



**Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»**

Факультет прикладной математики и механики
Направление 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика
Профиль Волоконная оптика
Кафедра Общая физика

Заведующий кафедрой общей физики
доктор физ.-мат. наук, доцент

_____ Перминов А.В.
«___» _____ 2020 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
на соискание академической степени бакалавра**

На тему Разработка волоконно-оптического датчика температуры
повышенной точности

Студент Вьюжанина Александра Михайловна

Состав ВКР:

1. Пояснительная записка на 36 стр.

Руководитель ВКР
канд. физ.-мат. наук, доцент

_____ Беспрозванных В.Г.

Пермь – 2020 г.

РЕФЕРАТ

А.М. Вьюжанина. Разработка волоконно-оптического датчика температуры повышенной точности. Выпускная квалификационная работа бакалавра по направлению 12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика», профиль «Волоконная оптика». Пермь: ПНИПУ, 2020. – 36 с.

Выпускная квалификационная работа бакалавра посвящена доработке волоконно-оптического датчика температуры с целью уменьшения его абсолютной погрешности. Автором проведено расчетно-экспериментальное исследование и предложена модифицированная конструкция датчика с улучшенными точностными характеристиками.

Библ.: назв. 10, табл. 11, рис. 13.

Ключевые слова и словосочетания: волоконно-оптический датчик температуры, температурные испытания, абсолютная погрешность, приведенная погрешность, температурная чувствительность.

Содержание

Введение.....	6
1 Современное состояние вопроса и обзорные материалы по техническим основам проекта	8
1.1 Классификация существующих волоконно-оптических датчиков температуры и краткий обзор публикаций по основным направлениям их совершенствования	8
1.2 Анализ современных научно-технических проблем, связанных с применением волоконно-оптических датчиков температуры (на примере ООО «Инверсия-С»)	16
2 Разработка модифицированной конструкции датчика	18
2.1 Схема экспериментального стенда и методика исследования. Полученные результаты и их анализ	18
2.2 Конструкция датчика.....	27
2.3 Расчетные и экспериментальные характеристики датчика	28
3 Специальные вопросы проектирования.....	31
3.1 Техничко-экономическая оценка.....	31
3.2 Основные положения техники безопасности	31
Заключение	33
Список литературы	35

Введение

Потребность в датчиках стремительно растет в связи с бурным развитием автоматизированных систем контроля и управления, внедрением новых технологических процессов, переходом к гибким автоматизированным производствам. Помимо высоких метрологических характеристик датчики должны обладать высокой надежностью, долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением, совместимостью с микроэлектронными устройствами обработки информации. Этим требованиям в максимальной степени удовлетворяют волоконно-оптические датчики (ВОД).

Современные волоконно-оптические датчики позволяют измерять многие физические параметры, например: давление, температуру, расстояние, положение в пространстве, скорость вращения, скорость линейного перемещения, ускорение, колебания, массу, звуковые волны, уровень жидкости, деформацию, коэффициент преломления, электрическое поле, электрический ток, магнитное поле, концентрацию газа, дозу радиационного излучения и т.д.[13].

В настоящее время существует проблема отсутствия отработанной для серийного производства номенклатуры ВОД. Поэтому возникает потребность в быстрейшем создании ВОД различных типов, пригодных для промышленного освоения и сопрягаемых как со стандартными, так и с разрабатываемыми волоконно-оптическими информационно-измерительными системами контроля, диагностики, аварийной защиты для различных объектов. Ощущается недостаток информации относительно функциональных возможностей ВОД, надежности, метрологических характеристик, экономических показателей.

Актуальность данной работы определяется недостаточностью сведений в имеющейся технической литературе о путях повышения точности

волоконно-оптических датчиков температуры, а также необходимостью получения дополнительных данных о возможности уменьшения абсолютной погрешности датчиков за счет увеличения их чувствительности, что в свою очередь ведет к повышению их быстродействия.

Цель дипломной работы:

на основе анализа современных научно-технических и технологических проблем, связанных с условиями применения и направлениями совершенствования волоконно-оптических датчиков температуры, провести расчетно-экспериментальное исследование и предложить модифицированную конструкцию датчика с улучшенными точностными характеристиками.

Для достижения этой цели необходимо выполнить ряд частных задач:

- 1) оценить современное состояние направлений совершенствования волоконно-оптических датчиков температуры;
- 2) собрать экспериментальный стенд и провести исследование влияния различных конструкционных материалов, а также инерционных свойств датчика на его точностные характеристики;
- 3) предложить модифицированную конструкцию волоконно-оптического датчика температуры с обоснованием повышения его эффективности;
- 4) выполнить технико-экономическую оценку и сформулировать основные требования техники безопасности при проведении экспериментальных работ.

1 Современное состояние вопроса и обзорные материалы по техническим основам проекта

1.1 Классификация существующих волоконно-оптических датчиков температуры и краткий обзор публикаций по основным направлениям их совершенствования

Датчик температуры – это устройство, предназначенное для определения температуры контролируемого объекта посредством преобразования изменения свойств объекта в соответствующий выходной сигнал, удобный для дальнейшей обработки или сбора информации.

На сегодняшний день существует множество датчиков температуры:

1. Термометры:
 - 1.1. Расширения;
 - 1.2. Давления;
 - 1.3. Терморезистивные;
 - 1.4. Термоэлектрические;
 - 1.5. Пирометры;
2. Волоконно-оптические датчики:
 - 2.1. Точечные;
 - 2.2. Распределенные;
 - 2.3. Квазираспределенные [14].

На сегодняшний день используются практически все датчики, но наибольшее распространение получили волоконно-оптические датчики температуры, так как они обладают рядом преимуществ по сравнению с термометрами: невосприимчивостью к электромагнитным помехам, отсутствием электричества в точке измерения, возможностью дистанционных измерений, долговременной стабильностью и возможностью мультиплексирования.

Принцип работы распределенного волоконно-оптического датчика температуры

Принцип работы основан на использовании вынужденного комбинационного (рамановского) рассеяния (ВКР). Температурные изменения индуцируют колебания решётки в молекулярной структуре кварцевого стекла. Под действием падающего излучения в волоконном световоде возникает зависящий от температуры комбинационный спектр частот, определяемый величиной резонансной частоты колебания решётки.

Основным преимуществом данного типа температурного датчика является большая протяжённость чувствительного элемента и большое количество точек измерения, что позволяет «обвязывать» очень крупные объекты (здания, мосты, трубопроводы, и др.) [15].

На Рис. 1 представлена схема типичная для всех распределенных датчиков температуры. [2]

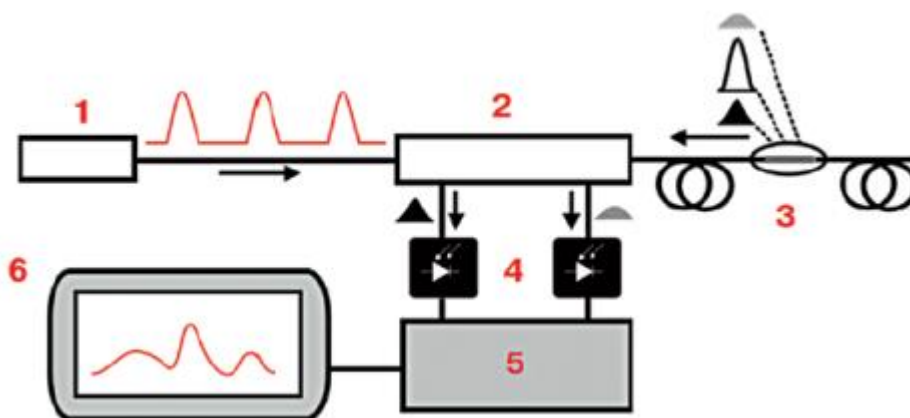


Рис. 1. Упрощенная схема температурного датчика на основе ВКР: 1 – импульсный лазер, 2 – система фильтрации оптического сигнала, 3 – чувствительное волокно ~ 7 км, 4 – фотодиоды, регистрирующие соответствующие компоненты рассеяния, 5 – АЦП, 6 – блок обработки и индикации

Принцип работы точечного волоконно-оптического датчика на интерферометре Фабри-Перо

В качестве чувствительного элемента используется интерферометр Фабри-Перо.

Типичная конструкция датчика на основе интерферометра Фабри-Перо представлена на Рис. 2. Сенсорный элемент датчика представляет собой стеклянную капиллярную трубку, в которой расположены два отрезка оптического волокна с нанесенными на торцы зеркалами. Торцы волокон с зеркалами обращены друг к другу и между ними формируется резонансная полость размером в несколько микрон. Одно из зеркал делается частично пропускающим для вывода излучения в обратном направлении. В результате многолучевой интерференции входящего и отраженных лучей образуется интерференционная картина, имеющая форму концентрических колец с резкими максимумами интенсивности, положение которых зависит от длины волны. Таким образом, интерферометр Фабри-Перо разлагает световое излучение в спектр. Перемещение одного из зеркал приводит к изменению интерференционной картины, что может быть измерено с помощью фотоприемника. Анализируя данные фотоприемника, можно оценить степень внешнего воздействия на датчик [16].

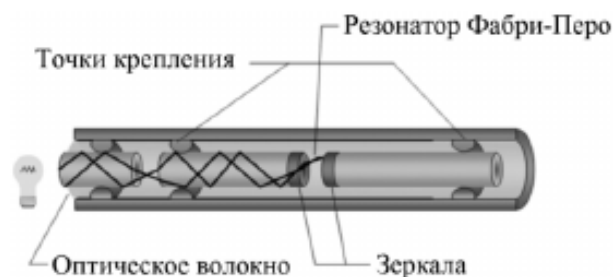


Рис. 2. Конструкция точечного датчика на основе интерферометра Фабри-Перо

Принцип работы квазираспределенных волоконно-оптических датчиков температуры (ВОДТ) на основе внутриволоконных решеток Брэгга

Чувствительным элементом точечных ВОД являются волоконные брэгговские решетки (ВБР). Чаще всего такие решетки получают при помощи ультрафиолетового лазера, они представляют собой участок световода с периодическим изменением показателя преломления вдоль оси. ВБР отражает свет определенной длины волны. Принцип работы ВБР приведен на рис. 3 [1].

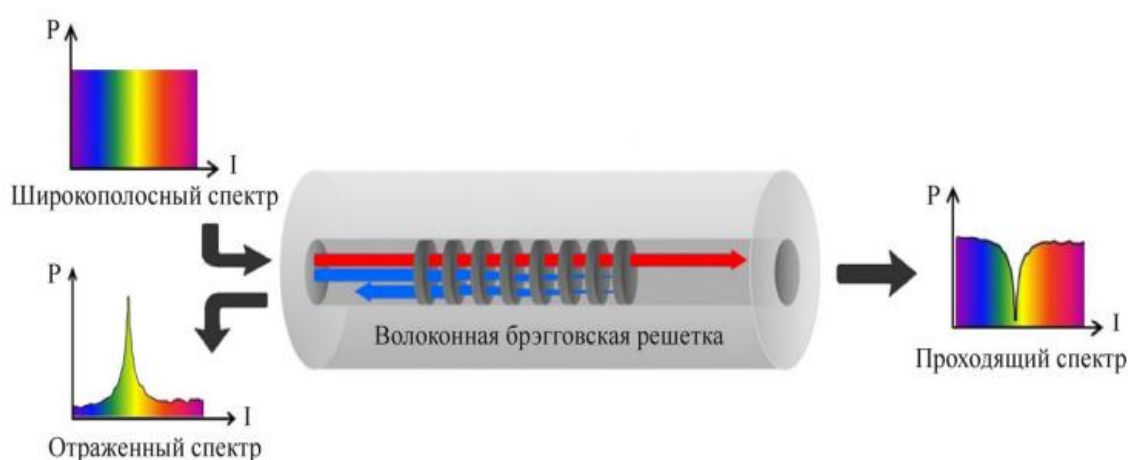


Рис. 3. Волоконная брэгговская решетка

При температурном воздействии изменяются период и показатель преломления решетки, вследствие чего наблюдается смещение длины волны отраженного света. С помощью этого смещения можно определить изменение температуры датчика.

Центральную длину волны отражения можно определить из условия Брэгга:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda, \quad (1)$$

где λ_B – длина волны брэгговского резонанса, n_{eff} – эффективный показатель преломления сердцевины волокна, Λ – период брэгговской решетки.

Большая часть работ над волоконно-оптическими датчиками на основе ВБР была сосредоточена на использовании этих устройств для обеспечения квазираспределенных точечных измерений деформации или температуры. Отклик на деформацию возникает из-за физического удлинения датчика (и, соответственно, изменения периода решетки) и изменения показателя волокна из-за фотоупругих эффектов, тогда как отклик на температуру возникает из-за собственного теплового расширения волокна и зависимости показателя преломления от температуры. Изменение длины волны Брэгга с учетом воздействия деформации и температуры может быть выражено [12]:

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left(\left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon + \left[\alpha + \frac{\left(\frac{dn}{dT} \right)}{n} \right] \Delta T \right) \quad (2)$$

где ε – приложенная деформация, P_{ij} – коэффициенты Поккельса упругооптического тензора, ν – коэффициент Пуассона, α – коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР), ΔT – изменение температуры. [1]

На рынке существует много коммерческих предложений ВОДТ. Их производят такие крупные компании, как ООО «Инверсия-Сенсор» (г. Пермь, Россия), НВМ FiberSensing (Португалия), Micron Optics (США), Sylex (Словакия) и другие.

Далее будет приведено сравнение наиболее распространенных ВОДТ.

Сравнение ВОДТ

В первую очередь, следует сравнить волоконно-оптические датчики с их цифровым аналогом ПТС-60 отечественного производства. Как видно из Табл. 1, волоконно-оптические датчики показывают более точную температуру в схожих рабочих диапазонах температур, нежели цифровой датчик.

Табл. 1. Сравнение ВОДТ с преобразователем температуры

	Astro A513 (Россия)	Os43** (США)	FS63 (Португалия)	TP-02 (Словакия)	ПТС-60 (Россия)
Рабочий диапазон температур, °С	От -50 до +80	От -40 до 120	От -20 до +80	От -20 до +60	От -20 до +60
Абсолютная погрешность измерения, °С	0,13	0,96	0,5	1,04	3,2

Преобразователи температуры измерительные струнные ПТС-60 - предназначены для измерения температуры в элементах сооружений при контрольных наблюдениях и натурных исследованиях.

Используются при контроле напряженно-деформированного состояния объектов при их строительстве и эксплуатации.

Но существуют также платиновые эталонные термометры сопротивления, например, ПТСВ-2К (Россия), которые в диапазоне от -60 до +50 °С показывают температуру с абсолютной погрешностью $\pm 0,02$ °С, что на порядок меньше, чем у волоконно-оптических датчиков.

Способы повышения точности ВОДТ

Существует несколько принципиально разных способов повышения точности волоконно-оптических датчиков. Все они основаны на повышении чувствительности к изменению температуры чувствительного элемента датчика (в моем случае, ВБР).

Первый из них – это повышение фоточувствительности самого волокна. Значительный интерес представляет насыщение стеклянной матрицы

водородом при высокой температуре, что способно на порядок увеличить наведенный показатель преломления стандартных световодов и обеспечивает повышенную фоточувствительность участка наводороженного волокна в течение длительного времени. При этом значительно уменьшается механическая прочность световода.

Второй способ водородной обработки также существенно увеличивает фоточувствительность световодов. Этот способ заключается в насыщении сетки стекла молекулярным водородом при относительно низких температурах (100 °С). При таких температурах еще не происходит взаимодействие молекулярного водорода с сеткой стекла, и водород находится в стекле в физически растворенном состоянии. Для такого насыщения световод погружают в камеру с водородом при давлении ~100 атм. Световод, подвергнутый низкотемпературной водородной обработке, имеет повышенную фоточувствительность до тех пор, пока водород находится в сетке стекла. По мере обратной диффузии водорода в окружающую среду фоточувствительность уменьшается, возвращаясь к своему исходному значению.

Полезное развитие описанной техники низкотемпературной водородной обработки было предложено в работе [8], где было показано, что облучение световода с растворенным водородом небольшой дозой УФ-излучения позволяет "заморозить" высокую фоточувствительность световода, то есть сохранить ее в течение длительного времени даже после выхода молекулярного водорода из световода. Таким образом, можно подготовить необходимые участки световода для последующей записи решеток, предварительно облучив их небольшой дозой.

Интересным методом является увеличение фоточувствительности с помощью механического растяжения световода при записи в нем решеток [9]. При этом наведенный показатель преломления увеличивается в 3 - 4 раза

при фиксированных параметрах облучения в сравнении с ненатянутым световодом, что позволяет сократить время записи решеток примерно на порядок. Недостаток – приложенные деформации имеют довольно большую величину (3% и более), что требует высокого качества поверхности световода и механической стабильности системы растяжения при записи. Кроме того, такие деформации значительно изменяют резонансную длину волны решетки, поэтому они должны быть учтены и заданы с высокой точностью, чтобы решетка после освобождения от механической нагрузки имела нужную длину волны.

В данной работе предложен принципиально другой метод повышения чувствительности датчика – изменение его конструктива.

Изменение конструктива подразумевает изменение материала, из которого изготавливается датчик. В примерах ВОДТ, что были приведены выше, описаны несколько материалов, из которых изготовлены датчики. В Табл. 2 приведено сравнение материалов по их коэффициентам теплового линейного расширения.

Табл. 2. Сравнение материалов ВОДТ

Датчик и страна-производитель	Astro A513 (Россия)	Os43** (США)	FS63 (Португалия)	TP-02 (Словакия)
Материал	Нерж. сталь 12X18H10T	Алюминий	Нерж. сталь	Нерж. сталь SS316L
КЛТР, мкм/(м*°C)	16,6	22,8	12	12

В связи с тем, что точная марка используемого материала известна не у всех датчиков, для датчиков иностранных компаний были взяты коэффициенты, характерные для алюминия и стали.

Как видно из Табл. 2, наибольший КЛТР имеет алюминий, а, значит, прогреваться такой датчик должен быстрее, что будет давать большее изменение периода ВБР.

1.2 Анализ современных научно-технических проблем, связанных с применением волоконно-оптических датчиков температуры

1. При работе с оптическими датчиками требуется специальное оборудование. Существующие устройства опроса позволяют опрашивать датчики с фиксированной погрешностью ± 2 пм. При чувствительности датчика 10 пм/°С устройство опроса вносит погрешность $0,2$ °С ($0,15$ % диапазона измерений датчика). Эту проблему можно решить, увеличив чувствительность датчика.

2. Относительно невысокая точность (в сравнении с платиновым термометром сопротивлений). Эта проблема решается увеличением чувствительности датчика.

3. Зависимость центральной длины волны отражения ВБР от прикладываемых к ней механических воздействий. Эта проблема решается с помощью использования конструктивных особенностей расположения датчиков, а также с помощью применения для фиксации ВБР клея с низким модулем Юнга и высокой теплопроводностью.

Внешние электрические и магнитные помехи не влияют на стабильность измерений ВОДТ, как на электрические датчики. Также ВОДТ подвержены малому влиянию ядерного излучения и вибрации, так как оптическое волокно мало восприимчиво к такому виду воздействий, не искажает сигнал в световоде по сравнению с электрическими датчиками.

ВОДТ имеют ряд проблемных вопросов, связанных с частными задачами. Например, термокомпенсация волоконно-оптических датчиков деформации внутри композитов. Для компенсации датчика деформации необходимо, чтобы датчик температуры был изолирован от механических

воздействий и имел достаточно маленький размер. Конструкция такого датчика еще не разработана.

Еще одна проблема возникает при работе датчиков в экстремальных условиях. При воздействии радиационного излучения на оптическое волокно ионизирующее излучение изменяет оптические свойства стекла, которое становится темным. В стекле появляются структурные неоднородности, и как следствие увеличиваются потери мощности. Для защиты датчиков от воздействия радиационного излучения используются стекляннопolyмерные изоляторы, что позволяет контролировать аварийную АЭС в критический период и выработать решения для экстренных мероприятий по предотвращению развития аварии в ядерную катастрофу [17].

В данной работе будет рассмотрена проблема точности волоконно-оптического датчика температуры.

2 Разработка модифицированной конструкции датчика

2.1 Схема экспериментального стенда и методика исследования.

Полученные результаты и их анализ

Для проведения температурных испытаний была собрана установка, приведенная на Рис. 4, где 1 – персональный компьютер; 2 – термометр цифровой эталонный ТЦЭ-005/М2; 3 – анализатор сигнала ASTRO А3ХХ; 4 – климатическая камера Excal; 5 – цепочки образцов (датчиков или капилляров); 6 – термометр сопротивления платиновый ПТСВ-6м-3.

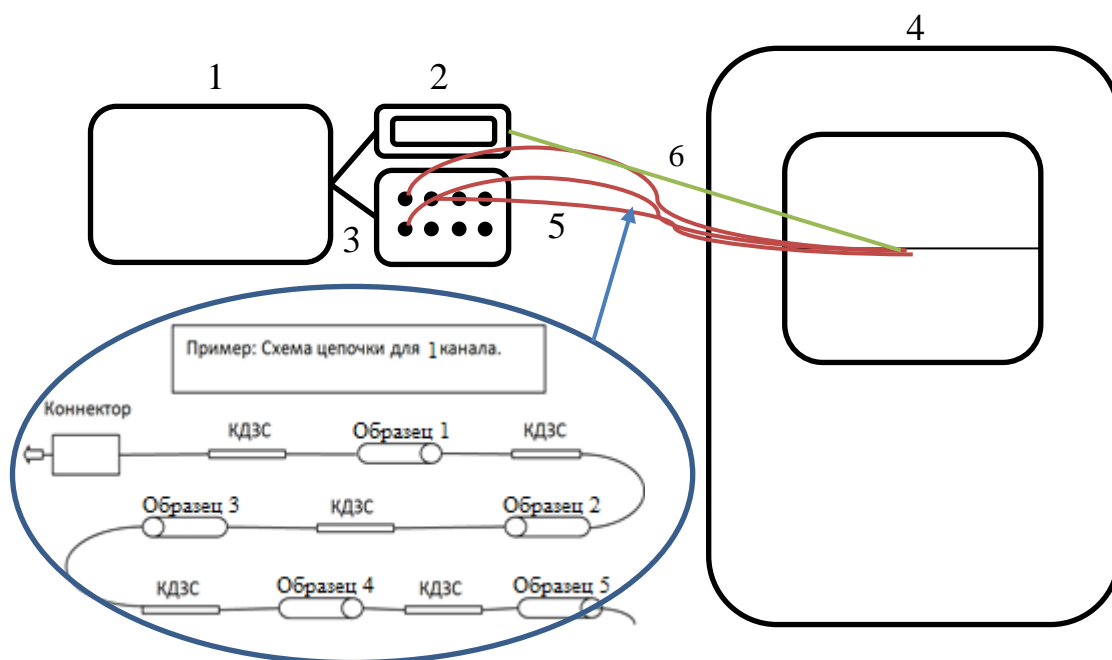


Рис. 4. Экспериментальная установка для проведения температурных испытаний.

На Рис. 5 приведен пример укладки образцов в климатической камере, где заклейка 1 – алюминиевый капилляр с вклеенной ВБР 1, заклейка 2 – алюминиевый капилляр с вклеенной ВБР 2. Заклейки были закреплены на картонной подложке, рядом с каждым образцом был прикреплен термометр сопротивлений.

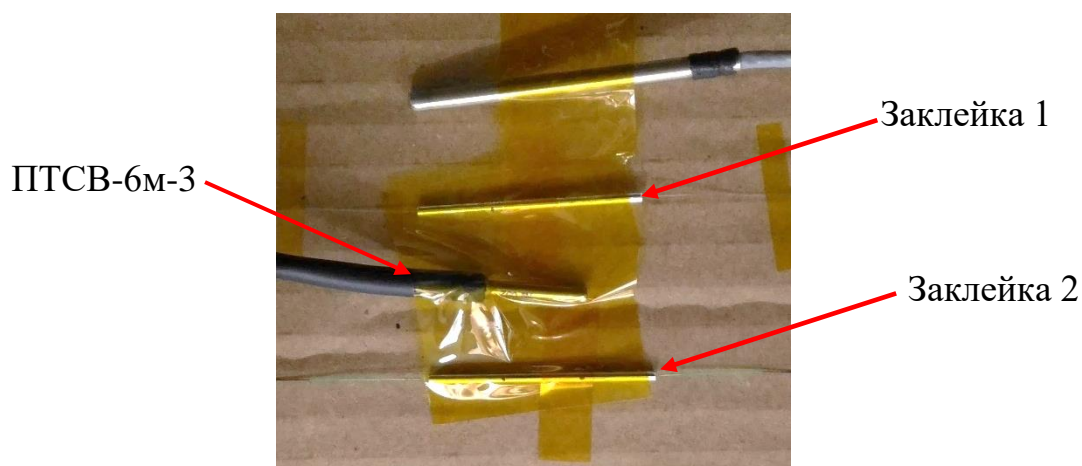


Рис. 5. Укладка заклеек в климатической камере.

Затем была проведена серия испытаний по методикам, указанным ниже.

Методика 1 - испытание на повторяемость результатов

Испытания считаются годными, если отклонение длины волны на равных температурных полках не превышает 4-5 пм.

Проверка заклеек на повторяемость результатов проходила по температурному циклу, указанному в Табл. 3 (переход с полки на полку составил $\approx 1,8$ °С/мин). При оценке повторяемости показания датчиков усреднялись по 2 минуты. Данные температуры были выбраны в связи с тем, что они являются наиболее характерными для объектов (по статистике).

Табл. 3. Температурный цикл для определения повторяемости результатов.

Температурная полка, °С	Выдержка на полке, ч
40	1,5
25	1,5
1	1,5

Результаты испытания:

Цикл, указанный в Табл. 3, был проведен 3 раза. По результатам испытания на повторяемость была получена разность между температурными полками равной температуры (разность между первой

температурной полкой и последней), указанная в Табл. 4. Графики испытания приведены на рис. 6-7.

Табл. 4. Разность длин волн датчиков между первой и последней температурной полкой.

Температурная полка, °C	Максимальное отклонение, пм	
	Заклейка 1	Заклейка 2
40	1	2
25	3	-2
1	1	-1

Из Табл. 4 можно сделать вывод, что обе заклейки успешно прошли испытание.

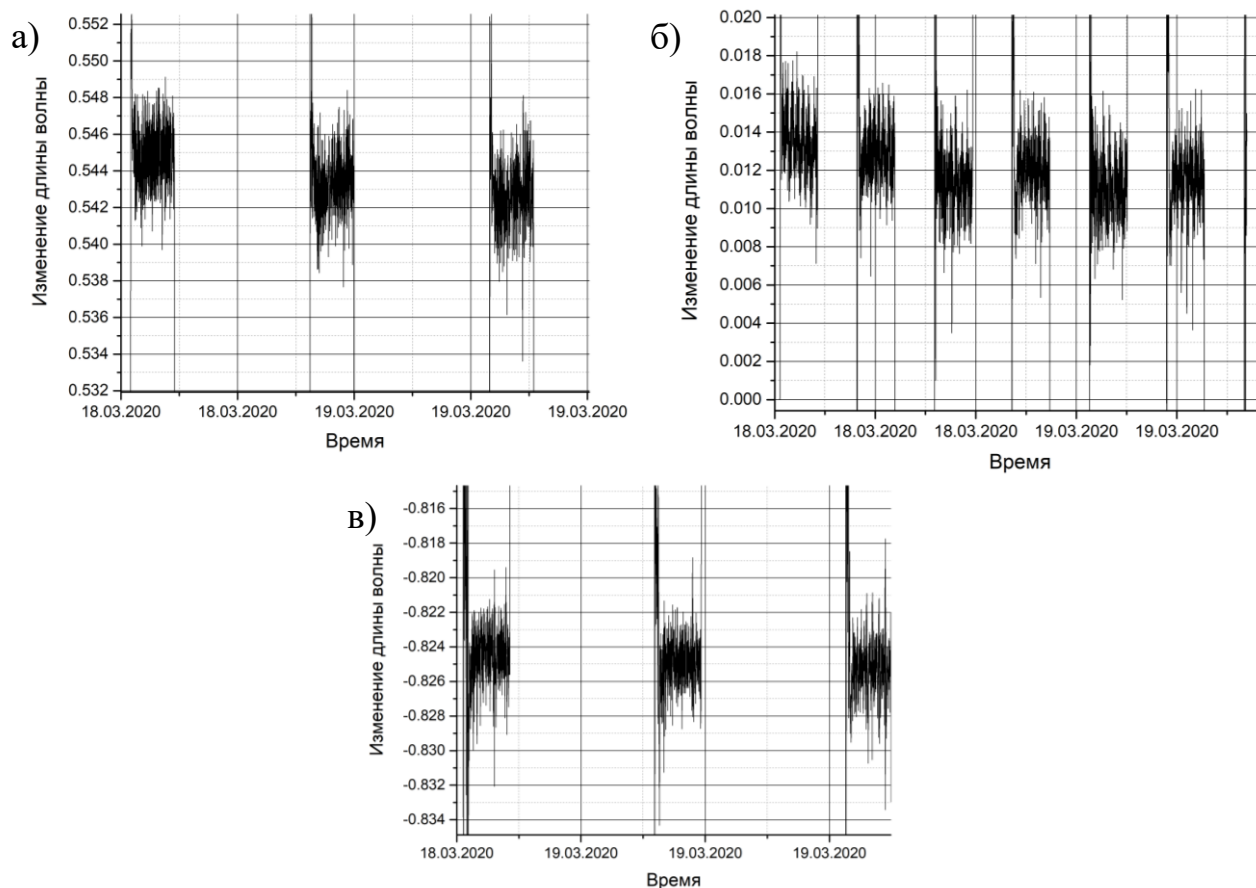


Рис. 6. График зависимости изменения длины волны от времени для заклейки 1. Полки 40 °C (а), 25 °C (б), 1 °C (в).

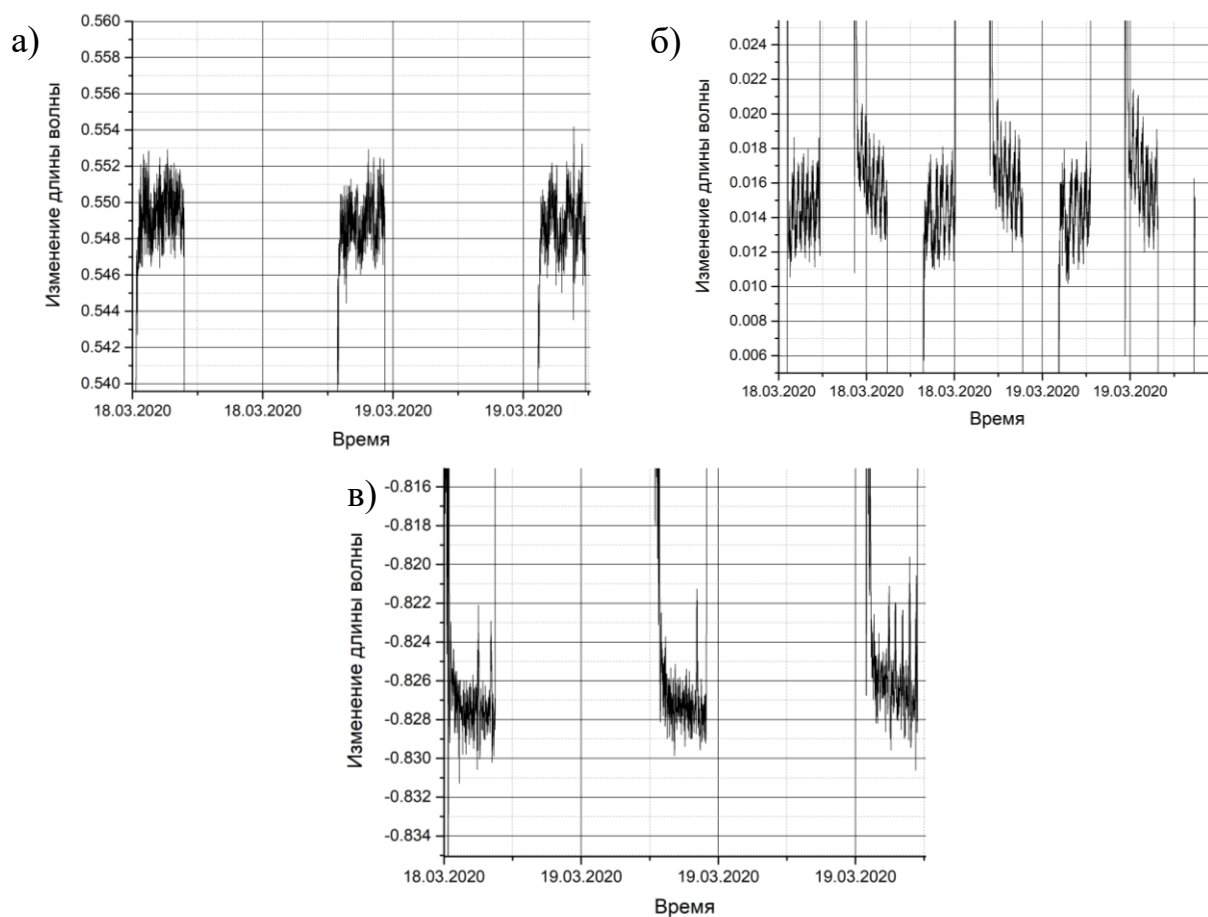


Рис. 7. График зависимости изменения длины волны от времени для заклейки 2. Полки 40 °С (а), 25 °С (б), 1 °С (в).

Из графиков, приведенных на рис. 6-7, можно сделать вывод, что заклейка 1 вела себя более стабильно, чем заклейка 2. Заклейка 1 лучше выходила на все температурные полки и выдерживала их. У заклейки 2 видны скачки показаний (например, при температуре 25 °С) и нестабильность полки (например, при температуре 40 °С).

Методика 2 - температурная калибровка и проверочное испытание

Испытания считаются успешно пройденными, если приведенная погрешность показаний датчиков/капилляров не превышает 0,1 %.

Температурная калибровка проводилась по температурному циклу от -50 до +80 °С с шагом 10 °С и выдержкой 3 часа на каждой температурной полке. Проверочное испытание проводились по температурному циклу, указанному в Табл. 5. Для уменьшения шумов было сделано усреднение

данных по 2 минуты. С помощью полинома четвертого порядка показания длины волны были получены калибровочные коэффициенты. После тестирования одна из заклеек (заклейка 1) была использована при сборке датчика температуры с алюминиевым капилляром и алюминиевым корпусом, который вновь прошел калибровку и проверочное испытание.

Табл. 5. Температурный цикл проверочного испытания.

Температурная полка, °С	Выдержка на полке, ч
75	3
5	3
-45	3

Результаты испытаний:

Обработка данных проводилась методом наименьших квадратов. По результатам обработки были получены результаты, приведенные в Табл. 6, Табл. 7.

Табл. 6. Сравнение погрешностей чувствительного элемента и готового изделия.

S/N	Калибровка		Проверочное испытание	
	Капилляр	Датчик	Капилляр	Датчик
Заклейка 1	0,07 %	0,02 %	0,07 %	0,03 %
Заклейка 2	0,01 %	-	0,03 %	-

Табл. 7. Сравнение погрешностей образца 1 и образца 2.

Калибровка		Проверочное испытание	
Образец 1*	Образец 2**	Образец 1	Образец 2
- 0,10 %	0,02 %	0,15 %	0,03 %

*Образец 1 – датчик со стеклянным капилляром и стальным корпусом;

**Образец 2 – датчик с алюминиевым капилляром и алюминиевым корпусом, изготовленный с заклежкой 1.

Для сравнения был взят серийный датчик со стеклянным капилляром и стальным корпусом, произведенный и протестированный одновременно с опытным.

Как видно из Табл. 7, при калибровке и проверочном испытании приведенная погрешность уменьшилась в 5 раз и оказалась меньше 0,1 %, а, значит, испытания считаются успешно пройденными.

Графики зависимостей температуры от изменения длины волны, полученные при калибровке, представлены на рис. 8-11.

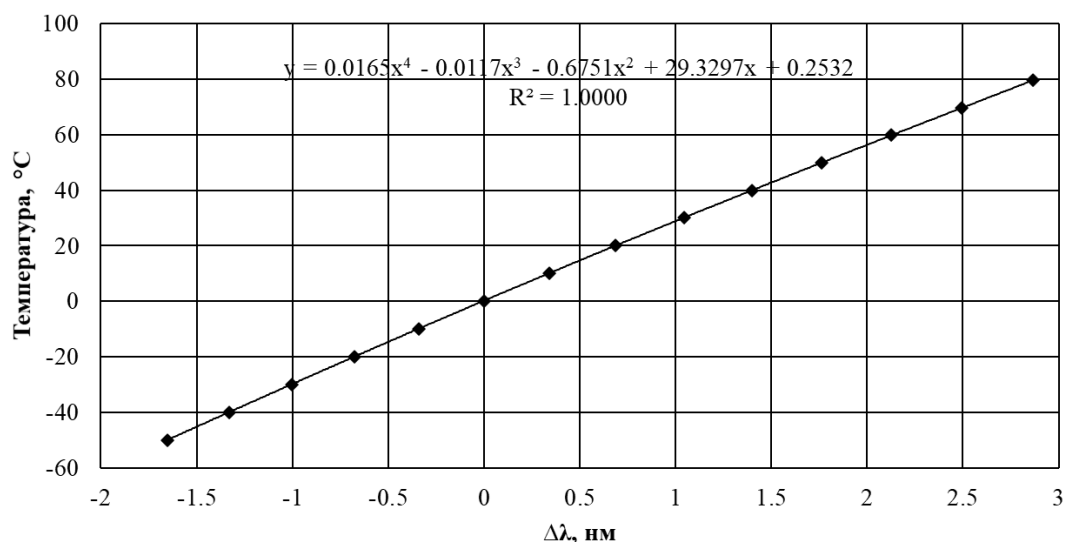


Рис. 8. График зависимости температуры от изменения длины волны для заклежки 1.

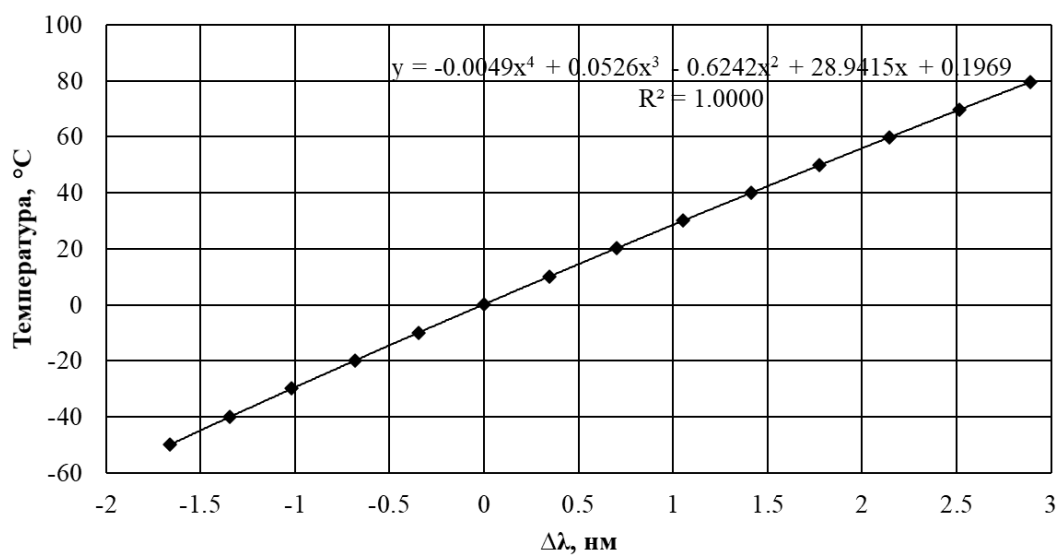


Рис. 9. График зависимости температуры от изменения длины волны для заклейки 2.

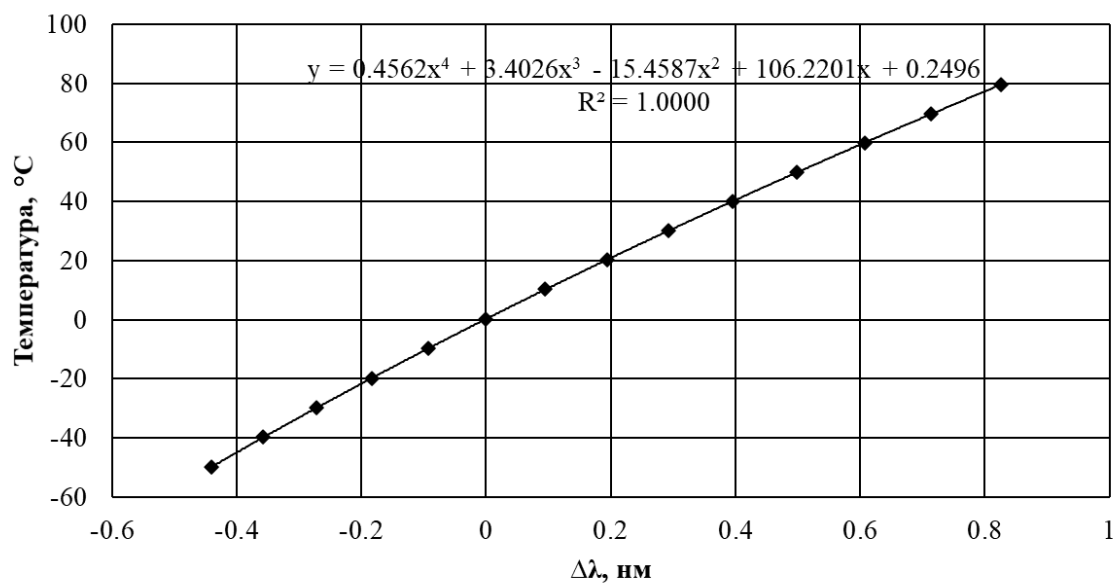


Рис. 10. График зависимости температуры от изменения длины волны для образца 1.

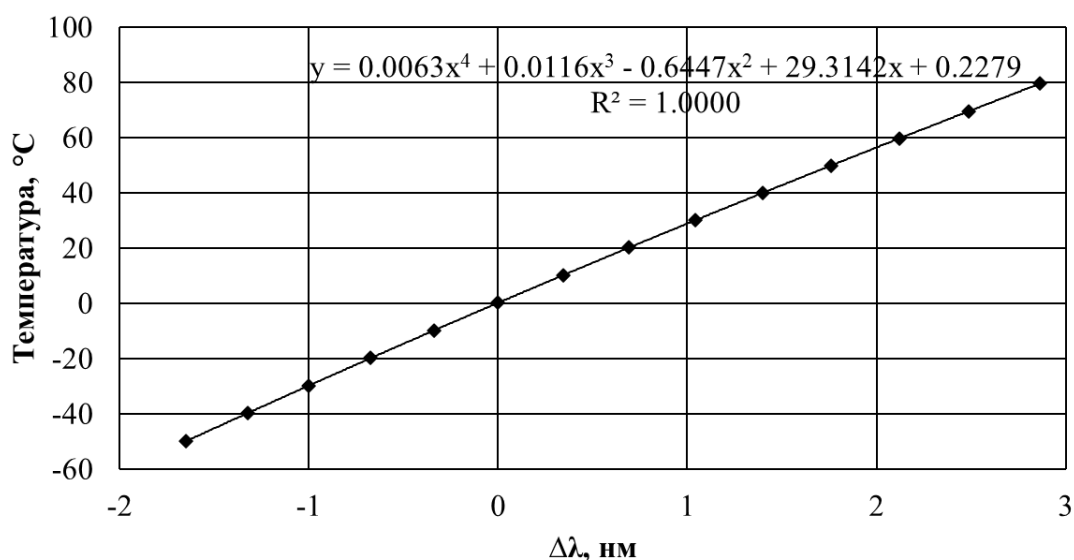


Рис. 11. График зависимости температуры от изменения длины волны для образца 2.

Для пересчета показаний датчика в показания температуры использовался полином четвертого порядка, так как он наиболее точно описывает показания датчика и дает наименьшую погрешность.

По графикам, представленным на рис. 10, 11, можно увидеть увеличение чувствительности датчика (чем больше чувствительность датчика, тем больше изменение длины волны, приходящееся на 1 °C).

Методика 3 – определение тепловой инерционности

В дальнейшем будет проведено испытание по разработанной методике для определения инерционности датчиков образца 1 и образца 2.

Согласно ГОСТ 6651-94 «Термопреобразователи сопротивления». Общие технические требования и методы испытаний датчик помещают в воду температурой 15 – 20 °C на глубину до 10 см. Выдерживают его до стабилизации температуры. Затем резко перемещают в воду температурой 30 – 80 °C и также выдерживают до стабилизации. Затем, по графикам определяют показатель тепловой инерции.

Для датчиков температуры образца 1 и образца 2 предлагается следующая методика определения тепловой инерции – с помощью эталонного термометра сопротивления.

Измерения будут проводиться на положительной и отрицательной температурах с помощью жидкостного термостата, водяной бани и климатической камеры по следующей схеме:

Табл. 8. Схема проведения испытания на определение инерционности.

1)	15 °С	80 °С
	Жидкостный термостат, спирт	Водяная баня
2)	15 °С	- 50 °С
	Климатическая камера Excal	Жидкостный термостат, спирт

1) Жидкостный термостат вывести на 15 °С, положить датчики в спирт на 3 часа. В это время прогреть до 80 °С водяную баню.

2) В минимальный промежуток времени перенести датчики из жидкостного термостата в водяную баню. Выдержать 3 часа.

3) Аналогичные действия провести для отрицательной температуры: выдержать датчики 3 часа в климатической камере Excal на 15 °С, затем перенести их в жидкостный термостат на -50 °С.

4) Далее найти показатель тепловой инерции датчиков по известному показателю тепловой инерции термометра сопротивления:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_x + \varepsilon_x \frac{\varepsilon_0}{t_m} \ln \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_x}$$

где ε_x – неизвестный показатель тепловой инерции датчика; ε_0 – известный показатель тепловой инерции термометра сопротивления; t_m – отрезок времени от начала переходного процесса разности температур первого и второго датчиков до его максимума [патент: RU 2682073: Способ определения показателя тепловой инерции датчиков температуры].

Испытания необходимо проводить с одним и тем же термометром сопротивления.

2.2 Конструкция датчика

На Рис. 12 приведена конструкция датчика, включающая в себя чувствительный элемент (защищённый полиимидным покрытием 1 оптическое волокно 2 с записанной на нём ВБР 8), защитные стекловолоконные буферные покрытия 3, термоусаживаемую фторопластовую трубку повышенной прочности 4, герметичные клейки 5, корпус 6 и капилляр 7.

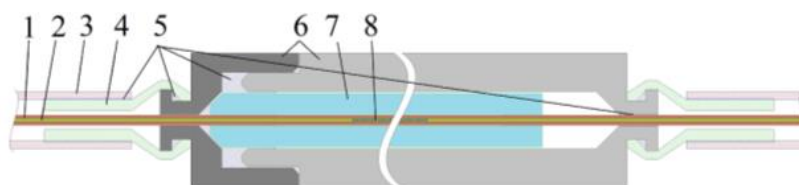


Рис. 12. Конструкция датчика со стеклянным капилляром и стальным корпусом

В конструкцию датчика было внесено 2 изменения:

1. Кварцевый капилляр был заменен на алюминиевый;
2. Стальной корпус был заменен на алюминиевый;

В результате внесенных изменений должно было получиться 4 вида датчиков (Табл. 9).

Табл. 9. Разновидности датчиков согласно внесенным изменениям.

Капилляр	Корпус
Алюминий	Алюминий
Кварц	Сталь
Алюминий	Сталь
Кварц	Алюминий

За неимением достаточного количества времени для производства всех разновидностей, дальнейшие расчеты были произведены относительно датчика с алюминиевым капилляром и корпусом.

В данной модификации датчика уменьшен паз, в который укладывается волокно (рис. 13 а – паз стеклянного капилляра, рис. 13 б – паз алюминиевого капилляра). Это изменение произведено с целью более ровной укладки ВБР в пазе, а также с целью уменьшения клея, которого будет хватать для надежной фиксации волокна.

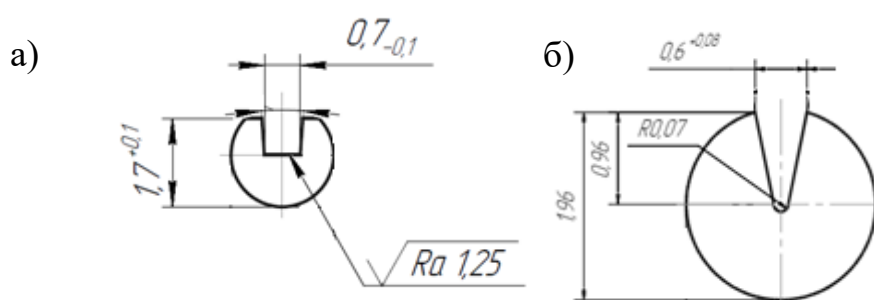


Рис. 13. Варианты паза капилляра для укладки в него ВБР.

2.3 Расчетные и экспериментальные характеристики датчика

Расчет чувствительности и приведенной погрешности датчика

Предложенный способ изменения конструкции заключается в том, что нужно заменить стеклянный капилляр и стальной корпус алюминиевыми. Так как коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР) алюминия равен $22,8 \frac{\text{мкм}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$, а КЛТР кварца $0,54 \frac{\text{мкм}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$, то при воздействии температуры величина изменения периода ВБР будет больше, чем у кварца. По формуле (2) вычислим изменение длины волны на изменение температуры, равное 1 °C . Изменения длины волны за счет механических воздействий не будет, так как присутствует жесткое закрепление капилляра в корпусе, тогда выражение (2) примет вид:

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left(\left[\alpha + \frac{\left(\frac{dn}{dT}\right)}{n} \right] \Delta T \right) \quad (4)$$

Преобразуем выражение (4):

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda([\alpha + \xi]\Delta T) \quad (5)$$

где ξ – термооптический коэффициент (для волокон с добавками германия $\xi = 8,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{МКМ}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$).

Расчетная чувствительность ВБР к изменению температуры приведена в табл. 10:

Табл. 10. Чувствительность ВОДТ с различным материалом капилляра

Материал	Чувствительность, пм/°С
Кварц	9,14
Алюминий	31,4

В результате испытания на повторяемость была получена температурная чувствительность заклеек, вычисленная как отношение изменения длины волны заклеек к перепаду температуры, вызвавшей это изменение (формула 6), составила ≈ 35 пм/°С.

$$S = \frac{\lambda_{25^\circ\text{C}} - \lambda_{1^\circ\text{C}}}{\Delta T}, \quad (6)$$

где S , пм/°С – температурная чувствительность заклейки;

$\lambda_{25^\circ\text{C}}$, нм – длина волны заклейки при 25 °С;

$\lambda_{1^\circ\text{C}}$, нм – длина волны заклейки при 1 °С;

ΔT , °С – разность температур между полками 25 °С и 1 °С.

Теперь оценим точность датчика при идеальных условиях и сравним с точностью, полученной экспериментально.

Как уже было описано в проблематике ВОДТ, анализаторы сигналов имеют собственную погрешность в диапазоне измерений от 1500 до 1600 нм. На сегодняшний день эта погрешность составляет ± 2 пм.

По теоретическому расчету на 1 °С приходится изменение длины волны на 31,4 пм.

Оценим минимальную погрешность измерений температуры:

$$\frac{\delta T}{\pm 2 \text{ пм}} = \frac{1 \text{ °С}}{31,4 \text{ пм}};$$

$$\delta T = 0,03 \text{ °С}$$

В результате калибровки датчика его приведенная погрешность после проверочного испытания составила 0,06 % или 0,078 °С.

Таким образом, теоретические расчеты совпали с экспериментальными.

3 Специальные вопросы проектирования

3.1 Техничко-экономическая оценка

Выполним технико-экономические расчёты размеров затрат на изготовление партии разработанных ВОДТ. Для этого определим затраты на основные материалы, произведём расчёт стоимости основных фондов, заработной платы работников и т.д.

Пусть годовая партия составляет 1000 шт.

- 1) Стоимость одного корпуса составляет (включая изготовление): 800 р/шт;
- 2) Стоимость одного капилляра составляет (включая изготовление): 800 р/шт;
- 3) Стоимость чувствительного элемента (ВБР): 1500 р/шт (указана не реальная стоимость чувствительного элемента);
- 4) Эпоксидный клей: 14800 р за 25 г, для датчика необходимо 0,01 г клея, это 5,92 р/шт;
- 5) Заработная плата работникам:

На сборку датчиков необходимо 2 сотрудника, средний заработок которых составляет приблизительно 30000 р/мес.

Таким образом, посчитав годовой расход по каждому пункту, итоговая стоимость затрат на партию датчиков составляет 3 825 920 руб.

Предположительно стоимость такого датчика на рынке составляет 20000 р/шт (указана не реальная стоимость датчика).

Общая стоимость производимых датчиков на рынке – 20 000 000 руб.

Таким образом, прибыль компании-производителя ВОДТ составляет 16 174 080 руб.

3.2 Основные положения техники безопасности

При производстве датчиков используются материалы, которые могут быть опасны для здоровья человека. Например, таким материалом является клей. Для того, чтобы не навредить здоровью, необходимо соблюдать правила безопасности при производстве и проведении температурных испытаний.

В Табл. 11 приведены травмы, которые можно получить при производстве и температурных испытаниях.

Табл. 11. Травмы, которые можно получить при производстве и температурных испытаниях ВОДТ

Риск	Место и причина возникновения риска
Ранение от волокна	Волокно может попасть в глаза или застрять в пальце (заноза).
Ожог от потока горячего/холодного воздуха	Ожог от потока горячего воздуха, выходящего из климатической камеры при открытии дверцы.
Удар электрическим током	Удар от использования незаземленного оборудования
Лазерное излучение	Ожог при попадании лазерного излучения в глаза

Чтобы избежать травм, персонал обязан соблюдать Инструкции по безопасной работе на производстве.

Заключение

В настоящее время ВОДТ могут найти применение на предприятиях металлургической, химической, нефте- и газодобывающей промышленности, топливно-энергетического комплекса, заводах судостроительной отрасли, горного дела, автомобильного транспорта, медицине и т.д.

В проекте на основе анализа научно-технологических проблем, связанных с точностью ВОДТ и обобщения участия автора в исследовании ВОДТ были получены следующие результаты:

- 1) Проведен сравнительный анализ материалов, из которых производятся датчики температуры с целью выявления наилучшего материала;
- 2) Предложена методика определения повторяемости результатов ВОДТ;
- 3) Предложена методика проведения температурных испытаний и определения абсолютной погрешности ВОДТ;
- 4) Разработана методика определения инерционности ВОДТ;
- 5) Предложен вариант доработки ВОДТ.

В результате проделанной работы были получены расчетные характеристики датчика: чувствительность составила $31 \text{ пм}/^\circ\text{C}$, абсолютная погрешность датчика составила $0,03 \text{ }^\circ\text{C}$. На экспериментальной установке были проведены температурные испытания датчика. В результате испытаний были получены следующие характеристики датчика: чувствительность датчика составила $35 \text{ пм}/^\circ\text{C}$, абсолютная погрешность измерения температуры датчиком составила $0,04 \text{ }^\circ\text{C}$.

Итак, чувствительность образца 2 в сравнении с образцом 1 увеличилась в 3,5 раза, а абсолютная погрешность уменьшилась в 5 раз.

В специальном разделе проекта выполнена технико-экономическая оценка и представлен материал по безопасной работе при производстве датчиков.

Таким образом, содержание проекта соответствует выданному заданию на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра.

В качестве перспектив возможной реализации проекта можно выделить разработку нового волоконно-оптического датчика температуры для использования в медицинских целях.

Список литературы

1. Шишкин В.В., Гранев И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. - 2016. - Т. 3, № 1. - С. 61-75.
2. Инверсия-Сенсор [Электронный ресурс]: официальный сайт. URL: <https://i-sensor.ru/> (дата обращения 12.12.2019).
3. Micron Optics [Электронный ресурс]: официальный сайт. URL: <http://www.micronoptics.com/> (дата обращения 12.12.2019).
4. HBM FiberSensing [Электронный ресурс]: официальный сайт. URL: <https://www.hbm.com/en/4584/fibersensing-profile/> (дата обращения 12.12.2019).
5. Sylex Fiber Optics [Электронный ресурс]: официальный сайт. URL: <https://www.sylex.sk/> (дата обращения 12.12.2019).
6. Fiber Optic Temperature Sensor structure, working, advantages, disadvantages [Электронный ресурс]: URL: <https://www.rfwireless-world.com/> (дата обращения на сайт 16.12.2019).
7. Advantages And Disadvantages Of Optical Fibers [Электронный ресурс]: официальный сайт. URL: <https://www.ukessays.com/> (дата обращения на сайт 18.12.2019).
8. Волоконно-оптические датчики температуры на основе решеток показателя преломления [Электронный ресурс]: URL: <https://www.km.ru/> (дата обращения на сайт 19.12.2019).
9. Гуртов В. А. Оптоэлектроника и волоконная оптика: учебное пособие. ПетрГУ, 2005. – 100 с.
10. Быстродействующее малогабаритное устройство регистрации спектрального отклика для волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках [Электронный ресурс]: URL: <https://www.dissercat.com/> (дата обращения на сайт 19.12.2019).

11. Васильев С.А., Медведков О.И. [и др.]. Волоконные решетки показателя преломления и их применения: обзор НЦВО РАН // Квантовая электроника, 2005. Т. 35. № 12. С. 1085-1103.
12. Kersey A.D., Davis V.A., Patrick H.J., LeBlanc M., Koo K.P., Askins C.G., Putnam M.A., Friebele E.J., J. Lightwave technol., 15, 1442 (1997).
13. Гармаш В. Б., Егоров Ф. А. [и др.] Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении// Фотон-экспресс. №6. 2005, с. 128 – 140.
14. Волков Ю.В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2019 – 89 с.
15. Беспрозванных В.Г., Зырянов С.В. Совершенствование эксплуатационных характеристик волоконно-оптического датчика температуры // Сборник научных трудов SWorld. 2013. Т. 14. Вып. 4. С. 41-44.
16. Гончаренко И.А., Рябцев В.Н. Датчики контроля состояния инженерных и строительных конструкций на основе оптических волноводных структур // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь, 2013. - №2 (18) – с. 118-132.
17. Гавричев В.Д. Волоконно-оптические измерители температуры для работы в условиях сильных электромагнитных помех [Электронный ресурс]: URL: <https://docplayer.ru/> (дата обращения на сайт 03.06.2020).