухэлементные волоконные брэгговские структуры (ДВБС), которые формируют в своей структуре известное двухчастотное излучение на уникальной (адресной) для каждой решетки частоте при их зондировании широкополосным излучением, являющиеся и датчиками, и элементами мультиплексора. Это достигается структурированием двух симметричных фазовых сдвигов в ВБР или созданием двух сверхузкополосных идентичных ВБР. В приложениях ВСТ ДВБС не использовались, оценка их разрешающей способности по температуре не проводилась, а методы радиофотонной обработки получаемой с них информации, рассматривались лишь с позиций разрешения коллизий совпадения в многосенсорных системах, а не в комбинировании с другими по физике системами.

Отмеченные выше обстоятельства определяют актуальность темы и постановки научно-технической задачи разработки методов анализа и принципов построения комбинированных систем внутрискважинной термометрии, использующих с целью повышения разрешающей способности измерения температуры и улучшения технико-экономических показателей дискретные волоконно-оптические датчики на основе ДВБС. Представляемая диссертационная работа посвящена решению этой задачи. Тематика и содержание работы соответствуют плану научных исследований, выполняемых КНИТУ-КАИ.

Объект исследования – комбинированные волоконно-оптические системы внутрискважинной термометрии.

Предмет исследования – вопросы применения дискретных волоконно-оптических датчиков на основе двухэлементных волоконных брэгговских структур в комбинированных системах внутрискважинной термометрии.

Цель исследования – повышение разрешающей способности измерения температуры и улучшение технико-экономических показателей комбинированных систем внутрискважинной термометрии на основе применения в них дискретных волоконно-оптических датчиков на основе двухэлементных волоконных брэгговских структур и радиофотонных способов обработки получаемой с них информации с учетом комбинирования с другими модулями, отличными по физике измерений.

Научная задача исследования – разработка методов анализа и принципов построения комбинированных систем внутрискважинной термометрии, использующих дискретные волоконно-оптические датчики на основе двухэлементных волоконных брэгговских структур, что позволяет повысить разрешающую способность измерения температуры и улучшить технико-экономические показатели указанных систем с помощью переноса получаемой с датчиков оптической информации в радиодиапазон и дальнейшей ее цифровой обработки, а также применения программно-определяемого подхода для упрощения комбинирования с другими модулями, отличными по физике измерений.

Решение поставленной научной задачи и достижение цели диссертационной работы проводилось **по следующим основным направлениям**:

1. Сравнительный анализ характеристик существующих и перспективных комбинированных систем внутрискважинной термометрии на основе волоконно-оптических датчиков; выявление резервов для улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик, основанных на применении в них дискретных волоконно-оптических датчиков на основе двухэлементных волоконных брэгговских структур.

2. Исследование оптомеханики волоконно-оптических датчиков на основе двухэлементных волоконных брэгговских структур в условиях, характерных для нефтяных скважин; анализ прохождения через них квазиширокополосного лазерного излучения на пропускание и отражение; теоретическое обоснование способов измерения температуры в условиях дискретного комбинирования; разработка методики радиофотонного измерительного преобразования и определение разрешающей способности измерения датчиков по температуре.

3. Разработка принципов построения комбинированных волоконно-оптических систем внутрискважинной термометрии среднего уровня иерархии для решения задач уточнения показаний бриллюэновских и рамановских распределенных датчиков с использованием дискретных датчиков на основе двухэлементных волоконных брэгговских структур; разработка программно-определяемого подхода к принципам комбинирования модулей, отличных по физике измерений.

4. Разработка практических рекомендаций по проектированию и созданию волоконно-оптических датчиков на основе двухэлементных волоконных брэгговских структур, их применению в комбинированных волоконно-оптических системах внутрискважинной термометрии, в том числе для: калибровки совмещенных дискретных датчиков давления и температуры, создания калибровочных стендов для комбинированных измерений на основе бриллюэновских и рамановских систем, верификации теоретических данных на основе результатов экспериментальных испытаний; внедрение результатов исследований и оценка перспектив их дальнейшего развития на основе анализа возможностей комбинированных систем высшего уровня иерархии.

Методы исследования, достоверность и обоснованность. При выполнении работы применялись методы математической физики, оптомеханики оптического волокна с записанными в него брэгговскими решетками, математические методы моделирования волоконно-оптических структур и радиофотонной обработки спектральной информации, методы спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье. Обоснованность и достоверность результатов определяются использованием известных положений фундаментальных наук; корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам; совпадением теоретических результатов с данными экспериментов и результатами других авторов. При решении задач использованы современные программные средства, в том числе стандартные пакеты прикладных программ Mathcad, Optiwave System и Optiwave Grating.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем.

Выявлены резервы для повышения разрешающей способности измерения температуры и улучшения технико-экономических показателей комбинированных систем ВСТ, основанных на применении в них ВОД на основе ДВБС, радиофотонных методов обработки информации, получаемой с них, с учетом комбинирования с другими модулями, отличными по физике измерений.

Впервые предложены способы измерения температуры при работе ВОД на основе ДВБС на пропускание и отражение, включая разработку структур радиофотонных интеррогаторов, методик измерительного преобразования и определения методических погрешностей и разрешающей способности измерений по температуре.

Предложены структуры комбинированных волоконно-оптических систем ВСТ для решения задач комплексной калибровки, компенсации влияния температуры в манометрии и уточнения показаний бриллюэновских и рамановских распределенных датчиков в их ключевых точках с разработкой методик комбинированного радиофотонного измерительного преобразования на основе программно-определяемого подхода.

На основе предложенных принципов построения и способов измерения разработаны основы проектирования комбинированных систем ВСТ, использующих волоконно-оптические датчики на основе ДВБС, алгоритмическое обеспечение процессов измерения температуры и развития для систем ВСТ высшего уровня иерархии.

Практическая ценность работы заключается в разработке практических рекомендаций по проектированию и созданию ВОД на основе ДВБС, их применению в комбинированных волоконно-оптических системах ВСТ, в том числе для: калибровки совмещенных датчиков давления и температуры, создания калибровочных стендов для измерений на основе бриллюэновских и рамановских систем, верификации теоретических данных на основе результатов экспериментальных испытаний. При этом достигается значительная экономия ресурсов на создание интеррогаторов для них за счет упрощения блоков зондирования, методик мультиплексирования и опроса ВОД на основе ДВБС в радиодиапазоне.

Реализация и внедрение результатов работы представлены в рамках выполнения НИР и НИОКР КНИТУ-КАИ, в частности, в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки РФ на выполнение НИР в КНИТУ-КАИ на 2014-2019 годы в его проектной (программы «Фотоника», «Радиофотоника») и базовых частях (программа «Ассиметрия»); инициативных работ с ООО ИПЦ «Пилот» и другими предприятиями нефтегазодобывающей и приборостроительной отраслей; в учебном процессе КНИТУ-КАИ по направлениям «Радиотехника», «Инфокоммуникационные системы и технологии», «Фотоника и оптоинформатика», что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XII МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара, 2014 г.), XII, XIV–XVI МНТК «Оптические технологии в телекоммуникациях» (Казань, 2014, 2017 гг., Самара, 2016 г., Уфа, 2018 г.), Международной молодежной научной конференции «XXII Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (Казань, 2015 г.), II–IV МНТК молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (Казань, 2015, 2017–2018 гг.), МНПК «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» (Казань, 2016 г.), Всероссийской НПК «Оптическая рефлектометрия» (Пермь, 2016 г.), 20–21-й Всероссийской молодежной научной школе-семинаре «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (Ульяновск, 2017, 2018 гг.), НТК «Актуальные вопросы телекоммуникаций» (Самара, 2017 г.), МНТК «Systems of signals generating and processing in the field of on board communications» (Москва, 2018 г.) и др.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 26 основных научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в Перечень ВАК по специальности 05.11.13, 7 статей в изданиях, цитируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 6 патентов РФ на полезную модель и изобретение, 5 статей в журналах нефтегазодобывающей отрасли, цитируемых в базе данных РИНЦ, и 5 работ в материалах докладов международных конференций.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 187 наименований, и приложения. Работа без приложения изложена на 253 страницах машинописного текста, включая 110 рисунков и 14 таблиц.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» по пунктам:

П.1. «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» (впервые в практике ВСТ предложены методы измерения температуры на основе ВОД на основе ДВБС, и использования полученной информации для компенсации ее влияния и калибровки датчиков манометрии, рамановских и бриллюэновских измерений).

П.3. «Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами» (предложенные технические решения обладают более высокой разрешающей способностью измерения температуры, улучшенными технико-экономическими показателями, разработаны, испытаны и внедрены, что подтверждено актами внедрения).

Основные положения, выносимые на защиту:

– методы и средства повышения разрешающей способности измерения температуры и улучшения технико-экономических показателей комбинированных систем ВСТ с применением в них дискретных ВОД на основе ДВБС;

– способы измерения температуры, включая разработку структур радиофотонных интеррогаторов и методик измерительного преобразования, результаты оценки разрешающей способности измерения температуры при их реализации;

– способы уточнения показаний внутрискважинных дискретных манометров, распределенных рамановских и бриллюэновских датчиков и принципы построения комбинированных систем ВСТ, включая разработку систем на основе программно-определяемого подхода;

- результаты виртуальных и физических экспериментов, подтверждающие работоспособность способов, улучшение метрологических и технико-экономических характеристик комбинированных систем ВСТ;
- рекомендации и результаты проектирования комбинированных систем ВСТ, оптико-электронных и радиофотонных интеррогаторов, характеризующихся простотой и низкой стоимостью реализации;
- результаты внедрения и использования разработанных автором теоретических положений и созданных стендов, макетов, устройств и систем.

Личный вклад автора заключается в научно-техническом обосновании разработки комбинированных систем ВСТ с применением в них ВОД на основе ДВБС; в разработке способов измерения температуры; в разработке особенностей построения и калибровки дискретных и распределенных ВОД для измерения температуры; участии в опытной эксплуатации стендов и систем и проведении оценки эффективности применения разработанных датчиков; определении направлений дальнейшего развития научных исследований по указанной тематике, в апробации, опубликовании и внедрении результатов исследования.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы: актуальность, цель, задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

В первой главе проведен сравнительный анализ характеристик существующих и перспективных комбинированных волоконно-оптических систем внутрискважинной термометрии на основе волоконно-оптических датчиков; выявлены резервы для улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик, основанные на применении в них адресных двухэлементных волоконных брэгговских структур.

В первом разделе показана актуальность темы и поставлена научно-техническая задача, заключающаяся в разработке комбинированных волоконно-оптических систем внутрискважинной телеметрии, основным обстоятельством развития которых является калибровка и уточнение показаний термометрии, полученных с помощью распределенных непрерывных систем, методами и средствами дискретной термометрии, основанной на использовании ВБР. Приведен их иерархический классификатор, определяющий уровень задач, которые необходимо решить для систем различного уровня сложности.

Для их конкретизации во втором, третьем и четвертом разделе главы определен круг нерешенных вопросов, связанных с улучшением метрологических и технико-экономических характеристик одинарных систем непрерывного и дискретного типов в слое контроля температуры. Каждая из используемых систем не в полной мере удовлетворяет требованиям достижения разрешающей способности измерения температуры в $0,01$ °С. При этом сделан вывод, что простое комбинирование распределенных и точечных систем приводит лишь к незначительному улучшению разрешающей способности измерений температуры.

Результаты сравнительного анализа указанных систем приведены в пятом разделе главы. По данным анализа научно-технической литературы были выявлены резервы для улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик систем внутрискважинной телеметрии на основе программно-определяемого подхода, основанные на применении единого источника зондирующего излучения для получения всех видов рассеянного излучения, и в том числе отраженного от ВБР; применения принципов оптимальной фильтрации и полигармонического зондирования контуров усиления нелинейных рассеяний и ВБР с возможностью включения в систему дополнительного элемента анализа – расходомера, построенного либо на релеевском рассеянии, либо на последовательности ВБР.

Для решения поставленных задач предложено два пути развития, представленные в шестом и седьмом разделах главы. В шестом разделе рассмотрены согласованные по спектру источник излучения и упорядоченная волноводную решетка для возбуждения и выделения информационных сигналов на различных типах рассеяния одновременно, включая отраженное излучения от ВБР. При этом представлены ряд промежуточных элементов. Показано, что оптимальная фильтрация позволит улучшить разрешающую способность измерения температуры, но не существенно. В отличие от данного пути изменение классической структуры ВБР на АВБС хорошо зарекомендовало в системах температурных измерений в энергетических малосенсорных цепях. Указанные структуры, представленные в седьмом разделе главы способны представлять собой одновременно мультиплексор, источник двухчастотного излучения и сенсор, с существенно увеличенным отношением сигнал/шум измерений, что позволит предположительно достичь улучшения как метрологических, так и технико-экономических характеристик.

В заключении главы определен объект и предмет исследований, сформулирована единая цель и научная задача настоящей диссертации, а также направления дальнейших исследований, выполнение которых необходимо для достижения поставленных цели и научной задачи.

Во второй главе представлены результаты исследования оптомеханики двухэлементных волоконных брэгговских структур в условиях, характерных для нефтяных скважин; анализа прохождения квазиширокополосного лазерного

излучения при работе двухэлементных волоконных брэгговских структур на пропускание и отражение; теоретического обоснования способов измерения температуры в мало- и многосенсорных приложениях внутрискважинной термометрии; разработки методики радиофотонного измерительного преобразования и определение его основных методических погрешностей при точечных и квазираспределенных измерениях.

В первом разделе главы поставлены задачи мало- и многосенсорных измерений в структуре ВСТ. Предлагаемые системы точечных датчиков можно использовать, например, для мониторинга скважины при эксплуатации винтовым насосом (малосенсорные измерения). В данном случае установлены датчики давления и температуры на приеме и на выходе насоса, а также датчик вибрации. Другой пример – горизонтальная скважина с открытым стволом и винтовым насосом, в горизонтальной секции которой установлены одиннадцать датчиков температуры и давления (многосенсорные измерения). Промежуточный вариант – это акустический расходомер, в котором может быть установлено от 2 до 10 термоманометров. С точки зрения оптомеханики оптического волокна датчики на решетках Брэгга очень компактны и выдерживают экстремальные условия эксплуатации – давление до 170 МПа и температуру до 275°C.

Во втором разделе главы приведены системные решения для опроса термометра 2 (рис. 1,а), термоманометра и расходомера, соответственно на одной, двух и трех ДВБС. Для их реализации использованы ДВБС, работающие на пропускание. Если для анализа работы термометра достаточно понимания прохождения двухчастотного излучения, полученного в ДВБС, через наклонный линейный фильтр 4 (рис. 1,б) для определения сдвига его центральной частоты от калиброванного значения, то для анализа термоманометра и расходомера необходимо проанализировать, различные взаимные положения разностных частот датчиков, число которых для термоманометра, например, может составлять 12. Учитывая малый объем автореферата, общее решения для массива i -датчиков, будет приведено в четвертом разделе данной главы.

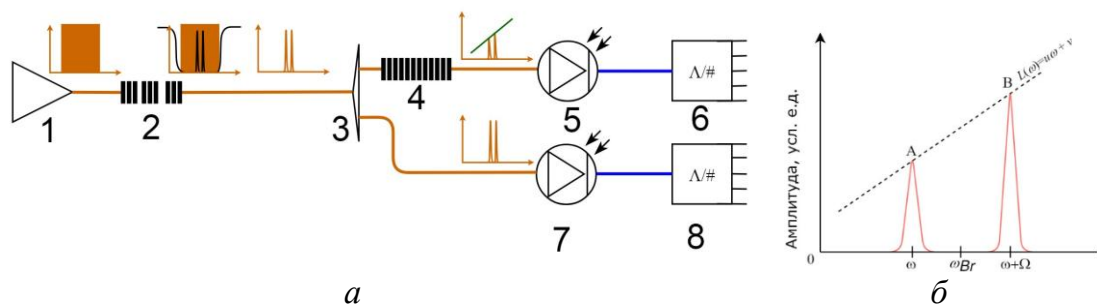


Рис. 1. Функциональная схема термометра на ДВБС 2 (а) и АЧХ сигнала на выходе наклонного фильтра 4 (б)

После фотоприемника 5 положение центральной частоты определяется как коэффициент модуляции огибающей биений между частотными составляющими ДВБС на их разностной частоте (рис. 2). Для устранения неравномерности шкалы измерений возможно установление второго фильтра с зеркальной по наклону характеристикой и канала компенсации паразитной модуляции источника лазерного излучения. Далее будет показано, что разрешающая способность измерений по температуре в такой схеме достигает целевого значения $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ с учетом влияния шумов.

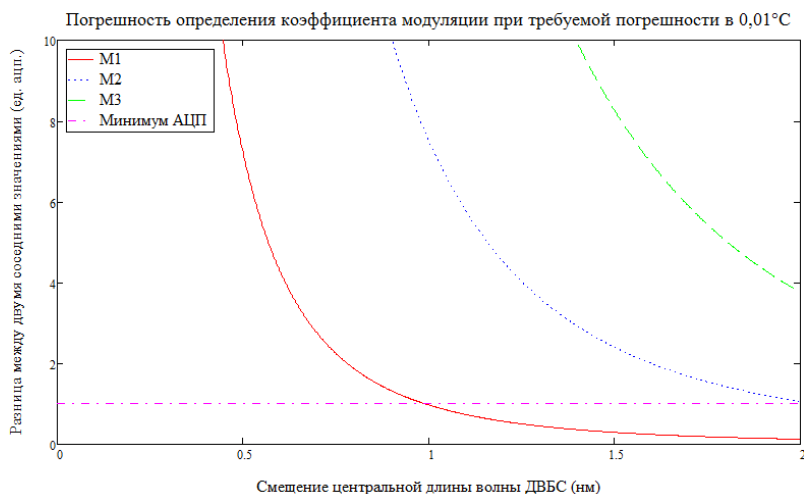


Рис. 2 – Определение положения центральной частоты ДВБС по коэффициенту модуляции огибающей биений разностных частот

В третьем разделе описана разработанная структура для массива датчиков ДВБС, подключенных по топологии «параллельная шина». Поставлена и решена задача анализа коллизий для множества разностных частот ДВБС. В результате математического моделирования с использованием подгоночных функций получена система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi(A_1, A_2, \nu)}{\partial A_1} = 2(P_m - P(t_m)) \frac{\partial P(t_m)}{\partial A_1} = 0 \\ \frac{\partial \Psi(A_1, A_2, \nu)}{\partial A_2} = 2(P_m - P(t_m)) \frac{\partial P(t_m)}{\partial A_2} = 0 \\ \frac{\partial \Psi(A_1, A_2, \nu)}{\partial \nu} = 2(P_m - P(t_m)) \frac{\partial P(t_m)}{\partial \nu} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Поиск значений A_1 , A_2 и $\omega_1 - \omega_2$ проведен методом наименьших квадратов. Условия минимума функционала (1), являются системой из трех уравнений для поиска трех неизвестных переменных. Выпишем частные производные от подгоночной функции:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(t)}{\partial A_1} = & 2(2A_1 + u\Omega_1) \cos^2\left(\frac{\Omega_1 t}{2}\right) + \\ & + A_2 (\cos(\nu t) + \cos((\nu + \Omega_1)t)) \\ & + (A_2 + u\Omega_2) (\cos((\nu - \Omega_2)t) + \cos((\nu + \Omega_1 - \Omega_2)t)) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(t)}{\partial A_2} = & 2(2A_2 + u\Omega_2) \cos^2\left(\frac{\Omega_2 t}{2}\right) + \\ & + A_1 (\cos(\nu t) + \cos((\nu - \Omega_2)t)) + \\ & + (A_1 + u\Omega_1) (\cos((\nu + \Omega_1)t) + \cos((\nu + \Omega_1 - \Omega_2)t)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(t)}{\partial \nu} = & -A_1 A_2 \sin(\nu t) - \\ & - A_1 (A_2 + u\Omega_2) \sin((\nu - \Omega_2)t) - \\ & - A_2 (A_1 + u\Omega_1) \sin((\nu + \Omega_1)t) - \\ & - (A_1 + u\Omega_1)(A_2 + u\Omega_2) \sin((\nu + \Omega_1 - \Omega_2)t) \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя выражение для подгоночной функции, параметрами которой являются (1), и ее частные производные (2)–(4) в систему уравнений (1), получим систему из трех уравнений с тремя неизвестными относительно A_1 , A_2 , $\nu = \omega_1 - \omega_2$, которую можно решить численно и, определив амплитуды A_1 , A_2 , и расстояние между двумя АВБС – ν .

В четвертом разделе главы впервые предложены схемы волоконных термометров на ДВБС, работающих на основе отраженного (топология «звезда») и прошедшего (топология «параллельная шина») излучения. В приведенном термометре по топологии «звезда» может быть подключено до 128 датчиков, как давления, так и температуры. При этом схема работает на отражение, для чего каждая ДВБС дополнена «глухой» ВБР с идентичным контуром и центральной длиной волны. В термометре по топологии «параллельная шина» также может быть подключено до 128 датчиков, как давления, так и температуры. При этом схема работает на пропускание, для чего все ДВБС дополнены «зеркальной» ВБР полоса пропускания которой равна диапазону измерений температуры, выраженной в длинах волн, а высокий коэффициент связи мод обеспечивает ей постоянный 100% коэффициент отражения во всем указанном диапазоне.

В пятом разделе для формирования реперных точек использовалась термокамера, в которой создавалась и поддерживалась требуемая температура. Для опроса ДВБС (производилось измерение положения пиков ВБР с двумя фазовыми сдвигами) использовался оптический интеррогатор FiberSensing FS1120. Результаты эксперимента представлены на рис. 3 и 4.

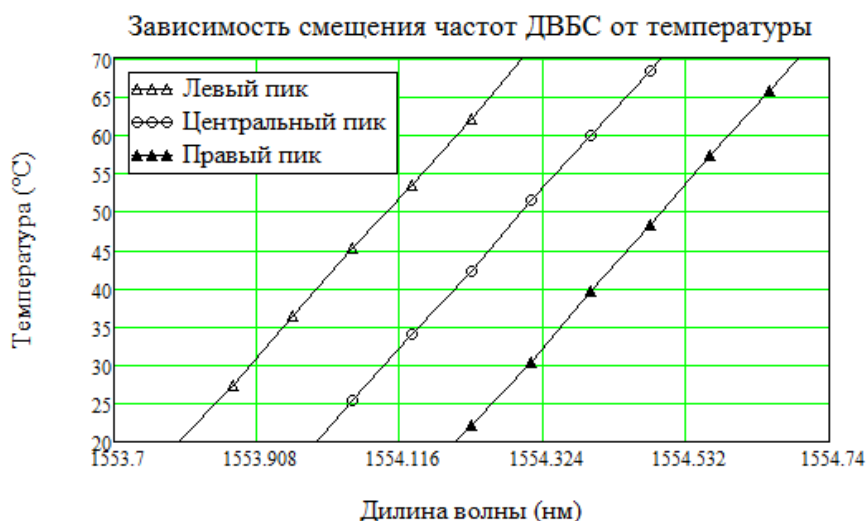


Рис. 3 – Смещение положения пиков в спектре отражения ДВБС в зависимости от температуры

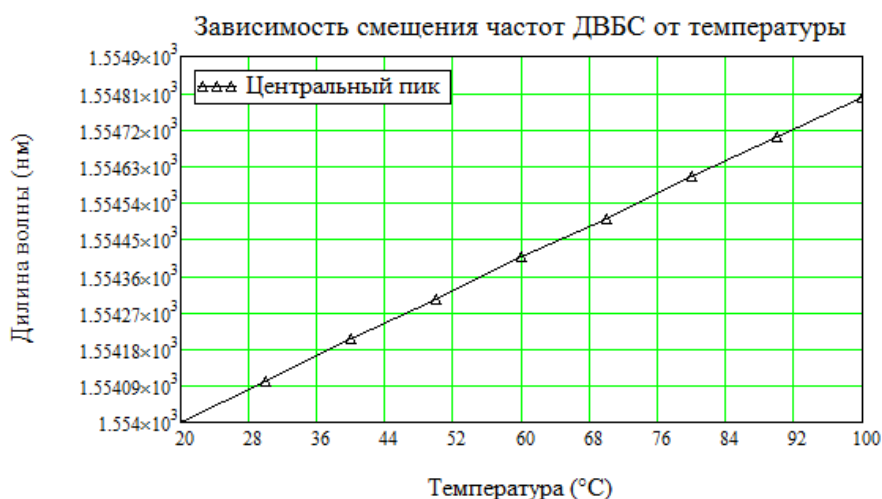


Рис. 4 – Смещение положения левого пика в спектре отражения ДВБС в зависимости от температуры

Результаты эксперимента наглядно демонстрируют, что:

1. Смещение положения характерных участков в спектре отражения ДВБС происходит симметрично (плоскопараллельный сдвиг) с градиентом ~ 10 нм/°C, что соответствует поведению обычных ВБР и ВБР с одним фазовым сдвигом.

2. Зависимость смещения центральной длины волны отражения от температуры имеет линейный характер. Для повышения точности аппроксимации может использоваться зависимость вида $a \cdot x^2 + b \cdot x + c$, как и в промышленных датчиках температуры на основе ВБР.

3. Погрешность измерения температуры не превысила $\pm 0,6$ °C, что соизмеримо с погрешностью измерения положения центральной длины волны отражения используемого прибора опроса (± 5 нм соответствует около $\pm 0,5$ °C). При использовании ртутного термометра 2-го класса точности сравнительная погрешность составила 0,01 °C.

4. Определены аналитические выражения для определения погрешности измерений указанным методом, параметрами которых является ширина окон прозрачности и разнос частот ДВБС. При реально достижимых ширинах окон прозрачности в 1 МГц, и необходимой разрешающей способности измерений в 0,01 °С (10^{-4} для относительной погрешности), минимальный разнос частот должен составить 20 ГГц.

Таким образом, в результате исследований, проведенных в главе 2, разработаны научно-технические основы проектирования дискретных термометров, термоанемометров, расходомеров и их квази-непрерывных вариантов по топологии «звезда» и «параллельная шина». Вопросы проектирования квази-непрерывных ВБР датчиков по топологии «последовательная шина» на ДВБС будут рассмотрены в следующей главе для комбинированных систем третьего уровня иерархии.

В третьей главе исследованы вопросы применения ДВБС в ВСТ третьего уровня иерархии, а именно для калибровки рамановских и бриллюэновских систем и уточнения их показаний по распределенной температуре, а также для построения систем распределенной акустической шумомерии.

В первом разделе главы предложена структурная схема комбинированной сенсорной системы (рис. 5), сочетающей основанный на некогерентной оптической частотной рефлектометрии температурный датчик на рамановском рассеянии с термоманометром для наблюдения за скважиной в устье и окончании.

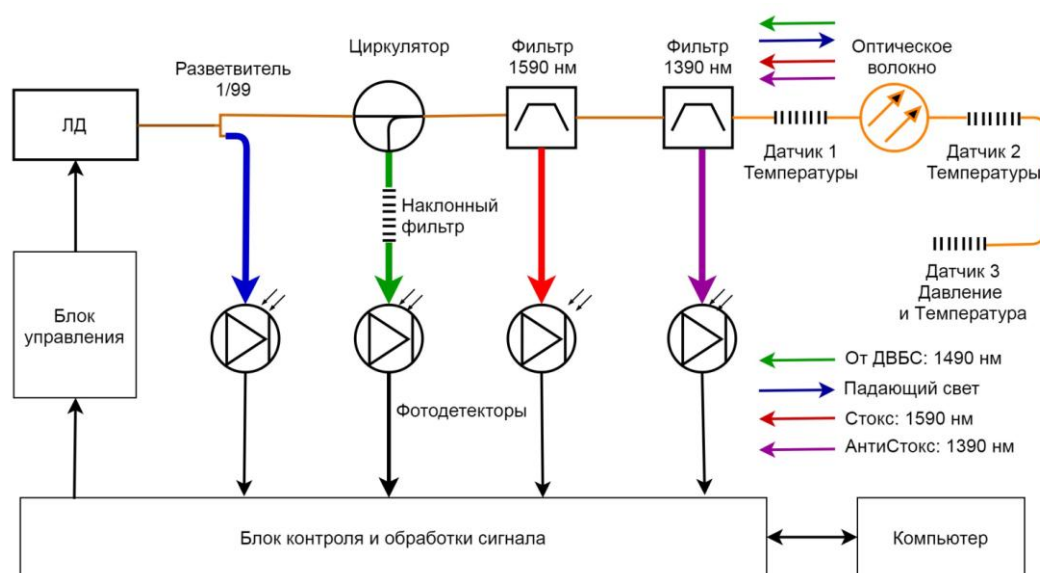


Рис. 5 – Экспериментальная установка комбинированной рамановской/РДТ/ДВБС сенсорной системы

Используя лазерный диод ЛД в качестве общего источника излучения, была создана комбинированная РДТ/ДВБС сенсорная система на едином волокне. Активированное и спонтанное излучение лазерного диода используются

для РДТ и зондирования ДВБС соответственно. Термоманомер выполнен в виде совмещенных датчиков давления и температуры, каждый из которых использует ДВБС в качестве чувствительного элемента (рис. 6).

Совмещенный датчик давления и температуры

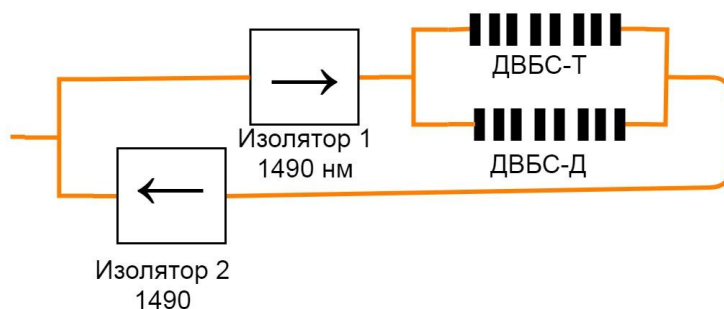


Рис. 6 – Структура совмещенного датчика давления

Полученные экспериментальные данные показывают, что и распределенная температура, и температура в ключевых точках могут быть измерены альтернативным способом с малыми погрешностями и более высокой разрешающей способностью, достигающей $0,008\text{ }^{\circ}\text{C}$, особенно при применении совмещенного ДВБС датчика.

Во втором разделе главы предложена структурная схема аналогичной системы на основе бриллюэновского оптического частотного распределенного анализа (БДТ) с квазираспределенным подходом, основанным на ДВБС, что дает возможность одновременно проводить распределенные и точечные измерения температуры. Достигнутая разрешающая способность для калибровки распределенной системы составляет $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ и определяется параметрами ДВБС.

В третьем разделе главы предложены структурные решения для комбинированных акустических сенсорных систем. В частности, приведена распределенная акустическая сенсорная система, основанная на непрерывном широкополосном массиве волоконных брэгговских решеток. Предложена двухкомпонентная интеррогация однотипных ВБР, объединенных в группу, с использованием интерференции с частотным смещением. Обозначены недостатки, описанных методов, в частности, сложность интерференционного устройства, его калибровку и управление двумя зеркалами с фарадеевским вращением, низкая скорость опроса и необходимость перестройки лазерного излучения по частоте. На основе сделанных сравнений впервые предложена модернизированная схема опрос массива слабо отражающих двухэлементных волоконных брэгговских структур для распределенных акустических измерений. В работе представлена модель и приведен численный эксперимент для анализа характеристик системы распределенных акустических измерений на основе массива ДВБС (рис. 7).

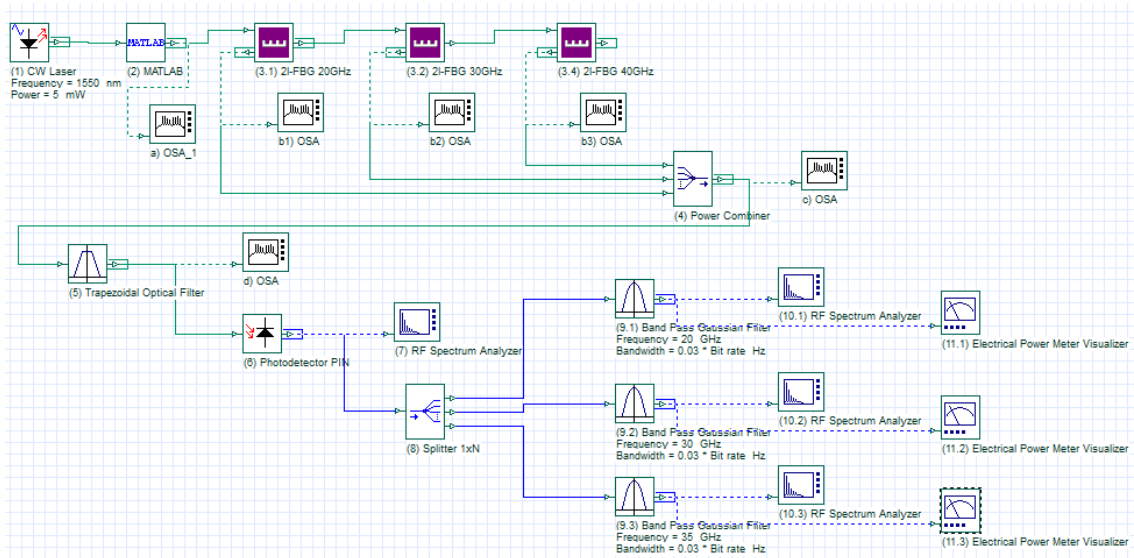


Рис. 7 – Модель опто-электронной схемы опроса ДВБС, основанная на анализе отраженного сигнала

Если в первом и втором пунктах третьего раздела используются слабо отражающие ВБР по коэффициенту отражения, то в пятом и по коэффициенту спектрального использования диапазона измерений (рис. 8).

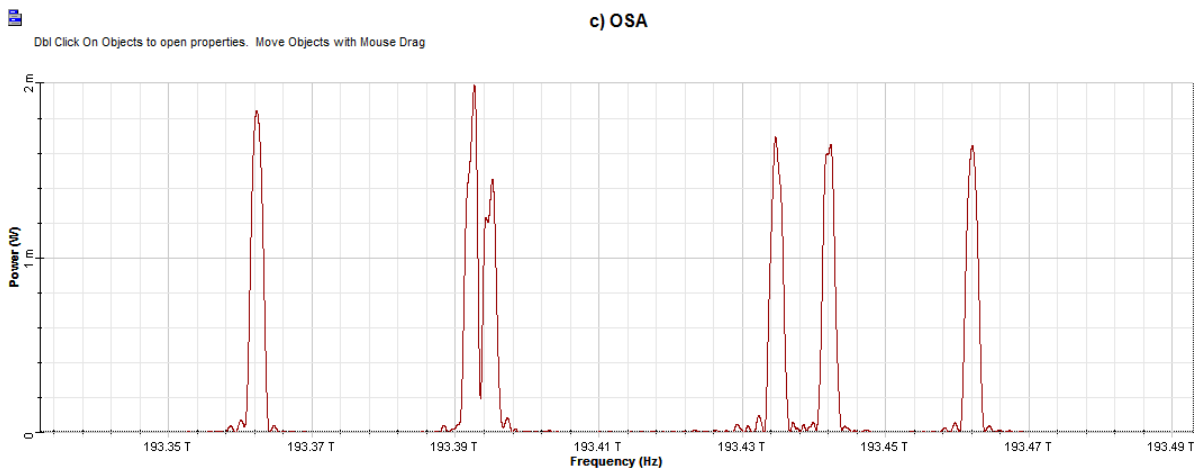


Рис. 8 – Спектральные характеристики ДВБС, входящих в массив

Оценим влияние смещения центральной длины волны ДВБС₂ на результаты измерения. Для чего, смоделируем смещение центральной длины волны ДВБС₂ структуры в диапазоне от 1550.3 до 1550.80 нм с дискретным шагом 0.05 нм, получим результаты измерений частоты и амплитуды опроса на разностных частотах для 11 последовательных различных положений ДВБС₂. Потребуем возникновения условия не одной кратности, а возникновения многократности разностных частот. Расположим ДВБС таким образом, чтобы в частотной области образовались несколько кратных частот, равных разностной частоте ДВБС₂.

Результаты расчетов по (4) для данного случая с точностью задания начальных значений в 5% приведены ниже:

$$\omega = \begin{pmatrix} 52 \\ 70 \\ 90 \end{pmatrix}, z = \begin{pmatrix} 50.9377 \\ 68.5699 \\ 88.1614 \end{pmatrix}, s = \begin{pmatrix} 52.0061 \\ 70.0000 \\ 90.0000 \end{pmatrix}, E = \begin{pmatrix} -6.0900 \cdot 10^{-3} \\ +2.5042 \cdot 10^{-7} \\ +3.3799 \cdot 10^{-7} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Максимальная погрешность определения положения ДВБС составляет не более 0.008 усл. ед. (8 МГц), что приводит к ошибке в определении центральной длины волны порядка сотых долей пика метра.

Таким образом, по результатам исследований, приведенных в третьей главе, предложены: принципы построения комбинированных волоконно-оптических систем внутрискважинной термометрии для решения задач компенсации влияния температуры в точечной манометрии и уточнения показаний бриллюэновских и рамановских распределенных датчиков в их ключевых точках; разработана методика комбинированного радиофотонного измерительного преобразования и определение его основных методических погрешностей для распределенной акустической шумометрии и расходомерии.

В четвертой главе решена задача разработки практических рекомендаций по проектированию и созданию комбинированных систем ВСТ на двух-элементных волоконных брэгговских структурах.

В первом разделе главы поставлена задачи калибровки дискретных термоанемометров на ДВБС, предполагаемых к использованию в системах ВСТ всех уровней иерархии. Задача состоит в том, чтобы построить зависимость температуры (T), как функцию от смещения центральной длины волны ($\Delta\lambda_T$), в виде функциональной зависимости $T = f(\Delta\lambda_T)$, а также построить зависимость давления (P), как функциональную зависимость от смещения центральной длины волны датчика давления ($\Delta\lambda_P$), в виде $P = g(T, \Delta\lambda_P) = g(T(\Delta\lambda_T), \Delta\lambda_P)$, т.е. с уточнением по температуре.

Данная задача решена во втором разделе главы. Максимальная погрешность аппроксимации температуры составила $0,087^\circ\text{C}$, среднее значение погрешности аппроксимации температуры не превысило $0,0148^\circ\text{C}$, что составляет $0,078\%$ и $0,011\%$ от полной шкалы измерения температуры, соответственно. Максимальная погрешность аппроксимации давления составила $1,608$ атм, среднее значение погрешности аппроксимации давления не превысило $0,53$ атм., что составляет $0,258\%$ и $0,082\%$ от полной шкалы измерения давления, соответственно. Точность аппроксимации и ее относительная погрешность позволяют считать, что предложенный метод успешно применим для калибровки как совмещенных датчиков давления и температуры, так и отдельных датчиков температуры.

В третьем разделе главы представлены экспериментальные стенды, которые использовались при выполнении работы и проектировании систем ВСТ третьего и четвертого уровня иерархии. На рис. 9 и рис. 10 представлены стенды для формирования рамановского и бриллюэновского рассеяния соответственно. Стенды выполнены в ходе совместных работ с ООО «Связьстрой» и ФГОБУ ВПО «ПГУТИ» в ходе выполнения работ в рамках инициативных исследований.

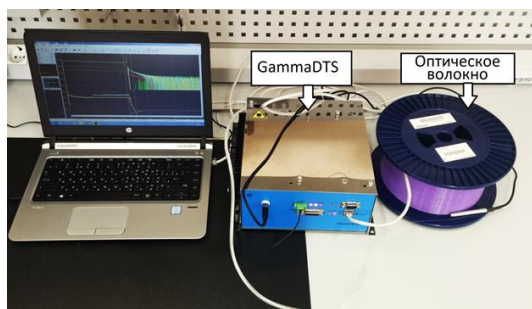


Рис. 9 – Стенд РДТ

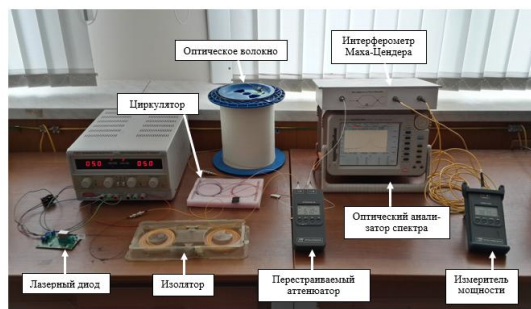


Рис. 10 – Стенд БДТ

Отдельно в рамках этого же раздела рассмотрен дискретный датчик вибрации. Разработанный ВОДВ на ДВБС показал работоспособность в диапазоне до 22 кГц. В диапазоне колебаний большинства механических систем 0–200 Гц погрешность определения частоты не превышала 1 Гц. Максимальная погрешность определения частоты в диапазоне от 10 Гц до 2 кГц составила 1.56 Гц на частоте в 1900 Гц.

В четвертом разделе представлены результаты полевых испытаний системы ВСТ третьего уровня иерархии. На рис. 11 показан внешний вид системы «ИРЗ ТМС-Квант+», а на рис. 12 пример термограммы, полученной на скважине №13010 Ашальчинского месторождения ООО «ЛУКОЙЛ-Коми»



Рис. 11 – Внешний вид системы «ИРЗ ТМС-Квант+»

Системы ВСТ проектировалась по принципам, представленным во второй главе. Полученная разрешающая способность по температуры составила 0,015 °С, что очень близко к целевому значению. Данная система защищена патентом РФ на управление системой сбора информации.

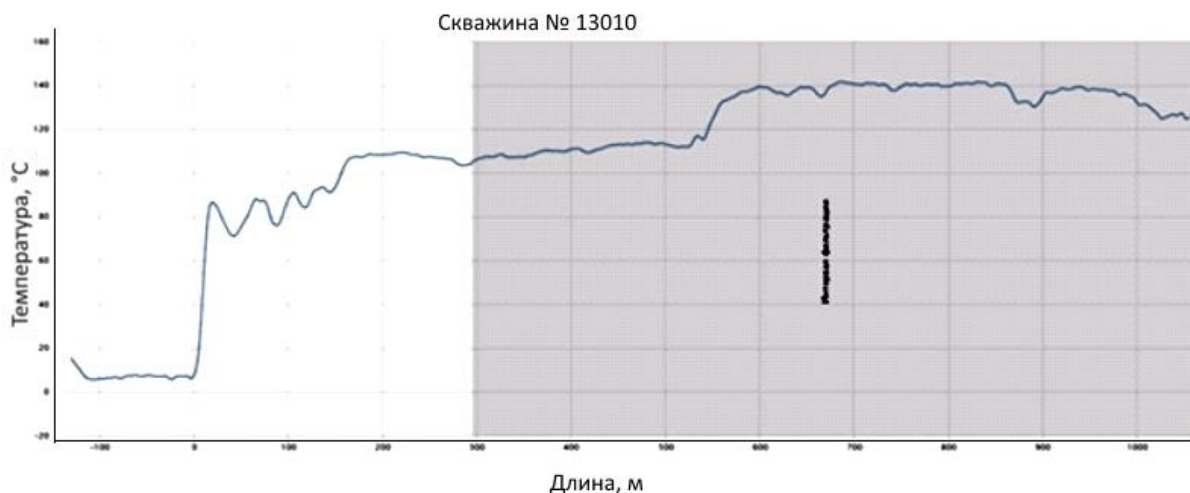


Рис. 12 – Пример термограммы, полученной при помощи «ИРЗ ТМС-Квант+» на скважине №13010 Ашальчинского месторождения

В пятом разделе главы представлены типовые решения для построения систем ВСТ четвертого уровня иерархии. Решения включают в себе непрерывные и квази-распределенные варианты ВСТ, объединенные в одной систем сбора и обработки информации на основе программно-определяемого подхода и ДВБС. Типовые решения защищены патентом РФ на принципы построения систем ВСТ.

По совокупности результатов четвертой главы выполнена разработка практических рекомендаций по проектированию и созданию ДВБС, их применению в комбинированных волоконно-оптических системах внутрискважинной термометрии, в том числе для калибровки совмещенных датчиков давления и температуры, создания калибровочных стендов для комбинированных измерений на основе бриллюэновских и рамановских систем, верификации теоретических данных на основе результатов экспериментальных испытаний; внедрение результатов исследований и оценка перспектив их дальнейшего развития на основе анализа возможности комбинированных систем высшего уровня иерархии.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Совокупность результатов проведенных научных исследований можно квалифицировать как решение актуальной научно-технической задачи улучшения метрологических и технико-экономических характеристик комбинированных систем внутрискважинной термометрии на основе применения в них двух-элементных волоконных брэгговских структур и средств радиофотонной обработки оптической информации, полученной с них, в радиодиапазоне.

Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. На основе систематизации и анализа информации о существующих и перспективных волоконно-оптических комбинированных системах внутрискважинной термометрии определены возможные пути улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик. Показано, что дальнейшее развитие систем указанного класса может быть основано на применении в них двухэлементных волоконных брэгговских структур, а также простых и дешевых в реализации способов их радиофотонной интеррогации, которые должны быть специально разработаны с учетом процедур прецизионного измерительного преобразования по амплитудным параметрам огибающей биений спектральных составляющих зондирующего излучения, прошедших через окна прозрачности или отраженных от двух сверхузкополосных идентичных ВБР.

2. По результатам анализа прохождения квазиширокополосного зондирующего излучения через двухэлементные волоконные брэгговские структуры впервые предложены способы измерения температуры для мало- (на отражение) и многосенсорных (на пропускание) приложений. Даны их теоретические обоснования. Оценка основных методических погрешностей измерений амплитудных параметров огибающей с учетом ее квазигармонического характера и оптомеханики ДВБС позволила определить значение погрешности измерений в $\pm 0,1$ пм, что на порядок меньше чем требуемая величина для термометрии, достижимая с помощью известных спектральных или векторных методов измерений. Проведены вычислительные и физические эксперименты подтвердившие теоретические результаты.

3. Разработаны принципы построения комбинированных систем внутрискважинной термометрии, основанные на применении в них двухэлементных волоконных брэгговских структур и решении задач совместного применения и калибровки точечных датчиков давления и температуры, распределенных бриллюэнновских и рамановских датчиков и квазираспределенных брэгговских массивов. Дано теоретическое обоснование вариантов компенсации данными, полученными с двухэлементных волоконных брэгговских термометров, данных с других датчиков с целью повышения точности измерений комбинированной системы. Разработаны универсальные системы зондирования полной комбинации датчиков. Проведены вычислительные и физические эксперименты указанных вариантов, которые показали, что реально достижимая погрешность измерений при работе в условиях маломеняющихся температур составляет около $\pm 0,15$ пм. При этом не требуется сложной дорогостоящей аппаратуры спектрального или векторного анализа, а измерение проходит на частоте огибающей биений, которая лежит в области минимальных шумов фотоприемника, что позволяет получить выигрыш по отношению сигнал/шум измерений в 3–5 раз.

4. На базе анализа оптомеханики двухэлементных волоконных брэгговских структур и разработанных способов спроектированы и созданы датчики для точечных измерений, макеты комбинированных систем внутрискважинной термометрии, экспериментальные стенды для их калибровки и верификации в полевых условиях. Разработаны рекомендации по проектированию датчиков и систем, включая алгоритмы радиофотонной обработки информации с них. Проанализированы перспективные направления развития комбинированных систем внутрискважинной термометрии, использующих разработанные способы и датчики для проведения измерений с учетом программно-определяемого подхода.

Результаты диссертационной работы внедрены в виде систем, интеррогаторов, отдельных датчиков, программных средств, практических рекомендаций по проектированию, методик измерения и учебно-методических материалов.

Новизна и полезность технических решений подтверждены шестью патентами на изобретение и полезную модель РФ.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК по специальности 05.11.13:

1. Феофилактов, С.В. Перспективы применения комбинированных внутрискважинных волоконно-оптических измерительных систем / С.В. Феофилактов, Д.А. Черепанов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. – Режим доступа: URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14445>

2. Феофилактов, С.В. Вопросы применения концепции программно-определяемых сетей для систем внутрискважинной волоконно-оптической телеметрии / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, С.В. Феофилактов и др. // Нелинейный мир. – 2014. – Т. 12. – № 10. – С. 83-90.

3. Феофилактов, С.В. Волоконно-оптический датчик вибрации «Виб-А» / К.А. Липатников, А.Ж. Сахабутдинов, С.В. Феофилактов и др. // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4. – Режим доступа: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5207.

Патенты:

4. Патент РФ №2509888, Российская Федерация, МПК E21B47/06, G01K11/32, G01L11/02. Способ мониторинга внутрискважинных параметров (варианты) и система управления процессом добычи нефти / С.В. Феофилактов, Д.В. Чернов, А.В. Кузнецов [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «Ижевский радиозавод» (RU). – №2012124255/03; заявл.: 13.06.2012; опубл.: 20.03.2014; Бюл. № 8. – 15 с.

5. Патент РФ №153963, Российская Федерация, МПК F04B49/06, E21B 47/00. Устройство управления электродвигателем насосной установки / Д.Ф. Салахов, Д.А. Черепанов, С.В. Феофилактов; заявитель и патентообладатель АО «Ижевский радиозавод» (RU). – №2015113379/03; заявл.: 10.04.2015; опубл.: 10.08.2015; Бюл. № 22. – 4 с.

6. Патент РФ №179264, Российская Федерация, МПК G01K11/32. Волоконно-оптический термометр / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, С.В. Феофилактов [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» (RU). – №2017139611/28; заявл.: 14.11.2017; опубл.: 07.05.2018; Бюл. № 13. – 11 с.

7. Патент РФ №180903, Российская Федерация, МПК G01K11/32; G02B 6/43. Волоконно-оптический термометр / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, С.В. Феофилактов [и др.]; заявитель и патентообладатель АО «НПО «Каскад»» (RU). – №2017137997/28; заявл.: 31.10.2017; опубл.: 29.06.2018; Бюл. № 16. – 11 с.

8. Патент РФ № 2673507, Российская Федерация, МПК G01K11/32. Волоконно-оптический термометр / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, С.В. Феофилактов [и др.]; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Научно-производственное объединение "Каскад" (АО "НПО "Каскад") (RU). – №2017138039/28; заявл.: 31.10.2017; опубл.: 27.11.2018; Бюл. № 33. – 11 с.

9. Патент РФ № 2 667 344, Российская Федерация, МПК G01K11/32. Волоконно-оптический термометр / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, С.В. Феофилактов [и др.]; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ" (КНИТУ-КАИ) (RU). – № 2017139653; заявл.: 14.11.2017; опубл.: 18.09.2018; Бюл. № 26. – 11 с.

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus/WoS:

10. Feofilaktov, S.V. Software defined down-hole telemetric systems: training course / I.I. Nureev, O.G. Morozov, S.V. Feofilaktov, et al. // Proc. of SPIE. – 2015. – Vol. 9533. – P. 953311.

11. Feofilaktov, S.V. Development of a fiber-fed spectrometer for the near IR-domain / I.I. Nureev, S.V. Feofilaktov, D.A. Cherepanov, et al. // Proc. of SPIE. – 2015. – Vol. 9533. – P. 95330E.

12. Feofilaktov, S.V. Methods of dispersion improvement in a fiber-fed spectrograph scheme / I.I. Nureev, O.G. Morozov, S.V. Feofilaktov, et al. // Proc. of SPIE. – 2016. – Vol. 9807. – P. 98070Y.

13. Феофилактов, С.В. Технология измерения продуктивности пластов при одновременно-раздельной эксплуатации скважин с применением электроцентробежных насосов в ООО «ЛУКОЙЛ - Западная Сибирь» / С.В. Феофилактов, В.А. Костиловский, Ф.Т. Шамилов // Нефтяное хозяйство. – 2017. – №8. – С. 108-111.

14. Feofilaktov, S.V. Multiple frequencies analysis in tasks of FBG based instantaneous frequency measurements / A.J. Sakhabutdinov, O.G. Morozov, S.V. Feofilaktov, et al. // Proc. of SPIE. – 2018. – Vol. 10774. – P. 107740Y.

15. Feofilaktov, S.V. FBG based brush length sensors for onboard measurement systems / A.A. Kuznetsov, I.I. Nureev, S.V. Feofilaktov et al. // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2018. – Vol. 83506. – P. 8350609.

16. Feofilaktov, S.V. Multiple frequencies analysis in FBG based instantaneous frequency measurements / A.J. Sakhabutdinov, O.G. Morozov, S.V. Feofilaktov, et al. // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2018. – Vol. 8350560. – P. 8350635.

Статьи в прочих изданиях:

17. Феофилактов, С.В. Высокоточные системы погружной телеметрии для проведения гидродинамических исследований / С.В. Феофилактов // Нефтегазовая Вертикаль. – 2011. – №11. – С. 62-63.

18. Феофилактов, С.В. Системы погружной телеметрии для "жестких" условий эксплуатации / С.В. Феофилактов // Инженерная практика. – 2013. – №10. – С. 8-10.

19. Феофилактов, С.В. Высокоточные системы погружной телеметрии для "жестких" условий эксплуатации / С.В. Феофилактов // Инженерная практика. – 2013. – №11. – С. 61-65.

20. Феофилактов, С.В. Системы управления и мониторинга для механизированной добычи нефти / С.В. Феофилактов, А.Е. Манохин // Инженерная практика. – 2016. – №4. – С. 40-44.

21. Феофилактов, С.В. Система управления и мониторинга для установок штанговых винтовых насосов / С.В. Феофилактов, Д.С. Холин // Инженерная практика. – 2017. – №9. – С. 112-115.

Материалы докладов:

22. Феофилактов, С.В. Разработка концепции комбинированных внутрискважинных волоконно-оптических измерительных систем / С.В. Феофилактов, Д.А. Черепанов, О.Г. Морозов // Физика и технические приложения волновых процессов: тезисы докладов XII Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». – Казань 2014. – С. 155-157.

23. Феофилактов, С.В. О концепции комбинированных внутрискважинных волоконно-оптических измерительных систем / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, С.В. Феофилактов и др. // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2014; Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2014: материалы Международных научно-технических конференций. – Казань 2014. – С. 126-128.

24. Феофилактов, С.В. Комбинированные внутрискважинные волоконно-оптические измерительные системы / С.В. Феофилактов, Д.А. Черепанов, О.Г. Морозов и др. // Международная молодежная научная конференция «XXII Туполевские чтения (школа молодых ученых)»: материалы конференции, сборник докладов. – Казань 2015. – С. 799-804.

25. Феофилактов, С.В. Постановка задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры / А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, С.В. Феофилактов и др. // Всероссийская научно-практическая конференция «Оптическая рефлектометрия - 2016»: сборник тезисов докладов. – Пермь 2016. – С. 70-71.

26. Феофилактов, С.В. Процедура решения задач калибровки совмещенных датчиков давления и температуры / А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, С.В. Феофилактов и др. // Всероссийская научно-практическая конференция «Оптическая рефлектометрия - 2016»: сборник тезисов докладов. – Пермь 2016. – С. 72-73.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ Г39.

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К. Маркса, 10