

На правах рукописи  
УДК 681.78

Чернуцкий Антон Олегович

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ  
ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

**Научный руководитель:** **Пнев Алексей Борисович**  
кандидат технических наук,  
начальник лаборатории волоконно-оптических систем НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана

**Официальные оппоненты:** **Семенов Сергей Львович,**  
доктор физико-математических наук,  
руководитель Научного центра  
волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН,  
г. Москва

**Куликов Андрей Владимирович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
директор института «Высшая инженерная  
школа» ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет ИТМО»,  
г. Санкт-Петербург

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Научно-производственное объединение  
Государственный оптический институт  
им. С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «25» мая 2022 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.07 по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



М.С. Ковалев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Волоконно-оптические сенсорные системы (ВОСС) широко применяются в различных областях науки и техники, в том числе в горнодобывающей, нефтяной и газовой отраслях, в гидроэнергетике, строительстве, авиации и космосе. Распространению таких систем способствует целый ряд их преимуществ в сравнении с существующими электрическими, например, отсутствие необходимости в электропитании и функционирование на больших расстояниях, возможность работы в электромагнитных полях, химическая и термическая устойчивость. Все это делает возможным их применение в агрессивных и высокотемпературных средах и мониторинге протяженных объектов. ВОСС способны регистрировать различные физические величины, в том числе температуру. Среди нескольких типов ВОСС измерения температуры, а именно точечных, квази-распределенных и распределенных, можно выделить последние как наиболее перспективные. Одним из типов таких систем, получивших распространение, является распределенный волоконно-оптический датчик температуры (распределенный ВОДТ) на основе регистрации комбинационного рассеяния света.

К настоящему времени сформировались научные группы и компании, занимающиеся вопросами изучения и создания распределенных ВОДТ, среди них стоит выделить: А. Хартог (Саутгемптон, Великобритания), Г. Болонини, М. Сото (Италия), Дж.Парк (Сеульский университет, Южная Корея), М. Таннер (Великобритания), российские научные группы из МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученые ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва (Б.Г. Горшков и др.), а также компании: Silixa и Sensornet (Великобритания), LIOS Technology (Германия), Инверсия-сенсор (Россия).

Измерения существующими распределенными ВОДТ ограничены пространственным разрешением в 1 м и погрешностью измерения температуры 0,5 °С в диапазоне от минус 50 до плюс 90 °С. Такие параметры не позволяют расширить области и возможности применения оптоволоконного мониторинга, например, в задачах измерения поля температур в витых криогенных теплообменных аппаратах, где необходимо обеспечить измерение с дискретностью менее 0,5 м и с погрешностью измерения не хуже 0,1 °С. Также, например, при постоянном мониторинге температуры нефтяных горизонтальных скважин необходимо иметь достаточно протяженную длину измерения – более 5 км. В этой связи важными направлениями в области распределенных ВОДТ являются исследования возможностей повышения пространственного разрешения, а также снижения погрешности измерения температуры. Поэтому разработка соответствующих методов и технических путей их реализации представляются актуальными задачами.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов повышения пространственного разрешения и уменьшения погрешности измерения распределенного волоконно-оптического датчика температуры на основе комбинационного рассеяния света и метода рефлектометрии во временной области.

Для этого были решены следующие **научно-технические задачи**:

–проведено аналитическое исследование существующих волоконно-оптических датчиков, предназначенных для измерения температуры на протяжённых участках оптического волокна, и предложены методы повышения пространственного разрешения и уменьшения погрешности измерения;

–разработана математическая модель процесса формирования сигнала в волоконно-оптической сенсорной системе на основе анализа компонент комбинационного рассеяния методом оптической рефлектометрии во временной области, позволяющая оценить метрологические характеристики на этапе выбора компонентов;

–обоснованы функциональные схемы распределенного волоконно-оптического датчика температуры: с повышенным пространственным разрешением на основе зондирования сенсорного волокна ультракороткими оптическими импульсами; с уменьшенной погрешностью измерения на основе активного термостатирования опорного участка оптического волокна;

–разработана методика калибровки распределенных волоконно-оптических датчиков температуры с активным термостатированием опорного участка оптического волокна в составе приборной части;

–созданы макетные образцы датчиков, использующие предложенные методы повышения пространственного разрешения и уменьшения погрешности измерения, на которых проведены экспериментальные исследования с целью проверки основных теоретических положений.

**Объект исследования** – распределенный волоконно-оптический датчик температуры.

**Предметом исследования** является повышение пространственного разрешения и уменьшение погрешности измерения распределенного ВОДТ на основе анализа компонент комбинационного рассеяния света и метода рефлектометрии во временной области.

**Методы исследований.** При решении теоретических и прикладных задач были использованы методы теории распространения излучения в оптическом волокне, теория комбинационного рассеяния, теория вероятности, экспериментальные методы исследований: метод реализации температур реперных точек, метод двух сечений, а также методы обработки сигналов, системный подход.

**Научная новизна** результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

–предложена методика повышения пространственного разрешения распределенных ВОДТ для длины измерения более 5 км на основе зондирования оптического сенсорного волокна импульсами ультракороткой длительности;

–предложен новый метод уменьшения погрешности измерения температуры, основанный на введении активного термостатирования опорного участка оптического волокна;

–разработана математическая модель процесса формирования сигнала в распределенном ВОДТ и в рамках данной модели разработаны методики расчёта значений основных конструктивных параметров, при которых обеспечиваются: минимальная погрешность измерения температуры, высокое пространственное разрешение, максимальная длина сенсора.

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

–разработанная математическая модель позволяет обосновать функциональную схему распределенного ВОДТ и методики расчета основных ее параметров, определить требования к значению стабильности температуры опорного участка для получения заданной погрешности измерения  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

–разработанный метод повышения пространственного разрешения при сохранении протяженной длины измерения распределенным ВОДТ, основанный на зондировании оптического сенсорного волокна импульсами ультракороткой длительности, позволяет повысить пространственное разрешение в 3 и более раз;

–использование метода активного термостатирования опорного участка оптического волокна в составе приборной части датчика позволяет: минимизировать влияние изменений внешних температур значением  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  и более, уменьшить погрешность измерений температуры более чем в 4 раза.

**Практическая значимость работы** заключается в возможности применения полученных результатов при создании распределенных ВОДТ на основе регистрации комбинационного рассеяния и метода оптической рефлектометрии во временной области.

**Реализация результатов.** Результаты диссертационной работы были использованы в ООО «Научно-инновационный центр «Институт развития исследований, разработок и трансферта технологий» (НИЦ «ИРТ») при выборе оптической схемы и составляющих компонентов в рамках разработки комплексной системы мониторинга технического состояния конструкций беспилотных летательных аппаратов. Реализация результатов работы подтверждается соответствующим актом.

**Достоверность** полученных в работе результатов подтверждается согласованностью математического моделирования и экспериментальных исследований с использованием аттестованного оборудования.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на девяти международных конференциях: Международная конференция «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург, 2018, 2020), 31-я Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине» (Москва, 2020), OPTICAL SENSORS 2019 (Чехия, 2019), школа-конференция с международным участием "Saint-Petersburg OPEN" (Санкт-Петербург, 2017, 2019), «XXX Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине» (Москва, 2019), PIERS-2017 (Санкт-Петербург, 2017), ICMIE 2016 (Германия, 2016).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 печатных работах, из них 2 патента на изобретение и 7 научных статей, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК РФ и/или международные базы цитирования Web of Science и Scopus, общим объемом 3,19 п.л.

**Личный вклад автора.** Заключается в выполнении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку математической модели, методик экспериментальных исследований, анализ и оформление результатов в виде публикаций. Подготовка основных публикаций проводилась с соавторами. Во всех работах, выполненных в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, разработке методов их решения, получении, обработке и анализе результатов.

**Структура и объём диссертации.** Работа состоит из введения, трёх глав, общих выводов и списка литературы. Материал изложен на 155 страницах машинописного текста и содержит 86 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 122 библиографических описаний.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность проведённой работы, обозначены основные существующие проблемы датчиков температуры. Сформулированы цели, задачи, защищаемые положения, представлены ценность и практическое применение результатов, приведена структура диссертации.

**В первой главе** проведен анализ существующих волоконно-оптических датчиков температуры.

Обзор литературы показал, что в настоящее время существует несколько различных типов распределенных ВОДТ, которые можно классифицировать как по типу рассеяния, так и по методу регистрации полезного сигнала.

Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (РМБ) и комбинационное рассеяние в оптических волокнах чувствительно к изменениям температуры, и именно этот эффект используется для организации распределенного измерения. Однако РМБ также зависит от деформаций.

Разделение этих двух процессов достаточно проблематично на практике. Комбинационное рассеяние чувствительно только к изменению температуры и имеет коэффициент зависимости выше, чем при РМБ (примерно 0,8 %/К против 0,36 %/К соответственно). Этим и обоснован выбор комбинационного рассеяния и метода оптической рефлектометрии для построения распределенных ВОДТ. Подобные датчики известны, имеются их коммерческие версии, которые находят практическое применение в различных областях науки и техники. Работы по данному направлению ведутся в России и за рубежом, создаются новые различные схемы и экспериментальные установки. Тем не менее остались мало изучены несколько направлений улучшения метрологических характеристик подобных датчиков.

Сделан вывод, что пространственное разрешение и погрешность измерения существующих распределенных ВОДТ ограничены для расширения областей их применения. Например, в задачах, где необходимо обеспечить пространственное разрешение менее 0,5 м при общей длине измерения более 2 км. Существующие методы улучшения пространственного разрешения с применением сложной схемы детектирования на основе сверхпроводящих однофотонных детекторов позволяют получить высокое разрешение, однако оказываются не способными обеспечить большую длину измерения (более 3 метров).

Для метода оптической рефлектометрии во временной области мощности обратнорассеянного излучения складываются в пределах полуширины импульса зондирования, длина которого эквивалентна пространственному разрешению датчика  $\left(\Delta z = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{n} \cdot \tau_{\text{имп}}\right)$ . Наиболее используемыми источниками излучения зондирующих импульсов для распределенных ВОДТ являются лазеры с модуляцией добротности, лазеры непрерывного действия с внешней модуляцией интенсивности и полупроводниковые источники. Значительная длительность импульса источников более 10 нс ограничивает эффективное пространственное разрешение несколькими метрами. В диссертации в качестве источника излучения для распределенного ВОДТ на основе регистрации комбинационного рассеяния света предлагается использовать волоконный лазер ультракоротких импульсов (УКИ) с синхронизацией мод. Структурно-функциональная схема такого датчика представлена на Рисунке 1. Подобный лазер способен обеспечить длительность импульса порядка 300 фс и пиковую мощность порядка 1 кВт, что может составить пространственное разрешение равным сотым долям миллиметра (без учета остальных ограничивающих факторов). Увеличение длины сенсора обеспечивается низкой частотой повторения и солитонным типом распространения импульсов, который обладает более высокой резистентностью к дисперсионному уширению по сравнению, например, с

импульсами, полученными из лазера с модуляцией добротности. Такой тип распространения достигается благодаря сочетанию эффекта фазовой самомодуляции, который обеспечивается высокой интенсивностью импульса УКИ, и отрицательной дисперсии групповых скоростей сенсорного оптического волокна. В работе предложена методика повышения пространственного разрешения с сохранением большой длины измерения распределенным ВОДТ на основе зондирования оптического сенсорного волокна импульсами ультракороткой длительности.

Обычно для организации опорного сигнала в приборной части распределенных ВОДТ принято размещать участок оптического волокна, составляющего часть измерительной линии, с прецизионным измерением его температуры электрическим датчиком. Такой метод не обеспечивает высокой повторяемости и малой погрешности измерений особенно в условиях быстро меняющихся температур среды, в которой располагается приборная часть. Среди недостатков подобной конструкции могут быть нежелательные эффекты самонагрева термометра (совмещенного с оптическим волокном), тепловая инерция, общая погрешность измерения и т.д. Все перечисленные факторы могут вызывать флуктуации – возникает разница между реальной температурой опорного оптического волокна и измеренной с помощью термометра сопротивления, совмещенного с опорной катушкой. Это приводит к увеличению погрешности измерения температуры в целом. Для решения данной проблемы в работе предложен метод активного термостатирования опорного участка оптоволоконка.

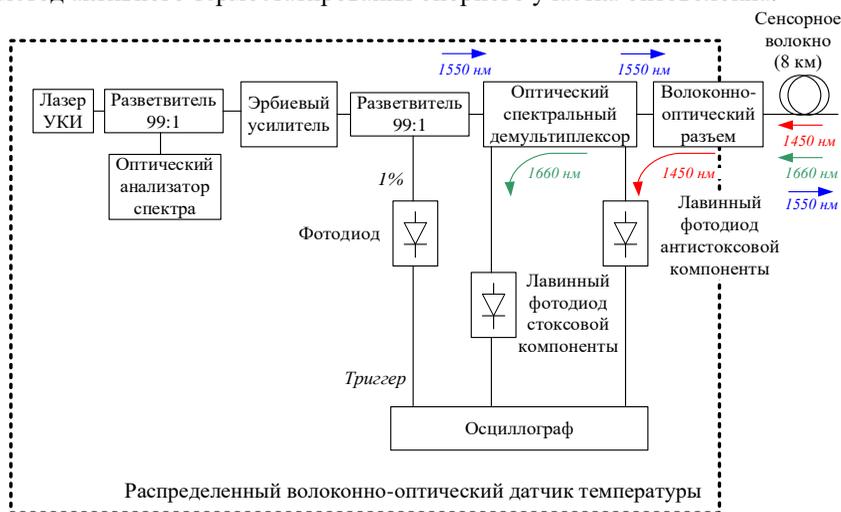


Рисунок 1. Схема распределенного ВОДТ с высоким пространственным разрешением на основе chirпированного импульсного лазера с синхронизацией мод

**Во второй главе** приведено описание математической модели формирования сигнала распределенного ВОДТ с высоким пространственным разрешением. В рамках указанной модели разработаны методики расчёта основных параметров датчиков, основанных на методе оптической рефлектометрии во временной области.

В модели учитывались параметры зондирующего сигнала, оптического волокна, приемной системы с учетом влияния различных шумов. Входное воздействие задавалось в виде функции, зависящей от координаты, ширины и температуры. Модель также позволяет учесть возникающие нестабильности температуры опорного участка оптического волокна и их влияние на погрешность и повторяемость измерения.

Параметрами, на основе которых проводится математический анализ, являются регистрируемые оптическими приёмниками интенсивности стоксовой и антистоксовой компонент рассеяния для каждой точки с координатой  $z$  вдоль линейной части с температурой  $T$ . Уровни напряжения на приемниках излучения определяются этими интенсивностями и рассчитываются по формулам:

$$u_{\text{act}}(z, T) = R_L \cdot R \cdot M \cdot P_0 \cdot \frac{c \cdot \tau}{n_g} \cdot \left[ \exp\left(\frac{h\Delta\nu}{k_B T(z)}\right) - 1 \right]^{-1} \cdot \eta_{\text{act}} \cdot \exp\left(-\int_0^z (\alpha_0(u) + \alpha_{\text{act}}(u)) du\right) + \sigma_{N_{\text{act}}}(z) \quad (1)$$

$$u_{\text{ст}}(z, T) = R_L \cdot R \cdot M \cdot P_0 \cdot \frac{c \cdot \tau}{n_g} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h\Delta\nu}{k_B T(z)}\right) \right]^{-1} \cdot \eta_{\text{ст}} \cdot \exp\left(-\int_0^z (\alpha_0(u) + \alpha_{\text{ст}}(u)) du\right) + \sigma_{N_{\text{ст}}}(z) \quad (2)$$

где  $R_L$  – сопротивление нагрузки операционного усилителя, Ом;  $R$  – чувствительность ЛФД, А/Вт;  $M$  – коэффициент усиления ЛФД;  $P_0$  – пиковая мощность импульса зондирования, Вт;  $c$  – скорость света в вакууме, м/с;  $\tau$  – длительность зондирующего импульса, с;  $n_g$  – показатель преломления сердцевины оптического волокна;  $h$  – постоянная Планка, Дж·с;  $k_B$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $\Delta\nu$  – частотный сдвиг комбинационного рассеяния, Гц;  $T$  – температура среды распространения излучения, К;  $z$  – координата вдоль сенсорного оптического волокна, м;  $\eta_{\text{act}}, \eta_{\text{ст}}$  – коэффициенты для антистоксовой и стоксовой компоненты соответственно, равны  $\eta_{\text{act}} = 11,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1}$ ,  $\eta_{\text{ст}} = 6,63 \cdot 10^{-10} \text{ м}^{-1}$ ;  $\alpha_0, \alpha_{\text{as}}, \alpha_s$  – коэффициенты затухания на зондирующей, антистоксовой и стоксовой длинах волн соответственно, м;  $\sigma_N = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_S^2 + \sigma_V^2 + \sigma_I^2}$  – представляет собой суммарный уровень шумов: теплового  $\sigma_T^2$ , дробового  $\sigma_S^2$ , шума напряжения усилителя  $\sigma_V^2$  и тока усилителя  $\sigma_I^2$ .

Математическая модель позволяет рассчитать отношение сигнал-шум каждого из двух каналов с учетом шумов приемной системы исходя из

технических характеристик применяемых компонентов и микросхем (операционные усилители, фотодиоды, АЦП и др.).

Термограмма (зависимость температуры от расстояния вдоль линейной части) может быть вычислена из уравнения отношения сигналов антистоксовой к стоксовой компонент рассеяния и данных с опорного участка, составляющего часть измерительной линии.

Опорный участок играет важную роль в вычислении термограммы и используется для нормализации сигналов, возвращаемых из линейной части. Этот узел имеет известную температуру (стабилизируется или измеряется), что позволяет компенсировать влияние изменяемых параметров распределенных ВОДТ.

Для конфигурации с опорным участком волокна с известной температурой  $T_{\text{оп}}$ , нормируя  $\frac{u_{\text{аст}}(z,T)}{u_{\text{ст}}(z,T)} = R(z,T)$  на значение  $\frac{u_{\text{аст}}(z_{\text{оп}},T_{\text{оп}})}{u_{\text{ст}}(z_{\text{оп}},T_{\text{оп}})} = R_{\text{оп}}(z_{\text{оп}},T_{\text{оп}})$ , формула вычисления термограммы выглядит следующим образом:

$$T(z) = \frac{1}{\frac{1}{T_{\text{оп}}} - \gamma \left( \ln \left( \frac{R(z,T)}{R_{\text{оп}}(z_{\text{оп}},T_{\text{оп}})} \right) + \Delta\alpha(z - z_{\text{оп}}) + C \right)}, \quad (3)$$

где  $C$  – безразмерный калибровочный коэффициент;  $\Delta\alpha$  – коэффициент, учитывающий дифференциальное затухание между сигналом стоксовой и антистоксовой составляющей,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\gamma = \frac{k}{hc\Delta\nu}$  – коэффициент, учитывающий сдвиг длины волны рассеянного излучения относительно длины волны зондирующего, К;  $T_{\text{оп}}$  – среднее значение температуры опорного оптического волокна за весь период единичного измерения распределенным ВОДТ, К;  $z_{\text{оп}}$  – координата опорного оптического волокна, м.

Полученная в (3) термограмма является относительным измерением. Это означает, что результат измерения будет зависеть от того, какая величина принимается за базу. Поэтому важным этапом проектирования распределенных ВОДТ является разработка методики калибровки – от нее зависит погрешность определения температуры во всем диапазоне измерения и корректная работа прибора в целом.

Процесс калибровки заключается в расчете коэффициентов  $\gamma$ ,  $C$ ,  $\Delta\alpha$  на основании полученных рефлектограмм  $u_{\text{ст}}(z,T)$  и  $u_{\text{аст}}(z,T)$ , температуры опорного оптического волокна  $T_{\text{оп}}$  и точечных измерений на разных температурах  $T_1, T_2, T_3$  в трех координатах линейной части  $z_1, z_2, z_3$ . Искомые коэффициенты могут быть вычислены из уравнения вида  $\vec{A}\vec{x} = \vec{b}$ , где:

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{\text{оп}}} - \frac{1}{T_1}; & -z_1; & -1; \\ \frac{1}{T_{\text{оп}}} - \frac{1}{T_2}; & -z_2; & -1; \\ \frac{1}{T_{\text{оп}}} - \frac{1}{T_3}; & -z_3; & -1; \end{pmatrix}; \bar{b} = \begin{bmatrix} \ln \left( \frac{u_{\text{акт}}(z_1)}{u_{\text{ст}}(z_1)} / \frac{u_{\text{акт}}(z_{\text{оп}})}{u_{\text{ст}}(z_{\text{оп}})} \right); \\ \ln \left( \frac{u_{\text{акт}}(z_2)}{u_{\text{ст}}(z_2)} / \frac{u_{\text{акт}}(z_{\text{оп}})}{u_{\text{ст}}(z_{\text{оп}})} \right); \\ \ln \left( \frac{u_{\text{акт}}(z_3)}{u_{\text{ст}}(z_3)} / \frac{u_{\text{акт}}(z_{\text{оп}})}{u_{\text{ст}}(z_{\text{оп}})} \right); \end{bmatrix}; \bar{x} = \begin{bmatrix} \gamma \\ \Delta\alpha \\ C \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В (3) и (4) представлена величина  $T_{\text{оп}}$ , соответствующая температуре опорного участка при проведении измерения, поэтому важно определить основные требования к этому опорному узлу и провести моделирование процессов, влияющих на погрешность измерения температуры. Задача проведения моделирования должна ответить на вопрос о количественной оценке погрешности измерения распределенными ВОДТ при возникновении флуктуаций в измерениях температуры опорного участка.

Для оценки влияния возможных флуктуаций температуры опорного участка согласно математической модели произведен расчет погрешности измерения. Результат представлен на Рисунке 2 в виде трехмерного графика зависимости погрешности измерения температуры для разных длительностей измерения и разных стандартных отклонений значений температур опорного участка.

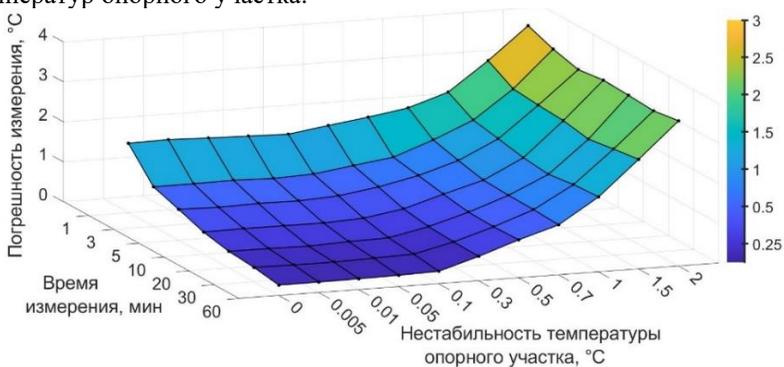


Рисунок 2. График зависимости погрешности измерения распределенного ВОДТ от времени единичного измерения и стабильности опорного участка

Для малых длительностей измерения (1 мин) и нестабильности температуры опорного участка вплоть до 0,7 °C характерно измерение с примерно одинаковой погрешностью. Это связано с тем, что при малой длительности единичного измерения рефлектограммы остаются достаточно зашумленными, и отношение компонент рассеяния на участке,

соответствующем опорному волокну, будет меняться от измерения к измерению даже при его стабильной температуре. Низкая погрешность измерения обеспечивается при большом количестве усреднений рефлектограмм (например, для времени измерения 60 мин). В этом случае прослеживается влияние нестабильности температуры опорного волокна. В работе предложено два варианта опорного участка оптического волокна.

Конструкция устройства с пассивным термостатированием (Рисунок 3, а) подразумевает тепловую изоляцию опорного участка с прецизионным измерением его температуры с помощью высокоточного термометра сопротивления. Подобная схема сглаживает резкие изменения внешней температуры, однако не гарантирует высокой тепловой стабильности на всем протяжении измерения распределенным ВОДТ.

В свою очередь конструкция устройства с активным термостатированием (Рисунок 3, б) обеспечивает поддержание температуры оптического волокна на отметке 70 °С. Её основа это ПИД-регулятор нагрева термостабильной проволоки из константана с обратной связью по температуре.

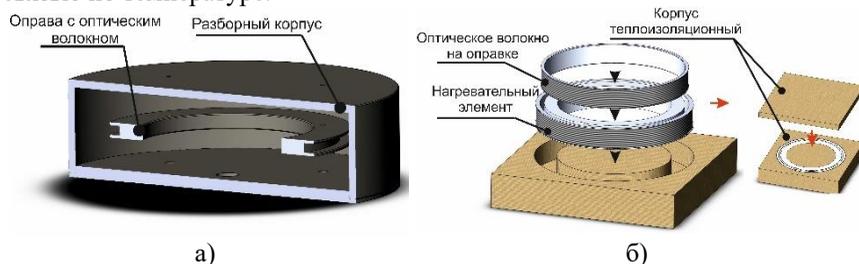


Рисунок 3. Модели устройств: а) пассивного в разрезе; б) активного с ПИД- регулятором температуры, показан процесс сборки

Для обоснования эффективности представленных моделей устройств были проведены тепловые расчеты – два вида анализа: статистический (Рисунок 5) и динамический (Рисунок 4). Основной целью осуществления тепловых расчётов является определение температурных полей, а также тепловых потоков в объёме изделия.

Под статическим тепловым расчетом в установившемся режиме понимается расчет температурных полей устройства в предположении бесконечно длительного периода времени наблюдения процесса после приложения тепловых нагрузок (нагрев константана до рабочей температуры и ее поддержание).

Динамический тепловой расчет осуществлялся в функции времени для моделирования процесса стабилизации температуры оправки с оптическим волокном для узлов, соответствующих месту расположения термометра сопротивления, и датчика обратной связи ПИД-регулятора (Рисунок 4).

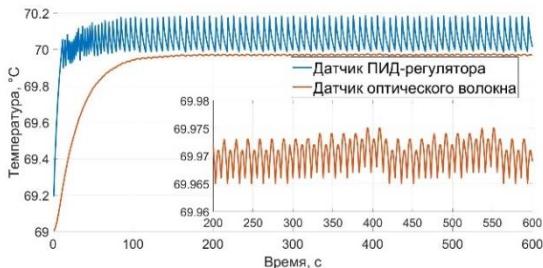


Рисунок 4. График зависимости температуры от времени при динамическом термическом расчете устройства с активным термостатированием

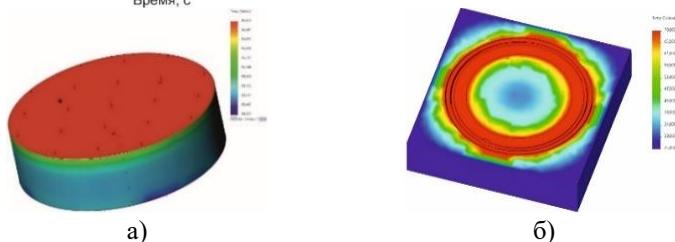


Рисунок 5. Результаты статического термического расчета устройств: а) пассивного; б) активного, показано без верхней крышки

Регулирование температуры с амплитудой до 0,2 °С, как показали тепловые расчеты, обеспечивает температурную стабильность  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ .

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований предложенных методов повышения пространственного разрешения и уменьшения погрешности измерения температуры.

Была собрана экспериментальная установка распределенного ВОДТ с высоким пространственным разрешением в соответствии со схемой, представленной на Рисунке 1. В качестве источника излучения использован лазер со следующими параметрами: длительность импульса 238 фс, средняя мощность излучения 2,0 мВт, частота повторения 7,925 МГц. Частота повторения импульсов лазера прореживается с помощью акустооптического модулятора до значения 10 кГц, затем усиливается в эрбиевом усилителе и направляется в сенсорное оптическое волокно – линейную часть распределенного ВОДТ. Длительность импульса на выходе в оптическое сенсорное волокно была измерена с помощью автокоррелятора и составила значение 270 фс.

К экспериментальной установке был подключен участок оптического волокна длиной около 7800 м при температуре  $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ . С использованием фотоприемников на основе лавинных фотодиодов с полосой пропускания по уровню минус 3 дБ, равной 400 МГц, и двухканального АЦП с полосой пропускания по уровню минус 3 дБ, равной 1200 МГц, были получены рефлектограммы обратного рассеяния на стоксовой и антистоксовой длинах волн (Рисунок 6). Используя полученные рефлектограммы, а также информацию о температуре опорного участка, в соответствии с (4), была

рассчитана термограмма (Рисунок 7). Максимальное расстояние от выходного разъема устройства опроса, измеренное с помощью лазеров ультракоротких импульсов и равное 7800 м, получено впервые.

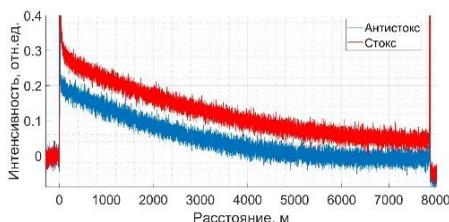


Рисунок 6. Рефлектограммы стоксовой (синяя кривая) и антистоксовой (красная кривая) компоненты

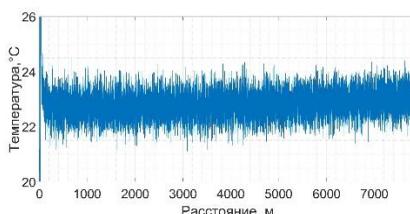


Рисунок 7. Термограмма распределенного ВОДТ на основе chirпированного лазера УКИ

Для определения пространственного разрешения экспериментальной установки распределенного ВОДТ на основе chirпированного импульсного волоконного лазера с синхронизацией мод участок оптического волокна длиной 0,5 м с координатой точки измерения  $\sim 190$  м был помещен в жидкостный термостат при температуре 53 °С.

Измерение пространственного разрешения производилось в соответствии с ГОСТ Р 59166-2020 «Оптика и фотоника. Датчики температуры волоконно-оптические распределенные. Методы испытаний». Оно составило значение 0,3 м (Рисунок 8, б), хотя длительность импульса 300 фс должна обеспечить минимальное значение 0,03 мм. Это связано с ограниченной полосой пропускания приемников излучения. В схеме использовались лавинные фотоприемники, способные обеспечить выборку 0,26 м по длине оптического волокна, но тем не менее при данном способе удалось увеличить пространственное разрешение в 3 раза.

В соответствии с представленными во 2-й главе моделями, были изготовлены экспериментальные образцы устройств термостатирования. Их внешний вид показан на Рисунке 9, а, б.

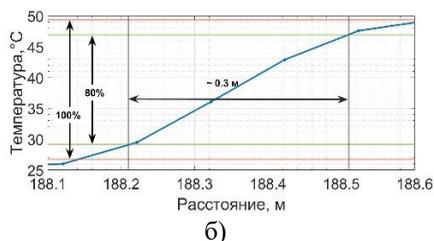
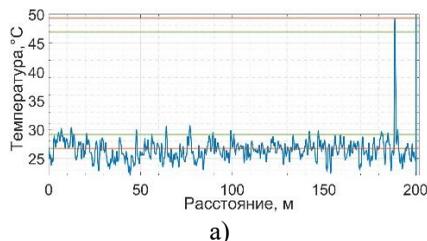
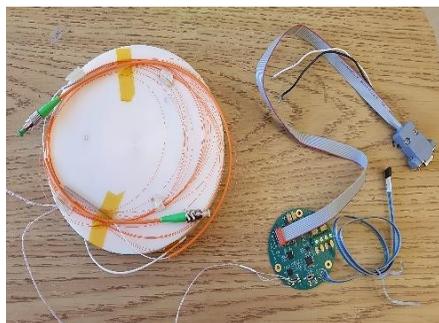
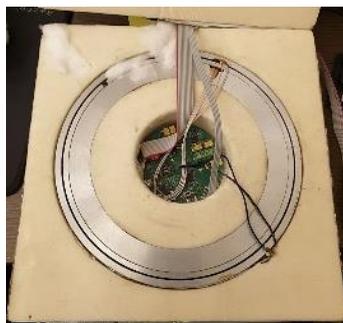


Рисунок 8. Полученная термограмма. Показаны линии для уровней 100% (красные) и 80% (зеленые) размаха функции, а) термограмма показана полностью, б) показан участок измерения пространственного разрешения



а)

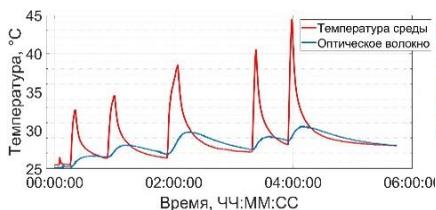


б)

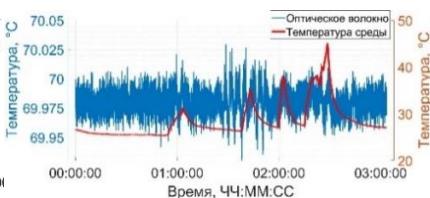
Рисунок 9. Экспериментальные образцы устройств термостатирования: а) пассивного, б) активного, показано без крышки

Для исследования нестабильностей измерения опорного участка волокна был проведен эксперимент, в ходе которого изменялась температура среды, в которой находилось устройство. Индикатором изменения среды являлся внешний платиновый термометр сопротивления, показания которого записывались с помощью автоматического регистратора с интервалом в 1 с.

При изменении внешней температуры со скоростью  $4,5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$  температура опорной катушки пассивного устройства менялась со скоростью  $0,16 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$  (Рисунок 10, а), что в условиях измерения распределенным ВОДТ может привести к флуктуациям термограммы вплоть до  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тепловая стабильность активного устройства за три часа измерений составила величину порядка  $\pm 0,04 \text{ }^\circ\text{C}$  (Рисунок 11, б) при достаточно быстрых изменениях внешней температуры (со скоростью до  $5,49 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ ).



а)



б)

Рисунок 10. Графики зависимости температуры от времени. Красная кривая – внешний датчик температуры, синяя кривая – датчик температуры, совмещенный с оптическим волокном: а) в пассивном устройстве, б) в активном устройстве

Для определения зависимости влияния флуктуаций температуры опорного участка оптического волокна на абсолютную погрешность

измерения распределенного ВОДТ было проведено экспериментальное исследование. В нем сравнивались метрологические характеристики двух распределенных ВОДТ с активным термостатированием опорного участка, но с разными его тепловыми стабильностями температуры – с высокой стабильностью порядка  $\pm 0,04$  °С и низкой порядка  $\pm 0,5$  °С. Проведен расчет абсолютных погрешностей измерения в соответствии с ГОСТ Р 59166-2020 для трех значений времени усреднения распределенных ВОДТ (3 мин, 10 мин и 60 мин) и трех температур (минус 50, плюс 50 и плюс 120°С), а также неисключенных составляющих погрешностей измерения (НСП) распределенным ВОДТ и эталонным измерителем температуры (прецизионный измеритель температуры (ПИТ) и термоэлектрический преобразователь). Результаты измерений представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

Результаты расчета абсолютных погрешностей измерения температур

Реперная температура, °С	минус 50			плюс 50			плюс 120			Тепловая стабильность, °С
	3	10	60	3	10	60	3	10	60	
Ср. знач. ВОДТ, °С	-50,51	-50,54	-50,56	49,92	49,97	50,02	120,26	120,23	120,21	$\pm 0,04$
	-50,98	-51,03	-50,95	49,89	49,56	49,84	120,78	120,67	120,79	$\pm 0,5$
СКО ВОДТ, °С	0,013	0,019	0,019	0,033	0,008	0,005	0,02	0,021	0,006	$\pm 0,04$
	0,083	0,09	0,007	0,202	0,006	0,006	0,116	0,243	0,094	$\pm 0,5$
Ср. знач. ПИТ, °С	-50,59	-50,59	-50,58	50,02	50,03	50,03	120,18	120,18	120,18	
	-50,59	-50,35	-50,58	50,02	50,03	50,02	120,18	120,18	120,18	
СКО ПИТ, $\times 10^{-3}$ °С	2	2	3	0,2	0,3	0,4	1	1	1	
	2	1	2	0,4	1	0,2	1	1	1	
НСП ВОДТ, °С	0,087	0,047	0,021	0,105	0,056	0,001	0,075	0,048	0,026	$\pm 0,04$
	0,385	0,680	0,369	0,139	0,464	0,189	0,596	0,492	0,616	$\pm 0,5$
НСП ПИТ, $\times 10^{-3}$ °С	5,2									
	4,6									
НСП преобр-теля, °С	0,023						0,026			
	0,023						0,026			
Систематическая погрешность, °С	0,099	0,057	0,034	0,118	0,067	0,025	0,088	0,060	0,041	
	0,425	0,749	0,406	0,155	0,511	0,209	0,657	0,542	0,678	
Абсолютная погрешность ВОДТ, °С	0,117	0,076	0,055	0,152	0,079	0,031	0,109	0,081	0,049	$\pm 0,04$
	0,518	0,883	0,469	0,442	0,689	0,242	0,969	0,792	0,793	$\pm 0,5$

Из Таблицы 1 видно, что при одинаковых длительностях измерения распределенным ВОДТ погрешность в случае нестабильного опорного участка гораздо выше (в 4 и более раз). Таким образом, использование термостатированного участка оптического волокна уменьшает абсолютную погрешность измерения температуры распределенным ВОДТ и увеличивает повторяемость измерений.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения работы.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Создана математическая модель процесса формирования сигнала в распределенных волоконно-оптических датчиках и на её основе разработаны методики расчета и проектирования датчиков с повышенным пространственным разрешением, большой длиной чувствительного волокна и уменьшенной погрешностью измерения температуры.

2. Разработана методика калибровки распределенного ВОДТ с методом активного термостатирования опорного участка ОВ в составе приборной части.

3. Предложен оригинальный метод повышения пространственного разрешения распределенного ВОДТ за счет зондирования оптического сенсорного волокна импульсами ультракороткой длительности без значительного сокращения общей длины чувствительного элемента.

4. Предложен оригинальный метод уменьшения погрешности и увеличения повторяемости измерений распределенного ВОДТ за счёт введения активного термостатирования опорного участка ОВ.

5. На основе проведенных термических расчетов моделей созданы два образца устройств – с пассивным и активным термостатированием. Проведены экспериментальные исследования влияния дрейфа внешних температур на стабильность температуры опорного ОВ. Устройство с активным термостатированием обеспечивает стабильность поддержания температуры на уровне  $\pm 0,04^\circ\text{C}$  даже во время резких скачков температуры среды ( $5,49^\circ\text{C}/\text{мин}$  и более в проведенном эксперименте).

6. Создан макетный образец распределенного ВОДТ, использующий предложенный метод повышения пространственного разрешения, на котором проведены экспериментальные исследования, подтверждающие основные теоретические положения. Экспериментально получено пространственное разрешение  $0,3\text{ м}$ , а также показана возможность измерения температуры таким способом для сенсорной линии  $5\text{ км}$  и более.

7. Создан макетный образец распределенного ВОДТ, использующий предложенный метод уменьшения погрешности измерения, на котором проведены экспериментальные исследования, подтверждающие основные теоретические положения. Экспериментально показана эффективность применения устройства с активным термостатированием опорного участка ОВ, получена погрешность измерения не более  $0,1^\circ\text{C}$ .

**Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:**

1. Распределенный волоконно-оптический датчик температуры на основе волоконного лазера ультракоротких импульсов / Я. Ж. Ососков, А. О. Чернуцкий, Д. А. Дворецкий [и др.] // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 10. С. 611-615. (0,52 п.л./0,28 п.л.)
2. Разработка распределенного волоконно-оптического датчика температуры на основе волоконного лазера ультракоротких импульсов / Я. Ж. Ососков, А. О. Чернуцкий, Д. А. Дворецкий [и др.] // Лазеры в науке, технике, медицине. 2018. С. 132-137. (0,69 п.л./0,35 п.л.)
3. Fiber optic Raman distributed temperature sensor based on an ultrashort pulse mode-locked fiber laser / Y. Z. Ososkov, A. Chernutsky, D. A. Dvoretzkiy [et al.] // Proc. of SPIE Vol. T. 11028. P. 110281I. (0,69 п.л./0,35 п.л.)
4. Measurement of cryological temperature distribution via fiber optic sensors / A. O. Chernutsky, A. B. Pnev, K. V. Stepanov [et al.] // Proceedings - International Conference Laser Optics 2018, ICLO 2018, St. Petersburg, 04-08 июня 2018 года. St. Petersburg, 2018. P. 284. (0,12 п.л./0,1 п.л.)
5. Phase-sensitive optical time-domain reflectometry with pulse mode EDFA: Probe pulse preparation / A. O. Chernutsky, A. A. Zhirnov, A. K. Fedorov [et al.] // 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS). IEEE, 2017. P. 2231-2236. (0,69 п.л./0,5 п.л.)
6. High-spatial-resolution Distributed Temperature Sensing System Based on a Mode-locked Fiber Laser / A. O. Chernutsky, D. A. Dvoretzkiy, I. O. Orekhov [et al.] // 2020 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE, 2020. P. 9285857. (0,12 п.л./0,08 п.л.)
7. Possibility of distributed acoustic sensing (DAS) for geophysical problems solution / Chernutsky A. O. [и др.] // Engineering and Mining Geophysics 2018. European Association of Geoscientists & Engineers, 2018. Т. №. 1. P. 1-7. (0,81 п.л./0,2 п.л.)
8. Минимизация погрешности измерения фазовых шумов узкополосного лазера с помощью интерферометра Маха-Цендера на основе волокна с сохранением поляризации / А. Б. Пнев, А. В. Борисова, А. О. Чернуцкий [и др.] // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 37-42. (0,81 п.л./0,13 п.л.)
9. Измеритель фазовых шумов узкополосных лазеров, основанный на состоящем из РМ-волокна интерферометре Маха-Цендера // Патент России № 2664692. Выд. 21.08.2018 / Чернуцкий А.О. [и др.]. (1,39 п.л./0,6 п.л.)
10. Многоканальное волоконно-оптическое устройство регистрации вибрационных воздействий с одним приёмным модулем регистрации // Патент России № 2695058. Выд. 19.07.2019 / Чернуцкий А.О. [и др.]. (1,73 п.л./0,6 п.л.)