

На правах рукописи



Шмыгалев Александр Сергеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА
ИНФРАКРАСНЫМИ ГАЛОГЕНИДСЕРЕБРЯНЫМИ СВЕТОВОДАМИ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского энергетического института Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Жилкин Борис Прокопьевич

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Терехов Виктор Иванович

Официальные оппоненты: **Вавилов Владимир Платонович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий научно-производственной лабораторией «Тепловой контроль»

Ангервакс Александр Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», заведующий лабораторией «Спектроскопия кристаллов»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теплофизики» Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Защита состоится «14» декабря 2018 года в 12.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «___» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.173.02,
доктор технических наук, профессор



А. В. Чичиндаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время для измерения тепловых свойств различных тел широко используют метод инфракрасной термографии. Однако современные тепловизионные приборы весьма громоздки, что не позволяет проводить съемку в пространственно-затрудненных местах и замкнутых контурах. Кроме того, не решена проблема применения теплового контроля в экстремальных условиях, таких как рабочее пространство двигателей, реакторов химического синтеза, промышленных печей, а также вблизи сварочной поверхности, в зонах сверхнизких температур и т. д. В связи с этим актуальным является создание канала тепловой связи между опасной зоной и зоной размещения измерительного оборудования. Этот канал может быть создан с помощью технологий волоконной оптики.

Волоконная оптика является одним из наиболее перспективных и востребованных направлений для различных приложений в промышленности, медицине и науке. В настоящее время растет потребность в оптических материалах, работающих в инфракрасном спектральном диапазоне. Наибольший интерес среди них вызывают кристаллы на основе твердых растворов галогенидов серебра и одновалентного таллия и, изготовленные из них методом экструзии, кристаллические инфракрасные световоды. Такие световоды нетоксичны и негигроскопичны, обладают высокой гибкостью и прочностью, а также высоким пропусканием в широком диапазоне длин волн от 2,5 до 25,0 мкм, что соответствует температурному диапазону пропускания от – 200 до 1000 °С. Данный температурный диапазон является рабочим практически для всех современных энергетических систем.

При этом анализ различных технических приложений показал, что для практического применения требуются длинные, тонкие ($d = 1 - 2$ мм) и гибкие световоды. Изучение существующей номенклатуры световодов показало, что нужные для различных технологий готовые изделия отсутствуют. Поэтому в химико-технологическом аспекте необходимо было вначале разработать технологию изготовления кристаллических световодов с нужными геометрическими и механическими характеристиками, включающую в себя расчет условий синтеза исходной шихты, подбор параметров роста монокристаллов, исследование их оптических свойств, определение режимов экструзии. После этого определить теплопереносные свойства именно в готовом изделии – световоде, поскольку известно, что технологические переделы значительно меняют эти свойства.

Целью настоящей диссертационной работы является комплексное экспериментальное исследование характеристик переноса тепловой энергии инфракрасными световодами на основе кристаллов твердых растворов галогенидов серебра и одновалентного таллия. Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие **задачи**:

1. Разработать технологию получения световодов малого диаметра прозрачных в диапазоне длин волн от 2,5 до 25,0 мкм.

2. Исследовать возможность передачи информации о температурных полях (тепловых изображениях) по сборке световодов на основе твердых растворов галогенидов серебра.

3. Установить характеристики импульсной теплопередачи через инфракрасные кристаллические световоды.

4. Определить основные теплофизические свойства материалов в готовых изделиях.

5. Разработать методики и конструктивное исполнение изделий для внедрения их в различных областях техники.

Научная новизна работы.

1. Проведен расчет условий термозонной кристаллизации-синтеза исходной шихты, подобраны режимы и выращены кристаллы систем $\text{AgCl} - \text{AgBr}$, $\text{AgBr} - \text{TlI}$, исследованы их оптические свойства. Подобраны параметры экструзии и изготовлены кристаллические инфракрасные световоды.

2. Экспериментально подтверждена возможность передачи энергии в форме теплоты и теплового (термического) изображения по сборке световодов. Определены факторы, влияющие на передачу тепловизионного изображения по инфракрасным световодам, предложены рекомендации по их учету и минимизации потерь.

3. Разработана методика и создана новая оптико-электронная система, предназначенная для получения и исследования импульсного режима передачи теплового излучения по инфракрасным световодам от тел, излучающих в среднем инфракрасном диапазоне (7,0 – 9,0 мкм) длин волн. Получены новые качественные и количественные данные о передаче тепловой энергии по световодам систем $\text{AgCl} - \text{AgBr}$, $\text{AgBr} - \text{TlI}$, при непрерывном и импульсном режимах передачи, на основании сравнения которых показана эффективность работы в импульсном режиме.

4. Предложена методика определения коэффициента теплопереноса на основании данных, полученных экспериментальным путем при помощи разработанной и отлаженной новой лабораторной установки для определения коэффициентов теплопереноса в готовых изделиях в виде стержней малого диаметра. Впервые получены данные о теплофизических свойствах инфракрасных световодов на основе кристаллов систем $\text{AgCl} - \text{AgBr}$, $\text{AgBr} - \text{TlI}$, включающие в себя коэффициенты теплопереноса и температуропроводности, а также величины удельной теплоемкости.

5. Разработан ряд предложений по практическому использованию световодов в различных областях науки и техники.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Показана возможность передачи тепловой энергии и информации о тепловых процессах по инфракрасным световодам с высокой скоростью. Разработанные устройства на основе инфракрасных световодов могут быть использованы для проведения термического контроля в различных областях техники.

2. Полученные данные об основных теплофизических свойствах световодов на основе галогенидов серебра и одновалентного таллия могут использоваться для проведения различных научных и инженерных расчетов.

3. Результаты исследования могут служить основой для разработки нового класса оптоволоконных приборов, реализующих метод удаленной инфракрасной термографии.

Результаты диссертационной работы по производству кристаллических инфракрасных световодов используются в деятельности Инновационно-внедренческого центра «Центр инфракрасных волоконных технологий» при Химико-технологическом институте УрФУ. Предложения по практическому использованию инфракрасных световодов внедрены в деятельность ЗАО «Центр инфракрасной диагностики», ООО «Дента-ОС» и ООО «НОТАМЕД».

Положения, выносимые на защиту.

1. Расчеты условий проведения термозонной кристаллизации-синтеза, режимы роста кристаллов и подобранные параметры экструзии.

2. Результаты экспериментального определения возможности передачи теплоты и теплового изображения по сборке световодов на основе кристаллов галогенидов серебра и одновалентного таллия.

3. Рекомендации по учету факторов и минимизации потерь, влияющих на передачу тепловизионного изображения по инфракрасным световодам.

4. Новая методика расчета коэффициента теплопереноса на основании данных, полученных экспериментальным путем.

5. Экспериментально и численно полученные значения коэффициентов теплопереноса, коэффициентов температуропроводности и удельной теплоемкости для инфракрасных световодов на основе кристаллов систем AgCl – AgBr, AgBr – TlI.

6. Данные о передаче тепловой энергии по инфракрасным световодам при непрерывном и импульсном режимах, полученные с помощью новой оптико-электронной системы, работающей в среднем инфракрасном диапазоне 7,0 – 9,0 мкм.

7. Предложения по практическому использованию световодов, изготовленных из кристаллов систем AgCl – AgBr, AgBr – TlI.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на XXII и XXIII Международных научных конференциях «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте» (Новороссийск, 2014 и 2015 г.), Advanced Photonics Congress, Optical Sensors Conference, Mid- and long-wavelength IR Sensors (Barcelona, Spain, 2014 г.), XVII Всероссийской молодежной научной школе-семинаре «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (Ульяновск, 2014 г.), XX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Москва, 2015 г.), на ежегодной конференции Нанотехнологического общества России (онлайн, 2014 г.), Всероссийской конференции по волоконной оптике (Пермь, 2015 и 2017 г.), XI Международной научно-технической конференции студентов,

аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016» (Иваново, 2016 г.), XXIV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2016 г.).

Научные и практические результаты диссертационной работы были представлены на Международных промышленных выставках ИННОПРОМ (Екатеринбург, 2015, 2016, 2017 г.), а также отмечены дипломом Областного конкурса инновационных идей «Минута технославы» в рамках ИННОПРОМ-2015 (Екатеринбург, 2015), медалью Российского форума «ЭнергоПром ЭКСПО 2015» (Екатеринбург, 2015 г.), дипломом за I место в конкурсе докладов по электроэнергетической и электротехнической тематикам Молодежной секции РНК СИГРЭ (Иваново, 2016 г.) и дипломом за I место в конкурсе докладов по секции «Теоретические основы теплотехники» XI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2016» (Иваново, 2016 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 7 квалификационных статей (из них 4 статьи в журналах из перечня ВАК и 3 в журналах, цитируемых в международной базе Scopus), получено 3 патента Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка использованной литературы (227 наименований) и приложения (11 страниц). Материал диссертации изложен на 164 страницах основного текста, содержит 64 рисунка и 16 таблиц.

Личный вклад автора. Основная часть диссертации выполнена автором лично, а именно: проведение аналитического обзора по исследуемой проблеме, постановка целей и задач работы, разработка методики и создание лабораторной установки для определения коэффициента теплопереноса стержней малого диаметра, определение основных теплофизических свойств инфракрасных световодов, разработка оптико-электронной системы и изучение характеристик передачи тепловой энергии при непрерывном и импульсном режимах, выявление и оценка факторов, влияющих на передачу тепловой энергии по световодам, а также рекомендации по практическому применению исследуемых волокон.

Выращивание монокристаллов из гидрохимически полученного сырья, измерение их оптических свойств и экструзия инфракрасных световодов выполнены автором на базе ИВЦ «ЦИВТ» УрФУ (совместно с к.х.н. А. С. Корсаковым). Экспериментальное определение возможности передачи теплоты и теплового изображения по инфракрасным световодам было выполнено автором в ИТ СО РАН им. С. С. Кутателадзе совместно с д.т.н. М. И. Низовцевым и к.т.н. А. Н. Стерляговым. Разработка предложений о практическом применении волоконных световодов для удаленного контроля параметров пламени газовых горелок было выполнено автором в ИТ СО РАН им. С. С. Кутателадзе совместно д.ф.-м.н. В. М. Дулиным, аспирантом Д. К. Шарaborиным.

Общее руководство выполнением диссертационной работы осуществлялось научным руководителем д.ф.-м.н. Б. П. Жилкиным и научным консультантом д.т.н. В. И.

Тереховым. Исследованиями в химико-технологическом направлении руководила д.т.н. Л.В. Жукова.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, обозначена степень её проработанности, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, реферативно представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, указаны положения, выносимые на защиту, обоснованы надежность и достоверность результатов и приведены сведения об апробации работы.

Первая глава представляет собой аналитический обзор литературы, в котором рассматриваются основные классы оптических материалов, известных современной науке. Приведены их физико-химические свойства, в том числе индивидуальных галогенидов серебра и твердых растворов на их основе, основные теплофизические свойства оптических материалов, применяемых в современной инфракрасной технике и волоконной оптике, а также некоторые области их применения.

Вторая глава содержит описание технологического процесса получения кристаллических световодов, включающего в себя подготовку сырья, выращивание кристаллов на основе твердых растворов галогенидов серебра и одновалентного таллия, исследование их оптических свойств и экструзию инфракрасных световодов.

Гидрохимическое получение исходной шихты, используемой в качестве однофазного сырья для выращивания кристаллов, осуществлялось методом термозонной кристаллизации-синтеза (ТЗКС), сочетающим в себе синтез и глубокую очистку продукта (содержание примесей менее 10^{-4} – 10^{-5} мас. %). Рост кристаллов проводился по методу Бриджмена-Стокбаргера на оригинальной ростовой установке. В состав выращенных кристаллов входил Тл, который обеспечивал расширенный диапазон пропускания, радиационную стойкость, увеличение показателя преломления и твердость кристаллов. Эти факторы являются определяющими при применении инфракрасных световодов.

После получения и обработки кристаллов были измерены их оптические свойства. Спектральное пропускание измерялось с помощью ИК-Фурье спектрометра Shimadzu IR-Prestige-21, а показатель преломления – на интерферометре Майкельсона, собранном из аттестованных компонентов фирмы STANDA. Выращенные кристаллы обладали высоким пропусканием (до 80 %) без окон поглощения в широком спектральном диапазоне от 0,4 до 40,0 мкм. Значения показателя преломления монокристаллов, измеренные интерферометрическим методом на длине волны 632,8 нм, находились в области от $2,094 \pm 0,003$ до $2,272 \pm 0,009$ в зависимости от состава.

Производство кристаллических световодов из полученных кристаллов осуществлялось методом экструзии на прессе ПОИ-500. Таким образом, исходя из вышеприведенной технологии производства, для дальнейших исследований были произведены однослойные инфракрасные световоды четырех составов: $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$, $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$, $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$, $\text{Ag}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$.

Третья глава посвящена комплексному изучению теплопереносных свойств кристаллических инфракрасных световодов на основе кристаллов твердых растворов галогенидов серебра и одновалентного таллия.

Продемонстрировано, что с применением инфракрасных световодов можно проводить измерения температур поверхностей различных удаленных объектов с использованием метода инфракрасной термографии. Для этого была изготовлена экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 1.

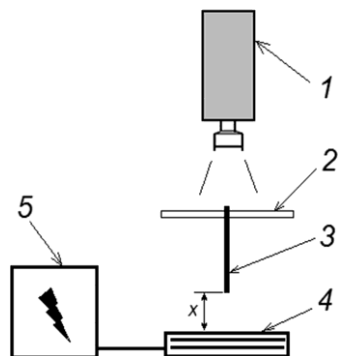


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки:

- 1 – приемник излучения;
- 2 – защитный экран;
- 3 – световод;
- 4 – элемент Пельтье;
- 5 – источник тока.

Световод (3) в защитной оболочке, выполненной из фторопласта, закреплялся в штативе и располагался вертикально. Над верхним торцом оптического волокна располагался приемник излучения (1). В опытах в качестве приемников излучения использовались два тепловизора: первый – NEC 7102WV, работающий в длинноволновом спектральном диапазоне 8,0 – 14,0 мкм; второй – ТКВр-ИФП «ТИРМ-02», работающий в коротковолновом инфракрасном спектральном диапазоне 2,8 – 3,1 мкм. По периметру верхнего торца световода для исключения влияния излучений окружающего фона, располагался защитный экран (2). Под нижним торцом световода на фиксированном расстоянии $x = 1$ мм находился элемент Пельтье (4), который выполнял роль теплового источника. Изменение величины напряжения, подаваемого на элемент с помощью источника постоянного тока (5), позволяло менять температуру излучающей поверхности элемента Пельтье поверхности в диапазоне 283 – 450 К.

Процедура опыта по определению переносных свойств световодов заключалась в следующем. Как только температура внешней поверхности элемента Пельтье достигала постоянного значения, он помещался под нижний торец световода. При этом на верхнем торце световода был сфокусирован объектив тепловизора, который фиксировал изменение температуры (Рисунок 2).

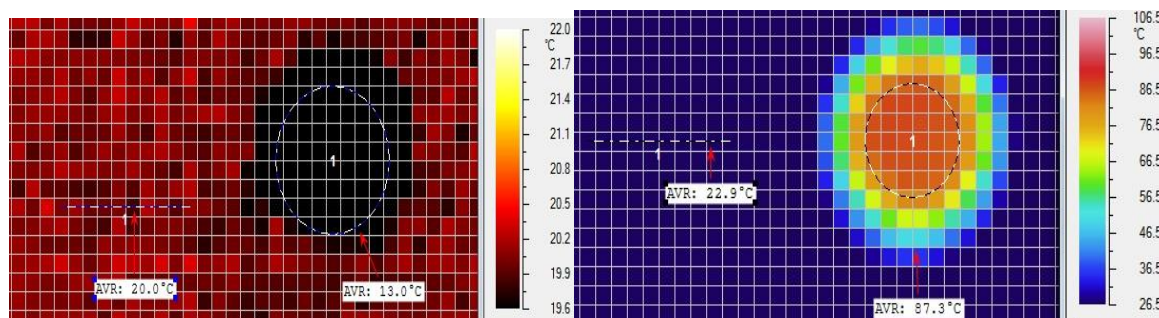


Рисунок 2 – Характерные тепловизионные изображения торца оптического волокна при температуре источника теплового излучения 271,5 К и 400 К соответственно, полученные в длинноволновом диапазоне с помощью тепловизора NEC 7102WV.

Контактные измерения температуры поверхности световода показали, что в течение экспериментов его нагревания не происходило. Таким образом, передача энергии через световод происходила по механизму радиационного теплопереноса. В ходе исследований было выявлено, что доля пропускания теплового излучения световодом θ в длинноволновом диапазоне была выше в два раза (54 %), чем в коротковолновом (26 %). Обработка экспериментальных данных производилась в соответствии с теорией радиационного теплообмена по формуле:

$$\theta = \frac{(T_s)^4 - (T_f)^4}{(T_w)^4 - (T_f)^4} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где θ – доля пропускания (%), T_w , – температура объекта, T_s – температура регистрируемая тепловизором, T_f – температура фона (К).

Результаты обработки экспериментальных данных по формуле (1) для коротковолнового (кривая 1) и длинноволнового (кривая 2) инфракрасных диапазонов излучения представлены на рисунке 3.

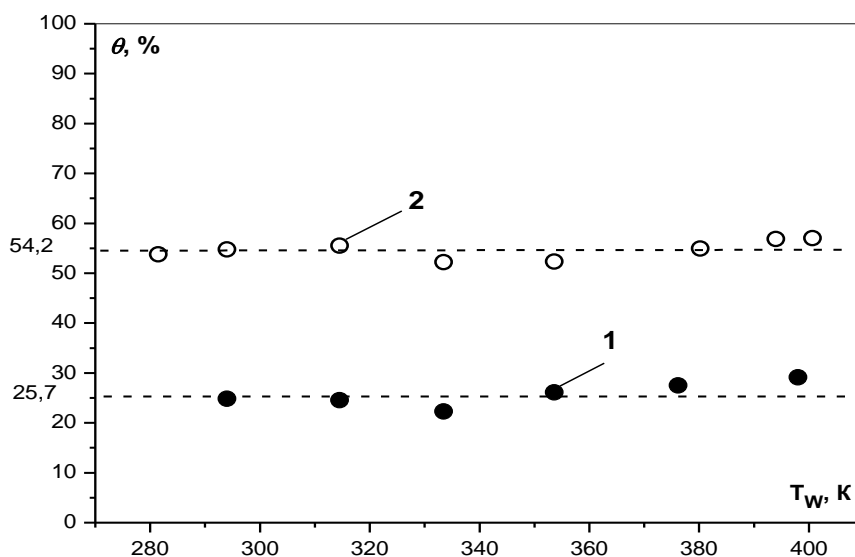


Рисунок 3 – Доля пропускания излучения через световод θ при различной температуре поверхности излучающего образца T_w : 1 – в коротковолновом инфракрасном диапазоне, 2 – в длинноволновом инфракрасном диапазоне.

Таким образом, полученные данные показали принципиальную возможность проведения измерений температур поверхностей различных объектов с использованием метода инфракрасной термографии через световоды, изготовленные на основе твердых растворов галогенидов серебра как длинноволновом, так и в коротковолновом диапазонах.

Установлено влияние различных конфигураций световодов на передачу теплового излучения. Определен критический радиус изгиба и оценены потери теплового излучения при различных радиусах, отличных от критического (Рисунок 4). Данные эксперименты показали, что инфракрасные световоды обладают повышенной гибкостью и пластичностью.

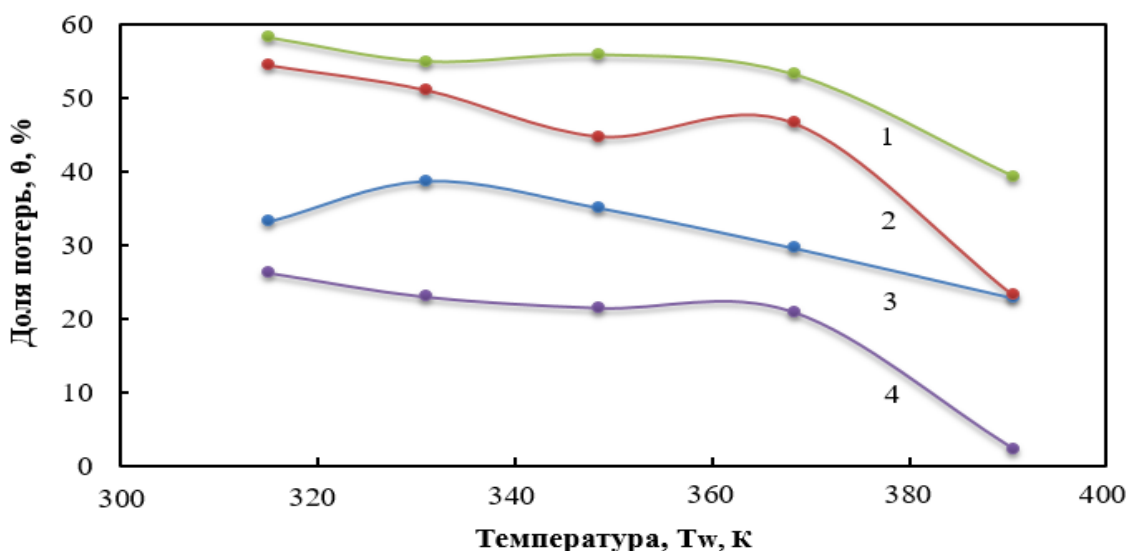


Рисунок 4 – Зависимость доли потерь θ при изгибе световода состава $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$ диаметром $d = 1,12$ мм при различной температуре T_w на угол $\gamma \geq 90$ с радиусом r : 1 – $r = 2$ мм, 2 – $r = 3,6$ мм, 3 – $r = 28$ мм, 4 – прямой световод.

При исследовании пропускания теплового излучения, проведенного для световодов состава $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$ длиной 200 мм с диаметрами 0,5, 1,12, 1,75 мм, выявлено, что диаметр оптического волокна не влияет на пропускание излучения. В то же время, уменьшение длины световода с 200 мм до 50 мм увеличивает долю пропускания на 10 %, что связано с уменьшением потерь, обусловленных поглощением и рассеиванием теплового излучения материалом световода. Наличие различных типов изоляционных оболочек также приводит к увеличению доли пропускания теплового излучения на 5 %.

Наибольший интерес, как с фундаментальной, так и практической точки зрения вызывает получение температурного поля нагретого тела с использованием волоконно-оптического кабеля в реальном времени. В ходе выполнения работы для подтверждения принципиальной возможности передачи тепловизионного изображения нами был изготовлен волоконно-оптический кабель длиной 135 мм, состоящий из семи световодов состава $\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$ диаметром $d = 1,12$ мм. В качестве объекта наблюдения выступала медная проволока диаметром в три раза меньшим, чем диаметр единичного волокна сборки ($d_{np} \approx 300$ мкм), которая наматывалась на поверхность элемента Пельтье. Волоконно-оптическая сборка располагалась перпендикулярно относительно поверхности источника теплового излучения (см. схему на рисунке 1) и перемещалась в ортогональных направлениях. При этом в режиме реального времени наблюдалось изменение регистрируемой тепловизором температуры отдельных волокон, что означало появление под поверхностью принимающего торца объекта наблюдения (Рисунок 5).

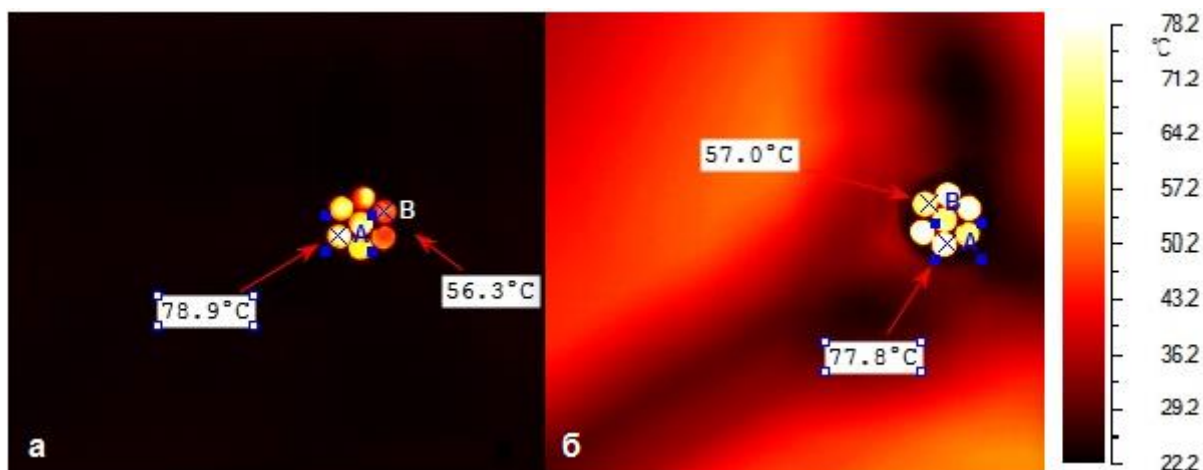


Рисунок 5 – Тепловизионные изображения принимающего торца волоконно-оптической сборки при: а – вертикальном расположении объекта наблюдения; б – горизонтальном расположении объекта наблюдения.

Исходя из полученных данных, можно заключить, что существует возможность передачи тепловизионного изображения через волоконно-оптический кабель. Результаты экспериментов показывают, что для получения четкой тепловизионной картины объекта необходимо повысить разрешающую способность волоконно-оптического кабеля за счет увеличения числа световодов в структуре, а также уменьшения их диаметра.

Так как в большинстве приложений инфракрасные световоды принимают излучение от тел, температура которых выше температуры окружающей среды, то в этом случае теряется часть энергии проходящей волны (в форме теплоты). Эти потери особенно критичны при бесконтактном измерении температуры и могут быть причиной значительных погрешностей. Применение концентраторов оптического сигнала (например, линз) приводит также к усилению помех. Одним из способов снижения погрешностей является использование импульсного режима передачи теплового излучения. Кроме того, многие теплоэнергетические агрегаты, в том числе газотурбинные установки и поршневые двигатели внутреннего сгорания, работают в периодическом режиме. В связи с этим, для установления закономерностей теплопереноса в импульсном режиме была разработана методика, сконструирована и отлажена экспериментальная оптико-электронная система (Рисунок 6) для исследования импульсного режима передачи теплового излучения по инфракрасным световодам в среднем диапазоне длин волн 7,0 – 9,0 мкм, что соответствует температурам от 280 до 400 К. Разработанная установка позволяет испытывать в импульсном режиме передачи с частотой от 20 до 170 Гц инфракрасные световоды различных геометрических параметров, а также их сборки.

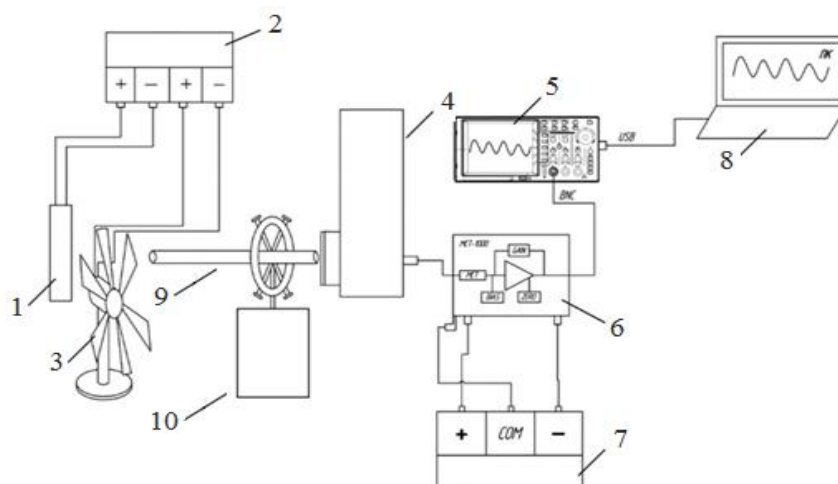


Рисунок 6 – Схема экспериментальной опико-электронной системы: 1 – элемент Пельтье, 2 – блок питания, 3 – крыльчатка, 4 – КРТ-детектор, 5 – осциллограф, 6 – предусилитель, 7 – блок питания, 8 – ПК, 9 – инфракрасный световод, 10 – двухкоординатный стол.

На основании исследований частотных характеристик КРТ-детектора было показано, что частоты колебаний светового пучка, создаваемые крыльчаткой, и напряжения детектора совпадают при 60 Гц, следовательно, при этой частоте измерительная цепочка не обладает инерционными свойствами и имеет высокую точность при передаче импульсного излучения. При изменении расстояния между приемником и источником инфракрасного излучения было найдено оптимальное расстояние, равное 4 мм, которое и использовалось в дальнейших экспериментах. При исследовании зависимости $U_{\text{ВЫХ}}$ от соотношения площадей излучателя и приемника было выявлено изменение формы сигнала с псевдогармонической на П-образную (Рисунок 7).

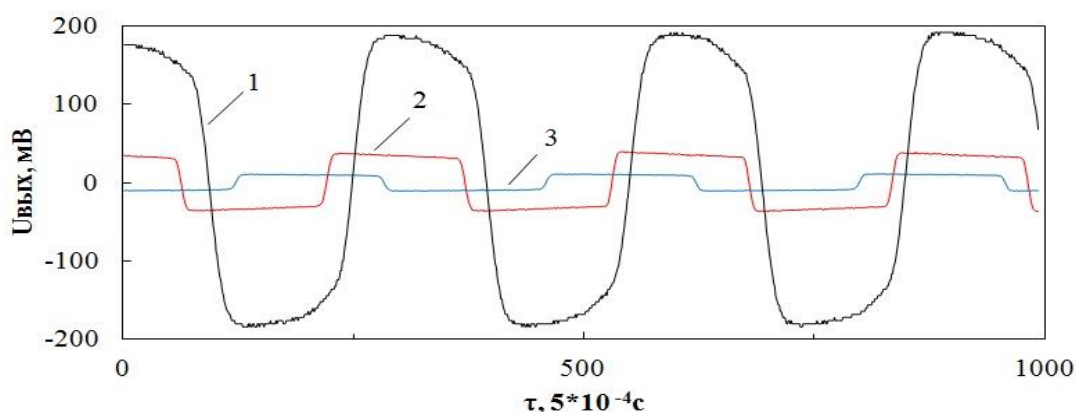


Рисунок 7 – Сравнение временных характеристик выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ от соотношения площадей поверхностей: 1 – элемент Пельтье (площадь поверхности $f_1 = 900 \text{ мм}^2$); 2 – элемент Пельтье-световод с площадью торца $f_2 = 2,4 \text{ мм}^2$ (соотношение $f_1/f_2 = 375$); 3 – элемент Пельтье-световод с площадью торца $0,98 \text{ мм}^2$ ($f_1/f_2 = 918$).

Появление деформированной П-образной формы выходного напряжения в случае использования световодов связано с соотношением эффективных размеров излучающей площадки с размером лопатки модулятора. Таким образом, следует полагать, что в случае

сопоставимых размеров будет иметь место псевдогармоника, а в случае меньшего размера принимающей площадки излучателя или лопатки обтюратора – П-образная форма сигнала. Показано, что импульсный режим работы канала с КРТ-детектором более эффективен, так как он позволяет получать значения выходного напряжения до 100 раз превосходящие значения выходного напряжения в непрерывном режиме передачи.

Установлена зависимость характеристик теплового излучения, передаваемого в импульсном режиме с помощью инфракрасных световодов различного химического состава (Рисунок 8).

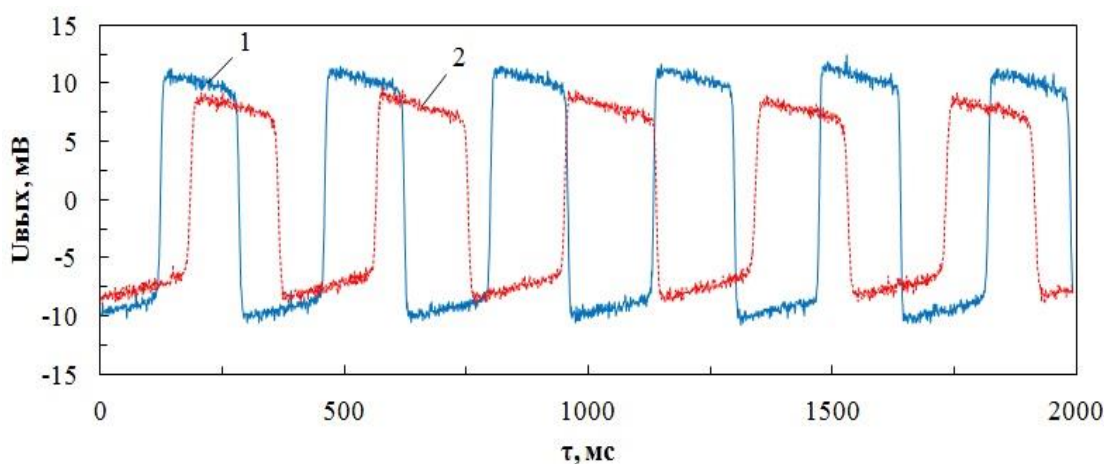


Рисунок 8 – Временные характеристики выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ для канала со световодами разных составов: 1 – $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ и; 2 – $\text{Ag}_{0,95}\text{Pb}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$.

Показано, что разница в значениях выходного напряжения в 15 % для световодов составов $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ и $\text{Ag}_{0,95}\text{Pb}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$ в диапазоне длин волн от 7,0 до 9,0 мкм связана со спектральными характеристиками оптического волокна. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что использование световода с химическим составом $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ представляется наиболее эффективным в импульсном режиме передачи теплового излучения в диапазоне от 2,5 до 15,0 мкм. Вместе с тем, оптическое волокно состава $\text{Ag}_{0,95}\text{Pb}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$ целесообразно применять в диапазоне длин волн от 15,0 до 25,0 мкм, где пропускание световода состава $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ значительно снижается. Помимо этого, инфракрасные световоды состава $\text{Ag}_{0,95}\text{Pb}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$ обладают большей фотостойкостью и меньшими оптическими потерями по длине, что значительно расширяет их сферы применения.

Поскольку световод представляет собой оптически полупрозрачную среду, для него следует использовать понятия эффективных характеристик теплопереноса, учитывающих совместный перенос теплоты излучением и теплопроводностью. Для определения коэффициента теплопереноса был использован стандартный метод стационарного теплового потока, модернизированный для объектов малого диаметра ($d = 1 - 5$ мм). Рабочий участок этой установки представлен на рисунке 9.

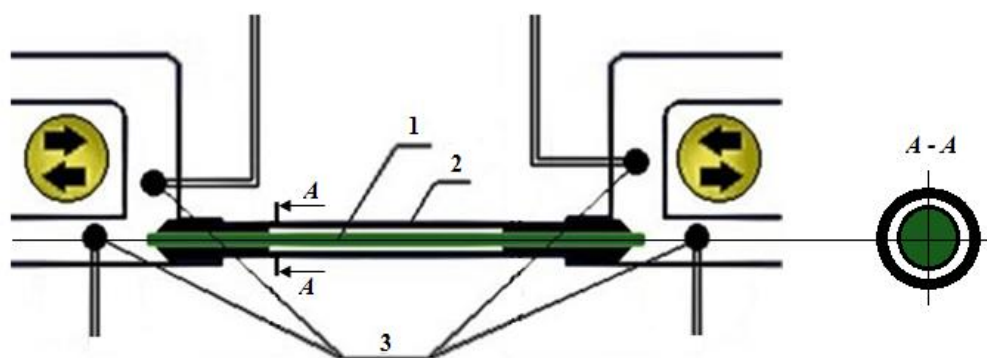


Рисунок 9 – Схема рабочего участка: 1 – исследуемый образец цилиндрической формы; 2 – теплоизоляционная рубашка, состоящая из полимерной термоусадочной трубки (черный фон) и фторопластовой трубки (белый фон); 3 – медь-константановые термопары.

Для определения коэффициента температуропроводности был применен метод температурного скачка – метод Паркера, реализованный с помощью установки, особенностью которой являлось то, что тепловой импульс создавался элементом Пельтье. На основании полученных значений, произведен расчет удельной теплоемкости кристаллических световодов. Данные об основных теплофизических свойствах световодов приведены в сводной таблице 1.

Таблица 1 – Теплофизические свойства световодов при температуре 300 К

Состав	$\text{AgCl}_{0,75}\text{Br}_{0,25}$	$\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$	$\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$	$\text{Ag}_{0,95}\text{I}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$
Коэффициент теплопереноса η , Вт/(м·К)	94 ± 25	99 ± 18	104 ± 21	143 ± 20
Коэффициент температуропроводности, $a \cdot 10^6$, м ² /с	$16,24 \pm 0,78$	$15,31 \pm 0,70$	$15,83 \pm 0,60$	$10,4 \pm 0,40$
Плотность ρ , кг/м ³	6195 ± 145	6422 ± 107	5303 ± 102	7812 ± 182
Удельная теплоемкость C , кДж/(кг·К)	$0,93 \pm 0,17$	$1,01 \pm 0,21$	$1,24 \pm 0,31$	$1,76 \pm 0,41$

Четвертая глава содержит предложения по практическому применению кристаллических инфракрасных световодов на основе твердых растворов галогенидов серебра.

В энергетике существует множество аппаратов, в которых необходим тепловой контроль работы его элементов. Примером может служить газотурбинное оборудование, при работе которого нужно отслеживать тепловое состояние рабочих лопаток. В работе была создана экспериментальная установка (Рисунок 10), которая представляла собой закрытый бокс (1), изнутри покрытый черным бархатом.

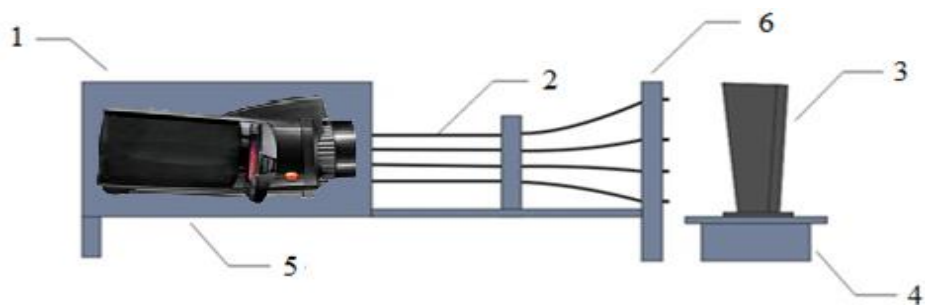


Рисунок 10 – Схема установки для измерения теплового состояния лопатки, где: 1 – закрытый бокс, 2 – инфракрасные световоды, 3 – лопатка ГТУ, 4 – ванночка с трансформаторным маслом, 5 – тепловизор, 6 – держатель, имитирующий корпус ГТУ.

В боксе располагались тепловизор NEC 7102WV (5) и выходные торцы четырех инфракрасных световодов (2) состава $AgCl_{0,25}Br_{0,75}$ диаметром 1,12 мм и длиной 200 мм, расположенных на одной линии. Другие торцы световодов помещались в держатель (6), установленный на расстоянии 10 мм от поверхности рабочей лопатки (3) с шагом 20 мм. Рабочая лопатка помещалась в ванну с разогретым до 80 °С трансформаторным маслом (4), которое нагревало хвостовик лопатки.

Распределение температуры по высоте лобовой кромки рабочей лопатки было неравномерным за счет охлаждения свободной конвекцией и излучением. Термограммы торцов световодов, находящихся в закрытом корпусе, и рабочей лопатки ГТУ, а также график температурного распределения по высоте лопатки представлены на рисунке 11.

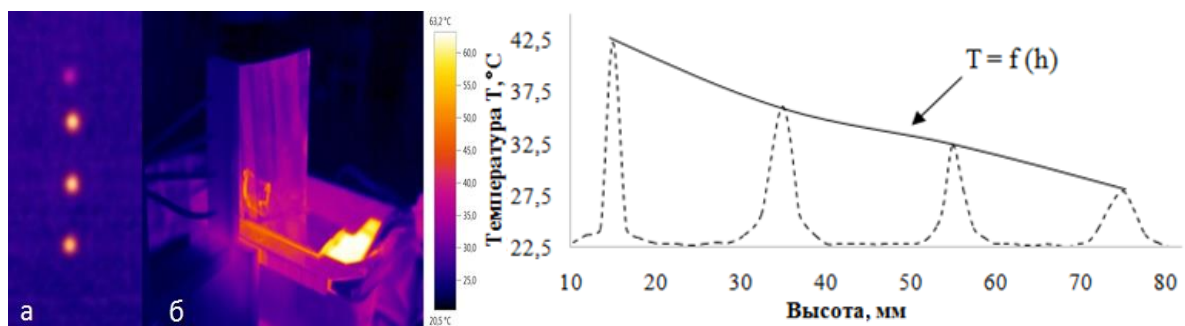


Рисунок 11 – Термограмма торцов световодов (а), рабочей лопатки ГТУ (б) и график распределения температуры по высоте лопатки. Температура масла в ванне 80 °С.

Результаты, полученные в ходе экспериментов, показывают принципиальную возможность создания оптоволоконной системы для вывода диагностической информации о тепловом состоянии движущихся деталей (лопаток) из проточной части турбины в ходе эксплуатации.

Перспективным направлением применения оптических волокон являются исследования в области управления процессами в газовых факелах в различных аппаратах сжигания. На сегодняшний день описано много оптических методов исследования пламен, однако, несмотря на все их преимущества, они позволяют проводить измерения лишь открытых газовых факелов на безопасном для измерительного оборудования

расстоянии. Поэтому особенно актуальной является разработка методик, позволяющих регистрировать параметры пламен, находящихся в труднодоступных местах – камерах сгорания. Учитывая, что пламя излучает в широком спектральном диапазоне, перспективным является совмещение в одном волоконном кабеле световодов, способных передавать излучение в различных диапазонах спектра.

В работе предложен вариант комбинированного кабеля, состоящего из кварцевых и инфракрасных световодов, а также проведено исследование возможности передачи излучения пламени газового факела в ультрафиолетовом диапазоне спектра через кварцевое оптическое волокно, и в инфракрасном – с помощью кристаллических световодов на основе галогенидов серебра.

Для исследования термических параметров пламени газового факела в ультрафиолетовом диапазоне спектра был выбран оптоволоконный кабель диаметром 250 мкм, состоящий из семи кварцевых волокон диаметром 10 мкм, собранных в пучок с возможностью регистрации по отдельным каналам. Один конец кабеля располагался вокруг объекта исследования, а другой – возле щели спектрографа Newport MS127i. В качестве объекта исследования было выбрано ламинарное предварительно смешанное пламя, полученное с помощью горелки с осесимметрично сужающимся соплом с профилем Витошинского и выходным диаметром 15 мм. Объемная скорость потока соответствовала числу ~ 1600 Re для ламинарного пламени Бунзена. В экспериментах сжигалась газовая смесь пропан-воздух с коэффициентом избытка топлива $\varphi = 1,26$.

Для выделения характеристических пиков OH^* и CH^* применялись спектральные фильтры VZ13-0817 (300 – 320 нм) и VZ13-0941 (422 – 455 нм) фирмы LaVision. Съемка газового факела производилась в условиях минимальной освещенности с изоляцией области горения черным тканевым экраном в ультрафиолетовом спектральном диапазоне 300 – 450 нм. Время сбора изображения для каждого кадра составляло 200 мс. Для уменьшения влияние ПЗС-помех было снято и усреднено по 200 кадров. Также для учета влияния шумового излучения окружающей среды были сняты фоновые характеристики, которые при последующей математической обработке вычитались из параметров пламени. Характерные спектры факела на высоте 22,5 мм приведены на рисунке 12.

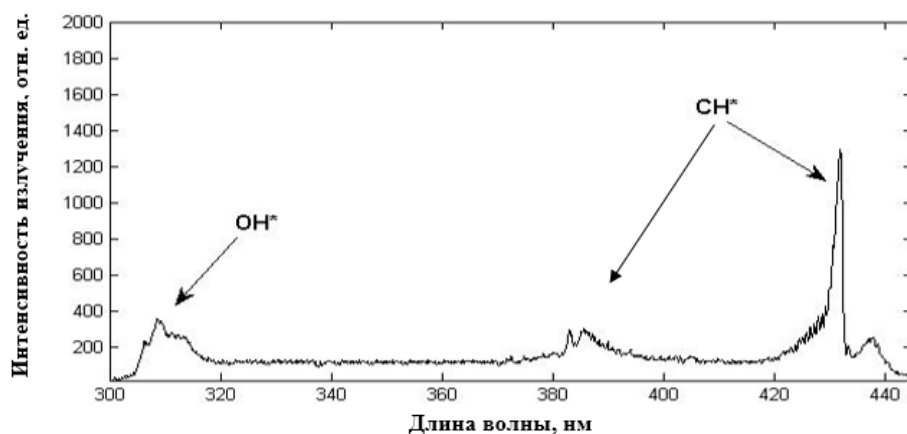


Рисунок 12 – Характеристический спектр газового факела.

Сравнение экспериментальных данных, полученных с помощью кварцевого кабеля, показало полное совпадение положения характеристических пиков OH^* и CN^* со стандартными. Параллельно было проведено измерение термических характеристик газового факела в инфракрасном диапазоне спектра с помощью кристаллического кабеля состава $\text{AgCl}_{0,25}\text{Vt}_{0,75}$. Обработка, полученных данных о температуре, производилась по формуле:

$$\psi = \frac{t - t_{\text{окр.ср.}}}{t_{\text{max}} - t_{\text{окр.ср.}}} \quad (2)$$

где ψ – температура в условных единицах, t – измеренная температура, °С, $t_{\text{окр.ср.}}$ – температура окружающей среды, °С, t_{max} – максимальная измеренная температура, °С.

На рисунке 13 представлена зависимость безразмерной температуры ψ от высоты факела пламени h , измеренной на оси факела термопарой (кривая 1) [по данным А. Я. Берлина] и методом термографии через кабель (кривая 2).

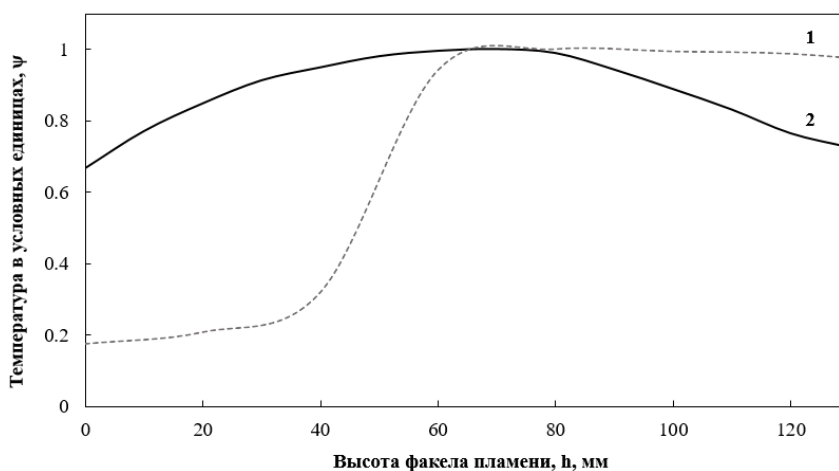


Рисунок 13 – Зависимость безразмерной (обобщенной) температуры ψ от высоты факела пламени h при различных способах измерения: 1 – на оси факела (по данным А. Я. Берлина), 2 – термографии через инфракрасный кабель.

Различия в форме кривых условной температуры пламени Бунзена по высоте факела, полученной на оси факела с помощью термопары и методом инфракрасной термографии через инфракрасный кабель, можно объяснить тем, что световод фиксирует среднеобъемную температуру в узком спектральном диапазоне. Также следует учитывать тот факт, что в световодах наблюдается поглощение тепловой энергии, которое напрямую зависит от длины волны. Вместе с тем, анализ полученных данных показывает, что инфракрасные световоды способны передавать температурный профиль пламени газовой горелки в своей части спектрального диапазона. В связи с этим предлагается совместить в одном волоконном кабеле кварцевые и инфракрасные световоды, что позволит значительно расширить не только перечень измеряемых параметров газовых факелов и других нагретых объектов, в том числе и находящихся в закрытых корпусах, но и значительно повысить достоверность получаемых данных. Рабочий диапазон длин волн в этом случае составит от 250 до 30000 нм.

Опыты по облучению кремниевых тиристорных структур через инфракрасные световоды позволили обнаружить эффект сверхглубокого проникновения излучения в тиристорную структуру. Известно, что подобные устройства являются важнейшими компонентами современной элементной базы преобразовательной техники и применяются в высоковольтных преобразовательных устройствах линий электропередач постоянного тока и других силовых агрегатах. В работе показано, что излучение импульсного СО-лазера на длине волны 5000 – 6000 нм, проходящее через световод, проникает в кремниевую тиристорную структуру на глубину до 10 раз превышающую глубину проникновения управляющего светового импульса лазерного диода (940 – 980 нм).

Инфракрасные кристаллические световоды находят широкое применение в медицинских технологиях. В частности, автором разработан и запатентован новый способ антисептической обработки пародонтального кармана с помощью специального устройства путем облучения очагов поражения оптическим излучением. Ключевое преимущество устройства заключается в использовании тонкого оптического волокна (диаметр до 0,4 мм), благодаря чему антисептическую обработку можно проводить в пародонтальных карманах любой глубины, не прибегая к хирургическому вмешательству. Проведенные клинические испытания, для случая ультрафиолетового излучения (выбор обусловлен медицинскими стандартами), показали высокую эффективность антисептической обработки. По данным независимой лабораторной экспертизы численность специфических микроорганизмов после процедуры значительно уменьшилась, некоторые виды бактерий вовсе не были выявлены. Во всех показателях индексной оценки наблюдалась положительная динамика. Таким образом, разработанное устройство и способ лечения обеспечивают, наряду с высокой эффективностью, простоту процедуры лечения. При этом исключается возможность побочных аллергических явлений от химических растворов.

В различных медицинских технологиях часто возникает задача измерения температуры внутри различных полостей человеческого тела. В частности, внутриполостное измерение температуры необходимо при оперативном лечении кисты Бейкера. Автором сконструирован волоконный пирометр, в котором в качестве канала для передачи информации о температуре нагрева используются инфракрасные световоды на основе твердых растворов галогенидов серебра. Проведен калибровочный опыт, в котором оценивалось отклонение измеренных с помощью пирометра температурных значений от действительных. Для этого в раствор Кляйна объемом 100 мл, помещенный в стерильную ёмкость, погружался один торец инфракрасного световода состава $\text{AgCl}_{0,5}\text{Br}_{0,5}$ на глубину 20 мм. На другой торец был сфокусирован тепловизор Testo 882, работающий в спектральном диапазоне 8,0 – 14,0 мкм и измеряющий температуру с точностью $\pm 0,1$ °С. Также в контрольный раствор для измерения действительного значения температуры помещалась ТХА термopара, предварительно калиброванная по точке кипения воды. Ёмкость закрывалась защитным экраном из фторопласта, оклеенного черным бархатом, исключающего попадание паразитного излучения и испаренной влаги на линзу

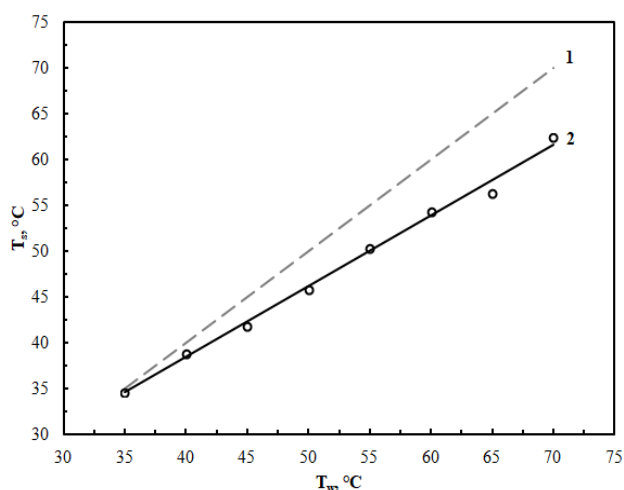


Рисунок 14 – Фиксируемая разными способами температура T_s при различной температуре раствора T_w : 1 – термопарой; 2 – световодом.

объектов. А учитывая безопасность материала световодов для человека и возможность его стерилизации применяемыми в медицине способами, можно сделать вывод о применимости предлагаемого волоконного пирометра для контроля температуры при лазерной облитерации кист Бейкера.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы:

1. Разработана технология производства световодов малого диаметра (до 2 мм) составов AgBr – ТП и AgCl – AgBr для инфракрасного диапазона длин волн от 2,5 до 25,0 мкм. Для этого были подобраны условия и методом ТЗКС проведен синтез исходной шихты, из которой выращены монокристаллы твердых растворов систем AgCl – AgBr, AgBr – ТП. Полученные кристаллы обладают высоким пропусканием (до 80%) без окон поглощения в широком спектральном диапазоне от 0,4 до 40,0 мкм и имеют значения показателя преломления от $2,094 \pm 0,003$ до $2,272 \pm 0,009$ на длине волны 632,8 нм в зависимости от состава. Методом экструзии из полученных кристаллов изготовлены поликристаллические однослойные инфракрасные световоды.

2. Продемонстрировано, что с применением инфракрасных световодов можно проводить измерения температур и передавать тепловизионные изображения поверхностей различных удаленных объектов с использованием метода инфракрасной термографии. Установлено влияние конфигурации световодов, изготовленных на основе твердых растворов галогенидов серебра на передачу теплового излучения. Выявленные закономерности являются практически значимыми и могут быть использованы при проектировании оптоволоконных систем, предназначенных для дистанционного измерения температуры труднодоступных объектов или передачи лучистой энергии по световодам.

3. Разработана методика, сконструирована и отлажена экспериментальная оптико-электронная система для исследования импульсного режима (частота от 20 до 170 Гц)

тепловизора. После этого раствор медленно нагревался до 70 °С. Измерения температуры световодом и термопарой производились в диапазоне от 35 (температура человеческого тела) до 70 °С с шагом 5 °С. Усредненные данные по пяти калибровочным опытам представлены на рисунке 14.

На рисунке 14 видно, что световод имеет практически линейное отклонение измеренных значений температуры (линия 2) от действительных (линия 1). Таким образом, при учете процента потерь в конкретном измеряемом диапазоне можно корректно оценивать температуру нагрева

передачи теплового излучения по инфракрасным световодам в среднем диапазоне длин волн 7,0 – 9,0 мкм, что соответствует температурам от 280 до 400 К. Выявлены зависимости $U_{\text{вых}}$ от расстояния между приемником и источником инфракрасного излучения и соотношения площадей излучающей площадки и лопастей модулятора. Показано, что импульсный режим работы канала с КРТ-детектором более эффективен, чем непрерывный.

4. Установлена зависимость характеристик теплового излучения, передаваемого в импульсном режиме с помощью инфракрасных световодов различного химического состава. Показано, что разница в значениях выходного напряжения в 15 % для световодов составов $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ и $\text{Ag}_{0,95}\text{Tl}_{0,05}\text{Br}_{0,95}\text{I}_{0,05}$ в диапазоне длин волн от 7,0 до 9,0 мкм связана со спектральными характеристиками оптического волокна.

5. Разработана методика и её аппаратное оформление для определения коэффициента теплопереноса в готовых изделиях – инфракрасных световодах. Для реализации этого метода сконструирована, изготовлена и отлажена лабораторная установка. Впервые определены эффективные теплофизические свойства новых инфракрасных поликристаллических световодов составов $\text{AgCl} - \text{AgBr}$ и $\text{AgBr} - \text{TlI}$ – тепло- и температуропроводность и теплоемкость. Эти данные необходимы для проведения теплотехнических расчетов при проектировании каналов передачи тепловой энергии, применяемых в пирометрии, спектроскопии и энергетике.

6. Разработан ряд предложений по применению световодов в различных научно-технических областях.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК

1. **Шмыгалев, А. С.** Пропускание ИК-излучения световодами из твердых растворов галогенидов серебра / А. С. Шмыгалев, Б. П. Жилкин ... В. И. Терехов // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т.42, №17. – С. 1 – 8.
2. Корсаков, А. С. Термодинамические функции процессов растворения галогенидов одновалентного таллия и серебра в воде и галогенводородных кислотах / А. С. Корсаков, Л. В. Жукова, **А. С. Шмыгалев** и др. // Бутлеровские сообщения. – 2014. – Т. 37, № 3. – С. 27 – 36.
3. Салимгареев, Д. Д. Исследование оптических и механических свойств кристаллов $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$, $\text{Ag}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Br}_{1-x}\text{I}_x$, $\text{Ag}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Cl}_y\text{I}_z\text{Br}_{1-y-z}$ и ИК световодов на их основе / Д. Д. Салимгареев, **А. С. Шмыгалев**, Л. В. Жукова // Бутлеровские сообщения. – 2014. – № 9. – С. 56 – 58.
4. **Shmygalev, A. S.** IR-probes for Fourier spectrometry [Электронный ресурс] / A. S. Shmygalev, A. S. Korsakov, L. V. Zhukova // Advanced Photonics Congress, Optical Sensors Conference, OSA. – 2014. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1364/BGPP.2014.JTu3A.65>.
5. **Shmygalev, A. S.** New class of crystal inorganic scintillators [Электронный ресурс] / A. S. Shmygalev, L. V. Zhukova, A. S. Korsakov, B. V. Shulgin // Advanced Photonics Congress,

Optical Sensors Conference, OSA Technical Digest (online), Mid- and long-wavelength IR Sensors. – 2014. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2014.SeTh1C.5>

6. Акифьева, Н. Н. Возможность применения инфракрасных световодов для измерения температуры в труднодоступных зонах энергооборудования / Н. Н. Акифьева, Л. В. Жукова, **А. С. Шмыгалев** и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 89 – 93.

7. Саркисян, Н. Г. Ультрафиолетовое облучение при лечении воспалительных заболеваний пародонта / Н. Г. Саркисян, Г. И. Ронь, **А. С. Шмыгалев** и др. // Пародонтология. – 2016. – Т. 21, № 4. – С. 70 – 72.

Патенты Российской Федерации

8. Патент 161219 РФ. Оптоэлектронный волоконный тиристор, управляемый инфракрасным излучением / **А. С. Шмыгалев**, С. В. Фатьянов, А. С. Корсаков и др. Заявлен 27.07.2015; опубликован 10.04.2016. Бюл. № 10.

9. Патент 2612840 РФ. Способ лечения пародонтита / Н. Г. Саркисян, Б. П. Жилкин, **А. С. Шмыгалев** и др. Заявлен 05.11.2015; опубликован 13.03.2017. Бюл. № 8.

10. Патент 172206 РФ. Устройство для антибактериальной обработки участков полости рта при лечении заболеваний пародонта и периодонта / **А. С. Шмыгалев**, Н. Г. Саркисян, Б. П. Жилкин, В. Н. Фасхиев. Заявлен 30.06.2016; опубликован 30.06.2017. Бюл. № 19.

Материалы международных и всероссийских конференций

11. **Шмыгалев, А. С.** Исследование функциональных свойств фотонных ИК-световодов на основе дефектных кристаллов / А. С. Шмыгалев, Л. В. Жукова, А. С. Корсаков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 11. – С. 70 – 72.

12. Корсаков, А. С. Исследование пространственного распределения мод, вытекающих из ИК-световодов / А. С. Корсаков, Л. В. Жукова, **А. С. Шмыгалев** и др. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 11. – С. 136 – 138.

13. **Шмыгалев, А. С.** Волоконно-оптические системы для онлайн контроля промышленных процессов / А. С. Шмыгалев, Л. В. Жукова, А. С. Корсаков и др. // Труды 22 международной научной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте». – 2014. – С. 13 – 14.

14. Львов, А. Е. Одномодовые кристаллические ИК-световоды и их потенциал для создания волоконных лазеров / А. Е. Львов, А. С. Корсаков, **А. С. Шмыгалев** и др. // Труды 22 международной научной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте». – 2014. – С. 15 – 16.

15. **Шмыгалев, А. С.** Оптоволоконные зонды для ИК- Фурье спектроскопии / А. С. Шмыгалев, Л. В. Жукова, А. С. Корсаков // Материалы 17-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники». – 2014 – С. 52 – 54.

16. Кашуба, А. И. Спектральное пропускание нанокристаллических ИК- световодов / А. И. Кашуба, **А. С. Шмыгалев**, Л. В. Жукова и др. // Актуальные проблемы физической и

функциональной электроники: материалы 17-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – 2014. – С. 54 – 56.

17. Корсаков, В. С. Инфракрасные зонды для Фурье-спектрометрии / В. С. Корсаков, А. С. Корсаков, **А. С. Шмыгалев** и др. // Проблемы спектроскопии и спектрометрии. – 2015. – С. 130 – 134.

18. **Шмыгалев, А. С.** Новый класс кристаллических волоконных неорганических сцинтилляторов / А. С. Шмыгалев, А. С. Корсаков, Л. В. Жукова, Б. В. Шульгин // Проблемы спектроскопии и спектрометрии. – 2015. – Вып. 34. – С. 135 – 138.

19. Кашуба, А. И. Спектральное пропускание нанокристаллических ИК- световодов / А. И. Кашуба, **А. С. Шмыгалев**, Л. В. Жукова и др. // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 17-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – 2014. – С. 54 – 56.

20. **Шмыгалев, А. С.** Способ передачи энергии в форме теплоты с помощью кристаллических инфракрасных световодов / А. С. Шмыгалев, Б. П. Жилкин, Л. В. Жукова, С. В. Фатьянов // Тезисы докладов XX школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках». – 2015. – С. 123 – 124.

21. **Шмыгалев, А. С.** ИК световоды нано- и микрокристаллической структуры для обнуляющей интерферометрии / А. С. Шмыгалев, Д. Д. Салимгареев, А. Е. Львов и др. // Ежегодная конференция Нанотехнологического общества России. – 2014. – С. 39 – 40.

22. **Шмыгалев, А. С.** Волоконно-оптический пирометр / А. С. Шмыгалев, С. В. Фатьянов // Труды XXIII Международной научной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте». – 2015. – С. 30 – 32.

23. **Шмыгалев, А. С.** Исследование и применение возможности передачи тепловой энергии кристаллическими световодами (2-40 мкм) / А. С. Шмыгалев, С. В. Фатьянов // Фотон-экспресс. – 2015. – С. 109 – 110.

24. **Шмыгалев, А. С.** Передача теплового излучения с помощью инфракрасных световодов: влияние изгиба оптического волокна / А. С. Шмыгалев, Б. П. Жилкин, Л. В. Жукова // Материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭНЕРГИЯ-2016». – 2016. – С. 120 – 122.

25. **Шмыгалев, А. С.** Разработка волоконно-оптического кабеля термографического контроля сложных систем / А. С. Шмыгалев, В. Н. Фасхиев // Труды XXIV международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – 2016. – С. 264 – 267.

26. Лашова, А. А. Инфракрасный волоконно-оптический датчик для исследования состава и температуры технических жидкостей и газов / А. А. Лашова, **А. С. Шмыгалев**, В. Н. Фасхиев // Фотон-экспресс. – 2017. – С. 181 – 182.

Подписано в печать 08.10.2018 г. Бумага писчая. Усл. печ. л. 1,0.
Уч.-изд. л. 1,0. Ризография. Тираж 100 экз. Заказ № 53
Ризография НИЧ УрФУ 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19