

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Омский государственный технический университет»

на правах рукописи



Пономарев Дмитрий Борисович

**Специализированные пирометрические средства теплового контроля  
и их метрологическое обеспечение**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
доцент Захаренко Владимир Андреевич

Омск – 2018

### Перечень использованных сокращений

- АБС – асфальтобетонная смесь
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
- АЧТ – абсолютно черное тело
- ИК – инфракрасный диапазон электромагнитных излучений
- ИФИ – источник фонового излучения
- МПК – модель пирометрического калибратора
- ОК – объект контроля
- ПИ – приемник излучения
- ПП – пирометрический преобразователь
- ПСО – пирометр спектрального отношения
- ПУЭ- правила устройства электроустановок
- ПЧТ – протяженное черное тело
- САР – Система автоматического регулирования
- ТК – тепловой контроль
- ТП – тепловизионные приборы
- ФД – фотодиод
- ФДП – Фотодиодный приемник
- ЭКС – электрическое контактное соединение

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ ПИРОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	16
1.1. Контроль низкотемпературных технологических процессов.....	17
1.1.1. Контроль температуры электрических контактных соединений.....	17
1.1.2. Контроль тепловых режимов в узлах трения в задачах триботехники.....	20
1.1.3. Обоснование целесообразности применения пирометров в производстве сыпучих материалов, асфальта и устройстве дорожных покрытий.....	22
1.1.4. Пирометрия в задачах энергоаудита.....	27
1.1.5. Обзор рынка низкотемпературных пирометров.....	29
1.2. Контроль высокотемпературных технологических процессов.....	34
1.2.1. Применение пирометров в производстве технического углерода	34
1.2.2. Пирометрический контроль в производстве цемента.....	38
1.2.3. Обзор рынка высокотемпературных пирометров.....	40
1.3. Методы и средства метрологического обеспечения.....	45
1.3.1. Современное состояние обеспечения единства измерений в пирометрии.....	45
1.3.2. Обзор технических средств метрологического обеспечения.....	54
Выводы по главе 1 .....	58

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПИРОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ.....	59
2.1. Разработка и исследование низкотемпературных пирометрических приборов.....	59
2.1.1. Методика энергетического расчета пирометра.....	59
2.1.2. Методика обоснования выбора оптической системы пирометра.....	63
2.1.3. Расчетная методика учета влияния коэффициента излучения и температуры окружающей среды.....	70
2.1.4. Разработка низкотемпературного пирометра и его программного обеспечения.....	74
2.1.5. Исследования опытного образца разработанного низкотемпературного пирометра.....	82
2.2. Разработка и исследование высокотемпературных пирометров на основе фотодиодов.....	89
2.2.1. Анализ технических решений при проектировании высокотемпературных пирометров на основе фотодиодов.....	89
2.2.2. Теоретические обоснования создания двухспектрального пирометра нового типа на основе одного фотодиода.....	93
2.2.3. Разработка нового типа пирометра спектрального отношения на одном фотодиоде.....	97
2.2.4. Экспериментальные исследования пирометра спектрального отношения на одном фотодиоде.....	99
2.2.5. Расчётные исследования погрешностей для предложенного пирометра спектрального отношения.....	102
Выводы по главе 2.....	107

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДСТВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....	109
3.1. Обоснование необходимости разработки калибраторов для метрологического обеспечения в пирометрии .....	109
3.1.1. Разработка функциональной схемы модели пирометрического калибратора.....	110
3.1.2. Исследование влияния изменения коэффициента излучения на результат пирометрических измерений.....	114
3.1.3. Исследование влияния фонового излучения на результат пирометрических измерений.....	119
3.2. Разработка, исследование и применение калибраторов.....	123
3.2.1. Разработка калибратора на основе конструкции термопары.....	123
3.2.2. Результаты экспериментальных исследований эффективности применения калибратора.....	128
3.2.3. Применение калибратора в специализированном пирометре компенсационного типа.....	132
3.3. Разработка и исследование протяженного излучателя .....	136
Выводы по главе 3.....	144
ГЛАВА 4. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДИК ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ .....	145
4.1. Внедрение устройства и методики измерения температуры трения в трибоисследованиях.....	145
4.2. Специализированные пирометры в производстве асфальта .....	151
4.3. Пирометр для контроля технологического процесса в производстве техуглерода.....	152
4.4. Бесконтактный тепловой контроль электрических контактных соединений.....	157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	159

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	175
Приложение А.	
Приложение Б.	
Приложение В.	
Приложение Г.	

## ВВЕДЕНИЕ

В задачах теплового неразрушающего контроля особый практический интерес представляют методы и средства бесконтактных измерений температуры, адаптированные для использования в различных производственных процессах и обеспечивающие достоверность результатов теплового контроля.

Например, в задачах низкотемпературного теплового контроля (ТК) металлических поверхностей, в частности при ТК качества электрических контактных соединений (ЭКС), стоит проблема учета коэффициента излучения в реальных условиях при изменении температуры среды и переизлучений, соизмеримых с температурой объекта контроля (ОК). В настоящее время для решения этой задачи используются тепловизоры в основном иностранного производства, имеющие более высокую стоимость в сравнении с переносными пирометрами. Разработка для этих целей специализированного пирометра позволит снизить затраты на оперативный контроль качества ЭКС.

При измерениях температуры трения в триботехнических исследованиях также основной проблемой снижения погрешностей измерений является учет коэффициентов излучения в условиях проведения экспериментов. Вопросы подбора коэффициентов излучения и введения поправок на отраженную температуру рассматривались в трудах В.П. Вавилова, Е.В. Абрамовой, однако применение предложенных алгоритмов в реальных условиях затруднительно из-за сложностей учёта геометрических параметров при ТК.

При применении пирометрических средств в производственных условиях требуются инструментальные рабочие средства для элиминирования неопределенностей, связанных с неизвестными значениями коэффициентов излучения. По этим причинам обеспечение необходимой точности ТК на уровне инструментальной погрешности, заявленной

производителями пирометров, затруднено. В связи с этим представляются перспективными и необходимыми разработки методик и калибраторов, снижающих погрешности вызванные неопределённостями значений коэффициентов черноты. Следует отметить, что проблема коэффициента излучения существует при любом пирометрическом контроле и даже её частичное решение актуально для снижения погрешностей при бесконтактном ТК.

В производствах асфальтобетонных смесей, при их отгрузке из-за изменений уровней поверхностей смесей, задачи теплового контроля требуют применения пирометров, показания которых бы не зависели от расстояния до контролируемых поверхностей и загрязнений оптических узлов, что требует разработки пирометров, специализированных под эту задачу, т. к. измерение температур отгружаемого сырья в настоящее время производят контактными термометрами.

В задаче высокотемпературного теплового контроля в технологическом процессе пиролиза технического углерода измерения производятся через смотровые окна реакторов, на которые оседают частицы продуктов горения. В настоящее время температура в реакторах контролируется с помощью пирометрических преобразователей суммарного излучения типа ТЕРА. Производство приборов ТЕРА осталось за границей (Украина). Для ТК в этой задаче целесообразно применение пирометров спектрального отношения (ПСО). Использование ПСО известных моделей (в основном зарубежных производителей), удовлетворяющих требованиям эксплуатации, затруднено или невозможно в связи с трудностями учёта спектральной прозрачности смотрового стекла, высокой стоимостью пирометров и их низкой эксплуатационной надёжностью, обусловленными значительной сложностью моделей ПСО, представленных на рынке.

Таким образом, разработка специализированных, адаптированных под конкретные технологические процессы пирометрических средств теплового контроля и средств их метрологического обеспечения, решающих проблемы



уменьшения неопределённостей при ТК и импортозамещения, является актуальной задачей.

### **Степень разработанности проблемы.**

Существенный вклад в решении проблем, связанных с разработкой отечественных пирометрических средств теплового контроля и их метрологического обеспечения, сделан в работах А.И. Гордова, Д.Я. Света, В.П. Вавилова, О.Н. Будадина, А.Е. Шейндлина, А.А. Поскачей, Е.П. Чубарова, А.И. Походуна, И.Я. Орлова, В.И. Курта, В.М. Тымкул, В.Я. Черепанова, Е.В. Абрамовой, А.Н. Магунова, В.А. Захаренко, А.В. Фрунзе, и других. Однако широкий круг задач, связанный с адаптацией средств пирометрического контроля под индивидуальные условия их применения и необходимостью создания специализированных пирометров для конкретных условий их эксплуатации требует как создания пирометров с улучшенными техническими параметрами, так и средств их метрологического обеспечения.

**Основная идея работы** состоит в создании специализированных пирометров и пирометров нового типа, разработке методических рекомендаций по особенностям их применения и метрологическому обеспечению, позволяющих уменьшить погрешности при бесконтактном тепловом контроле.

**Цель диссертационной работы** - разработка и исследования специализированных устройств бесконтактного контроля температуры для ряда технологических процессов, средств и методик их метрологического обеспечения.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Проведёние анализа специфики теплового контроля для ряда технологических процессов и характеристик современных средств теплового контроля. Определение технических требований к специализированным пирометрам.

2. Разработка конструкций и схмотехнических решений создания специализированных пирометров, учитывающих при ТК влияние температуры среды и изменения коэффициентов черноты.

3. Проведение расчётно-экспериментальных исследований погрешностей пирометрического контроля в реальных условиях.

4. Обоснование требований к метрологическому обеспечению разрабатываемых приборов и разработка методов и средств их метрологического обеспечения.

**Область исследования** – методы и средства бесконтактного теплового контроля и средства их метрологического обеспечения.

#### **Методы исследования.**

Для решения поставленных задач в работе проводились расчетные и экспериментальные исследования с применением математического моделирования и моделей абсолютно чёрного тела. В исследованиях применялись классические законы распространения тепловых излучений, теории теплопередачи, метод конечных элементов, статистической обработки экспериментальных данных с применением ПК и стандартных пакетов программ.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые обоснован способ реализации пирометра спектрального отношения на одном фотодиоде, исключающий применение оптических фильтров или нескольких фотоприёмников, что существенно упрощает конструктивное исполнение ПСО и уменьшает методические погрешности при ТК.

2. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые технические средства повышения достоверности теплового контроля:

- обосновано применение пирометрических калибраторов как рабочих средств метрологического обеспечения, позволяющих уменьшить

погрешность измерений в реальных условиях. Экспериментально доказано, что при этом методическая погрешность уменьшается на 3% и более.

- впервые обоснована возможность создания пирометра компенсационного типа со встроенным калибратором, в котором компенсируются температурные изменения коэффициентов излучения поверхностей, что в разы уменьшает погрешности при бесконтактном ТК.

### **Практическая значимость работы и внедрение:**

1. Стационарный пирометр спектрального отношения внедрен в опытную эксплуатацию на ООО «ОмскТехуглерод». Пирометр адаптирован для измерений через защитное стекло и уменьшает погрешности, связанные с его загрязнением. Разработанное техническое решение защищено патентом РФ №2485458 «Пирометр спектрального отношения» от 20.06.2013 г.

2. Методика проектирования низкотемпературных пирометров использована для разработки средств теплового контроля. На её основе созданы переносные специализированные приборы, внедренные в ООО «Лаборатория-131», ООО «НТК «Интекс», ООО «НПЦ Термаль».

3. Пирометрический калибратор, модель протяжённого излучателя и пирометра компенсационного типа со встроенным калибратором внедрены в ООО «НПЦ Термаль» и учебный процесс в ОмГТУ при обучении студентов по направлениям 11.03.04 и 11.04.04 – «Электроника и наноэлектроника».

4. Методика и технические решения измерения температуры поверхности трения, учитывающие эффективный коэффициент излучения, внедрены в лабораторной установке кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технологии» ОмГТУ и позволили получить новые знания в области триботехники, опубликованные в печати.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Представленная диссертация удовлетворяет п.2, п.3 и п.5 паспорта специальности 05.11.13.

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

1. Способ реализации пирометра спектрального отношения на одном

фотодиоде, использующий эффект смещения спектрального максимума чувствительности от обратного напряжения, результаты расчетно-теоретических обоснований принципа его работы.

2. Результаты расчетов погрешностей пирометра спектрального отношения нового типа.

3. Технические решения и алгоритмы работы разработанных пирометров и калибраторов.

4. Разработанные методы и средства уменьшения методических погрешностей, связанных с неопределенностями коэффициентов излучений поверхностей объектов контроля.

5. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие работоспособность и преимущества разработанных средств теплового контроля.

**Достоверность полученных в работе результатов** подтверждена соответствием результатов имитационного математического моделирования и экспериментальных данных, отсутствием противоречий между полученными результатами и выводами исследований, описанными в научной литературе. Все экспериментальные данные были получены на сертифицированной и метрологически аттестованной аппаратуре.

### **Апробация работы**

Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: региональной научно-технической конференции «Омское время – взгляд в будущее» (Омск, 2010); Ежегодных Российских семинарах «Практическое применение контактных и пирометрических средств температурных измерений и средств их метрологического обеспечения» (Омск, 2010-2017); всероссийской научно-технической конференции «Наука и молодежь в XXI веке» (Омск, 2017); всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2006); всероссийских научно-технических конференциях «Россия молодая: передовые технологии в промышленность» (Омск, 2008,

2009, 2013, 2015); всероссийской научной конференции «Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли» (Омск, 2006); всероссийских научно-технических конференциях «Стандартизация, метрология и управление качеством» (Омск, 2015, 2017); всероссийской конференции по проблемам термометрии «Температура 2011» (Подольск, 2011); всероссийской и стран участниц КОOMET конференции по проблемам термометрии «Температура 2015» (С-Петербург, 2015); всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (Екатеринбург, 2015); международных научно-технических конференциях «Измерение, контроль, автоматизация» (Барнаул, 2006, 2011, 2012, 2014); международной научно-технической конференции «Наука, Техника, Инновации 2014» (Брянск, 2014); международных научно-технических конференциях «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2007, 2009, 2014, 2016).

Работа получила поддержку Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта по теме «Разработка новых пирометрических средств для задач энергосбережения» (договор №011-010/2 от 25.05.2010).

### **Публикации**

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 30 печатных работах, из них 4 статьи опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 3 в журналах, входящих в базу Scopus, 1 патент РФ на изобретение.

### **Личный вклад автора**

Все основные теоретические результаты и положения, выносимые на защиту, выполнены лично автором. Автором выполнены экспериментальные исследования, разработаны и реализованы схмотехнические решения, алгоритмическое и программно-техническое обеспечение для разработанных пирометров и пирометрических калибраторов. Постановка целей и задач

исследования, планирование экспериментов осуществлялось совместно с научным руководителем.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Диссертация изложена на 174 листах основного текста, содержит 88 рисунков, 8 таблиц и 4 приложения.

**Во введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость результатов, представлены структура диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ и обоснование целесообразности создания средств пирометрического контроля для задач теплового контроля в промышленности. Рассмотрены задачи низкотемпературного и высокотемпературного пирометрического контроля и проведен обзор пирометров, представленных на отечественном рынке. Проведен анализ современного состояния обеспечения единства измерений в пирометрии и обзор технических средств метрологического обеспечения.

**Во второй главе** представлены созданные расчетные методики разработки специализированного низкотемпературного пирометра: проведения энергетического расчета, обоснования и расчета оптической системы, учета влияния коэффициента излучения и температуры окружающей среды. Приведен пример энергетического расчета пирометра на базе термоэлектрического ПИ, расчета двухзеркальной оптической системы, разработана схема электрическая принципиальная и алгоритм работы пирометра.

Также во второй главе представлено обоснование для нового типа двухспектрального пирометра на основе одного фотодиода и разработка высокотемпературного пирометра спектрального отношения. Проведено расчетное исследование погрешностей пирометра спектрального отношения.

Для обоих типов пирометров представлены результаты экспериментальных лабораторных исследований.

**Третья глава** посвящена разработке, исследованию и применению пирометрических калибраторов. Произведено обоснование необходимости разработки калибраторов для метрологического обеспечения и оценка влияния фонового излучения на результат пирометрических измерений. На основании проведенных исследований разработаны рабочие средства метрологического обеспечения: модель пирометрического калибратора, модель протяженного излучателя. Произведена экспериментальная оценка их характеристик. Описан опытный образец компенсационного пирометра со встроенным калибратором и представлены данные его экспериментальных исследований.

**В четвёртой главе** приведены результаты экспериментальных исследований характеристик разработанных устройств ИК-контроля, а так же рассмотрены различные варианты их применения для контроля температур в различных технологических процессах.

В приложении к диссертации приведены математические расчеты, электрические принципиальные схемы и внешний вид разработанных устройств, акты их внедрения на различных промышленных предприятиях.

# 1. АНАЛИЗ И ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ ПИРОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рост промышленного производства в современном мире сопровождается также увеличением количества технологических процессов в основе которых лежат теплотехнические преобразования, соответствующие различным требованиям к температурным режимам сырья, материалов и работы оборудования. При этом в зависимости от диапазонов температур, характерных для разных технологических процессов, можно выделить низко- и высокотемпературные диапазоны:  $-30...500$  °С и  $500...3000$  °С, соответственно. Качество выпускаемой продукции, энергоэффективность производства и его безопасность во многом определяются корректностью применения методов и средств измерения температуры. На сегодняшний день существует большое количество методов и средств измерения температуры [7,22,23,58,94,100,101,63,11], отличающихся по стоимости, эксплуатационным характеристикам, методам контроля и точности измерений. Особое место при этом занимают пирометрические методы и средства. К достоинствам средств теплового пирометрического контроля следует отметить бесконтактность, высокое быстродействие и разрешение, возможность определения локальных температур на поверхности объекта контроля. При этом реальная точность теплового пирометрического контроля на производстве в каждом конкретном случае определяется особенностями взаимодействия средства измерения с объектом контроля. Это обусловлено законами генерации и регистрации теплового электромагнитного излучения: законами Планка, Стефана-Больцмана, Кирхгофа, Ламберта и др. При определении требований к средствам пирометрического контроля необходимо учитывать параметры оптической системы прибора, диапазон спектральной чувствительности, быстродействие приемника теплового



излучения, параметры промежуточной среды и фактуры излучающей поверхности объекта контроля (ОК). Преимущества средств бесконтактного теплового контроля позволяют широко их использовать практически во всех отраслях промышленности для оперативного контроля параметров технологических процессов, теплового мониторинга. Бесконтактный тепловой контроль необходим для слежения за обжигом сырья во вращающихся печах нефтеперерабатывающей промышленности и производстве технического углерода, в производстве строительных материалов, решения задач энергоаудита и энергосбережения, обеспечения безаварийной эксплуатации электротехнического и теплотехнического оборудования и т.д. [7,71].

В настоящем разделе приведен обзор технологических процессов, для которых целесообразно применение пирометрических методов и средств, адаптированных под эти и другие технологические процессы, в рамках работ, в которых автор принимал участие по разработке и внедрению опытных образцов пирометров.

## **1.1. Контроль низкотемпературных технологических процессов**

### **1.1.1. Контроль температуры электрических контактных соединений**

Большое практическое значение для обеспечения надежности работы систем энергоснабжения имеет тепловой контроль качества электрических контактных соединений (ЭКС). От качества ЭКС напрямую зависит как надёжность электроснабжения в целом, так и безаварийность эксплуатации энергетического оборудования. При эксплуатации устройств, с высоким напряжением, одним из основных способов обеспечения безопасности эксплуатации оборудования и обслуживающего персонала, является защита расстоянием. И здесь основным преимуществом является бесконтактность пирометрического контроля. В таблице 1, на основе анализа требований

ПУЭ, приведены значения безопасных расстояний для персонала до токоведущих частей, в зависимости от величины электрического напряжения [95].

Таблица 1.1 – Безопасные расстояния для персонала

Напряжение, кВ	1-35	60	150	220	330	400	750	1150
расстояние, м	0.6	1	1.5	2	2.5	3.5	5	8

Эти расстояния положены в основу технических требований для специализированных пирометров теплового контроля качества ЭКС.

Одним из основных параметров, характеризующих качество ЭКС, является переходное сопротивление контакта, создающее электрическое сопротивление зоны перехода тока из одних токоведущих частей в другие.

В работе [36] приведена математическая модель ТК ЭКС, результатом которой является уравнение, описывающее связь между температурой перегрева (избыточной) и переходным сопротивлением нагруженного ЭКС, как:

$$\Delta T = \frac{d}{\alpha_{ЭКВ} V} I^2 R_{II} \quad (1.1)$$

где  $I$  – ток через контакт,  $d$  – толщина контакта,  $V$  – объём ЭКС,  $m^3$ , а  $\alpha_{ЭКВ}$  находится методом последовательных приближений [76].

Оценка теплового состояния электрооборудования и токоведущих частей в зависимости от условий их работы и конструкций может осуществляться: по нормированным температурам нагрева (превышениям температуры), избыточной температуре, коэффициенту дефектности, динамике изменения температуры во времени, с изменением нагрузки, путем сравнения измеренных значений температуры в пределах фазы и между фазами со значениями температуры на заведомо исправных участках [5].

В настоящее время для контактов и болтовых ЭКС при токах нагрузки (0,3 — 0,6)  $I_{НОМ}$  оценка их состояния проводится по избыточной температуре.

В качестве норматива используется значение температуры, пересчитанное на  $0,5I_{\text{НОМ}}$ .

Для пересчета используется соотношение

$$\frac{\Delta T_{0,5}}{\Delta T_{\text{раб}}} = \left[ \frac{0,5I_{\text{НОМ}}}{I_{\text{раб}}} \right]^2 \quad (1.2)$$

где  $\Delta T_{0,5}$  — избыточная температура при токе нагрузки  $0,5I_{\text{НОМ}}$ .

При оценке состояния контактов и болтовых ЭКС по избыточной температуре при токе нагрузки  $0,5I_{\text{НОМ}}$  различают следующие области по степени неисправности [5,99]:

- избыточная температура  $\Delta T$  5—10 °С. Начальная степень неисправности, которую следует держать под контролем и принимать меры по ее устранению во время проведения ремонта, запланированного по графику;
- избыточная температура  $\Delta T$  10—30 °С. Развившийся дефект. Следует принять меры по устранению неисправности при ближайшем выводе электрооборудования из работы;
- избыточная температура  $\Delta T$  более 30 °С. Аварийный дефект. Требуется немедленного устранения.

Согласно исследованиям зарубежных авторов [134] аварийным дефектом считается избыточная температура контакта  $\Delta T$  более 40 °С или перегрев более 15 °С относительно аналогичного исправного контакта при той же нагрузке.

Оценку состояния сварных и выполненных обжатием ЭКС рекомендуется производить по избыточной температуре или коэффициенту дефектности.

Специфическим требованием для пиromетрического контроля температуры ЭКС под электрическим напряжением является такое требование к показателю визирования, который бы обеспечивал поле зрения пиromетра не более минимального размера ЭКС, с расстояний в соответствии

с таблицей 1. В противном случае результаты измерения будут занижаться. При этом диапазон измеряемых температур должен лежать в области  $T_{\max} + \Delta T$ .

Исходя из анализа конструкций ЭКС можно сформировать требования к минимальному диаметру ЭКС в 50 мм. Тогда показатель визирования пирометра, определяемый как отношение диаметра зоны контроля  $D$  к расстоянию  $L$  до ОК [7], не должен превышать 1:160 для 1150 кВ.

### **1.1.2. Контроль тепловых режимов в узлах трения в задачах триботехники**

К задачам низкотемпературного теплового контроля относится контроль температуры поверхности трения в трибологии. Срок службы узлов трения напрямую зависит [54] от типа применяемой смазки, от рабочей температуры, от скорости и от нагрузки. Актуальной проблемой в триботехнике является задача определения максимального значения рабочей температуры, воздействующей на материал при работе трибоузла.

Анализ существующих конструкций полимерных подшипников скольжения проведенный в работе [97] показал, что наибольшее распространение получил узел трения, в котором полимерная втулка запрессована в металлическую деталь или промежуточную обойму. Такая конструкция узла проверена в производственных условиях, удобна при монтаже, эксплуатации и ремонте. Однако вопросы обеспечения требуемого теплового режима металлополимерных подшипников скольжения проработаны недостаточно, что делает актуальной задачу исследования оценки тепловых потерь в таких узлах трения и создания конструкций, реализующих эффективную систему охлаждения несмазываемых металлополимерных радиальных подшипников скольжения.

В [121] было предложено определить максимальную температуру фрикционного контакта как сумму средней объемной температуры, а также

средней поверхностной температуры и температуры вспышки, рассматриваемых как приращение к объемной температуре. Наибольший интерес представляет температура вспышки, приводящая к термодеструкции смазочного материала или поверхности полимера безсмазочного подшипника, что снижает срок службы узлов трения. Известно, что контакт твердых тел происходит по пятнам контакта множества микронеровностей, совокупная площадь которых образует фактическую площадь контакта. Продолжительность существования контактов (вспышек температуры) колеблется от наносекунд, до нескольких миллисекунд. Диапазон контролируемых температур от комнатной до +200 °С.

В работе [10] проведен обзор прямых и косвенных экспериментальных методов измерения температуры при трении. Для оценки температуры вспышки пригодным является метод оценки температуры по структурным изменениям в микрообъемах поверхностного слоя. Очевидно, что данный метод обладает невысокой точностью, технической сложностью и дороговизной.

Среди прямых методов измерения температуры наибольшее распространение получили методы, основанные на применении термопар различной конструкции [107,83]. Метод искусственной термопары, заключающийся в размещении термопары в приповерхностном слое, пригоден для приближенной оценки температуры вспышки. Необходимость монтажа термопар в объеме одного из тел трения делают невозможным применение данного метода для определения температуры вспышки в период доэксплуатационного контроля узлов трения.

Также к методам прямого измерения температуры относят бесконтактный метод теплового контроля [107]. К преимуществам данного метода можно отнести возможность наблюдения быстроизменяющихся распределений температуры и определения температуры непосредственно в зоне трения. Вследствие дискретной природы трения и малого времени существования вспышек температуры пирометр должен обладать малым

временем отклика и конструктивной возможностью контроля поверхности трения.

Известно применение быстродействующего оптоволоконного пирометра спектрального отношения в технологии механической обработки металлов [135], однако диапазон измеряемых температур такого пирометра составляет 300 – 650 °С. Оптоволоконный прецизионный инфракрасный радиометр, представленный в [75], измеряет температуру поверхности объектов в диапазоне 10 – 45 °С с постоянной времени 1 с.

### **1.1.3. Обоснование целесообразности применения пирометров в производстве асфальта, сыпучих материалов и устройстве дорожных покрытий**

Анализ технологических процессов [108, 109, 47] приготовления асфальтобетонных и других битумосодержащих смесей (АБС) и устройства покрытий и оснований из них показывает, что измерение и контроль температур является одним из основных параметров технологического контроля и управления качеством устройства асфальтобетонных покрытий. При этом необходимо повышать требования к точности, достоверности и непрерывности измерений температуры, т.к. развитие информационной составляющей информационно-измерительной техники (компьютерная техника, алгоритмы обработки данных и т.д.) происходит опережающими темпами, а температурные характеристики, тепловые режимы процессов приготовления, транспортировки и укладки АБС, во многом определяют как требуемое качество АБС покрытий так и энергоэффективность этих процессов.

В настоящее время в соответствии с технологическим регламентом [108] на приготовление асфальтобетонных и других битумосодержащих смесей контроль температур производится в сушильном барабане

материалов, поступающих в мешалку, битума в расходной ёмкости, смеси на выходе из мешалки, смеси в бункере накопителе.

При этом температура минеральных материалов в сушильном барабане и смеси на выходе из мешалки контролируется пирометрами. Система автоматического управления осуществляет только регулирование подачи воздуха и топлива для обеспечения температурного режима внутри сушильного барабана. Все остальные технологические точки контроля температуры носят информационный характер, не обеспечивают непрерывность контроля и не увязаны в систему автоматического управления асфальтосмесительной установкой. Очевидно, что разработка программно-аппаратных средств, направленных на автоматическое управление температурами битума, материалов на входе и выходе сушильного барабана, смеси при выпуске из смесителя позволит оптимизировать энергоэффективность работы асфальтосмесительных установок, повысить однородность и качество смесей.

Анализ технологической схемы приготовления АБС[109] показал, что на входе рукавных фильтров необходимо установить пирометры контроля температуры пыли из хвостовой части сушильного барабана с целью контроля процесса горения в сушильном барабане и не допущения попадания в фильтр раскалённых более 200°С частиц, которые приводят к разрушению фильтрующих материалов. Обнаружить проскоки таких частиц можно только быстродействующими пирометрическими средствами. Необходимо также контролировать и нижний предел температуры на входе фильтра, так как температура точки росы очищаемых газов может привести к образованию конденсата, что приведёт к снижению эффективности пылегазоочистки, увеличению гидравлического сопротивления и уменьшения срока эксплуатации фильтра.

Анализ технологического процесса приготовления АБС показал, что одним из ответственных агрегатов АСУ является сушильный барабан,

представляющий собой вращающуюся печь с газовой горелкой, в которую поступают минеральные материалы, подлежащие сушке и отжигу. Этот агрегат является наиболее энергопотребляющим и температурно-механически напряженным. В связи с этим целесообразно производить пирометрический тепловизионный контроль температуры стенки вращающегося барабана. Такой контроль позволит обеспечить косвенный контроль за процессами сушки материала внутри барабана, функционированием форсунок горелки, осуществлять диагностику целостности корпуса сушильного барабана.

В настоящее время измерение температур АБС в кузовах машин производится контактными термометрами, что приводит к затратам рабочего времени персонала, значительным погрешностям измерений и простоем автомобилей. Кроме того, измерение температуры отпускаемой АБС производится на весовой, расположенной иногда, в сотнях метров от бункера-накопителя, из которых загружаются автомобили. Следует отметить, что температура смеси в бункере не измеряется.

В этой связи для оценки теплофизических процессов, связанных с гранулометрической сегрегацией смеси, её температурной неоднородностью целесообразно использовать стационарные пирометры на выходе бункера весовой отгрузки АБС на диапазон контролируемых температур (80-160)°С с показателем визирования не более 1:2. Следует отметить, что пирометрический контроль позволяет обеспечить независимость результатов измерений от уровней загрузки кузовов машин. Это объясняется зависимостью лучистого потока регистрируемого пирометром от отношения  $S_M/L^2$ , где  $S_M$  - площадь визируемого пятна на поверхности материала, а  $L$  - расстояние от апертуры пирометра до поверхности контролируемого материала. Из геометрических соображений для пирометров с оптической системой диафрагменного типа [16] можно выразить  $S_M$  как

$$S_M = \pi r^2 = \pi \operatorname{tg}^2 \alpha L^2, \quad (1.3)$$



Таким образом очевидно, что лучистый поток  $\Phi$  не будет зависеть от расстояния  $L$ , определяемого высотой АБС (Рис.1.1).

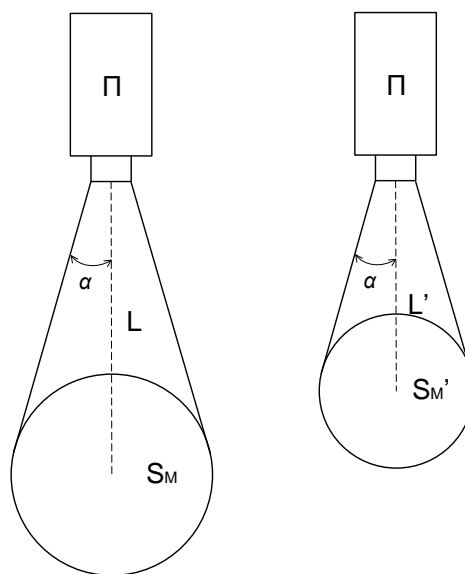


Рис. 1.1. Поле зрения пирометра диафрагменного типа

Значительная часть дефектов (при устройстве покрытий и оснований, как отмечено в [19], связана с отклонениями температур от регламентируемых. Например, причиной возникновения таких дефектов, как «плохая текстура», «колея от катка», «продольные и поперечные волны» и др., является «горячее» покрытие. Дефекты типа «неровная поверхность», «колеи от катка», «сетка трещин», «выкрашивание» связаны с «холодным покрытием». С перегревом и охлаждением АБС связаны такие дефекты как «колеи от катка», «неровности», «сдвиги перед вальцом» и др.

Таким образом очевидна необходимость оперативного контроля температуры АБС на всех этапах её укладки, а также температурный контроль производства оснований из битумных эмульсий, жидкого или вязкого битума. Оперативность такого контроля может быть обеспечена переносными пирометрами с микропроцессорными блоками, в которые могут быть введены коэффициенты черноты, поправки на температуры окружающей среды и на виды битумов, условия их хранения, архивирование результатов измерений, составление электронного журнала. Такие

пирометры на диапазон температур измерения от 20°C до 160°C с показателем визирования от 1 : 10 до 1: 20 позволят решать не только задачи соблюдения регламентов, но и создать статистическую базу данных для разработки теплофизических моделей возникновения тех или иных дефектов при устройстве покрытий и оснований.

Технологические процессы производства различных сыпучих материалов и сырья после обжига в производстве цемента, гипса, кокса требуют их транспортировки в горячем состоянии на конвейерах или транспортёрах, состоящих из отдельных тележек. К таким процессам относятся производства цемента, керамзита, извести, гипса, процессы вальцевания; спекания сырья в алюминиевой промышленности: нефелинов и бокситов, кальцинации гидроксида алюминия; обезвоживание карналлита (минерала для производства магнезия); в производствах ртутносодержащих материалов и др.

В технологическом цикле производства цемента [18] после выхода из печи клинкер на движущемся конвейере поступает в холодильник для охлаждения. В зависимости от условий производства температура клинкера на выходе из холодильника может составлять от 70 до 250°C. При этом стоит задача контроля температуры клинкера на выходе из холодильника. Это позволяет оптимизировать режим работы холодильника, что влияет на процесс обжига, поскольку охлаждающий воздух, нагретый клинкером, затем поступает во вращающуюся печь, возвращая ей часть тепловой энергии. Также в ряде случаев сразу после холодильника клинкер размалывается при добавлении 5% сырого гипса для получения цемента. При этом важно, чтобы температура материала в мельнице не превышала 130°C. При более высокой температуре начинается процесс дегидратации гипса, что может привести к ложному схватыванию цемента.

Поскольку клинкер движется непрерывно по ленте транспортёра со скоростью 1 - 2 метра в секунду, то использование известных контактных

методов контроля температуры не представляется возможным. Пирометрический контроль вследствие бесконтактности, быстрогодействия и возможности обеспечения независимости измерений от расстояния до поверхности контроля позволяет решать задачи измерения температуры сырья и материалов, находящихся на лентах и тележках движущихся конвейеров.

Для решения этих задач требуется специализированный пирометр диафрагменного типа с соответствующими техническими параметрам, конструкции которых как показывает анализ таблицы 1.2 отсутствуют на сегодняшнем рынке.

#### 1.1.4. Пирометрия в задачах энергоаудита

Согласно методике Госстандарта РФ №1305/442 от 10.01.2001 г. и ряда ГОСТов в задачи энергоаудита входит определение частичных и общих теплопотерь строительных сооружений и оценка сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

При определении теплопотерь это мощность  $Q_{\text{тп}}$  с поверхности площадью  $S$ :

$$Q_{\text{тп}} = \alpha_{\text{вн}} \cdot S \cdot (T_{\text{н}} - T_{\text{в}}), \quad (1.4)$$

где  $\alpha_{\text{вн}}$  - коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности;  $T_{\text{н}}$  - температура наружной поверхности;  $T_{\text{в}}$  - температура наружного воздуха.

Значение  $\alpha_{\text{вн}}$  определяется при помощи датчиков теплового потока (приборы, соответствующие ГОСТ 7076-78).

При определении сопротивления теплопередачи стационарный тепловой поток  $Q_{\text{ст}}$  через многослойную плоскую стенку, разделяющую две среды с температурами  $T_1$  и  $T_2$  определяются по формуле:

$$Q_{\text{ст}} = \frac{T_1 - T_2}{R}, \quad (1.5)$$

где  $T_1$  – температура воздуха внутри помещения;  $T_2$  - температура воздуха снаружи;  $R$  – полное сопротивление теплопередаче стенки, определяемое как

$$R = R_1 + R_2 + R_3, \quad (1.6)$$

где  $R_1 = \frac{1}{\alpha_{\text{внутр.}}}$  - тепловое сопротивление пограничного слоя на внутренней поверхности;  $R_2 = \frac{1}{\alpha_{\text{вн.}}}$  - тепловое сопротивление пограничного слоя на внешней поверхности;  $R_3 = \sum_1^n \frac{l_i}{\lambda_i}$  - термическое сопротивление многослойной стенки с числом слоев  $n$ , здесь  $l_i$  - толщина  $i$ -го слоя;  $\lambda_i$  - коэффициенты теплопроводности  $i$ -го слоя.

Как следует из представленных алгоритмов основными приборами инструментальных средств для задач энергосбережения являются методы и средства контроля температуры.

Одним из наиболее объективных показателей теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий, обмуровки теплогенераторов и других теплоизолирующих конструкций, является распределение температуры на их поверхности [13]. Контактное измерение температуры – процесс весьма трудоемкий, особенно на больших площадях, при наличии на обследуемой поверхности труднодоступных участков, участков с высокой температурой или опасного для жизни человека электрического потенциала.

В работе [1] рассмотрены методы определения сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций в условиях эксплуатации зданий и сооружений на базе теплового контроля. Следует отметить, что при определении теплотерь и сопротивления теплопередачи при помощи пирометрических средств и тепловизионных приборов следует руководствоваться не только ГОСТ 26254-84 [25], но и спецификой измерения температуры по излучению поверхностей, которая требует прежде

сего знания и учета коэффициентов излучения контролируемых поверхностей и показателей визирования приборов.

При выборе пирометров необходимо ориентироваться не только на температурный диапазон измерений, но и правильно выбрать спектральный диапазон. Это связано с тем, что коэффициент излучения поверхностей зависит не только от вида материала и фактуры его поверхности, но и от температуры. Для одного и того же материала эта зависимость в одном интервале спектра может быть значительной, в другой нет. При этом в большинстве случаев нельзя ориентироваться на значения коэффициентов излучения, приведенные в справочной литературе для различных материалов, например, в [59], т.к. в справочниках приводятся значения интегральных коэффициентов излучения (в широком спектральном диапазоне), а пирометры и тепловизоры, как правило, работают в конкретном узком диапазоне, например,  $\Delta\lambda=3-3,5$  мкм или 8-14 мкм.

Решение задач энергоаудита требует соответствующей приборной базы, кроме того, без таких приборов невозможны управление энергосбережением и оценка мероприятий, направленных на энергосбережение. При тепловизионном контроле в соответствии с ГОСТ Р 54852-2011 могут быть использованы пирометры ГОСТ 28243-96. Несмотря на то, что сегодня на рынке предлагается множество моделей пирометров и тепловизионных систем для энергоаудита, универсальные и дешёвые приборы, обладающие необходимыми техническими характеристиками для решения поставленных задач отсутствуют. Для создания устройств теплового контроля необходима не только приборная база но и соответствующее метрологическое обеспечение: средства поверки, калибровки и градуировки средств пирометрического контроля.

### **1.1.5. Обзор рынка низкотемпературных пирометров**

В таблице 1.1 приведены сведения о низкотемпературных пирометрах и пирометрических преобразователях отечественных и зарубежных

производителей, применяемых в настоящее время на российских предприятиях.

Сведения о типах и изготовителях пирометров и пирометрических преобразователей

Таблица 1.2

№ п/п	Тип (Изготовитель, страна)	Стоимость, руб.	Диапазон измерения, °С; погрешность	Показатель визирования	Спектраль ный диа- пазон, мкм
1	2	3	4	5	6
1	Диэлтест- ТНЗП (ВНИИОФИ «Термоконт», г. Москва)	-	-20-600 ±1%	1:50	8-14
3	Термоскоп-200-НТ0 Термоскоп-200-НТ1 Институт автоматики и оптоэлектроники, г. Екатеринбург	-	-20-500 ±1% 0-500 ±1%	1:30 1:30	8-14 8-14
4	«Кельвин Пироцельс» МИДИ-У7 МИДИ МАКСИ ООО КБ «Пироцельс», г. Москва	42 480 26 160 33 480	0- 300 ±1% -30- 100 ±1% -30- 100 ±1%	1:250 1:250 1:500	5-7 - -
5	«Кельвин» Компакт 200/175 ИКС 4-20 ЗАО «Евромикс», г.	15 700 9 000	-30- 200 ±1% -50- 350 ±1%	1:175 1:5	8-14 8-14

	Москва				
7	C-20.1	6 136	-30- 500 $\pm 2^{\circ}\text{C}$	1:8	8-14
	C-300.3 Фотон «Техно-Ас»; г. Коломна Московской обл.	39 000	-20- 600 $\pm 1,5\%$	1:100	8-14
8	Condrol IR-T4 ООО «Измерительные системы», г. Челябинск	13 000	-50- 1350 $\pm 1,5\%$	1:30	8-14
9	Питон-102	16 700	-18-1450 $\pm 2\%$	1:50	8-14
	Питон-105 «Энергоаудит-2000», г. Москва	19 700	-20- 550 $\pm 2^{\circ}\text{C}$	1:12	8-14
10	MIKRON M50 Фирма «MIKRON», США	-	-20- 1300 $\pm 1,5\%$	1:6	6,5-14
11	FLIR TG167 Пирометр-тепловизор FLIR Systems, США	41 000	-20- 380 $\pm 1,5\%$	1:24	8-14
12	Raynger MX6	88 260	-30-900 $\pm 1\%$	1:60	8-14
	Raynger i3 LR Raytek, Бельгия	235 000	-30-1200 $\pm 1\%$	1:120	8-14
13	Land SYSTEM4 M6	-	0- 300 $\pm 0,3\%$	1:30	3-5
	Land SYSTEM4 M8 LandMark, Dronfield, Великобритания		0- 1000 $\pm 1\%$	1:100	8-14
14	Optris KT 3M	От 37500	50 – 400 $\pm 1\%$	1:22	2,3
	Optris CT LT	От 27 800	-40- 900 $\pm 1\%$	1:2; 1:20	8-14
	Optris MS	От 7 800	-32- 420 $\pm 1\%$	1:20; 1:30	8-14
	Optris LS	52 800	-35- 900 $\pm 1\%$	1:75	8-14

	Optris GmbH, Германия				
15	Testo 845 TESTO, Германия	50 000	-35-950 ±1% (0,75 до 75) °C	1:75	8-14
16	Fluke 62 Fluke 561 FLUKE, США	9 950 14 600	-30-500 ±1% -40-550 ±1%	1:10 1:12	8-14 8-14
17	ADA TemPro 2200 ADA, Китай	19 900	-50-220 ±1°C	1:50	8-14

Анализ технических параметров, представленных в табл. 1.2 пирометров, позволил сделать следующие выводы относительно их применимости в рассмотренных технологических задачах низкотемпературного контроля:

1. Несмотря на то, что контроль температуры ЭКС потенциально осуществим переносными отечественными пирометрами «Кельвин Компакт 200/175» и «Кельвин Пироцельс», в эксплуатационной практике в системах электроснабжения отсутствуют модели пирометров, адаптированные для решения поставленной задачи пирометрического контроля качества ЭКС.

2. Пирометр Raynger i3 LR (Raytek, Бельгия) имеет функцию компенсации отраженного фонового излучения. Однако отсутствует информация о погрешности и способе компенсации. Стоимость такого пирометра в несколько раз превышает стоимость отечественных пирометров.

3. В триботехнике применимы пирометры и стационарные пирометрические головки зарубежных фирм Land SYSTEM4 и Optris GmbH, пригодные для теплового контроля полированных металлов. Это объясняется использованием относительно коротковолнового интервала спектральной чувствительности так как мощность излучения в коротковолновом диапазоне, как показывают расчеты, не превышает  $10^{-9}$  Вт/мм<sup>2</sup>. Однако остается вопрос о реальной температурной чувствительности в нижнем диапазоне температур для пирометра Optris KT 3M.



4. В производстве асфальта и сыпучих материалов, для задач энергоаудита условно применимы многие из представленных отечественных и зарубежных моделей. Однако, в частности, стационарный Optris CT LT имеет линзовую оптическую систему что приводит к занижению реальных показаний в условиях запыленности на производстве.

5. Все рассмотренные модели потенциально предусматривают возможность установки коэффициента излучения с дискретностью 0,01. Некоторые дорогие зарубежные модели имеют выносной контактный датчик температуры, согласно которому можно подобрать коэффициент излучения ОК. Однако нет сведений об автоматизации этой процедуры, а сам метод с использованием контрольной термопары в производственных условиях затруднителен.

6. Для моделей, представленных в табл. 1.2, в паспортной документации указывают достаточно широкий температурный диапазон эксплуатации. Однако из практики пирометрии известно, что погрешность показаний пирометра, особенно невысокой стоимости, увеличивается при изменении температуры окружающей среды и превышают значения заявленной погрешности.

7. Анализ рынка низкотемпературных пирометров показывает, что большинство пирометров на отечественном рынке представлено зарубежным производителем. Следовательно, для решения задачи импортозамещения актуальна разработка пирометров с параметрами не хуже представленных в табл. 1.2. Стоит отметить ограниченность модельного ряда отечественных производителей, в частности отсутствие пирометра полностью удовлетворяющего условиям задач триботехники, и высокую стоимость зарубежных моделей.

## 1.2. Контроль высокотемпературных технологических процессов

### 1.2.1. Применение пирометров в производстве технического углерода

На Омском заводе технического углерода используется печной способ получения углерода. Он характеризуется проведением реакции термоокислительного пиролиза (разложения) углеводородов в строго контролируемых условиях в специальных реакторах. Реактор имеет полностью закрытый газонепроницаемый металлический корпус. Так как процессы получения печного техуглерода осуществляются при высоких температурах, внутренняя полость реакторов обложена футеровкой из огнеупоров, выдерживающих температуру до 1800-2000°С в зависимости от материала огнеупора [44]. В таких реакторах и происходит процесс термоокислительного пиролиза углеводородов, сопровождающийся протеканием различных химических реакций, конечной стадией которых является образование твердого углерода и сопутствующих газов.

Конструкция реакторов для получения усиливающих марок углерода характеризуются наличием четырех основных зон – зоны горения, зоны смешения, зоны реакции и зоны закалки. На рисунке 1.2 показана принципиальная конструкция реактора [44], применяемого на Омском заводе технического углерода.

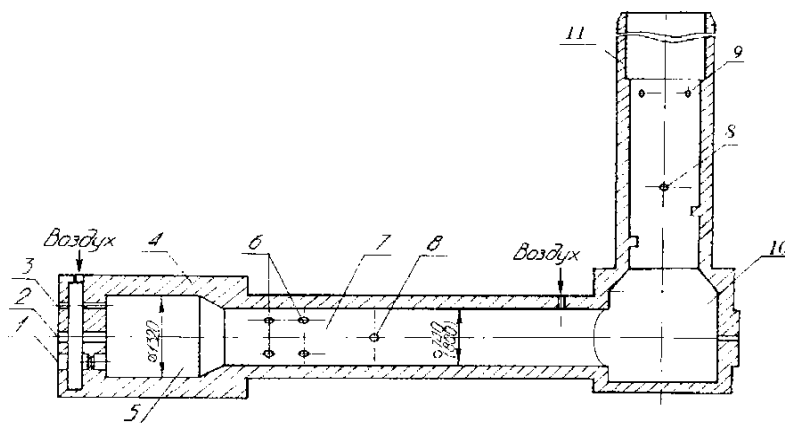


Рис. 1.2. Эскиз конструкции реактора Омского завода технического

## углерода серии 500 и 600

1-горелка газовая; 2-форсунка сырьевая центральная; 3-пирометр; 4-футеровка; 5-зона горения; 6-форсунки сырья радиальные; 7-зона реакции; 8 –пирометр; 9-форсунки водяные; 10-ловушка; 11-стакан футеровочный.

Основным фактором, обеспечивающим получение техуглерода с необходимыми свойствами, является температура в зоне сажеобразования. В камере горения реактора необходимо поддерживать максимально допустимую температуру применения огнеупора, что обусловливается необходимостью получения максимально возможного выхода техуглерода из сырья, оказывающего определяющее влияние на технико-экономические показатели процесса получения техуглерода. С другой стороны нельзя допустить превышения действительной температуры в камере горения более 1900 °С — температуры, при которой корундовые огнеупоры начинают разрушаться [44,74]. Для огнеупоров из циркониевой керамики максимально допустимой температурой является 2350°С [74]. Здесь возникают повышенные требования к точности действующих средств измерений.

Наиболее точным и общепринятым методом измерения температуры продуктов сгорания газов является метод ее измерения посредством термоэлемента (термопары) [44, 74]. Термопарами измеряется температура в камере обогрева сушильного барабана, температуры газов по всему углеродогазовому тракту после проведения закалки углеродогазовой смеси и т.д. Однако измерение термопарами надежно только при умеренных температурах газов. При высоких температурах (более 1600°С) термопары быстро выходят из строя, как сам спай, так и защитный чехол, поэтому использовать их для постоянной регистрации температуры в зонах горения реактора не представляется возможным. Поэтому для непрерывного измерения температуры газов, имеющих температуру выше 1600°С, целесообразно применять пирометры.

Оптические пирометры, приборы в которых яркость зоны контроля

визуально сравнивается с яркостью стандартного источника света, применяются только для периодических измерений температуры [44]. Например, пирометр с исчезающей нитью типа «Проминь», используемый в технологическом процессе с 60-х годов прошлого века, которые в настоящее время не производятся.

Для постоянного измерения температуры в зонах горения и зонах реакции реакторов для получения технического углерода в соответствии с технологическим регламентом применяются радиационные пирометры полного излучения типа «Тера» с показателем визирования 1:20, которые измеряют количество энергии, излучаемой с единицы поверхности в относительно широком диапазоне волн.

Пирометр полного излучения регистрирует радиационную температуру, которая меньше действительной (истинной) температуры объекта. Это объясняется тем что излучательная способность объекта контроля всегда меньше чем АЧТ по которому происходит градуировка пирометра. Следовательно при одинаковой регистрируемой мощности излучения истинная температура объекта контроля может быть больше регистрируемой пирометром по излучению радиационной температуры. Истинная температура связана с радиационной температурой соотношением [7]:

$$T_{ист} = \frac{T_P}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \geq T_P, \quad (1.7)$$

где  $\varepsilon$  — интегральная степень черноты объекта контроля.

Применяемые огнеупоры, являющиеся объектом для измерения температуры в камере горения реактора, имеют степень черноты  $\varepsilon < 1$  и поэтому истинная температура всегда выше радиационной. Исходя из степени черноты огнеупоров и регламентирована радиационная температура в камере горения реактора. То есть именно сопоставление показаний радиационной температуры, количества выхода готового продукта и расхода

сырья позволяют регламентировать технологические параметры конкретного реактора [44].

Важное значение для определения действительной (истинной) температуры в камере горения реактора имеет точность измерения самой радиационной температуры. Здесь имеет значение спектральный диапазон чувствительности фотоприемника пирометра, расстояние от апертуры пирометра до объекта измерения, диаметр визирного канала и точность визирования. Необходима также периодическая проверка и очистка оптической системы пирометра. Также следует отметить что со временем происходит уменьшение диаметра канала визирования пирометра вследствие осаждения сажи на стенках смотрового окна реактора, что влечет неизбежное занижение показаний измеренной температуры относительно истинной и требует применения пирометров с меньшим показателем визирования.

Решением задачи отстройки от занижения показаний может являться применение пирометров спектрального отношения. Принцип работы пирометров спектрального отношения основан на регистрации излучения в двух и более спектральных диапазонах. Преимущества пирометров спектрального отношения обусловлены тем, что в них для определения температуры используется отношение сигналов соответствующих разным спектральным диапазонам регистрации теплового излучения. Это позволяет уменьшить ряд неопределенностей, сопровождающих процесс пирометрических измерений: зависимость от расстояния, поглощение промежуточной средой (защитное стекло), коэффициент черноты. Но по сравнению с пирометрами, работающими в одном спектральном диапазоне, такие пирометры, как правило, обладают сложной оптической системой, сменными оптическими фильтрами или несколькими чувствительными к излучению элементами с разными диапазонами спектральной чувствительности что в конечном итоге значительно усложняет конструкции и увеличивает их стоимость.

Описанные технологические особенности производства технического углерода предъявляют особые требования к конструкции, показателю визирования, спектральному диапазону чувствительности и погрешности измерений пирометра.

### **1.2.2. Пирометрический контроль в производстве цемента**

В производстве цемента важной технологической операцией является обжиг цементного клинкера, который осуществляется во вращающихся печах. Одним из основных условий нормального теплового режима при обжиге цементного клинкера является поддержание установленных технологическими требованиями температур в отдельных зонах печи, и прежде всего в зоне спекания материалов [7].

Обжиговые вращающиеся трубчатые печи [35,18,53] являются агрегатами непрерывного действия, в которых происходят тепловые и физико-химические процессы сопровождаемые высокой температурой. Конструктивно печи представляют собой пустотелый цилиндр из стали диаметром 2,5-7,5м длиной 150-250м. Изнутри печь обложена огнеупорной керамической футеровкой на основе хромитовых и магнезитовых огнеупоров.

Процесс производства цемента заключается в следующем. Исходное сырьё измельчается в дробилках и мельницах, после этого в него вводятся необходимые добавки. После этого сырьевая смесь при помощи горячего газа нагревается в теплообменнике примерно до температуры 800°С и попадает в цилиндрическую вращающуюся печь, температура в которой поддерживается с помощью горелки (топливом может выступать угольная пыль, газ или мазут). В печи происходят три последовательные стадии образования клинкерных минералов. На последней стадии, когда температура смеси достигает 1285°С часть обжигаемого материала переходит в жидкое состояние и начинается экзотермическая реакция

(спекание). Вследствие этого материал начинает вести себя подобно жидкости, скорость движения его вдоль печи увеличивается, что может нарушать нормальный режим работы [35].

При оптимальном соотношении компонентов сырьевой смеси качество материала (клинкера), а следовательно и качество цемента, в процессе обжига обусловлено управлением температурой материала в зоне спекания. Регулировка температуры осуществляется за счёт управления подачей топлива и изменения тяги воздуха в печи. Поэтому контроль температуры в зоне спекания является одной из важнейших задач теплового контроля при производстве цемента.

Применение термопар для этой цели не выдержало испытаний на практике. Если термопары выходят за футеровку печи, то они не выдерживают абразивного действия клинкера, а если не выходят, то они покрываются обмазкой и из-за теплоизолирующего эффекта последней регистрируемая температура не отражает реальной картины.

Контроль температуры в зоне спекания обычно производится с помощью радиационных пирометров. Измерение температур материала в печи пирометром возможно только со стороны головки печи [7]. Однако применение пирометров в ряде случаев затруднительно, их оптические детали (зеркала, линзы) очень быстро покрываются пылью, поскольку цементное производство характеризуется значительной запылённостью. Также расположение горящего факела в этом участке не позволяют осуществить точное измерение действительной температуры материала в зоне спекания. Следовательно, ПИ будет давать показания относительных усреднённых температур в этой зоне, по результатам которых можно видеть изменение хода процесса обжига.

Достоверные показания температуры в зоне спекания будут при визировании ПИ на участок футеровки в зоне спекания вблизи границы с зоной экзотермических реакций, где исключается влияние горящего факела. Для уменьшения влияния факела на его показания у отверстия визирования

устанавливают диафрагмы, с помощью которых ограничивается лучистый поток на объектив пирометра и исключается попадание факела. Для контроля температуры шихты используют ПИ с интерференционным фильтром и длиной волны в окнах прозрачности спектра излучения газов. Для решения проблемы запыленности некоторые производители оборудуют пирометры системами обдува оптической системы чистым воздухом, которая также выполняет роль системы охлаждения. Диапазон температур, контролируемых такими пирометрами обычно составляет 500...1500°С [35].

Температура в зоне спекания может также контролироваться опытным оператором с помощью оптического пирометра с исчезающей нитью. Однако такой контроль не является достаточно точным и непригоден для АСУТП.

### 1.2.3. Обзор рынка высокотемпературных пирометров

В таблице 1.3 приведены сведения о высокотемпературных пирометрах и пирометрических преобразователях отечественных и зарубежных производителей, применяемых в настоящее время на российских предприятиях.

Сведения о типах и изготовителях пирометров  
и пирометрических преобразователей

Таблица 1.3

№ п/п	Тип, Изготовитель, страна	Стоимость	Диапазон измерения, °С	Показатель визирования	Спектраль- ный диа- пазон, мкм
1	2	3	4	5	6



1	Комплекс АПИР-С. Пирометры и пирометрические преобразователи типов: ПШТ	-	900-1200 1400-2500 400-1500 900-2000	1:50 1:50 1:50 1:100	0,4-4 0,4-2,5 0,4-4 0,4-4
	ПЧД ОАО «Каменец- подольский приборострой-тельный завод», Украина		800-1300 1000-2000 1500-2500 700-1100 600-1300 1100-1700	1:25;1:100 1:50;1:200 1:100;1:200 1:25;1:50 1:50;1:100 1:100;1:300	0,7-1,1 0,7-1,1 0,7-1,1 0,8-1,8 0,8-1,8 0,8-1,8
1	2	3	4	5	6
2	Комплексы АПИР-П, АПИР-СП. Пирометры и пирометрические преобразователи «Смотрич» ОАО «Каменец- подольский приборостроительный завод», Украина	-	500-1400	1:300	1,8-2,7
3	«Весёлка-1» «Весёлка-2» «Весёлка-4» «Весёлка-5» ОАО «Каменец- подольский при- боростроительный завод», Украина	-	1400-2800 750-1500 1300-3000 500-1400	1:50...1:250 1:25...1:200 1:25...1:400 1:25...1:100	0,4-2,5 0,8-1,8 0,7,1,1 0,4-1,8
4	ТЕРА-50: РС-25 ОАО «Каменец- подольский прибо- роостроительный завод», Украина	9700 р.	1200-2500 ±25	1:20	0,4-2,7

5	ТермоКОНТ ТЦ2П; ТЦ2С сп.отн. ТЦ3П; ТЦ3С сп.отн.  ТНС ТВ2П  ННТП «ТермоКОНТ», г. Москва	>200 000 р.	600-1800 800-3000 500-1700 (700-3200) 500-1800 (700-3000)	1:80 1:150 - 1:100	0,8;1,0 1,0;1,5 0,6-1,1  0,9-1,1
6	«Спектропир» ПСО (переносные, стационарные) АО Завод Лентеплоприбор, г.С.- Петербург)	-	600-1500  800-1800  500-3000	1:100  1:25;1:50  1:25...1:500	0,8-1,8; 0,6-3,2 0,8-1,8; 0,4-1,1 0,8-1,8; 0,4-1,1
7	«Рубин», «Кварц» ООО, «Юстос», г. С-Петербург	-	600-1600	1:100	0,8-1,8; 0,4-1,1
8	ПРЦ-400, 500, 70 МНПО «Спектр», г. Москва	-	200-1400 500-1500 700-1800	1:100	Спектр. отнош. 0,4-1,8 0,4-1,8
9	С-500 С-3000 ООО «Техноас», г. Коломна, Моск. обл.	-	400-1600 1300-1800	1:100 1:50	1-17 0,4-1,5 сп.о.
10	«Термоскоп» ТС-004 ТС-005 ТС-005 Институт автоматики и оптоэлектроники, г.	-	350 -1450 700-1500 700-1500	1:50...1:500 1:200 1:50	0,8-1,5 0,8 0,9;1,0

	Екатеринбург				
11	«Кельвин-Пироцельс» (различные модификации) ООО КБ «Пироцельс», г. Москва	От 23 000	500 – 1500 800 – 1800 1300 – 2300	1:150...1:500	-
12	«Термикс» ООО «Тимол», г. Москва	-	1200-2300	1:200	0,4-1,1
13	«Луч»; «Луч-Н» «Луч-С» Фирма «Рида-С», г. Самара	-	350-1800 400-1800	1:30...1:200 1:30...1:100	0,6-1,8 0,6-1,8
14	«Астротерм» ПРЦ-600,1000,2000 АО «Астрон-электро», г. С-Петербург	-	600...1200- 2000	1:40...1:120	2-20
15	ФЭП-4	-	800- 2000	1:22-1:55	0,65
16	Смотрич-3 (модели 01 - 06) НПО «Укртермоконт» , Украина	-	800- 3500	1:25- 1:200	0,65
17	СТ-1 СТ-2 ПД-4  ПД-10 ПД-9-02 ОАО «НПП «Эталон», г. Омск	-	150-2000 900-2300 900-1500 1500-2500 500-2500 400-1400	1:15...1:40 1:50 1:100 1:300 1:150 1:100	2,5-5,0 0,32-1,1 0,95 0,65 0,9-1,7 0,9-1,7
18	Питон-101 Питон-102 «Энергоаудит-2000», г. Москва	-	200-1850 -18-1450	1:80 1:50	8-14 8-14

19	MR19 сп. отн. M77 M67 M67H M90 M90D Фирма «MIKRON», США	-	600-3000 250-3500 250-1650 500-3000 700-2000 900-3000	1:44 (1:130) 1:15...1:90 1:30 1:90; 1:180 1:60 1:180	сп. отн. 0,75-1,1 (0,95-1,1) 2,0-2,6 2,0-2,6 0,78-1,06
1	2	3	4	5	6
20	Raynger 3i LT  MARATHON MR1S  Raytek, Бельгия	170 000 р.  150 000 р.	400-3000 $\pm 0,5\%$ 600-3000 $\pm 0,75\%$	1:250  1:130	2,2  1, сп. отн. (Si)
	ET2G5	-	260-1650	1:30	5,2
21	COMARK KM800S KM801 KM1000 Comark Ltd, США	-	0-1000 0-800 600-2000	1:20 1:40 1:40	8-14 8-14 2-25
22	Land SYSTEM4 M1 FO R1 (R1 FO) SYSTEM SOLOnet  UNO, RT 8 A, FG  Land Instruments International, Dronfield, Великобритания	-	800-2600 1000-2600 250-1750 0-2500		1 сп. отн. 1-5 1-14
23	MARATHON MRIS MAIS FRI TERMALERT TXHT	-	600-3000 250-3000 450-2500 500-2000	1:44 1:300 - 1:60	сп. отн. сп. отн. сп. отн. -

	FLIR Systems, США				
24	ARDONOR M55262 7MC3020  M250 Siemens, Германия	-	330-500  600-2500  400-2000	1:10...1:30  1:20; 1:50  1:20; 1:50	1,1-1,8  0,6-1,0  1,0-1,2  0,3-2,5
25	Optris 1M/2M Optris GmbH, Германия	-	250-1800	1:40/1:75	1,0/1,6
26	TESTO 835-t2 TESTO, Германия	-	-10 - 1500	1:50	-

Анализ рынка представленных в табл. 1.3 высокотемпературных пирометров показывает, что существует большое разнообразие таких пирометров отечественного и зарубежного производства, а разработки пирометров в последние годы направлены на пирометры спектрального отношения. Показания таких пирометров в меньшей степени подвержены влиянию, например, таких факторов как неопределенность коэффициента излучения и изменение поглощения излучения промежуточной средой. Следует отметить, что это дорогостоящие модели вследствие технических сложностей их реализации, в том числе из-за высокой стоимости специализированных приемников излучения.

### **1.3. Методы и средства метрологического обеспечения**

#### **1.3.1. Современное состояние обеспечения единства измерений в пирометрии**

Широкое разнообразие средств пирометрического контроля и различия в принципах их работы и исполнения приводит к необходимости проектирования разнообразных средств метрологического обеспечения,

основные характеристики которых должны быть адаптированы под градуируемые и поверяемые средства. Для каждого типа пирометрического прибора необходима разработка индивидуальных методик поверки, ориентированных на образцовые излучатели и образцовые пирометры. Учитывая, что практически все типы используемых на практике пирометров являются пирометрами частичного излучения с селективными приёмниками, поверка пирометров разного типа в соответствии с ГОСТ [27] может осуществляться только на образцовых (эталонных) излучателях типа моделей абсолютно черных тел (АЧТ) [26], а при поверке по образцовым пирометрам поверяемые и образцовые приборы должны быть однотипными по спектральной чувствительности. В настоящее время не существует как универсальных излучателей типа АЧТ, так и образцовых пирометров для поверки всех пирометров различных типов. Из этого следует, что применение и проектирование пирометрических средств теплового контроля влечет за собой разработку как методик их градуировки и поверки, так и разработку широкого разнообразия средств их метрологического обеспечения [36].

В настоящее время в радиационной термометрии обеспечение единства измерений осуществляется с помощью технических средств, воспроизводящих единицу температуры по излучению: моделей абсолютно черных тел (АЧТ) и температурных ламп. Поверка, градуировка и калибровка рабочих пирометрических средств проводится либо прямыми измерениями по модели образцового излучателя типа АЧТ или температурной лампе, либо сличением с показаниями образцовых пирометров по методу компаратора [36]. Обобщенная иерархия поверки и калибровки пирометров и средств метрологического обеспечения, сложившаяся к настоящему времени на основе ГОСТ 8.558-2009 [27], приведена на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Обобщенная схема поверки и калибровки пирометров

Таким образом, широкое разнообразие рабочих средств пирометрического контроля с одной стороны и разнообразие технических решений по обеспечению поверочной схемы с другой стороны предполагает и различные варианты исполнения средств метрологического обеспечения. В работе Захаренко В.А. [36] сделан вывод о необходимости одновременной разработки как пирометрических средств, так и средств их метрологического обеспечения на уровне I и II разрядов. Основные технические характеристики излучателей и образцовых пирометров определяются по ГОСТ 8.558-2009 [27] в соответствии с поверочной схемой. На рис. 1.4 приведена схема установки для поверки пирометров.

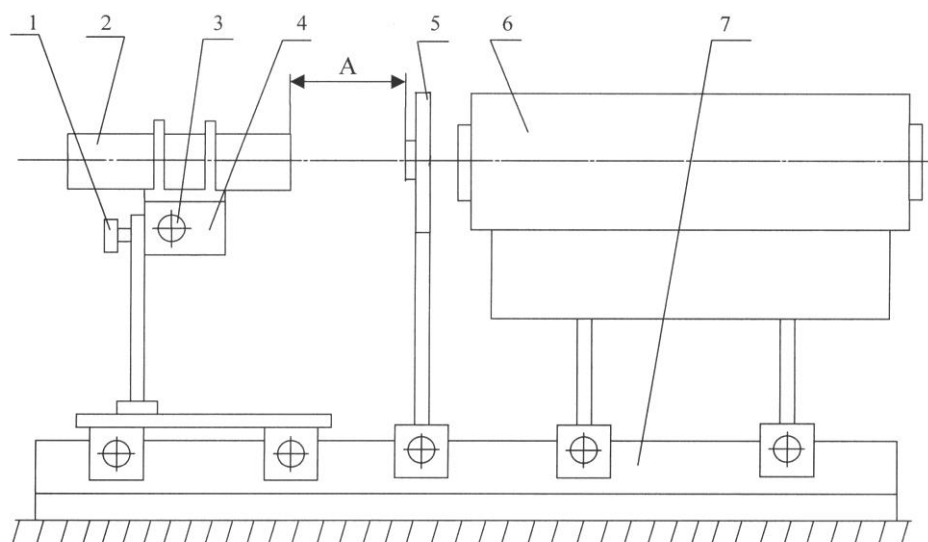


Рис. 1.4. А – рабочее расстояние; 1,3 – микрометрические винты; 2 – пирометр; 4 – штатив; 5 – диафрагма; 6 – модель АЧТ или протяженного излучателя; 7 – оптическая скамья

В соответствии с поверочной схемой ГОСТ 8.558-2009 пределы допускаемой абсолютной погрешности  $\Delta$  рабочих средств измерений для пирометров полного и частичного излучения, пирометров спектрального соотношения составляют от 1 до 4 К в диапазоне температуры от минус 53,15 °С до 0 °С; до 80 К в точке 3000 °С.

При этом как рекомендуется в ГОСТ 8.558-2009, Доверительные границы абсолютной погрешности  $\delta$  рабочих эталонов 2-го разряда при доверительной вероятности 0,95 с учетом нестабильности за межаттестационный интервал:

- для излучателей АЧТ и пирометров полного и частичного излучения: 1 °С в точке 0 °С и 7,5 °С в точке 3000 °С;

- для температурных ламп: 5 °С в точке 900 °С и 17 °С в точке 2800 °С.

Доверительные границы абсолютной погрешности  $\delta$  рабочих эталонов 1-го разряда при доверительной вероятности 0,95 с учетом нестабильности за межаттестационный интервал:

- для излучателей АЧТ и пирометров: 0,6 °С в точке 0 °С и 5 °С в точке 3000 °С;



- для температурных ламп: 3,3 °С в точке 800 °С и 10 °С в точке 2800 °С.

Следует отметить, что техническая реализация метрологического обеспечения предполагает разнообразие характеристик и параметров как образцовых излучателей типа «черное тело» и температурных ламп, так и образцовых пирометров. Это определяется прежде всего тем, что затруднительно обеспечить как конструктивное исполнение излучателей типа АЧТ, обеспечивающих весь температурный диапазон для задач теплового контроля при необходимых требованиях к погрешностям и апертурах, так и с принципиальной невозможностью создания универсальных образцовых пирометров, регистрирующих изменения температуры с заданными погрешностями во всем спектральном диапазоне этих температур. Применение и проектирование сканирующих и тепловизионных пирометрических систем, получающих в настоящее время широкое распространение, требует не только средств градуировки и поверки по температуре, но и средств поверки пространственного разрешения этих приборов по ГОСТ Р 8.619 – 2006 [29].

Одной из ключевых проблем обеспечения единства измерений в реальных эксплуатационных условиях является необходимость учета коэффициентов излучения [7,13,45].

При взаимодействии излучения с физическим телом (рис. 1.5) имеют место следующие оптические эффекты: поглощение с коэффициентом  $\alpha(\lambda)$ ; отражение (включая рассеяние) с коэффициентом  $\rho(\lambda)$ , и пропускание с коэффициентом  $\tau(\lambda)$ .

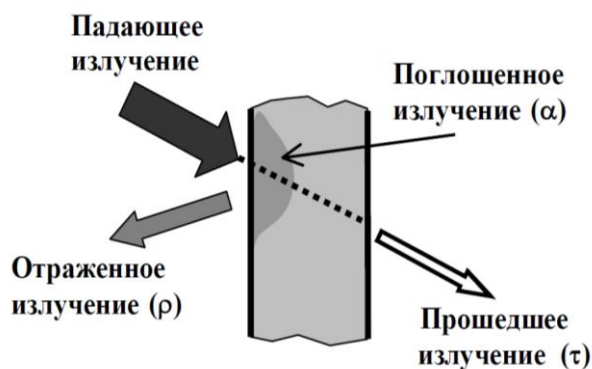


Рис. 1.5. Взаимодействие излучения с физическим телом

В соответствии с законом сохранения энергии:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1, \quad (1.8)$$

Закон Кирхгофа устанавливает, что в точке поверхности теплового излучателя при любой температуре и длине волны спектральный коэффициент направленного излучения для заданного направления равен спектральному коэффициенту поглощения для противоположно направленного неполяризованного излучения». Фактически это означает численное равенство между коэффициентами поглощения и излучения тел  $\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$  и что на определенной длине волны тело способно поглотить и испустить одинаковое количество энергии.

Коэффициент излучения  $\varepsilon$  показывает отношение энергии теплового излучения ОК, к излучению «абсолютно черного тела» при той же температуре:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{r_{\text{ОК}}(\lambda, T)}{r_{\text{АЧТ}}(\lambda, T)} \quad (1.9)$$

Таким образом, согласно Закону Стефана Больцмана для пирометров полного излучения, прошедших градуировку по АЧТ, температура ОК определяется из уравнения 1.7 при условии определенной ранее величины коэффициента излучения.

Использование табличных значений коэффициентов излучения материалов, приведенных в справочной литературе [58] и документации к

средствам измерений в реальных условиях приводит к большой погрешности измерений. Приведенные в справочниках значения, как правило, определены классическим способом, заключающимся в сравнении сигналов пирометра при последовательном его визировании на ОК и АЧТ [106]. При этом очевидно, что недопустимо использовать одни и те же коэффициенты для разных приемников излучения. Это объясняется тем что для большинства реальных материалов имеет место неоднозначная зависимость коэффициента излучения от температуры и длины волны [58,77,101,102]. По данным [58,43] коэффициент излучения большинства металлов изменяется в 1,5...2 раза при изменении температуры их поверхности.

В настоящее время ведутся разработки экспериментальных аппаратов для измерения спектральной излучательной способности металлов в ближнем ИК спектре в диапазоне 1.15-1.6 мкм [133] и 0.8-2.2 мкм [141] в лабораторных условиях с применением монохроматора. Значение неопределенности таких измерений составляет 3.9% [141]. В области спектра 7.5-13 мкм известно применение лабораторной мультиспектральной пирометрической установки для определения спектральной излучательной способности молибдена [142].

Следует отметить, что в практике бесконтактного теплового контроля существует проблема неопределенности коэффициента излучения поверхности объекта контроля и отраженного излучения. Например, при тепловом контроле стальных корпусов химических реакторов и алюминиевых кожухов истинные температуры лучше всего определяются в зонах, покрытых ржавчиной, пылью и т.п. где за счет естественного увеличения степени черноты повышается достоверность результатов измерений.

Погрешность определения температуры  $\Delta T$ , связанная с неопределенностью коэффициента излучения  $\Delta \epsilon$ , для спектрального

интервала чувствительности низкотемпературного пирометра  $\Delta\lambda = 7-14$  мкм с учетом отраженного фонового излучения определяется уравнением [13,72]:

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = \frac{1}{n} \left[ 1 - \left( \frac{T_0}{T} \right)^n \right] \cdot \left| \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right|, \quad (1.10)$$

где  $T$  – истинная температура поверхности ОК;  $T_0$  – отраженная температура фона;  $\varepsilon$  – интегральный коэффициент излучения;  $n = 4.83$  – коэффициент определяемый спектральным интервалом  $\Delta\lambda = 7-14$  мкм.

Например, если на объекте контроля с интегральным коэффициентом излучения окисленной меди  $\varepsilon = 0,5$  имеет место неопределенность  $\Delta\varepsilon = \pm 0.02$ , то в соответствии с уравнением (1.10) при температуре объекта  $50$  °С и комнатной температуре фона  $T_0 = 20$  °С погрешность определения температуры составит  $\Delta T = \pm 1$  °С, а при температуре фона  $T_0 = 0$  °С соответственно  $\Delta T = \pm 1,5$  °С. Таким образом, полученная суммарная погрешность превышает инструментальную, для пирометров, технические характеристики которых приведены в табл. 1.1 и 1.2, в два раза и более. Например, при  $\Delta\varepsilon \geq 0.1$  методическая погрешность может достигать 100% и более.

В настоящее время для определения коэффициента излучения контролируемой поверхности на практике применяется два способа [2, 22,101].

В первом случае выбирают зону на объекте контроля, температуру в которой измеряют контактным термометром. Далее при наличии разницы температур добиваются её сведения к нулю подбирая коэффициент излучения в настройках пирометра (тепловизора). Значение коэффициента излучения, полученное таким образом принимают за значение коэффициента излучения поверхности в данной зоне в реальных условиях измерения.

Для определения излучательной способности строительных материалов с  $\varepsilon > 0.9$  может быть использована методика с применением двух контактных

термометров [128], обладающая улучшенной точностью для практического применения.

Во втором случае на поверхность объекта контроля наносят пленку (краску) с известным коэффициентом излучения (в основном 0.95) и определяют температуру объекта в зоне плёнки. Далее, измеряя температуру на естественной поверхности объекта контроля и подбирая коэффициент излучения в настройках пирометра, также добиваются такого же значения измеренной температуры как в зоне с пленкой.

Для определения отраженной температуры фона (эффективной температуры объектов) окружающей среды, также широко используют два способа в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013 [30].

В первом случае определяют эффективную температуру в противоположном направлении от поверхности объекта контроля. Во втором случае рядом с объектом контроля помещают диффузно рассеивающий отражатель – рифлёную поверхность с высоким коэффициентом отражения. В обоих случаях измеряется радиационная температура, для этого параметр «коэффициент излучения» устанавливается равным единице. Для ускорения коррекции температуры фона возможно использовать два идентичных средства измерения [7]: один пирометр визируется на отражатель, второй на ОК.

Во всех описанных случаях коррекции неопределенностей коэффициента черноты и температуры фонового излучения необходимо производить дополнительные измерения, что существенно усложняет процедуру определения истинной температуры объекта контроля, а также являются невозпроизводимыми для ряда описанных производственных задач бесконтактного определения температуры. Это приводит к тому, что в практике пирометрии используется понятие эффективного коэффициента излучения как интегрального коэффициента, учитывающего воздействие возмущающих факторов в реальных условиях. Этими воздействиями являются: изменение коэффициента излучения поверхности, температуры

среды и самого измерительного прибора, отраженной температуры фона, геометрии поверхности и расстояния до объекта контроля, изменение поглощения среды и оптической системы.

Таким образом очевидно, что существует противоречие между заявленными производителем значениями инструментальной погрешности в соответствии с ГОСТ 8.558-2009 и большой методической погрешностью измерений температуры поверхности в реальных технологических условиях производства. Это обусловлено в большей степени отсутствием простых и надежных средств учета коэффициента излучения при измерениях в производственных условиях.

### 1.3.2. Обзор технических средств метрологического обеспечения

В настоящий момент на российском рынке представлены как зарубежные так и отечественные разработки излучателей для пирометрии. В таблицах 1.4-1.5 приведены основные сведения о наиболее распространенных в отечественной метрологической практике моделях типа АЧТ.

Характеристики излучателей типа моделей АЧТ и ПЧТ низкотемпературного диапазона, представленных на российском рынке

Таблица 1.4

№ п/п	Тип АЧТ, производитель	Коэффициент излучающей способности	Диапазон воспроизводимых температур	Диаметр излучающей полости, мм
1	2	5	3	4
1	ВВ 300, ВНИИОФИ, Россия	0,999	80 – 300 К	30

2	ИР220, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Россия	$0,99 \pm 0,005$	-50 – 60 °С	30
3	НЧТ-2Н, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Россия	$0,99 \pm 0,005$	-20 – 60 °С	70
4	АЧТ 1010, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Россия	$0,99 \pm 0,005$	30 – 100 °С	100
5	РП729М, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Россия	$0,99 \pm 0,005$	25 – 100 °С	100
6	АЧТН-1, НПП «Тензор», Украина	$\geq 0,995$	-20 - +60 °С	70
7	АЧТН-2, НПП «Тензор», Украина	$\geq 0,995$	20 - 200	70
8	М300, М310, и др. МІКRON Instrument co, INC, США	0,995 – 0,999	от –20, 10 до 300°С	10, 25, 50, 76
9	ОИ АЧТ 50/600 «Деметра-М» АО «Метропир», г. С.- Петербург	- 0,996	50 - 600 °С -40 - 110	70, 25, 15, 6 70
10	АЧТ-200, ООО «Техноас», г. Коломна	0,98	50 - 200	100
11	АЧТ-165/40/100, НПП «Эталон», Россия	0,99	35 – 95 °С	165
12	ПЧТ-540/40/100, НПП «Эталон», Россия	0,96	30 – 95 °С	540x540

13	M315X-HT	0,975 (1.00)	(T <sub>o</sub> +5) – 600	305x305
	M345X12	1.00	0 – 170	305x305
	M345X8-LX	0,9756	-40 – 100	203x203
	MIKRON Instrument co, INC, США			

Характеристики излучателей типа моделей АЧТ высокотемпературного диапазона, представленных на российском рынке

Таблица 1.5

№ п/п	Тип АЧТ, производитель	Коэффициент излучающей способности	Диапазон воспроизводи мых температур	Диаметр излучающей полости, мм
1	2	5	3	4
1	ВВ 1200, ВНИИОФИ, Россия	0,995	800 – 1200 К	8
2	ВВ 2000, ВНИИОФИ, Россия	0,995	800 – 2000 К	60
3	АЧТ ИТ20, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, Россия	0,99 ± 0,005	700 – 1500 °С	20
4	ОИ АЧТ 600/1400, 900/2500, 600/1200 АО «Метропир», г. С.- Петербург	-	от 600, 900, до 1400, 2500, 1200 °С	70, 25, 15, 6
5	АЧТ/16/900/2500, НПШ «Эталон», Россия	0,99	900 – 2500 °С	16



6	M330, M360, M370, M380 и др. MIKRON Instrument co, INC, США	0,995 – 0,999	от 100, 300 до 1700, 2300 °С	10, 25, 50, 76
7	M390, MIKRON Instrument co, INC, США	0,995	от 250, 600 до 1800, 2300, 2600, 3000 °С	16, 25, 38
8	Установки с ламповыми излучателями типа ОИА, АЧТ «Гелиос» АО «НПЛ «МЕТРОПИР», г. С.- Петербург	-	от 600, 900 до 2000, 2500, 3000 °С  800 – 1500 °С	1

Анализ обзорной информации, приведённой в таблицах 1.4 и 1.5, показывает, что отсутствуют эталонные серые излучатели для калибровки рабочих средств теплового контроля, позволяющие уменьшать методические погрешности пирометрических измерений, связанные с неопределенностью эффективного коэффициента черноты объектов контроля. Также отсутствуют излучатели с излучающей полостью более 76 мм для обеспечения поверки высокотемпературных пирометров с большими показателями визирования (пирометров с большим углом зрения).

#### Выводы по главе 1

1. В результате аналитического обзора задач теплового контроля в промышленности в главе показана актуальность применения пирометрических средств теплового контроля для обеспечения различных

технологических процессов, решения задач энергосбережения и безопасности на производстве.

2. Представленные сведения о пирометрах отечественных и зарубежных производителей позволили произвести оценку современного состояния средств теплового контроля для поставленных задач и оценить перспективы новых разработок, в том числе для решения вопросов импортозамещения.

3. Анализ технологических особенностей различных технологических процессов, оценка особенностей применения средств бесконтактного измерения температуры позволили сделать вывод о необходимости разделения задач разработок новых средств теплового контроля на низко- и высокотемпературные диапазоны со специализированными требованиями к основным техническим характеристикам: диапазону измерения, эксплуатационному температурному диапазону, погрешности, устойчивости к запыленности и др.

4. На рынке нет универсальных излучателей, обеспечивающих весь диапазон температурных измерений и метрологическое обеспечение пирометров необходимо обеспечивать специализированными излучателями в низко-, средне- и высокотемпературных диапазонах с диаметрами излучающих поверхностей, соответствующих оптическим параметрам моделей пирометров.

5. Анализ метрологического обеспечения средств теплового контроля показал отсутствие на данный момент оперативных средств обеспечения однозначности ТК, связанных с неопределенностью значений коэффициента излучения и учетом температуры фонового излучения.

## **2. РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПИРОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

### **2.1 Разработка и исследование низкотемпературных пирометрических приборов**

Разработка и проектирование пирометров, удовлетворяющих поставленным в диссертационной работе задачам, потребовала создания методического обеспечения для решения следующих вопросов:

1. Методики проведения необходимых энергетических расчетов для выбора приемника излучения (ПИ);
2. Методики обоснования выбора оптической системы пирометра;
3. Методики проведения расчетно-аналитических обоснований влияния неопределенностей при учете коэффициента излучения и влияния температуры окружающей среды на результаты бесконтактного измерения температуры;

Разработка специализированных пирометров предполагает также решения вопросов конструктивного исполнения, разработки функциональной и электрической схем, создание новых алгоритмов и специализированного программного обеспечения.

#### **2.1.1. Методика энергетического расчета пирометра**

Для качественной работы любого пирометра важно обеспечить определенные энергетические соотношения между полезным сигналом и шумом, источники которого могут быть как внутри прибора, так и вне его. Определение этих соотношений и на их основе некоторых важнейших параметров пирометра составляет главное содержание и цель энергетических расчетов.

Энергетический расчет позволяет найти важнейшие геометрические параметры оптической системы, определить необходимое значение

порогового потока или обнаружительной способности приемника излучения [125].

Значения потоков и облученностей на входе пирометра зависят от свойств излучателей, среды распространения излучения. В связи с тем, что на первом этапе проектирования прибора необходимо произвести приблизительные расчеты основных параметров на основе предварительных энергетических расчетов в следующей последовательности:

1. Определяется соотношение между основным сигналом и помехой.

В общем виде основное энергетическое неравенство, которое устанавливает необходимое для качественной работы соотношение между полезным сигналом и помехой представляется как [125,55]:

$$\frac{\Phi_c}{\Phi_{пор}} \geq \mu \text{ или } \frac{U_c}{\sqrt{U_{ш}^2}} \geq \mu; \quad (2.1)$$

где  $\Phi_c$  — поток полезного сигнала, Вт;  $\Phi_{пор}$  — пороговый поток сигнала, Вт;  $U_c$  — напряжение полезного сигнала, В;  $U_{ш}$  — напряжение шумов, В;  $\mu$  - параметр качества или коэффициент запаса [125].

2. В соответствии с выражением 2.2 [85] рассчитывается лучистый поток, соответствующий заданной температуре и оптическому разрешению:

$$\Phi_e(\lambda, T) = \frac{\varepsilon_T S_{OK} S_{ПИ}}{\pi L^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) R(\lambda, T) d\lambda \quad (2.2)$$

где  $S_{OK}$  — площадь визируемого пятна ОК,  $S_{ПИ}$  - площадь чувствительного элемента приемника излучения,  $l$  — расстояние между излучающей поверхностью и пирометром,  $\tau_c(\lambda)$  — коэффициент пропускания среды,  $\tau_o(\lambda)$  — коэффициент пропускания объектива,  $R(\lambda, T)$  — спектральная яркость энергетической светимости в соответствии с функция Планка,  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  — спектральный диапазон приемника излучения.

В соответствии с выражением 2.2 изменение лучистого потока на входе пирометра при изменении температуры ОК на 1 градус может быть найдено как:

$$\Delta\Phi_e(\lambda, T) = \frac{\varepsilon_T S_{OK} S_{ПИ}}{\pi L^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda) \tau_o(\lambda) [R(\lambda, T) - R(\lambda, T-1)] d\lambda \quad (2.3)$$

Тогда, подставив (2.3) в (2.1), определяется требуемая величина порогового потока ПИ как  $\Phi_{пор} \leq \Delta\Phi_e(\lambda, T)/\mu$ .

### 3. Выбирается тип приемника излучения.

Основным элементом пирометра, определяющим диапазон измеряемых температур является чувствительный к излучению элемент. Например, для заданного диапазона температур  $-30$ - $+180$  °С на основании приведенных характеристик в табл. 2.1, сопоставив спектральные диапазоны излучения объектов контроля и окон прозрачности атмосферы, в работе [36] сделан вывод о том, что пирометры, для заявленных задач, должны иметь спектральную чувствительность к излучению в диапазоне от 7 до 14 мкм [140]. Для регистрации излучения в этом диапазоне в настоящее время широко применяются тепловые приемники излучения [46,4,130,57,38,9,31,60] среди которых в практике пирометрических измерений используются три основных типа: болометрические, термоэлектрические и пироэлектрические [46, 38, 9].

Основные характеристики наиболее распространенных на сегодня неохлаждаемых тепловых ПИ, применяемых в пирометрических приборах, приведены в таблице 2.1.

Основные характеристики тепловых приемников излучения некоторых типов

Таблица 2.1

Тип приемника	Марка приемника	Площадь чувств. площадки, мм <sup>2</sup>	Интегральная чувств., S, В/Вт	$\tau$ , мс	Спектральный диапазон, мкм	Пороговый поток, Вт	Производитель
Термоэлектрический	ТМ-0,5 х 0,4	0,5 х 0,4	3,0	-	-	$8 \cdot 10^{-9}$	г. Санкт-Петербург

	ТП-0,3 х 0,3	0,3 х 0,3	24	40	-	$3,4 \cdot 10^{-11}$	
	TPS 424/434	0,5 х 0,5	35	20	5,5-22	$0,5 \cdot 10^{-9}$	HEIMANN Sensor, Германия
	TPS 424/387	0,5 х 0,5	22	20	5,5-22	$0,12 \cdot 10^{-9}$	Perkin Elmer, Германия
	ТД-510	3.14	120	40	0,4-50	$3,3 \cdot 10^{-10}$	Термоэлектри- ческий институт, Украина, г. Черновцы
	Т 05-1- 1000-3,5	-	-	1	2-5,5	$0,5 \cdot 10^{-10}$	ГУП Альфа, г. Москва
Болометры метал- лические	БВЦ-0,3 х3	0,3 х 3	25	-	-	$6 \cdot 10^{-11}$	г. Москва
	БВЦ-0,2 х2	0,2 х 2	20	-	-	$2 \cdot 10^{-10}$	
Полупро- водни- ковые боло- метры	БОС-0,5 х2	0,5 х 2	250	-	-	$1 \cdot 10^{-9}$	г. Санкт- Петербург
	БОС- 0,35х2,8	0,35х2,8	500	-	-	$5 \cdot 10^{-6}$	
Полупро- водни- ковые болометры	БОК-1 х 2	1,0 х2,0	4	-	-	$3 \cdot 10^{-6}$	АООТ «Реконт», г. С-Петербург
	БО-1 х 2	1,0 х2,0	50	-	32 – 15	$3 \cdot 10^{-8}$	
	БКМ-5- 1х1 <sup>+</sup>	1,0 х1,0	100	4,0	-	$5 \cdot 10^{-9}$	

Анализ характеристик и параметров рассмотренных тепловых приемников показал, что наиболее удовлетворяющими использованию в широком диапазоне температур эксплуатации являются термоэлектрические ПИ. Это объясняется тем, что термоэлектрические ПИ обладают меньшей зависимостью выходного сигнала от изменения температуры окружающей среды, и в большинстве случаев позволяет обойтись электронными методами термокомпенсации температурной чувствительности ПИ посредством встроенного датчика температуры. Пироэлектрические приемники имеют

относительно большую интегральную чувствительность, однако требуют модуляции входящего потока излучения и нижняя граница эксплуатационных рабочих температур ограничена 0...-5 °С [9]. Ограничивает их применение также относительно высокий уровень шума и наличие микрофонного эффекта [137]. Боллометрические ПИ уступают термоэлектрическим и пироэлектрическим [57] по таким параметрам как интегральная чувствительность, шумы, температурная стабильность, постоянная времени [4].

Наибольшее распространение [57, 60] в настоящее время получили термоэлектрические ПИ фирмы HEIMANN Sensor GmbH (Германия) типа TPS и аналогичные им по основным характеристикам НІD А1, но имеющие встроенный АЦП и цифровой интерфейс передачи данных. Также массовое применение в последнее время получили термоэлектрические приемники с цифровым интерфейсом типа mlx90614 фирмы Melexis (Бельгия). Пирометры зарубежного производства на основе термоэлектрических приемников в России представлены фирмами FLUKE, MIKRON, RAYTEK, RAYNGER и др. (табл. 1.2.).

### **2.1.2. Методика обоснования выбора оптической системы пирометра**

Как показал проведенный в разделе 1 настоящей работы анализ задач контроля температуры в ряде технологических процессов, практический интерес в условиях эксплуатации технологического оборудования является задача разработки пирометров с оптической системой диафрагменного типа.

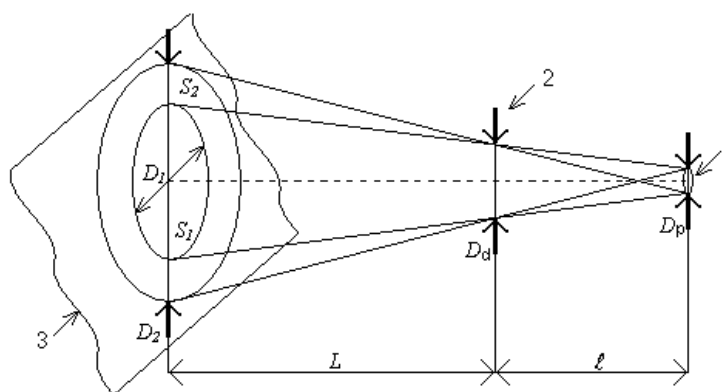


Рис. 2.1 Оптическая система пирометра с диафрагмой:

1 – чувствительный элемент ПИ; 2 – апертурная диафрагма; 3 – плоскость измерительного поля

Исходя из представленных на рис. 2.1 геометрических построений диаметр визируемого пятна на поверхности ОК можно рассчитать по формуле [36]:

$$D_2 = \frac{L}{l}(D_d + D_p) + D_d, \quad (2.4)$$

где  $D_2$  – диаметр измерительного поля,  $L$  – расстояние от плоскости ОК до диафрагмы,  $l$  – расстояние между поверхностью чувствительного элемента ПИ и диафрагмой,  $D_p$  – диаметр площадки чувствительного элемента ПИ,  $D_d$  – диаметр отверстия диафрагмы.

Из выражения (2.4) следует, что при изменении расстояния  $L$  до контролируемой поверхности будет изменяться диаметр  $D_2$  и, соответственно, площадь измерительного поля  $S_2$ . Тогда в соответствии с выражением (2.3) отношение  $S_{ок}/L^2$  остается неизменным как и показания пирометра с диафрагменной ОС при условии что диаметр визируемого пятна меньше минимальных размеров объекта контроля, что соответствует  $S_2 \leq S_{ок}$ .

В качестве более сложных оптических систем в области инфракрасно спектра принято использовать схемы Кассегрена [22,6]. Схема Кассегрена является предфокальной, т.е. относительно меньших размеров, двухзеркальной оптической системой (рис. 2.2). Такая оптика обеспечивает



малое пространственное разрешение прибора и, благодаря большой апертуре главного зеркала, высокую чувствительность прибора.

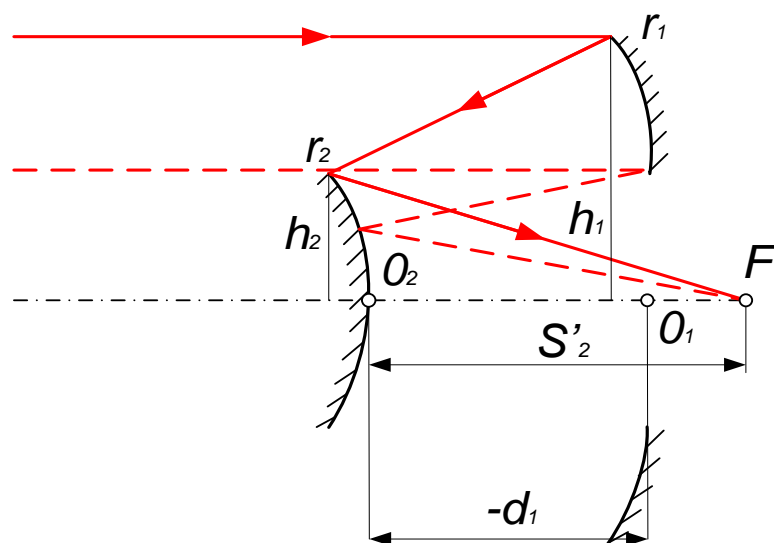


Рисунок 2.2. Двухзеркальная оптическая система Кассегрена

где  $d_1$  – расстояние между зеркалами объектива;  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы кривизны основного и вторичного зеркал соответственно;  $h_1$  и  $h_2$  – радиусы основного и вторичного зеркал;  $S_2$  – заднее вершинное фокусное расстояние объектива пирометра, определяется исходя из показателя визирования  $n$  и минимального размера  $a$  чувствительной площадки ПИ:

$$n = \frac{a}{S_2}; \quad (2.5)$$

Радиусы кривизны главного зеркала  $r_1$  и малого  $r_2$  объектива системы Кассегрена (рис. 2.2) определяются следующими соотношениями [6,16]:

$$F = \frac{r_1 r_2}{2(r_1 - r_2 - 2d_1)}; \quad (2.6)$$

$$r_1 = \frac{2dF}{S_2 - F}; \quad (2.7)$$

$$r_2 = \frac{2dS_2}{S_2 + d - F}; \quad (2.8)$$

где  $d_1$  – расстояние между зеркалами объектива (рис. 2.2.);  $F$  – фокусное расстояние зеркальной системы.

Площадь  $A$  входной апертуры пирометра с такой оптической системой определяется по выражению энергетического расчета согласно методике, приведенной в [70,64]:

$$A = \frac{\pi \sqrt{ab\Delta f} K_e \mu T^2}{\Delta T_{\text{пор}} \alpha \beta c_2 D^* \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\text{ПИ}}(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \lambda^{-1} R(\lambda, T) d\lambda} \quad (2.9)$$

где  $a, b$  – размеры чувствительной площадки ПИ, мм;

$D^*$  – удельная интегральная обнаружительная способность ПИ, (см·Гц<sup>1/2</sup>)/Вт;

$\Delta f$  – ширина полосы пропускания ПИ, Гц;

$\Delta T_{\text{пор}}$  – пороговая разность измеряемых температур пирометра, К;

$T$  – температура среды, К;

$K_e$  – коэффициент использования ПИ [117];

$S(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность ПИ;

$R(\lambda, T)$  – спектральная плотность энергетической светимости АЧТ;

$\lambda_1 \dots \lambda_2$  – спектральный диапазон приемника излучения.

$C_2$  – вторая постоянная в уравнении Планка, 1.439·20<sup>2</sup> См·К;

$\alpha, \beta$  – углы поля зрения пирометра, мрад;

Величина ширины полосы частот пропускания ПИ  $\Delta f$  определяется по формуле [110] как обратная величина удвоенной постоянной времени  $\tau$  ПИ:

$$\Delta f = \frac{1}{2\tau}; \quad (2.10)$$

Углы поля зрения пирометра  $\alpha$  и  $\beta$  в радианах исходя из геометрических соображений:

$$\text{tg} \alpha \approx \alpha = \beta = n; \quad (2.11)$$

Величина коэффициента использования  $K_e$  ПИ определяется из соотношения воспринимаемой ПИ энергии лучистого потока от АЧТ при

температуре  $T_e$  к полной излучаемой энергии АЧТ при этой температуре [43]:

$$K_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\text{ПИ}}(\lambda)R(\lambda, T_e)d\lambda}{\sigma T_e^4}; \quad (2.12)$$

Как видно из рисунка 2.2 главное зеркало представляет собой кольцо с радиусом  $h_1$  и радиусом отверстия  $h_{12}$ . Примем  $h_1$  в два раза больше радиуса  $h_{12}$ , а  $h_{12}$  равным  $h_2$  вторичного зеркала, тогда:

$$h_1 = 2 h_2; \quad (2.13)$$

Учитывая площадь радиального крепления вторичного зеркала как  $0.1 \cdot A$ , радиус вторичного зеркала определяется из уравнения площади входной апертуры [6]:

$$\begin{aligned} A &= A_1 - A_2 - 0.1A = \pi h_1^2 - \pi h_2^2 - 0.1A; \\ 1.1A &= \pi (4h_2^2 - h_2^2); \\ h_2 &= (1.1A/3 \pi)^{1/2}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Пример предварительного энергетического расчета пирометра с диафрагменной оптической системой.

Примем показатель визирования  $n = 1:20$ , что соответствует площади визируемого пятна  $S_2 = 1.96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  на расстоянии  $L = 1 \text{ м}$ . Площадь чувствительного элемента ПИ TPS424  $S_{\text{ПИ}} = 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  при размере чувствительной площадки  $D_p = 0.5 \text{ мм}$ . Коэффициент излучения алюминия окисленного  $\varepsilon_r = 0.25$  [58]. Графический результат расчета  $\Delta\Phi(\lambda, T)$  в соответствии с выражением (2.3) при  $\Delta T = 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  в диапазоне температур ОК от  $-20$  до  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  представлен на рисунке 2.3.

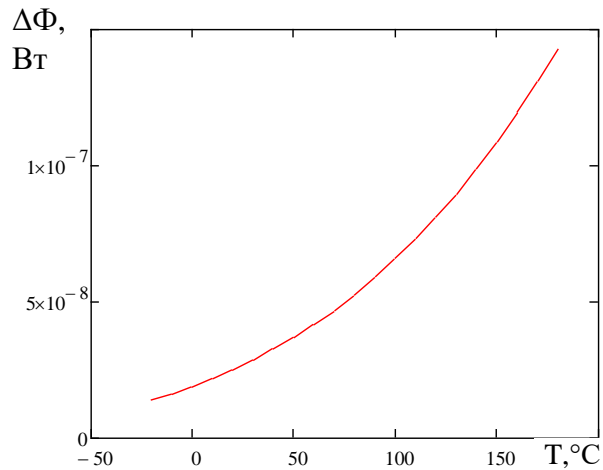


Рисунок 2.3. Расчетная зависимость изменения лучистого потока  $\Delta\Phi(\lambda, T)$  при чувствительности пирометра  $\Delta T = 0.1$  °C в диапазоне температур ОК от -20 до 180 °C

Как видно из рисунка 2.3 минимальная величина изменения лучистого потока при  $\Delta T = 0.1$  °C для температуры ОК -20 °C составила  $4.44 \cdot 10^{-9}$  Вт. Подставляя паспортное значение удельного порога чувствительности  $\Phi_{\text{пор}}$  в выражение (2.1) получим минимальное соотношение сигнал/шум  $\mu = 4.44 \cdot 10^{-8} / 0.6 \cdot 10^{-9} = 7.4$ , что является удовлетворительной величиной ( $> 3$ ) [124].

Пример расчета оптической системы Кассегрена для опытного образца пирометра контроля ЭКС

На основе анализа требований к оптической системе низкотемпературных пирометров для задач контроля КС, представленных в главе 1, принят минимальный показатель визирования  $n=1:240$ .

Паспортное значение обнаружительной способности ПИ TPS424  $D^* = 0.84 \cdot 10^8$  (см·Гц<sup>1/2</sup>)/Вт. Подставляя основные параметры ПИ TPS424 из табл. 2.1 в (2.5, 2.10, 2.11), имеем:

$$\Delta f = \frac{1}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 25 \text{ Гц};$$

$$S_2 = 200 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} = 0.12 \text{ м};$$

$$\alpha = \beta = \frac{1}{240} = 4.17 \text{ мрад.}$$

Величина коэффициента использования  $K_e$  ПИ TPS424, рассчитанная согласно общепринятой методике [43] для температуры АЧТ  $T_e = 373 \text{ К}$  по выражению (2.12), составила  $K_e(373) = 0.27$ .

Принимая температурную чувствительность пирометра  $\Delta T_{\text{пор}} = 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  и, например,  $\mu=70$ . Тогда подставляя паспортные значения характеристик и полученные выше параметры в (2.9), получим площадь входной апертуры объектива пирометра:

$$A = \frac{\pi \sqrt{0.5 \cdot 0.5 \cdot 25 \cdot 0.27 \cdot 70 \cdot 293^2}}{0.1 \cdot 4.17 \cdot 4.17 \cdot 1.439 \cdot 10^2 \cdot 0.84 \cdot 10^8 \cdot 0.115} = 5294 \text{ мм}^2$$

Подставляя найденное выше значение  $A$  в (2.14), а затем  $h_2$  в (2.13) получаем:

$$h_2 = (1.1 \cdot 5294 / 3 \pi)^{1/2} = 24,86 = 25 \text{ мм}; h_1 = 50 \text{ мм.}$$

Примем расстояние между основным и вторичным зеркалами  $d_1 = D_1 = 100 \text{ мм}$ , а  $F = 2d_1$ . Подставив значения  $F$ ,  $d_1$  и  $S_2$  в уравнения (2.10-2.12) при совместном последовательном решении определены значения  $r_1 = -0.51 \text{ м}$ ,  $r_2 = 2.6 \text{ м}$ .

Окончательные расчеты оптической двухзеркальной системы проводились с использованием программного обеспечения ATMOS 8.5. На основе выбранного теплового приемника излучения TPS424 был рассчитан и изготовлен макет с использованием оптической системы Кассегрена, геометрические размеры которого представлены на рис. 2.4.

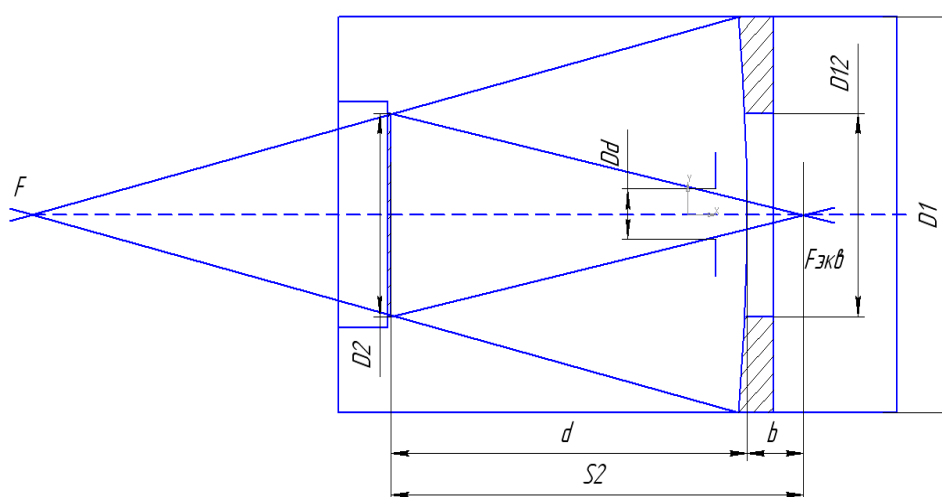


Рис. 2.4. Оптическая система Кассегрена:  $F = 205$  мм – фокус оптической системы,  $D_1 = 98$  мм – диаметр главного зеркала,  $D_{12} = 50$  мм – отверстие главного зеркала,  $D_2 = 50$  мм – диаметр вторичного зеркала,  $D_d = 12.5$  мм – диафрагма защитной бленды,  $d = 102$  мм – расстояние между зеркалами,  $S_2 = 118$  мм - заднее вершинное фокусное расстояние,  $r_1 = -0.51$  м – радиус кривизны главного зеркала,  $r_2 = 2.6$  м – радиус кривизны вторичного зеркала.

### 2.1.3. Расчетная методика учета влияния коэффициента излучения и температуры окружающей среды

Воздействие возмущающих факторов, помех или шумов, можно подразделять на внешние и внутренние. Под внешними помехами подразумевается воздействие излучения фона, тепловое воздействие, а под внутренними - оптических элементов пирометра, шум приемника излучения. Следует отметить, что конструктивные меры и средства борьбы с шумами, возникающими при воздействии указанных эксплуатационных факторов, опробованы на практике и изучены лучше, чем способы их аналитического описания. Во многих случаях эффективность конструктивных мер борьбы с ними достаточно высока [124,125].

При формировании суммарного выходного сигнала пирометра необходимо учитывать свойства теплового излучения окружающей среды и

собственное излучение элементов оптической схемы пирометра. Тогда величину суммарного выходного сигнала на выходе теплового ПИ пирометра можно определить как [70]:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_T + U_{\text{ФОН}} + U_O \quad (2.15)$$

где  $U_T$  - выходной сигнал, формируемый собственным излучением поверхности исследуемого объекта соответствующему его температуре  $T$ , В;

$U_{\text{ФОН}}$  - выходной сигнал, формируемый отраженным от поверхности объекта излучением фона, В;

$U_O$  - выходной сигнал, формируемый излучением элементов оптической схемы пирометра, В.

Для борьбы с рассеянным излучением, возникающим при наличии так называемых боковых помех, находящихся за пределами углового поля зрения пирометра, используются оптические бленды. В ряде случаев величина потока этого рассеянного излучения заметно превышает яркость фоновых помех, находящихся в угловом поле объектива [124].

Для стабилизации составляющих  $U_O$  были применены следующие конструктивные решения (рис. 2.5): входные двойные бленды 5 и бленды между зеркалами 6 в соответствии с рекомендациями [58,6]. Расстановка диафрагм внутри бленды проводилась путем геометрических построений хода лучей, которые учитывают требуемое число отражений на боковых цилиндрических поверхностях. Круговые бленды обеспечивают коэффициент ослабления порядка  $K_o = 5 \cdot 10^5$  [124].

Следует отметить, что излучение, пропорциональное температуре оптической системы, также будет входить в измеряемое значение, что приведет к погрешности измерений. Оценка погрешности обусловленной тепловыми источниками оптической схемы проведена в работах [4,94]. По данным [70] чувствительность радиационного пирометра к изменению температуры окружающей среды в общем случае всего лишь в два раза меньше, чем чувствительность к изменению температуры объекта, т. е.

изменение температуры окружающей среды на  $10^{\circ}\text{C}$  внесет ошибку в показания прибора, равную  $5^{\circ}\text{C}$ .

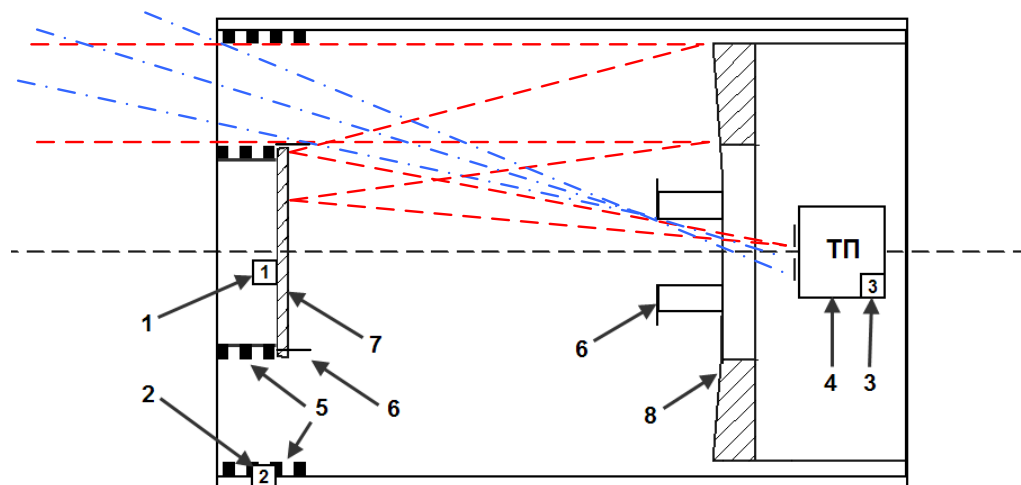


Рис. 2.5. Оптическая схема пирометра по схеме Кассегрена с компенсацией возмущающих факторов:

1, 2, 3 - датчики температуры ДТ1, ДТ2 и ДТ3, 4 – тепловой приемник TPS424, 5 – входные диафрагмы, 6 – бленды, 7 – вторичное малое зеркало, 8 – основное зеркало, 9 – ход лучей излучения от ОК; 10 – ход «паразитных» лучей

Таким образом контроль температуры корпуса пирометра позволит повысить точность низкотемпературных измерений, путем введения в алгоритм работы поправки на температуру корпуса

Соответственно, вытекает вывод, что для контроля и компенсации данных погрешностей необходимо измерить температуры теплового приемника, малого зеркала и входных диафрагм. В качестве датчиков температуры ДТ1 и ДТ2 входных диафрагм и малого зеркала соответственно можно применить полупроводниковые интегральные датчики типа DS18B20. Датчиком температуры ДТ3 теплового приемника ТП (TPS424) является встроенный в конструкцию ПИ терморезистор. Также для температурной стабилизации теплового приемника целесообразно применение пассивного термостата.



Исследования показывают, что на результаты пирометрических измерений температуры металлических поверхностей влияет качество обработки поверхности металла и наличие окислов [17,34]. Коэффициент излучательной способности металлов следует считать эффективным  $\varepsilon_{\text{эф}}$ , отличным от истинного коэффициента излучательной способности [72,17]. Тогда в соответствии с законом Стефана-Больцмана [58]:

$$T_{II} = \frac{T_{РАД}(T_O, T_{\Phi})}{\sqrt[4]{\varepsilon_{\text{эф}}(T_O, T_{\Phi})}} \quad (2.16)$$

где  $T_{II}$  – измеренная пирометром истинная температура объекта,  $T_{РАД}$  – измеренная пирометром радиационная температура,  $T_O$  – температура объекта,  $T_{\Phi}$  – температура фона. Зависимость  $T_{РАД}(T_O, T_{\Phi})$  в общем случае определяется выражением [72, 124]:

$$T_{РАД}^n = \varepsilon \cdot T_O^n + (1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon_{\Phi} \cdot T_{\Phi}^n + \varepsilon_{\Phi 1} \cdot T_{\Phi 1}^n \quad (2.17)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения образца,  $\varepsilon_{\Phi}$  – коэффициент излучения фона,  $T_{\Phi 1}$  – температура апертуры пирометра. Параметр  $n$  определяется спектральной характеристикой излучения.

Ввиду сложности определения фоновых составляющих ( $\varepsilon_{\Phi}$ ,  $T_{\Phi}$ ) для нахождения  $\varepsilon_{\text{эф}}$  с целью внесения поправок в показания пирометра, градуированного по модели АЧТ, предложена следующая методика:

- определение  $\varepsilon_{\text{эф}}(T_{Omax})$  в верхней точке температурного диапазона измерений;
- снятие зависимостей  $T_{II}(T_O, T_{OC})$  при соответствии  $T_{II}$  формуле (2.16);
- составление поправочной таблицы  $\varepsilon_{\text{эф}}(T_O, T_{OC})$ .

Применение данной методики целесообразно для объектов с малым коэффициентом черноты  $\varepsilon$ , наличии вблизи других нагретых объектов и переотражения излучения, что предполагает поверку пирометра в условиях максимально приближенных к эксплуатации.

Для стабилизации фоновой составляющей оптической схемы пирометра  $U_0$  ( $\varepsilon_\phi$ ,  $T_\phi$ ) предлагается программным путем по датчикам температуры  $T$ , ДТ1 и ДТ2 вносить коррекцию показаний на влияние температуры среды следующим образом:

- определение характера зависимости окружающей температуры на выходной сигнал пирометра  $U_{ВЫХ}$ ;
- внесение в память микроконтроллера поправочных коэффициентов;
- определение  $U_{к.о.}(T, ДТ1, ДТ2)$  как функции от температуры оптической системы;
- осуществление коррекции  $U_{ВЫХ} - U_{к.о.}(T, ДТ1, ДТ2)$ .

Таким образом поправка на величину  $U_0$  ( $\varepsilon_{\phi 1}$ ,  $T_{\phi 1}$ ) закладывается в программное обеспечение пирометра при градуировке по модели АЧТ. Поправка на фоновую составляющую  $U_{ФОН}$  ( $\varepsilon_\phi$ ,  $T_\phi$ ) должна вводиться оперативно при калибровке пирометра в лабораторных и полевых условиях.

#### 2.1.4. Разработка низкотемпературного пирометра и его программного обеспечения

Функциональная схема разработанного пирометра представлена на рис.

2.6.

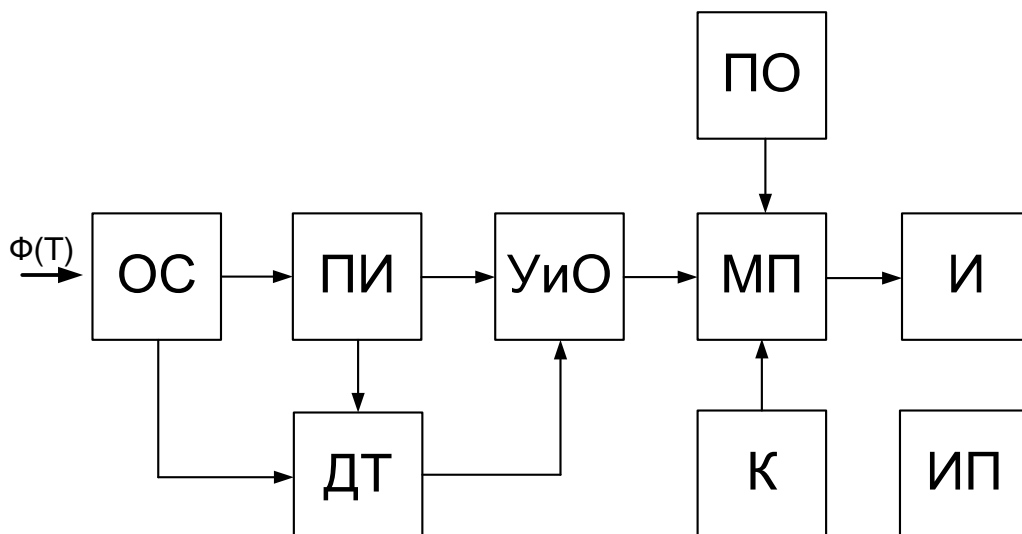


Рис. 2.6. Функциональная схема низкотемпературного пирометра:

$\Phi(T)$  – лучистый поток пропорциональный температуре ОК; ОС – оптическая система; ПИ – приемник излучения; ДТ – датчик температуры; УиО – схема усиления и обработки сигнала; МП – микропроцессор; ПО – программное обеспечение; И – индикатор; К – клавиатура; ИП – источник питания

Структурная электрическая схема низкотемпературного пирометра по функциональной схеме рис. 2.6 представлена на рисунке 2.7.

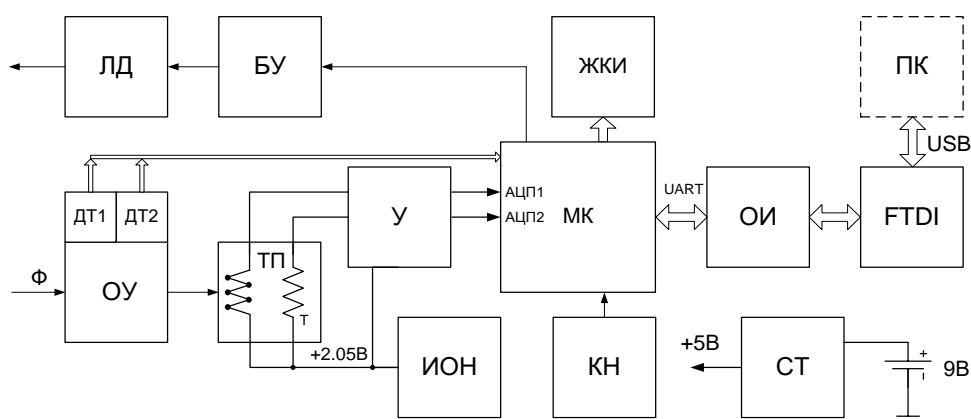


Рис. 2.7. Структурная электрическая схема пирометра:  $\Phi$  – лучистый поток, ОУ – оптический усилитель с датчиками температуры ДТ1 и ДТ2 (DS18B20), ТП – тепловой приемник (TPS434), Т – компенсационный терморезистор, У – усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер (ADUC845), ОИ – оптический изолятор, ИОН – источник опорного напряжения (REF191), КН – кнопочная станция, СТ – стабилизатор напряжения, ЛД – лазерный диод, БУ – буферный усилитель, ЖКИ – жидко-кристаллический индикатор (WH1602), FTDI – преобразователь интерфейса UART/USB (FT232B), ПК – персональный компьютер

В схеме пирометра применен микроконтроллер ADUC845 [115]. В составе ADUC845 имеются дополнительные аналоговые элементы: два сигма-дельта АЦП (с разрешением 24 бит), 12-разрядный ЦАП, источники тока, монитор источника питания. Встроенная цифровая периферия кристалла включает в себя: сторожевой таймер, счетчик временного интервала (ТИС), три таймера/счетчика и последовательные порты.

Система команд микроконтроллера ADuC845 соответствует расширенному ядру 8052, рабочая тактовая частота составляет 12.58 МГц.

Основные элементы схемы на рис. 2.7. выполнены по типовым схемам. Микроконтроллер осуществляет нелинейное преобразование входного сигнала в текущее значение измеряемой температуры, которое отображается на ЖКИ. В пирометре предусмотрена возможность коррекции показаний на изменение значения коэффициента излучения в диапазоне от 0,1 до 1,0 с дискретностью 0,01. Управление работой пирометра осуществляется при помощи 4-х кнопочной клавиатуры. Также пирометр осуществляет выдачу измеренных значений температуры в цифровой форме в стандарте RS-232C по USB.

Несмотря на применение в пирометре прецизионных операционных усилителей, необходимость установки больших коэффициентов усиления для обеспечения точности измерений при заданном показателе визирования приводит к дрейфу нуля, низкой помехозащищённости от электромагнитных полей и флуктуациям выходного сигнала в процессе измерений. В связи с этим были проведены поиск, анализ и реализация схемотехнических решений по увеличению точности и достоверности при измерении слабых сигналов в процессе бесконтактного измерения температуры. Немаловажную роль играет выбор операционного усилителя. Характеристики входного каскада однополярного операционного усилителя (как ослабление синфазного сигнала, входное напряжение смещения и его температурный коэффициент с шумами) являются определяющими параметрами для низковольтных приложений. Операционные усилители с входами «от питания до питания» должны разрешать малые сигналы даже в тех случаях, когда входы находятся под потенциалом «земли», а в некоторых случаях близко к положительному потенциалу источника питания.

Для тепловых приемников излучения различают три вида шумов: шумы источников излучения и фона, собственные шумы чувствительного элемента и шумы усилительной схемы. Шумы измерительной схемы можно

уменьшить таким образом, чтобы они не превышали собственных шумов приемника. При этом используются не только схемотехнические приемы, но и конструкторские решения [124, 49] и навыки проектирования печатных плат систем смешанной обработки сигналов [50].

Разработка электрической схемы пирометра потребовала проведения анализа схем предварительного усилителя для теплового приемника [139, 129]. Анализ характеристик ОУ показал, что наилучшими параметрами обладает операционный усилитель AD8554.

На основе рассмотренных схемотехнических решений предложена схема усилителя для теплового приемника TPS434 (рис. 2.8). Особенностью схемы является использование АЦП с двумя входами, что позволяет произвести цифровую коррекцию показаний датчика (U1) по его температуре (U2). Данное решение отличается от рассмотренных уменьшением бюджета возможных ошибок. Также для уменьшения переменной составляющей сигнала между каскадами 1 и 2 использован RC-фильтр первого порядка с частотой среза  $f_c=1/RC=10$  Гц. Для создания искусственной нулевой точки использован источник опорного напряжения +2.05 В служит специализированная микросхема REF191.

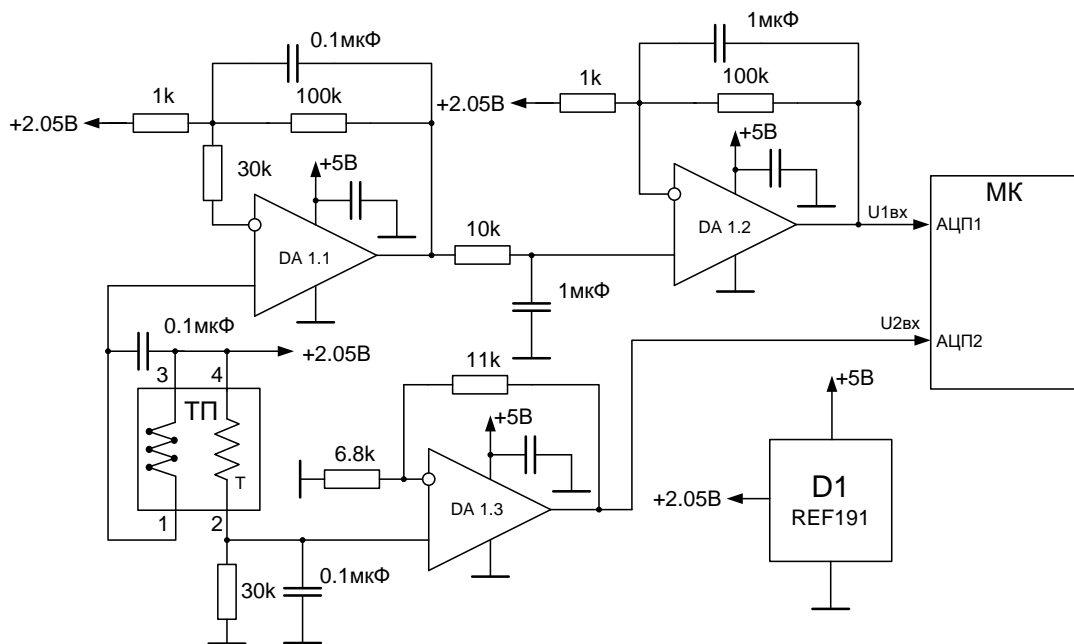


Рис. 2.8. Схема усилителя для теплового приемника на AD8554

Составление алгоритма работы микроконтроллера с учетом влияния окружающей температуры заключалось в разработке структуры программы управления микроконтроллером на основе принципиальной схемы устройства и разработанной ранее методике компенсации влияния окружающей температуры и фонового излучения. Целью разработки такого алгоритма является выделение полезной составляющей сигнала с датчика, соответствующего температуре объекта.

Общая структура разработанного алгоритма работы микроконтроллера в виде модулей-подпрограмм приведена на рис. 2.9. Алгоритм подпрограммы 7 приведен на рисунке 2.10.

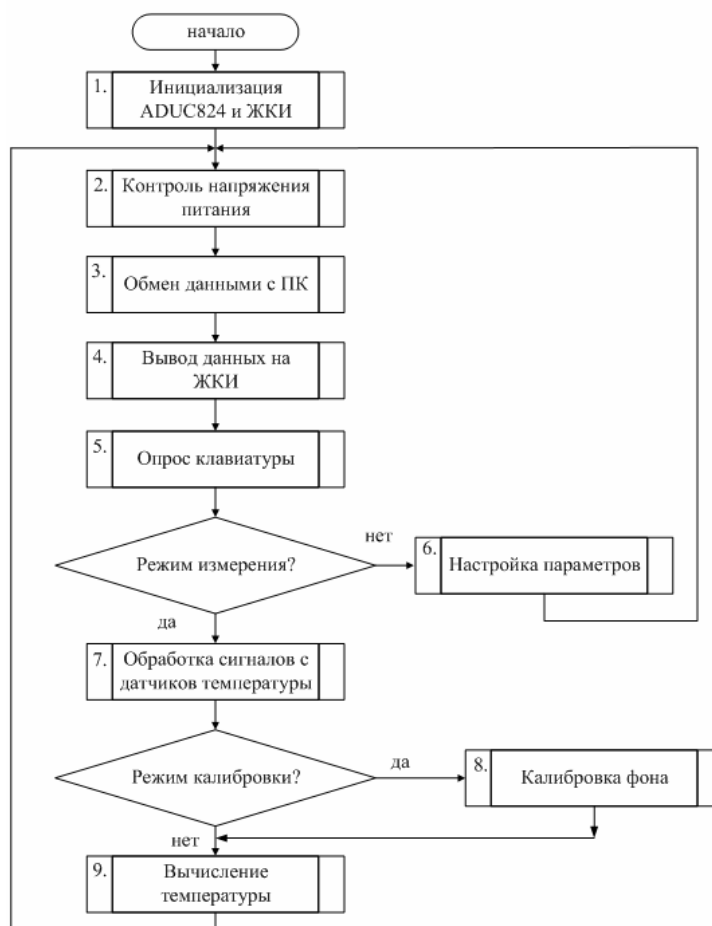


Рис. 2.9. Алгоритм работы микроконтроллера

Подпрограммы 1-6 являются типовыми [115].

Алгоритм подпрограммы обработки сигналов с датчиков температуры (рис. 2.10) состоит из нескольких подпрограмм написанных на языке низкого уровня ассемблере. Это позволяет минимизировать код и ускорить обработку сигналов для ADUC845.



Рис. 2.10. Алгоритм подпрограммы обработки сигналов с датчиков температуры

Подпрограмма 7 (рис. 2.10) представлена как:

7.1 Рекурсивный фильтр данных с каналов АЦП1 (выход  $K_{in}$ ) и АЦП2 (выход  $K_{2in}$ ) – усреднение кода по последним 16 значениям (переменная  $ST\_usred$ ) для канала температуры объекта и температуры корпуса теплового датчика соответственно.

7.2 Линеаризация кода АЦП1 методом кусочно-линейной аппроксимации. Характеристика зависимости выходного сигнала теплового датчика TPS424 имеет слабую нелинейность. В программе Mathcad произведен расчет погрешности аппроксимации и удовлетворительным являются 16 интервалов аппроксимации. Линеаризация производится в соответствии с формулой  $T_h = [(K_{in} * a_m)/FFFF + c_m]$  где коэффициенты  $a_m$  и  $c_m$  выбираются в соответствии с величиной входного усредненного кода  $K_{in}$ .

7.3 Масштабирование усредненного кода  $K_{2in}$  канала АЦП2 в соответствии с температурным коэффициентом  $B=3800$  терморезистора (встроенного датчика температуры корпуса теплового датчика TPS424) по формуле  $Tr = K_{2in} * kB$ . Окончательная величина коэффициента устанавливается при градуировке пирометра. Таким образом сигнал с датчика с поправкой на его температуру  $Td = Th - Tr$ .

7.4 Подпрограмма обработки сигнала с датчиков температуры ТД1 и ТД2 (DS18B20). Прием по однопроводному интерфейсу является типовой подпрограммой [129]. Далее в соответствии со значениями температур  $td1$  и  $td2$  и  $Th$  по алгоритму аналогичному 7.2 определяются поправочные коэффициенты  $d1$ ,  $d2$  и  $d2$  ( $td1$  и  $td2$  при этом задают масштабирующие коэффициенты). В итоге имеем  $Tr = Td * d1 * d2 - t2$ .

Поправка на данные отклонения также произведена методом кусочно-линейной аппроксимации. В программе Mathcad произведен расчет коэффициентов аппроксимации  $d1, d2$  и  $t12$ . Таким образом подпрограмма вычисления температуры на данном этапе сводится к вычислениям по следующей формуле:

$$Tr = (Th - Tr) * d1 * d2 - t12 \quad (2.18)$$

Подпрограмма калибровки фона 8 (рис.3) включается с клавиатуры в случае необходимости введения нелинейной зависимости  $\epsilon_{эф}(T_P)$  при известной температуре объекта или калибратора. При этом устанавливается максимальная температура излучателя и на остывании с интервалом  $10^\circ\text{C}$  показания температуры пирометра корректируются с клавиатуры и автоматически рассчитывается коэффициент  $\epsilon_{эф}(T_P)$ . Далее значения  $Tr$  и  $\epsilon_{эф}$  сохраняются в энергонезависимой памяти контроллера. Подпрограмма работы с флэш памятью ADUC845 написана в соответствии с [115]. Выборка коэффициента из таблицы происходит по значению  $Tr$  в соответствии с алгоритмом подпрограммы 7.2.



При измерении температуры серых тел (объектов контроля) в подпрограмму вычисления температуры 9 вводится поправка на коэффициент черноты в соответствии с по формуле:

$$T = ((T_h - T_r) \cdot d_1 \cdot d_2 - t_{12}) \cdot (1/\varepsilon_{\text{эф}})^{1/4} \quad (2.19)$$

или в случае режима калибровки на величину фонового излучения

$$T = ((T_h - T_r) \cdot d_1 \cdot d_2 - t_{12}) \cdot (1/\varepsilon_{\text{эф}}(T_p))^{1/4} \quad (2.20)$$

Разработанная программа работы низкотемпературного пирометра предусматривает возможность оперативной калибровки в условиях изменения фонового излучения и введение нелинейной поправки на эффективный коэффициент излучения.

Очевидно, что одним из основных параметров, характеризующих качество ЭКС, является его переходное сопротивление, создающее электрическое сопротивление в зоне перехода тока из одной токоведущей части в другую. Начальные переходные сопротивления электрических контактных соединений нормируются ГОСТ 10434-76 и ПУЭ, в соответствии с которыми увеличение сопротивления ЭКС в процессе эксплуатации не должно превышать 80 % от нормативного значения.

Для контроля качества электрических контактных соединений целесообразно выводить на индикатор специализированного пирометра не только результат измерения температуры контактного соединения, но и информацию о его переходном сопротивлении.

В работе [36] приведена математическая модель ТК ЭКС, на основе которой зависимость температуры ЭКС  $T_{II}$  от переходного сопротивления  $R_{II}$ . Тогда приведённая разность температур  $\Delta T_{III}$  определяется как:

$$T_{II} = BR_{II} + A \quad (2.21)$$

где  $A = T_{III}$  – температура на участке провода без ЭКС,  $B = K \cdot I^2$ ,  $K$  – коэффициент теплообмена. Для учета отклонения токов и коэффициента  $K$  в [36] предложено нормировать коэффициент  $B$  относительно номинального как

$$B^* = \frac{KI_H^2}{KI_H^2} \quad (2.22)$$

Тогда для номинального тока, протекающего через ЭКС, приведенная разность температур  $\Delta T_{III} = B^* R_{II} = R_{II}$ . Следовательно при контроле температуры  $\Delta T_{III}$  при известной величине тока  $I_K$  через ЭКС можно судить о переходном сопротивлении  $R_{II}$  через приведенную разность температур  $\Delta T_{III}$  как:

$$\Delta T_{III} = \Delta T_{II} \frac{I_H^2}{I_K^2} \quad (2.23)$$

Следовательно в алгоритм работы пирометра, предназначенного для контроля качества ЭКС, необходимо предусмотреть введение коэффициентов  $A$  и  $B$  путем измерения температуры на участке провода без ЭКС и величины токов  $I_H$  и  $I_K$ . Соответственно (2.21, 2.23) в программное обеспечение пирометра, алгоритм которого представлен на рис. 2.8, введена подпрограмма определения коэффициентов  $A$  и  $B$  и вычисления переходного сопротивления  $R_{II}$ . Оперативный расчет и вывод на дисплей пирометра значения переходного сопротивления существенно упрощает процедуру контроля качества ЭКС.

### **2.1.5. Исследования опытного образца разработанного низкотемпературного пирометра**

Градуировка разработанного низкотемпературного пирометра на основе термоэлектрического датчика потребовала использования нескольких моделей инфракрасных излучателей: абсолютно чёрного тела (АЧТ), точечного и протяженного излучателей. При этом поверочная схема предполагает также процедуру поверки модели эталонного протяженного излучателя как образцового средства 3-го разряда, путём сличения его с образцовой моделью АЧТ-165/40/100 «НПП «Эталон» при помощи образцового пирометра 2-го разряда OPTRIS 15L с последующей

градуировкой и поверкой по этим моделям пирометрических преобразователей и пирометров.

По результатам исследований макета низкотемпературного пирометра на установке для поверки пирометров и пирометрических преобразователей в соответствии с ГОСТ 8.558-2009 [27] (рис. 1.4) получена зависимость аналогового сигнала от температуры АЧТ (рис. 2.11).

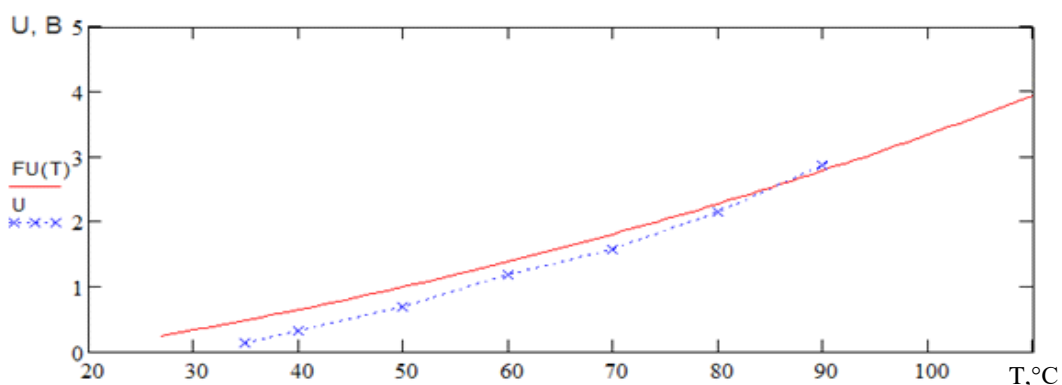


Рис. 2.11 Зависимость выходного сигнала макета низкотемпературного рефлекторного пирометра ( $FU(T)$  – расчетная,  $U$  – экспериментальная)

Основная градуировочная характеристика  $Th$  пирометра при нормальной окружающей температуре  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  по модели излучателя АЧТ (АЧТ-165/40/100) приведена на рис. 2.11. Проходные характеристики при температуре корпуса  $25, 30, 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  (датчик ТД2) также представлены на рисунке 2.12.

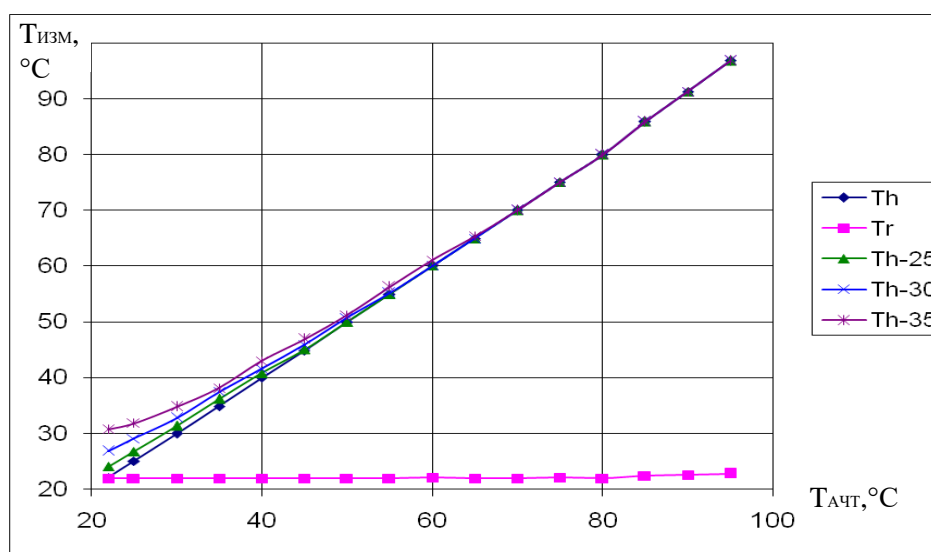


Рис. 2.12. Градуировочная характеристика пирометра  $T_h$ , температура теплового датчика  $T_r$  и градуировочные характеристики  $T_h$  при температуре корпуса 25, 30, 35 °С (датчик ТД2)

Проверка показателя визирования производилась при помощи ирисовой диафрагмы, установленной перед излучающей полостью модели АЧТ, путём уменьшения диаметра диафрагмирующего отверстия. Фиксируя минимальный диаметр отверстия, при котором при котором измеряемое значение выходного сигнала преобразователя начинает изменяться более чем на величину основной погрешности, показатель визирования определяется как отношение зафиксированного минимального диаметра диафрагмирующего отверстия  $d$  к расстоянию  $A$  между этим отверстием и входной диафрагмой пирометрического преобразователя или пирометра. Измеренный показатель визирования составил  $d:A = 0,024\text{м} : 5,5\text{м} = (1:229) \pm 4,2\%$  с доверительной вероятностью 0,95.

Практическое исследование характеристики направленности оптической системы пирометра проводилось с помощью изготовленной модели точечного инфракрасного излучателя, с разработанным микропроцессорным терморегулятором. Температура точечного излучателя составляла  $100 \pm 0.2^\circ\text{C}$ , диаметр выходной апертуры – 4 мм. Стабилизация температуры на уровне  $\pm 0.2^\circ\text{C}$  осуществлялась термопарой. Эскиз конструкции изготовленного точечного излучателя представлен в приложении Б.

В ходе эксперимента точечный излучатель перемещался вдоль оптической оси исследуемого пирометра на расстоянии  $L$  от 1 до 8 м, а перпендикулярно оси на величину  $b = \pm 6$  см с шагом 5 мм.

На рис. 2.13 представлена зависимость предварительно обработанного низкочастотным цифровым фильтром выходного кода аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера от перемещения точечного источника вдоль и перпендикулярно оптической оси пирометра. На расстоянии 6

метров диаметр поля зрения пирометра составил около 0.025 м, что соответствует показателю визирования, равным 1:240.

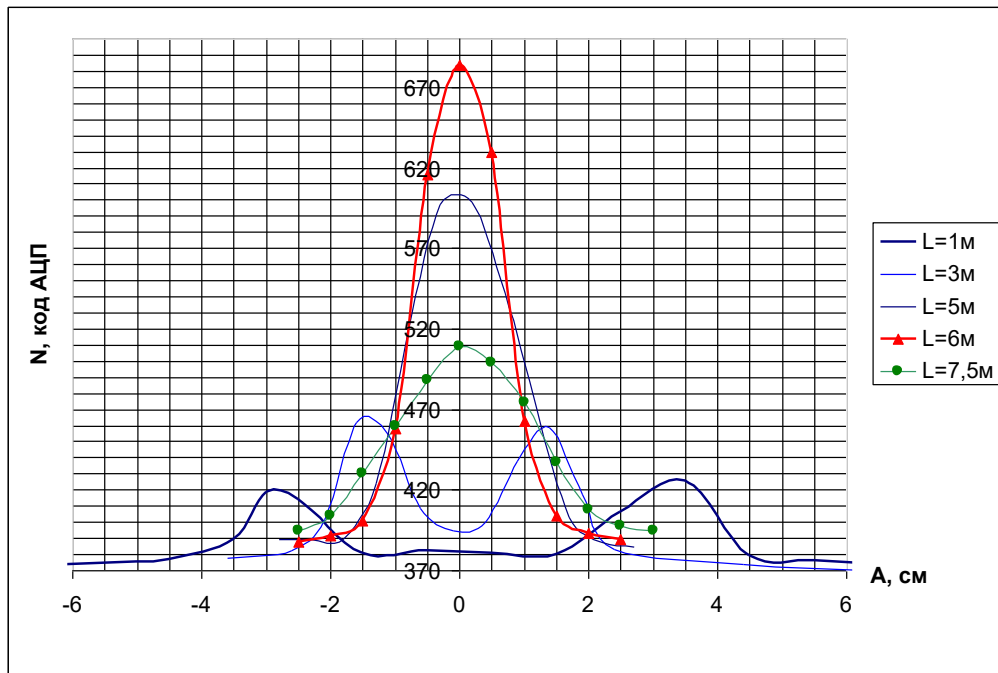


Рис. 2.13. Характеристика направленности двухзеркальной оптической системы пирометра (A- координата точечного источника излучения в плоскости отогональной главной оптической оси, L- расстояние до точечного источника по оптической оси)

Структурная схема собранной установки на основе излучателя АЧТ (АЧТ-165/40/100) производства «НПП «Эталон» для определения порогового потока приведена на рис. 2.14.

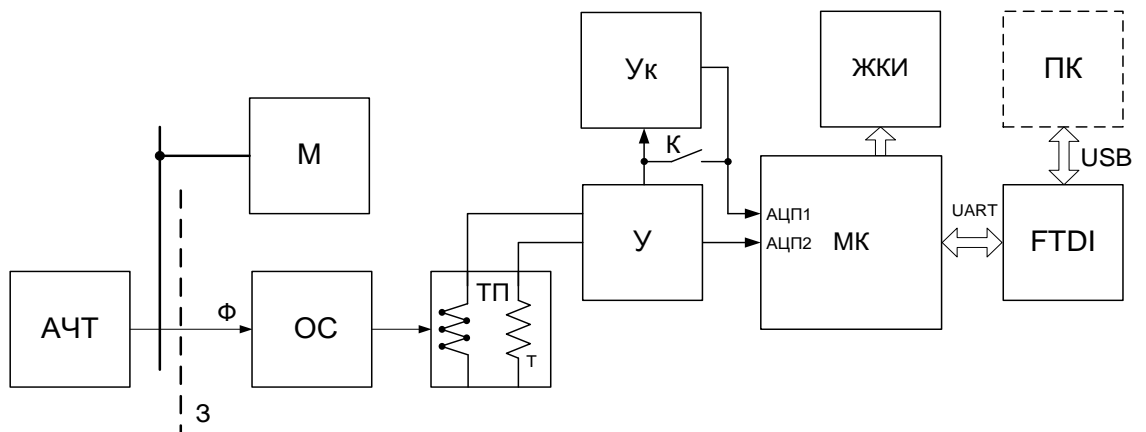


Рис. 2.14. Структурная схема установки для определения порогового потока

Измерения проводились в соответствии с методикой, приведённой в [14]. После проведения ряда замеров и усреднения результатов измерений  $U_T$  и  $u_{ш}$  пороговый поток  $\Phi_{п}$  для единичной полосы частот ( $\Delta f=1$ ) определялся по формуле:

$$\Phi_{п} = \frac{\Phi}{\bar{U} / \sqrt{\bar{u}_{ш}^2}} = \frac{\sqrt{\bar{u}_{ш}^2} S S_{п} (\Phi(\lambda, T) - \Phi(\lambda, T_0))}{(\bar{U}_T - \bar{U}_{T_0}) \pi^2 \sqrt{\Delta f}}, \quad (2.24)$$

где  $S$  – площадь излучающей поверхности (определяется по диаграмме направленности оптической схемы пирометра),  $S_{п}$  – площадь чувствительного элемента теплового приемника,  $\Phi(\lambda, T)$  – лучистый поток при температуре излучателя  $T$  в диапазоне спектральной чувствительности теплового датчика,  $\Phi(\lambda, T_0)$  – лучистый поток соответствующий окружающей температуре.

Величина лучистого потока  $\Phi_{01}$ , соответствующего разрешению  $0.1^\circ\text{C}$  для поверхности с температурой  $T$  и коэффициентом черноты  $\varepsilon$ , найдена по формуле:

$$\Phi_{01} = \frac{\varepsilon S S_{п} (\Phi(\lambda, T) - \Phi(\lambda, T - 0,1))}{\pi^2} \quad (2.25)$$

и составляет  $\Phi_{п} = 0.709$  нВт.

Исследование совокупного влияния коэффициента излучения поверхности и окружающей температуры [72,34] на результаты бесконтактного измерения температуры проводилось посредством протяженного излучателя. При этом была определена зависимость эффективного коэффициента излучения от радиационной температуры  $\varepsilon_{эф}(T_p)$  для отожженного никеля – материала протяженного излучателя (Рис 2.15.). Истинная температура поверхности излучателя была определена контактной термопарой. По кривой  $E_{эф}$  на рис. 2.15. введена поправка коррекции фонового излучения в соответствии с разработанным ранее алгоритмом. По данным эксперимента, представленным на рис. 2.16а, с введением алгоритма коррекции методическая погрешность измерения

температуры, на примере поверхности отожженного никеля, уменьшена в 3 раза. Среднеквадратичное отклонение приведено на рис. 2.16б.

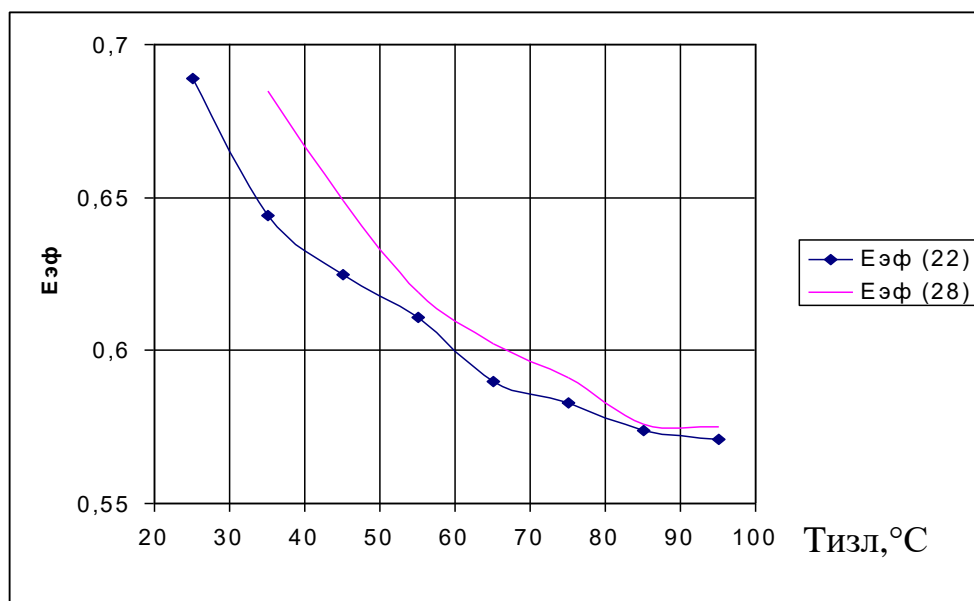


Рис. 2.15. Зависимость эффективного коэффициента излучения отожженного никеля от условной температуры фонового излучения 22 и 28 °C

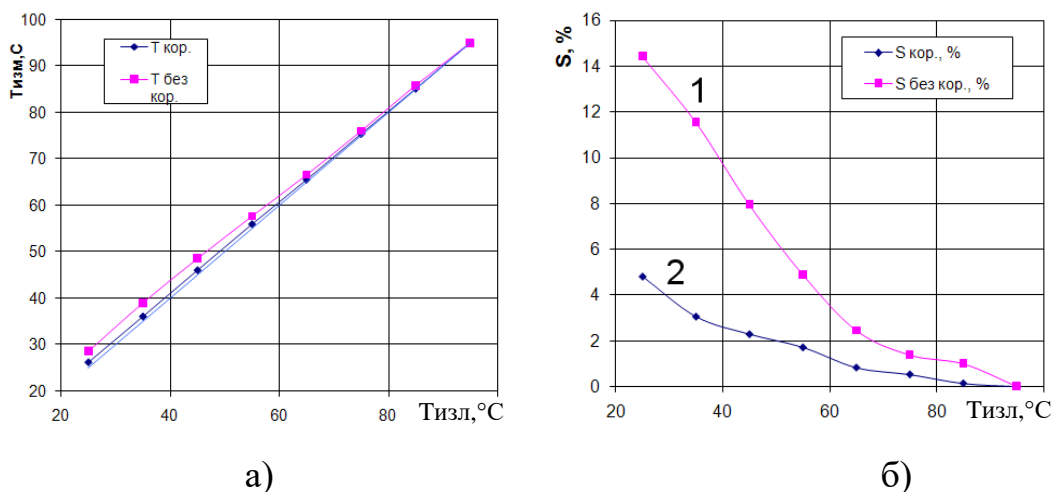


Рис. 2.16. Зависимости измеренной пирометром температуры  $T_{изм}$  от температуры поверхности излучателя  $T_{изл}$  (а) и методической погрешности измерений (б) без коррекции фонового излучения (без кор.) и с введением алгоритма коррекции (кор.) при  $T_{окр} = 19.5$  °C,  $T_f = 22$  °C

Выводы по результатам экспериментальных исследований:

Полученная величина порогового потока не превышает расчетной величины, соответствующей разрешающей способности пирометра. Разработанная схема усилителя для теплового датчика TPS434 низкотемпературного пирометра удовлетворяет поставленной задаче создания специализированного пирометра с показателем визирования 1:240 и пороговой разностью температур  $\Delta T=1$  °С.

Расчетные формулы подтверждены результатами эксперимента: полученное в результате измерений лучистого потока модели АЧТ значение интегральной чувствительности ПИ TPS424 составило 34,635 В/Вт (паспортное значение 35 В/Вт).

Проведенные исследования низкотемпературного пирометра в диапазоне температур 22-95 °С показали принципиальную эффективность алгоритма коррекции фонового излучения и уменьшение методической погрешности в 3 раза.



## **2.2. Разработка и исследование высокотемпературных пирометров на основе фотодиодов**

### **2.2.1. Анализ технических решений при проектировании высокотемпературных пирометров на основе фотодиодов**

В настоящее время для решения задач высокотемпературного теплового контроля широко применяются фотодиодные пирометры [7,73,67]. Как показано в главе 1 это пирометры с диапазоном измерения от 800 до 3000 °С. Измерение таких температур производится за счет регистрации излучения в диапазоне 0,4 – 1,5 мкм. Выбор спектрального диапазона чувствительности для таких пирометров осуществляется исходя из максимума спектральной энергетической светимости в заданном диапазоне измерения температуры в соответствии с функцией Планка или приближением Вина [101,38]. В работах [101,113] рекомендуется с целью минимизации методической погрешности измерений в заданном диапазоне температуры следует использовать ПИ с минимальной эффективной длиной волны.

В настоящее время отечественной и зарубежной промышленностью выпускается широкий спектр приборов со спектральной чувствительностью в диапазоне 0,2- 1,9 мкм. На основе ФП из кремния (Si) 0,22 – 1,15 мкм; на основе ФП из германия (Ge) 0,3 – 1,9 мкм; на основе ФП из арсенида галлия (GaAs) 0,25 – 0,75 мкм др. В разделе 1.2 приведены основные типы высокотемпературных пирометров, представленных на отечественном рынке.

В этих пирометрах используются, как правило, две основные схемы включения фотодиодов, подключенных к усилителю фототока [3]:

1. В фотогальваническом режиме на низкоомную нагрузку – режиме короткого замыкания (КЗ) без внешнего источника питания (рис. 2.17 а).

2. В режиме с обратным смещением – фотодиодном (ФД) режиме (рис. 2.17 б).

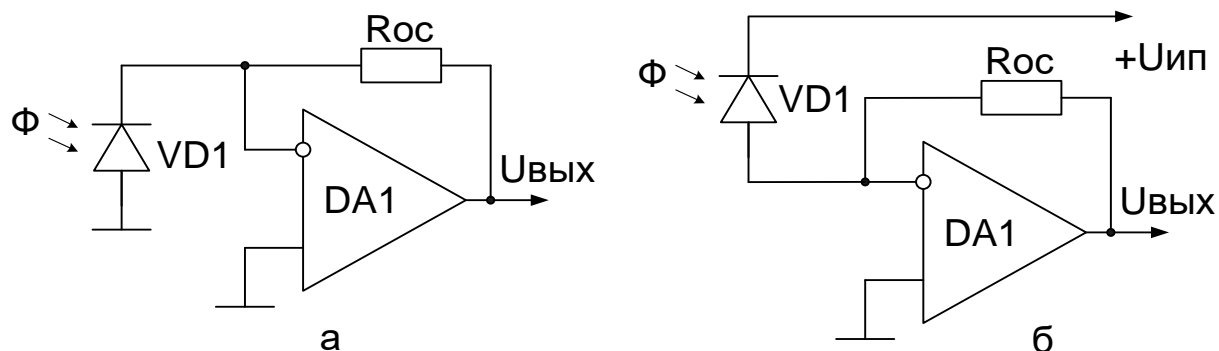


Рисунок 2.17. Схемы подключения фотодиодов к согласующим усилителям тока: а – фотодиод, работающий в режиме короткого замыкания (фотогальваническом); б – фотодиодный режим (с обратным смещением)

При включении в режиме КЗ отсутствует темновой ток и отношение сигнал-шум максимально. В фотодиодном режиме обеспечивается более высокая интегральная чувствительность и наибольшее быстродействие, обусловленное уменьшением барьерной емкости р-п перехода при обратном смещении. Однако темновой ток имеет значительную величину и зависит от температуры окружающей среды. Это приводит к нестабильности шумов и нуля измерительной схемы [50,40] и требует дополнительных схемотехнических решений по отстройке от влияния температуры среды [81,39,40].

Общим недостатком применения фотодиодных ПИ является зависимость их интегральной чувствительности от температуры [62,20,105,12], что приводит к значительным дополнительным погрешностям измерений при пирометрическом контроле технологических процессов в условиях изменения температуры окружающей среды.

Так, в результате проведенных в работе [122] исследований и данных, приведенных в [105], для интервала температур от  $-30$  до  $+60$  °С установлено изменение темнового тока кремниевого фотодиода ФД 256 в 90 раз. В этом же интервале температур темновой ток ФД7К изменяется в 110 раз, а ток короткого замыкания изменяется в пределах 50%.

Радикальным решением температурной нестабильности является применение активного термостатирования фотоприемника [32,81]. Данный метод заключается в помещении ФД в корпус термостата с нагревателем и датчиком температуры в цепи обратной связи схемы управления мощностью нагрева. Погрешность поддержания температуры должна составлять не хуже 0.1-0.2 °С [122].

Следует отметить, что применение термостата для переносных пирометров с автономным питанием нецелесообразно в виду значительной потребляемой на нагрев электрической мощности. В работах [40,41,79] представлены разработки пирометров дискретно-адаптивного типа.

Следует отметить, что в этих пирометрах обеспечивается повышенная точность термокомпенсации за счет того, что датчиком температуры среды является сам фотодиод. Тем самым исключается градиент температур между датчиком температуры и объектом термокомпенсации, уменьшая термодинамические погрешности.

В настоящее время на рынке высокотемпературных пирометров также присутствуют пирометры спектрального отношения (ПСО) [33,117,67,135]. Принцип работы пирометров спектрального отношения основан на регистрации излучения в двух и более спектральных диапазонах. Технически это реализуется либо путем применения нескольких приемников излучения, чувствительных в разных спектральных диапазонах, либо применением спектральных оптических фильтров при одном приемнике излучения.

Принцип спектральных отношений при измерении температуры позволяет уменьшить ряд неопределенностей, сопровождающих процесс пирометрических измерений: зависимость от расстояния, поглощение промежуточной средой, например, отстройка от поглощений защитным стеклом, коэффициент черноты. Однако стоимость специализированных приемников излучений остается несоизмеримо высокой, что является основным недостатком реализации и внедрения пирометров спектрального отношения. Также недостатками таких ПИ являются разные постоянные

времени отклика  $\tau$  и разное время старения фотоприемников образующих двухспектральный ПИ.

В работах [119,117] рассмотрены основные причины возникновения методических погрешностей ПСО и предложены способы их минимизации. В работах [103,104,138] представлена методика расчета инструментальной и методической погрешностей и обоснован выбор спектральных диапазонов чувствительности фотоприемников. В работе [66] указаны ограничения ПСО, использующие узкие спектральные интервалы, связанные с неоднозначной зависимостью спектральной излучательной способности ОК. В работе [123] сделан вывод о том, что для измерения температуры в широком диапазоне предпочтительнее применять приемники излучения с широким спектральным диапазоном.

В пирометрии спектральных отношений с широкой полосой спектральной чувствительности используются «тандемные» и мозаичные приемники излучений. «Тандемные» фотодиоды имеют двухслойную структуру, при этом выделяемые участки спектральной чувствительности имеют незначительные перекрытия спектральных интервалов, что предопределяет методическую погрешность измерений связанную, в первую очередь, с изменениями спектрального и интегрального коэффициентов черноты  $\varepsilon(T,\lambda)$  объекта измерения. При применении мозаичных приемников излучения спектральная селекция осуществляется за счет фоточувствительных элементов с разными спектральными чувствительностями, обеспеченными либо оптическими фильтрами либо использованием приемников излучения с различными спектральными чувствительностями. При этом фотоприемники расположены в одной плоскости. Уменьшение методической погрешности в последнем случае возможно благодаря сближению и перекрытию рабочих спектральных интервалов [104].

С целью минимизации методических погрешностей в последнее время ведется разработка методов мультиспектральной (многоканальной)

пиromетрии [66,120,127,132] основанных на одном и том же принципе: излучение ОК измеряется на различных каналах имеющих различные спектральные характеристики, и излучательная способность моделируется как функция длины волны. Применение таких методов, помимо высокой стоимости реализации, ограничивает сравнительно высокая погрешность измерений, зависящая от метода обработки сигналов и характеристик ОК [127] и возрастающая с увеличением каналов измерений [101].

### **2.2.2. Теоретические обоснования создания двухспектрального пиromетра нового типа на основе одного фотодиода**

В настоящем разделе представлены теоретическое и расчетно-экспериментальное обоснования по разработке пиromетра спектрального отношения на одном фотодиоде [91]. Новизна этого технического решения подтверждена патентом на изобретение [82].

Принцип работы пиromетра нового типа основан на предложении периодического изменения спектральной чувствительности фотодиода. Предложение основано на изменении спектральной чувствительности в зависимости от приложенного обратного напряжения (рис. 2.18) [46].

В соответствии с физикой работы p-n – перехода [46] в фотодиодном режиме работы фотодиода увеличивается коэффициент собирания неосновных носителей заряда. Это объясняется ростом ширины области объемного заряда и высотой потенциального барьера при увеличении обратного напряжения на p-n – переходе фотодиода. По сравнению с работой фотодиода в режиме КЗ спектральный максимум чувствительности увеличивается и смещается в длинноволновую область.

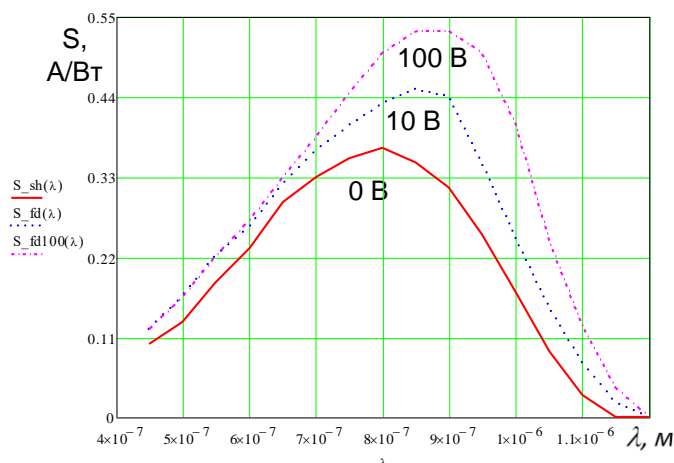


Рисунок 2.18. Изменения спектральной чувствительности кремниевого фотодиода ФД-256 от приложенного напряжения:

$S_{kz}$  – при напряжении на фотодиоде  $U_{pn}=0$  В в режиме КЗ;  $S_{fd}$  – при  $U_{pn}=10$  В,  $S_{fd100}$  – при  $U_{pn}=100$  В (фотодиодный режим при максимально допустимом обратном напряжении)

Технически использование этого эффекта предлагается реализовать путем переключения за одно измерение схем включения фотодиода: с максимально допустимым обратным напряжением и с напряжением равным нулю (режим КЗ). При этом выходной сигнал пирометра формировать как отношение выходных сигналов, полученных при разных режимах включения.

В работе [123] показано, что ПСО на базе широкополосных ПИ «может применяться для измерений температур в широком диапазоне. Предложено для расчета температуры использовать формулу Планка, поскольку формула Вина дает большую погрешность» [123, с. 48].

Теоретические расчеты проходных характеристик пирометра для каждого из режимов работы фотодиода базируются на уравнении Планка и экспериментальных функциях изменений спектральной чувствительности фотоприёмника, приведенных на рис. 2.18.

Для двух спектральных интервалов  $\lambda_1 - \lambda_2$  и  $\lambda_3 - \lambda_4$  функций спектральных чувствительностей фотоприёмников отношение выходных сигналов пирометра в соответствии с функцией Планка представляется как

$$SR(T) = \frac{I_{f1}(T)}{I_{f2}(T)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_1(\lambda)r(\lambda,T)d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} S_2(\lambda)r(\lambda,T)d\lambda}, \quad (2.2.1)$$

где  $r(\lambda,T)$  - функция Планка;  $I_{f1}(T)$  и  $I_{f2}(T)$  - фототоки для разных включений фотодиода;  $S_1(\lambda)$  и  $S_2(\lambda)$  - функции спектральной чувствительности фотоприёмника.

При этом доля полной энергетической светимости, преобразуемая фотоприемником в электрический сигнал – фототок в режимах ФД и КЗ, можно рассчитать через произведение

$$I_{fi}(T) = A \cdot \int_{0,45 \cdot 10^{-6}}^{1,2 \cdot 10^{-6}} S_i(\lambda) \cdot r(\lambda,T) d\lambda, \quad (2.2.2)$$

где  $A$  – апертурный коэффициент, учитывающий соотношение геометрических параметров между приемником и излучателем.

Апертурный коэффициент  $A = 3.142 \cdot 10^{-8}$  был найден в соответствии с выражением [125]:

$$A = \tau_o \frac{D^2 S_{\text{ФП}}}{4F^2} \left(1 - \frac{F}{L}\right)^2, \quad (2.2.3)$$

где  $D$  – диаметр объектива;  $S_{\text{ФП}}$  – площадь чувствительной площадки фотоприемника;  $F$  – фокус объектива;  $\tau_o$  – коэффициент пропускания объектива;  $L$  – расстояние от объектива до излучающего тела.

В соответствии с выражением (2.2.2) были получены расчетные зависимости фототока от температуры излучающей полости АЧТ для кремниевого фотодиода ФД-256, представленные на рисунке 2.19.

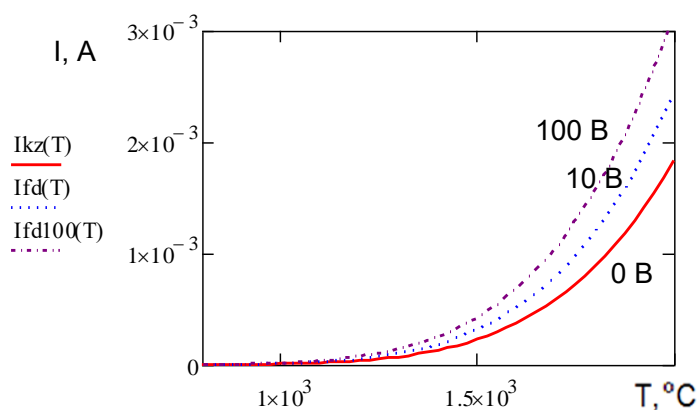


Рисунок 2.19. Графики зависимостей выходных сигналов от температуры полости АЧТ:

$I_{kz}$  – фототок при напряжении на фотодиоде  $U_{pn}=0$  В;

$I_{fd}$  – фототок при  $U_{pn}=10$  В;

$I_{fd100}$  – фототок при  $U_{pn}=100$  В

Расчетная зависимость отношения выходных сигналов  $SR(T)$  для фотодиода ФД-256, полученная как

$$SR(T) = \frac{I_{kz}(T)}{I_{fd}(T)} \quad (2.2.4)$$

приведена на рис. 2.20 а, где  $I_{kz}(T)$  – фототок в режиме короткого замыкания;  $I_{fd}(T)$  – фототок в фотодиодном режиме. Расчеты приведены в приложении А.

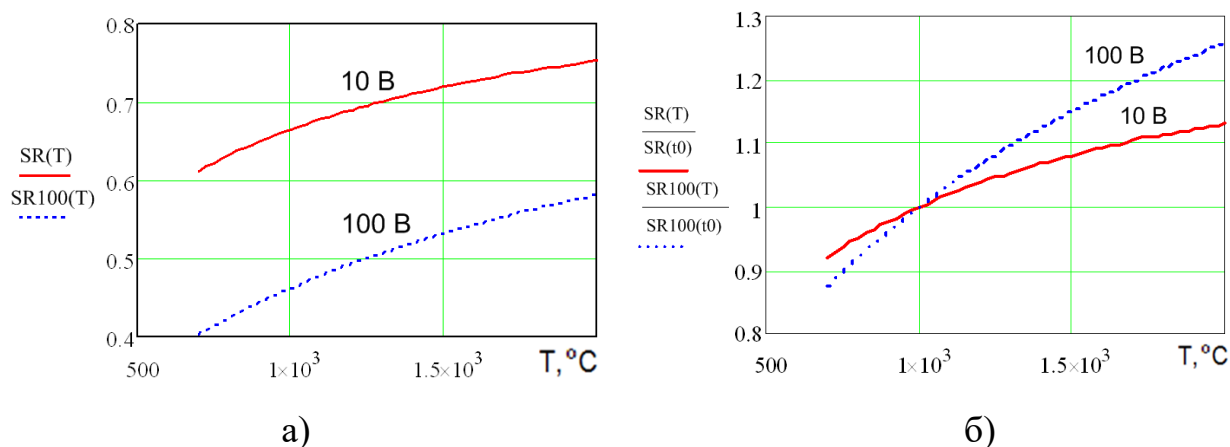


Рис. 2.20. Расчетные функции зависимости абсолютного (а) и нормированного относительно  $SR(1273)$  при  $1000^\circ\text{C}$  (б) отношения выходных сигналов пирометра от температуры полости АЧТ:  $SR(T)$  – при  $U_{pn}=10$  В,  $SR100(T)$  – при  $U_{pn}=100$  В



Как видно из рисунка 2.20 отношение сигналов  $SR(T)$  монотонно возрастает с увеличением температуры. По данным расчетов в диапазоне измеряемых температур 1000...2000 °С, представленных на рисунке 2.20 б, при обратном напряжении  $U_{pn} = 10$  В относительное изменение выходного сигнала составило 13%, а при  $U_{pn} = 100$  В соответственно 26 %.

### 2.2.3. Разработка нового типа пирометра спектрального отношения на одном фотодиоде

На рис. 2.21 представлена функциональная схема фотодиодного пирометра спектрального отношения, реализованная по предложенному способу.

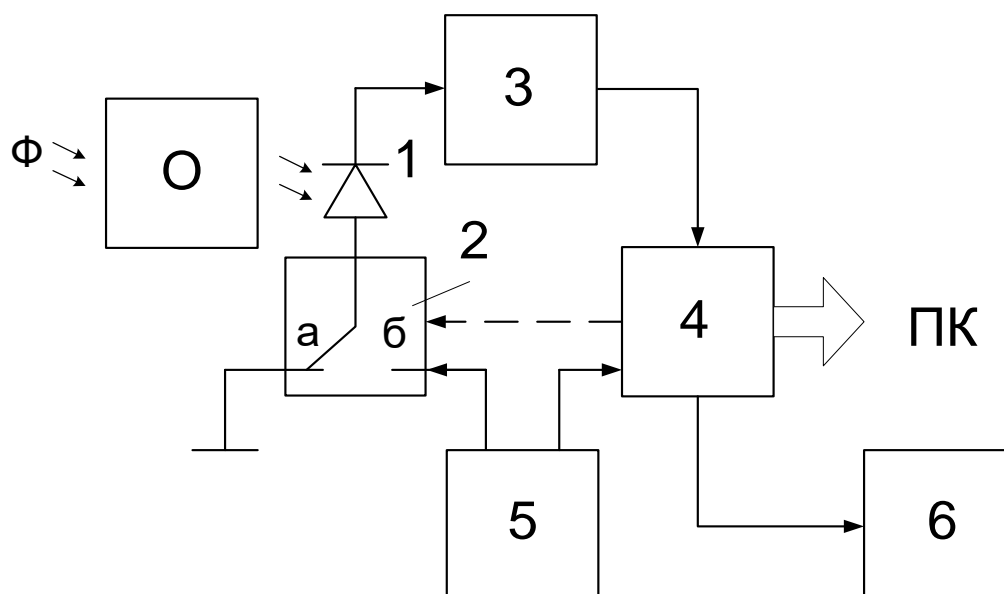


Рисунок 2.21. Функциональная схема фотодиодного пирометра спектрального отношения:

О – объектив; 1 – фотодиод; 2 – электронный ключ; 3 – усилитель преобразователь ток-напряжение; 4 – микроконтроллер со встроенным АЦП; 5 – источник питания; 6 – индикатор; ПК – персональный компьютер

Пирометр спектрального отношения работает следующим образом. Объектив О формирует изображение объекта контроля на фотодиоде 1. В первом цикле работы управляемый электронный ключ 2 по команде микроконтроллера 4 устанавливается в положение «а» и подключает фотоприемник 1 к общему проводу с нулевым потенциалом, обеспечивая фотогальванический режим короткого замыкания работы фотодиода 1, подключенного к усилителю 3. Выходной сигнал усилителя 3 считывается АЦП микроконтроллера 4 и запоминается. Во втором цикле работы по команде микроконтроллера 4 ключ 2 переводится в положение «б», обеспечивая тем самым фотодиодный режим фотодиода 1. При этом отрицательное напряжение смещения на аноде фотодиода обеспечивается источником питания 5. После этого микроконтроллер 4 вычисляет отношение выходного сигнала фотоприемника работающего в фотогальваническом режиме работы к сигналу этого же фотоприемника работающего в фотодиодном режиме. Сигнал с микроконтроллера 4 поступает на индикатор температуры 6 и персональный компьютер ПК.

По представленной на рисунке 2.15 функциональной схеме на базе фотодиода ФД-256 был изготовлен опытный пирометрический преобразователь. Для этого разработаны, изготовлены и апробированы электрические схемы усилителя 3 и электронного ключа 2.

Схема подключения фотодиода 1 к усилителю тока 3 в ПСО представлена на рисунке 2.22. Данное решение отличается от общепринятого фотогальванического режима включения (рис. 2.17 а) тем, что на анод фотодиода подается нулевой или отрицательный потенциал  $U_{pn} = -U_{пит}$ . Схема управляемого микроконтроллером 4 (МК) электронного ключа, представлена на рисунке 2.23. Ключевыми переключателями схемы являются полевые транзисторы VT3, VT4 n и p-типа с индуцированным каналом, имеющие сопротивление в открытом состоянии менее 1 Ома. Инвертирующий усилитель на ОУ с двухполярным питанием DA2 преобразует управляющий сигнал логическая «единица» от микроконтроллера в отрицательное

напряжение величиной около  $-14$  В. При этом открывается биполярный транзистор VT2 который в свою очередь открывает VT4 и подает на анод фотодиода VD1 напряжение  $U_{pn} = -15$  В. В случае если на входе инвертирующего усилителя на DA2 находится логический «ноль», открывается каскад VT1-VT3 и на аноде VD1 устанавливается нулевой потенциал  $U_{pn} = 0$  В.

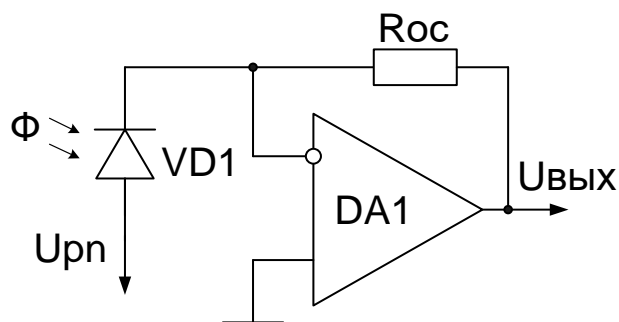


Рисунок 2.22. Схема подключения фотодиода к усилителю тока в ПСО

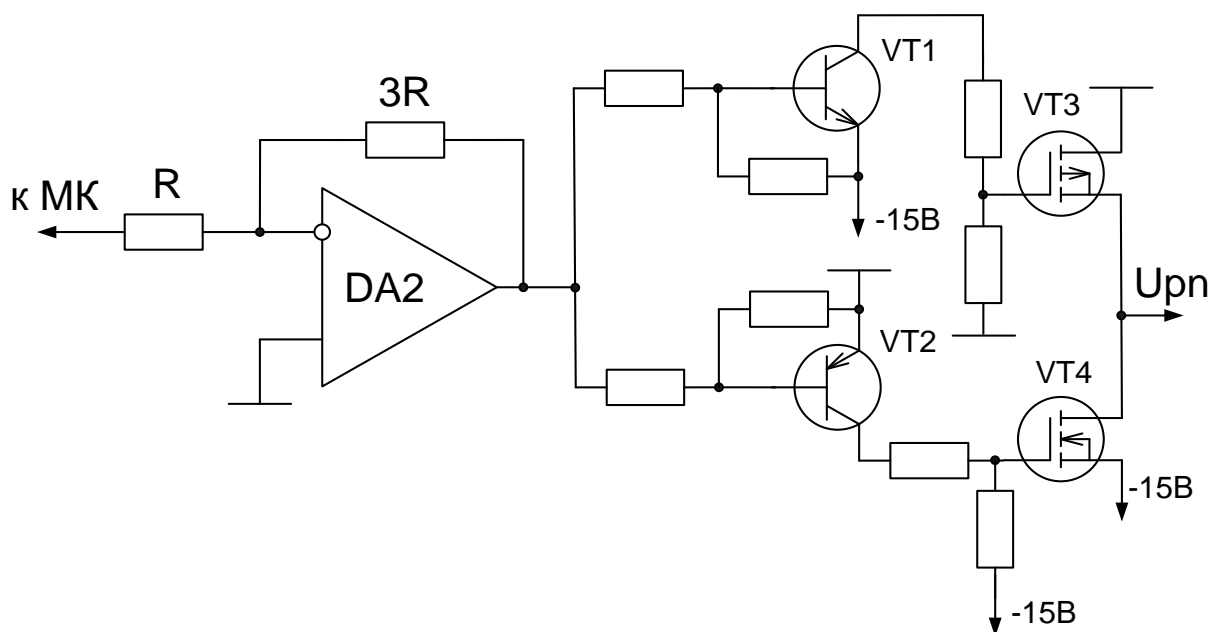


Рисунок 2.23. Схема управляемого электронного ключа

#### 2.2.4. Экспериментальные исследования пирометра спектрального отношения на одном фотодиоде

Экспериментальные исследования зависимостей  $SR(T)$  (выражение 2.2.1) от температуры  $T$  проведены на установке, схема которой представлена на рисунке 2.24. При проведении эксперимента был использован излучатель

типа модели черного тела МТП-2М-50-500 производства ОАО НПП «Эталон» (г. Омск) с регулятором температуры БУ-1М.

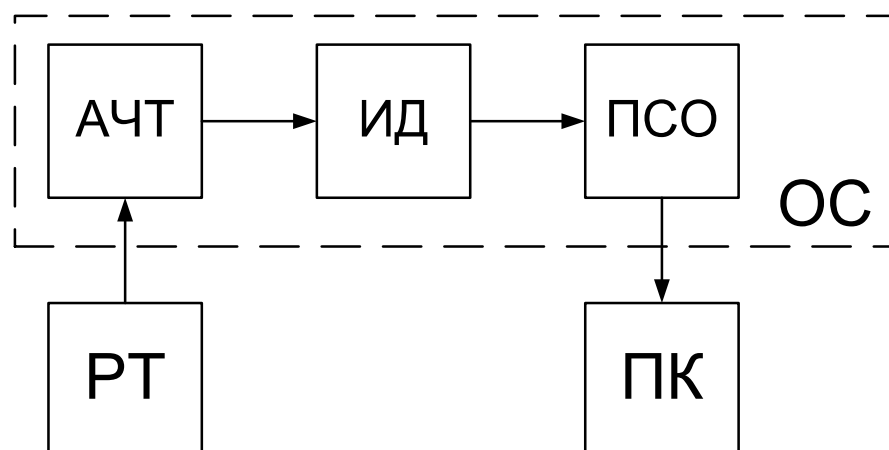


Рис. 2.24. Блок-схема экспериментальной установки исследования пирометра спектрального отношения:

АЧТ - модель абсолютно черного тела МТП-2М-50-500; РТ – регулятор температуры; ИД – ирисовая диафрагма; ПСО – пирометр спектрального отношения на одном фотодиоде, включающий в себя объектив, активный термостат фотоприемника, усилитель ток-напряжение и микроконтроллер с встроенным АЦП; ОС – оптическая скамья; ПК – персональный компьютер

На рис. 2.25. приведена экспериментальная (—) и расчетная (- - -) зависимости выходного сигнала разработанного пирометра. Приведенные зависимости нормированы относительно сигналов при температуре 800°С. Выходной сигнал пирометра спектрального отношения  $sr(T)$  получен в соответствии с выражением:

$$sr(T) = \frac{U_{kz}(T) - U_{kz0}}{U_{fd}(T) - U_{fd0}}$$

где  $U_{kz0}$  и  $U_{fd0}$  – напряжения при отсутствии излучения от АЧТ на входе пирометра.

Измерения проводились через каждые 25 градусов, вычислялись средние величины  $U_{kz}$  и  $U_{fd}$  по 10 измерениям в каждой точке. Погрешность измерений составила 5,3% при доверительном интервале 0.95. Расчетная зависимость получена в соответствии с выражениями (2.2.1)-(2.2.4) и

спектральными характеристиками чувствительности фотодиода ФД-256 при обратном напряжении 0 В и 10 В, представленными на рисунке 2.19. При проведении эксперимента величина обратного напряжения в фотодиодном режиме  $U_{pn}$  составила также 10 В.

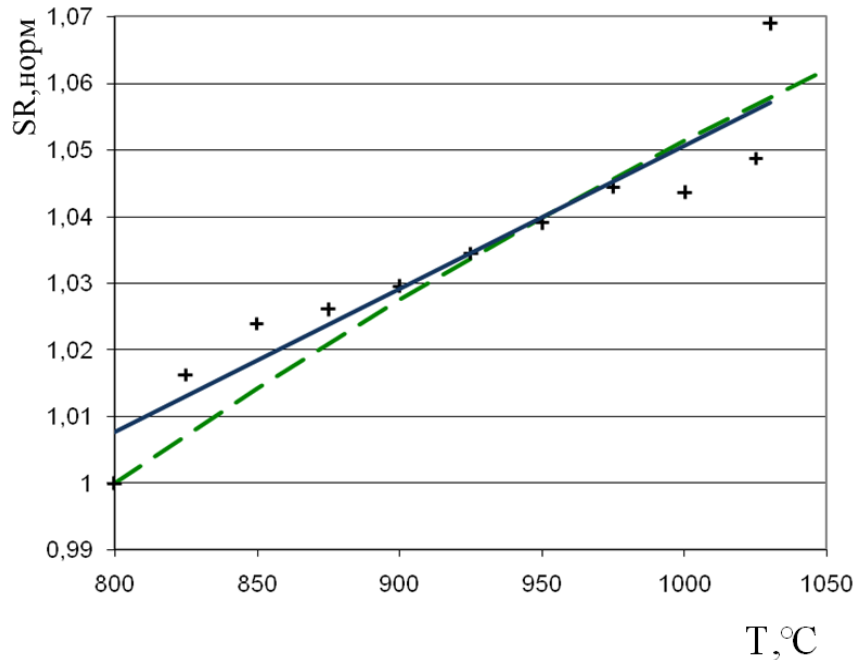


Рис. 2.25. Зависимости выходного сигнала пирометра на основе кремниевого фотодиода ФД-256 от температуры:  
расчет (---), эксперимент (—)

Для оценки изменения результатов измерений, связанных с уменьшением поля зрения пирометра, проведен опыт с изменением апертуры входной ирисовой диафрагмы. Результаты измерений приведены на рис. 2.26.

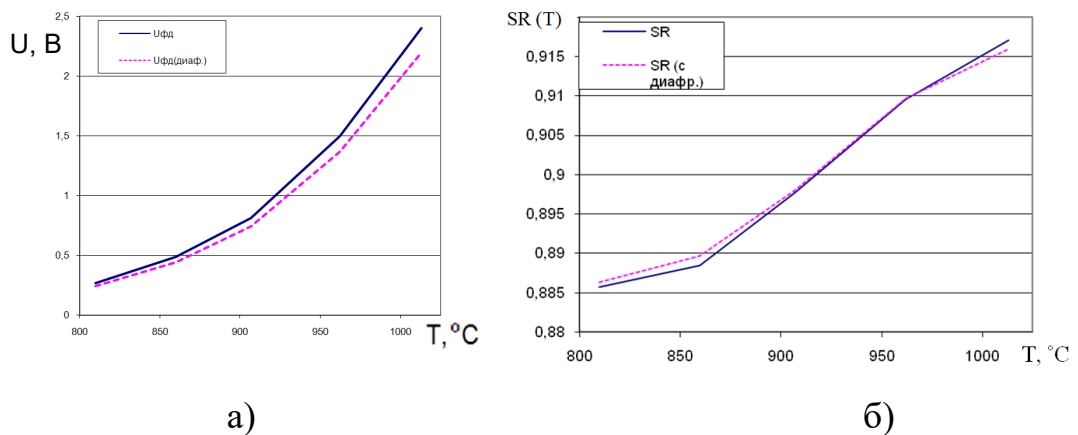


Рис. 2.26. Графики изменения выходного сигнала пирометра при изменении апертуры входной диафрагмы:

в фотодиодном режиме (а) и режиме спектрального отношения (б)

По результатам измерений в диапазоне температур: 810.. 1020 °С, приведенным на рис. 2.26, средняя величина отклонения сигнала пирометра при введении диафрагмы по 10 измерениям составила:

в фотодиодном режиме  $\delta_{ФД} = 9 \%$ ;

в режиме спектрального отношения  $\delta_{СО} = 0,7 \%$ .

Изменение поля зрения пирометра на 9 % производилось за счёт изменения диаметра его апертурной диафрагмы.

Таким образом, экспериментально подтверждено уменьшение погрешности измерений, связанной с изменением поля зрения пирометра, что подтверждает вывод о работе принципа спектральных отношений по предложенному техническому решению.

### **2.2.5. Расчётные исследования погрешностей для предложенного пирометра спектрального отношения**

Методики расчета погрешностей ПСО на широкополосном ПИ представлены в работах [101,103,104,114,135,143]. Зависимость инструментальной и методической погрешности ПСО от спектральных интервалов чувствительности ПИ и температуры ОК наиболее подробно исследована в работах Сенькова А.Г. и Фираго В.А. [103,104,138].

По данным [104] погрешность пирометра спектрального отношения увеличивается по мере уменьшения крутизны преобразования. Крутизна преобразования определяется частной производной по  $T$  отношения пирометрических сигналов  $SR(T) = I_{f1}(T)/I_{f2}(T)$ . При этом увеличение погрешности можно оценить через коэффициент кр. При измерении температуры «серых» тел этот коэффициент рассчитывается как [104]:

$$k_p(T) = \frac{K(T)}{T \cdot \left( \frac{d}{dT} K(T) \right)} \quad (2.2.5)$$

Коэффициент  $k_p$  показывает во сколько раз увеличивается погрешность измерений в пирометре спектрального отношения.

На рис. 2.27 представлены расчетные зависимости коэффициента  $k_p$  от температуры АЧТ для пирометра спектрального отношения на основе кремниевого фотодиода ФД-256, рассчитанные в соответствии с выражением 2.2.5. Расчеты приведены в приложении А.

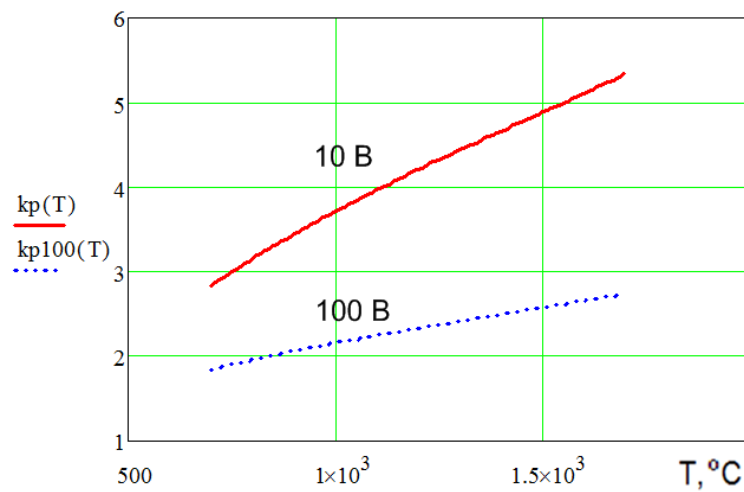


Рис. 2.27. Расчетные функции зависимостей коэффициента  $k_p$  от температуры полости АЧТ:  $k_p(T)$  – при  $U_{pn} = 10$  В,  $k_{p100}(T)$  – при  $U_{pn} = 100$  В

Относительная инструментальная погрешность  $\delta T_i$  определения температуры пирометром спектрального отношения в соответствии с [104] может быть найдена по выражению:

$$\delta T_i = k_p \cdot \sqrt{(\delta Tr)^2 + \left[ \frac{\Delta I_{1H}}{I_1} \right]^2 + \left[ \frac{\Delta I_{2H}}{I_2} \right]^2}, \quad (2.2.6)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – фототоки, соответствующие пирометрическим сигналам в разных спектральных диапазонах чувствительности фотоприемника,  $\Delta I_{1H}/I_1$  – погрешность входного тракта сигнала,  $\delta Tr$  – относительная погрешность, вызванная радиационными шумами принимаемого излучения, собственными

шумами фотоприемника и зависимостью темнового тока фотоприемника от температуры [104]:

$$\delta Tr = kp \cdot \sqrt{\frac{2q_e \Delta f}{I_1 + I_{1T}} + \frac{2q_e \Delta f}{I_2 + I_{2T}}}, \quad (2.2.7)$$

где  $\Delta f$  – полоса частот пропускания фотоприемного тракта,  $q_e$  – заряд электрона,  $I_{1T}$  и  $I_{2T}$  – темновые токи используемых фотоприемников. При использовании одного фотодиода  $I_{1T} = I_{2T} = I_T$ .

Нестабильность каналов усиления  $\Delta I_H/I$  определяется параметрами схемы усиления, разрядностью АЦП и погрешностью функции линеаризации и составляет в среднем  $\Delta I_H/I = 10^{-4}$  [49,50]. Следует отметить, что фактически фототок  $I$  является функцией от температуры и, например, для работы в фотодиодном режиме, нестабильность определяемая разрядностью АЦП:

$$\frac{\Delta I_H}{I_{fd}} = \frac{I_{fd}(T_{max}) / 2^{ne}}{I_{fd}(T)}, \quad (2.2.8)$$

где  $I_{fd}(T_{max})$  – фототок в режиме ФД при максимальной измеряемой преобразователем температуре;  $ne$  – эффективная разрядность АЦП при постоянной величине лучистого потока на входе пирометра.

После подстановки (2.2.7) и (2.2.8) в (2.2.6), зависимость инструментальной погрешности ПСО на одном фотодиоде от измеряемой температуры может быть рассчитана в соответствии с выражением:

$$\delta Gi(T) = kp \cdot \sqrt{\left( kp \cdot \sqrt{\frac{2q_e \Delta f}{I_{kz}(T) + I_T} + \frac{2q_e \Delta f}{I_{fd}(T) + I_T}} \right)^2 + \left[ \frac{I_{kz}(T_{max}) / 2^{ne}}{I_{kz}(T)} \right]^2 + \left[ \frac{I_{fd}(T_{max}) / 2^{ne}}{I_{fd}(T)} \right]^2} \quad (2.2.9)$$

По результатам проведенных расчетов относительной инструментальной погрешности для исследуемой схемы ПСО на одном фотодиоде сделаны следующие выводы:

1. Расчет погрешности  $\delta Tr$  по формуле (2.2.7) для кремниевого фотодиода ФД-256, имеющего низкий темновой ток  $I_T = 5$  нА, при  $\Delta f = 8$  Гц дает величину  $\delta Tr = 5 \cdot 10^{-5}$  при температуре АЧТ  $1000$  °С и  $2.2 \cdot 10^{-6}$  при  $2000$



°С (величины  $I$  и  $k_p$  определены из графиков представленных на рис. 2.13 и 2.21 соответственно).

2. По данным графика  $I_{fd}(T)$ , представленного на рис. 2.13, по формуле (2.2.8) произведен расчет нестабильности каналов усиления  $\Delta I_n/I$  для кремниевого фотодиода ФД-256. При эффективной разрядности АЦП  $n_e=14$  величина  $\Delta I_n/I$  составляет  $1.5 \cdot 10^{-2}$  при температуре АЧТ  $1000^\circ\text{C}$  и  $6 \cdot 10^{-5}$  при  $2000^\circ\text{C}$ . При эффективной разрядности АЦП  $n_e=16$  соответственно  $3.7 \cdot 10^{-3}$  и  $1.5 \cdot 10^{-5}$  при температуре АЧТ  $1000^\circ\text{C}$  и  $2000^\circ\text{C}$ . По данным [143] расчетная величина инструментальной погрешности ПСО также уменьшается с увеличением температуры АЧТ.

3. Оценка влияния нестабильности напряжения смещения для интегрального стабилизатора обратного напряжения типа LM7915 [136] имеющего типовую абсолютную погрешность регулирования  $\Delta U = 0,02\text{ В}$  относительная погрешность фототока  $\delta I_{fd}$  составила величину  $0.031 \dots 0.033\%$  в диапазоне  $1000 \dots 2000^\circ\text{C}$  [84].

4. Результаты аналитических расчетов по формуле (2.2.8) с использованием выражений (2.2.2), (2.2.3), (2.2.5), проведённый в среде Mathcad, представлен на рисунке 2.28. Расчетные зависимости величины относительной инструментальной погрешности  $\delta Ti(T)$  от температуры полости АЧТ получены при эффективной разрядности АЦП  $n_e=14$  (а) и  $n_e=16$  (б).

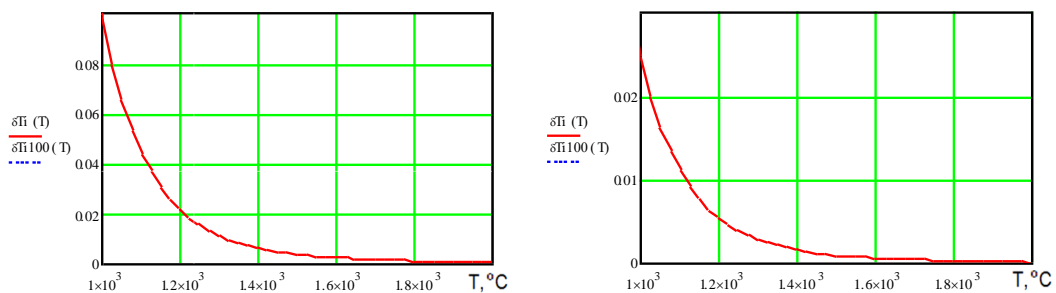


Рисунок 2.28. Расчетные зависимости относительной инструментальной погрешности:  $\delta Ti$  от температуры полости АЧТ при  $n_e=14$  (а) и  $n_e=16$  (б):  $\delta Ti(T)$  – при  $U_{pn}=10\text{ В}$ ,  $\delta Ti100(T)$  – при  $U_{pn}=100\text{ В}$

Результаты представленных расчетов позволили также сделать выводы о том, что инструментальная погрешность ПСО на одном фотодиоде, как видно из рисунка 2.28, фактически определяется нестабильностью каналов  $\Delta I_n/I$  и практически не зависит от величины обратного приложенного напряжения.

Относительная методическая погрешность  $\delta T_\varepsilon$  при измерении температуры пирометром спектрального отношения для тел с  $\varepsilon(\lambda)$  зависящей от длины волны в соответствии с [104] может быть описана выражением:

$$\delta T_\varepsilon = \left| kp \cdot \left( \frac{\varepsilon_1^{\text{эф}}}{\varepsilon_2^{\text{эф}}} - 1 \right) \right|, \quad (2.2.10)$$

где  $\varepsilon_1^{\text{эф}}(\lambda)$ ,  $\varepsilon_2^{\text{эф}}(\lambda)$  – эффективные излучательные способности [104], определяемые выражением:

$$\varepsilon_i^{\text{эф}} = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon(\lambda) S_i(\lambda) r(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_i(\lambda) r(\lambda, T) d\lambda}, \quad (2.2.11)$$

В работе на примере измерения температуры стали произведён анализ методической погрешности для предложенного ПСО.

На рисунке 2.29 по данным [131] приведен пример спектральной зависимости излучательной способности  $\varepsilon(\lambda)$  для стали.

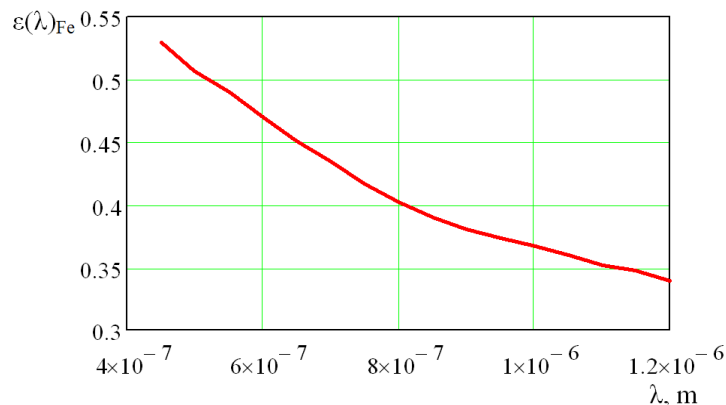


Рис. 2.29. Спектральная зависимость излучательной способности  $\varepsilon(\lambda)$  стали

Относительная методическая погрешность  $\delta T_{\varepsilon}(T)$  предложенного ПСО, рассчитанная по (2.2.10) и (2.2.11) для стали при температуре 1000 °С, составила  $\delta T_{\varepsilon}(1273) = 3,5\%$  при обратном напряжении как 10 так и 100 В. Полученное значение погрешности сопоставимо с данными расчетов для приемников спектрального отношения другого типа с аналогичными спектральными характеристиками, представленными в работе [104] :

$$\delta T_{\varepsilon}(1273) = 3,8\% \text{ для «тандемного» ПИ;}$$

$$\delta T_{\varepsilon}(1273) \approx 3 \% \text{ для «мозаичного» ПИ.}$$

Расчетные значения относительной методической погрешности  $\delta T_{\varepsilon}(T)$  при измерении температуры стали для приемников ПСО серийно выпускаемых промышленностью представлены в работе Фрунзе А.В. [118] и составляют:

$$\delta T_{\varepsilon}(1273) = 7 \% \text{ для ПИ типа Si/InGaAs;}$$

$$\delta T_{\varepsilon}(1273) = 5,1 \% \text{ для ПИ типа Si/Si.}$$

По результатам проведенных расчетов и исследований относительной методической погрешности для схемы ПСО на одном фотодиоде сделаны следующие выводы:

1. При обратном смещении  $U_{pn} = 10$  В и  $U_{pn} = 100$  В соответствующие этим напряжениям расчетные значения относительной методической погрешности  $\delta T_{\varepsilon}(T)$  и  $\delta T_{\varepsilon}100(T)$  совпадают.

2. По данным расчетов относительная методическая погрешность  $\delta T_{\varepsilon}(T)$  пирометра по предложенному решению, полученная для стали, меньше в 2 раза в сравнении с ПСО с приемником излучения типа Si/InGaAs и 1,5 раза в сравнении с ПИ типа Si/Si.

## Выводы по главе 2

1. Разработанные методики энергетического расчета и расчета оптической систем низкотемпературных пирометров могут быть

использованы для разработки диафрагменных пирометров и пирометров с малым показателем визирования с применением отечественных термоэлектрических приемников излучения.

2. Полученные результаты исследования пирометра спектрального отношения нового типа на одном ФД могут быть использованы как разработчиками пирометров нового типа, так и разработчиками приемников излучения с целью создания специализированных фотодиодов для пирометрии и других областей оптико-электронного приборостроения, обеспечивающих требуемую разность спектральных максимумов чувствительности при изменении обратных напряжений.

3. ПСО на одном фотодиоде имеет преимущества в части временной и температурной стабильности перед пирометрами спектрального отношения на двух фотодиодах, имеющих отличающиеся зависимости спектральной чувствительности от времени и температуры, что приводит к увеличению погрешности измерений в ходе эксплуатации таких пирометров.

4. Монотонное возрастание отношения сигналов  $K(T)$  от температуры (рисунок 2.14) подтверждает возможность создания пирометров спектрального отношения нового типа на основе изобретения, предложенного в [82]. Этот вывод подтвержден экспериментальными зависимостями, приведёнными на рис. 2.19.

5. Полученные расчетные значения величины инструментальной погрешности измерений сопоставимы с погрешностями пирометров спектрального отношения других типов, представленными в настоящее время на рынке, а величина методической погрешности меньше в полтора - два раза погрешностей пирометров на приемниках типа Si/Si и Si/InGaAs соответственно [118]. В сравнении с яркостным пирометром с аналогичным спектральным диапазоном чувствительности расчетная методическая погрешность, обусловленная зависимостью коэффициента излучения от температуры, представленного ПСО меньше в два раза [114].

### **3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ СРЕДСТВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

#### **3.1. Обоснование необходимости разработки калибраторов для метрологического обеспечения в пирометрии**

Учет неопределенностей, связанный с методическими погрешностями, вызванными трудностями точного учета коэффициентов излучения поверхностей, коэффициентов поглощения и рассеяния промежуточной среды представляют значительную проблему при пирометрических измерениях в промышленных условиях. Универсальные количественные оценки таких погрешностей затруднительны из-за разнообразия условий применения средств контроля температур по тепловому излучению поверхностей.

В работах [61,62,112] проведено исследование влияния погрешностей задания эксплуатационных коэффициентов пирометров и тепловизоров на точность бесконтактного измерения температуры. Представленные в [62,112] результаты расчетов на основе энергетического баланса на приемнике излучения показали, что присутствует существенная зависимость погрешностей от значений измеряемой температуры объекта контроля.

В производственной практике в соответствии с ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013 [30] получили распространение следующие способы учета коэффициента черноты и коррекции результатов измерений на коэффициент излучения [2,22,101]:

Способ 1. Необходимо образец материала, температура которого подлежит измерению пирометрическими средствами, нагреть до известной (замеренной контактным способом) температуры, а затем произвести замер этой температуры пирометром, выравнивая при этом регулировкой коэффициента передачи в электронной схеме пирометра (она должна быть предусмотрена в приборе производителем) показания пирометра под

результат измерений контактным способом. Полученный поправочный коэффициент будет учитывать коэффициент излучения материала и может использоваться в последующих измерениях температуры поверхности этого материала.

Способ 2. Необходимо просверлить в образце материала отверстие по диаметру на 20-25% больше диаметра, соответствующего полю зрения пирометра, определяемого из паспортного значения показателя визирования для расстояния между пирометром и образцом материала. Глубина отверстия должна составлять 3-5 его диаметра. Коэффициент излучения такого отверстия можно считать равным 1. Затем, замерив пирометром температуру, соответствующую излучению отверстия и температуру соседней плоской поверхности, можно найти коэффициент излучения этого материала как отношение последних показаний прибора к предыдущим. Очевидно, что при этом необходимо обеспечить равномерный нагрев в зоне отверстия и соседней поверхности, на которую визируется пирометр.

Анализ методов учета коэффициента  $\varepsilon$  в практике пирометрических измерений показал, что для введения поправки в пирометр на действительный коэффициент излучения поверхности материала объекта контроля наиболее практично использовать образец данного материала с известной температурой. Метод может быть автоматизирован и реализован в виде специализированного устройства – калибратора. Впервые в работах [36,88,80] было предложено применение пирометрических калибраторов на основе контактных измерителей температуры.

### **3.1.1. Разработка функциональной схемы модели пирометрического калибратора**

На рис. 3.1. представлена функциональная схема предлагаемой модели пирометрического калибратора (МПК). Изменение температуры образца контролируемой поверхности ОКП осуществляется нагревателем Н.

Температура нагреваемой поверхности устанавливается регулятором температуры РТ с помощью задатчика температуры ЗТ и контролируется по температуре образца, измеренной контактным датчиком температуры ДТ посредством измерителя И. Таким образом реализована система автоматического регулирования с отрицательной обратной связью.

Основным требованием к МПК является необходимость обеспечивать минимальный градиент между температурой поверхности материала объекта контроля ОКП и температурой измеряемой контактным датчиком регулятора температуры ДТ.

В работе [37] показано, что погрешность поддержания температуры поверхности, например при 100 °С, должна быть не хуже  $\pm 0.4$  °С. В конструкции калибратора должна быть предусмотрена возможность замены образцов материала объекта контроля, что позволяет использовать калибратор для различных образцов материалов при измерениях в производственных условиях.

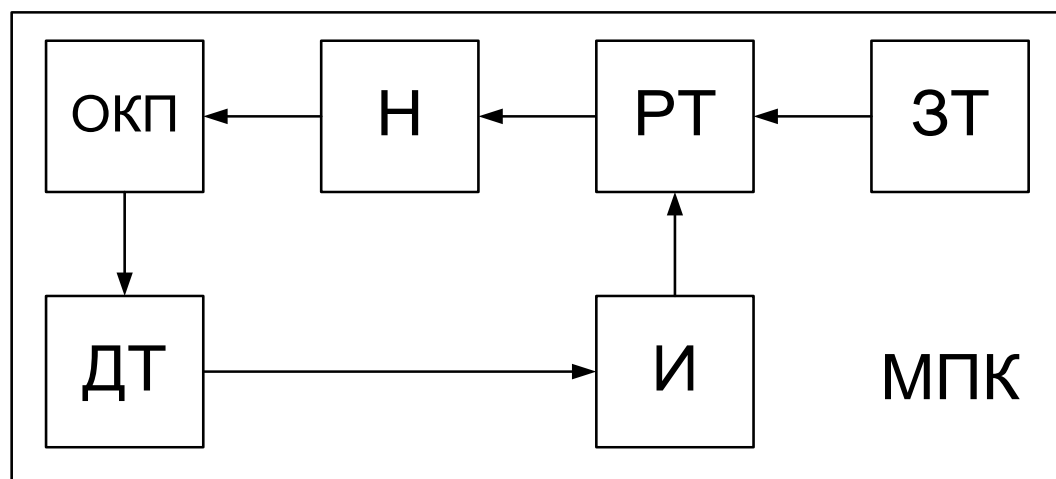


Рис. 3.1. Функциональная схема модели пирометрического калибратора: ОКП – образец контролируемой поверхности объекта контроля, идентичного материалу объекта контроля; Н – нагреватель; ДТ – датчик температуры; РТ – регулятор температуры; И – измеритель температуры; ЗТ – задатчик температуры

При условии неопределенности  $\varepsilon(\lambda, T)$  градуировку пирометров предлагается проводить не по излучателю типа модели АЧТ, а по МПК (Рис. 3.2). На такой установке градуировка пирометра будет производиться по лучистому потоку  $\Phi(T)$  с учетом неоднозначной зависимости эффективного коэффициента излучения от температуры, фактуры поверхности и спектрального диапазона чувствительности пирометра.

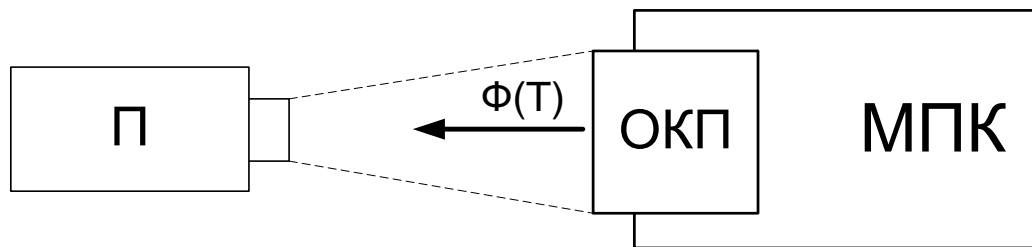


Рис. 3.2. Схема градуировки пирометра по модели пирометрического калибратора: П – пирометр;  $\Phi(T)$  – лучистый поток, пропорциональный температуре поверхности образца объекта контроля

Следует отметить также возможность использования МПК для коррекции показаний пирометра при значительной мощности фонового излучения, присутствующего в производственных условиях. Источником значительного фонового излучения могут быть расположенные близи контролируемой поверхности технологические объекты с температурой существенно превышающей температуру окружающего воздуха: трубы отопления, печи, трущиеся поверхности работающих механизмов и т.д. Величина данного излучения не поддается аналитическому учету ввиду постоянного изменения параметров теплообмена.

Современные модели пирометров позволяют установить коэффициент излучения с дискретностью не менее 0,01. Соответственно МПК должна обеспечивать определение коэффициента излучения при неопределенности  $\Delta\varepsilon = \pm 0,01$ . Для установки требований к стабильности температуры образца контролируемой поверхности в соответствии с выражением (1.10),

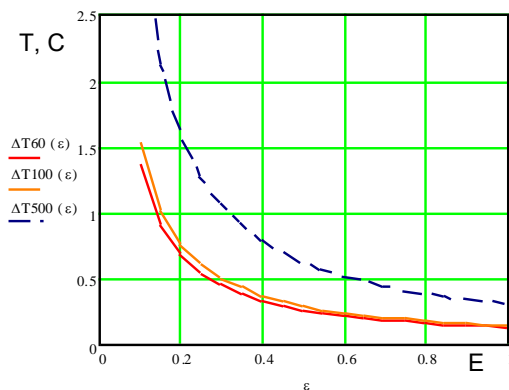


приведенным в разделе 1.3.1, произведены расчеты абсолютной погрешности поддержания температуры по формуле:

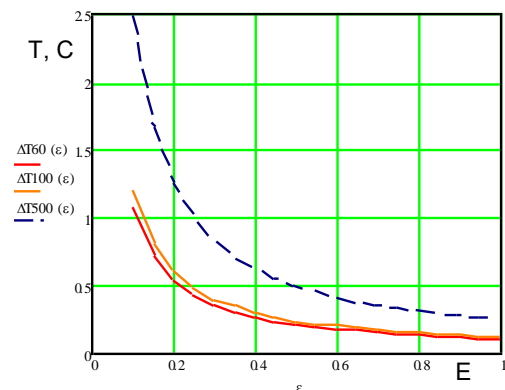
$$|\Delta T| = \frac{1}{n} \left[ 1 - \left( \frac{T_0}{T} \right)^n \right] \cdot \left| \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right| \cdot T, \quad (3.1)$$

где  $T$  – истинная температура поверхности ОК, К;  $T_0 = 27$  К – отраженная температура фона;  $\Delta \varepsilon$  - дискретность коэффициента излучения;  $\varepsilon$  - интегральный коэффициент излучения;  $n = 4.83$  – коэффициент определяемый спектральным интервалом  $\Delta \lambda = 7-14$  мкм ( $n = 10.11$  для  $\Delta \lambda = 3-5,5$  мкм).

Результаты расчетов для двух спектральных интервалов чувствительности приемника излучения при температурах поверхности ОК  $T = 60, 100$  и  $500$  °С представлены на рис. 3.3. Анализ приведенных зависимостей позволил обосновать требования, предъявляемые к погрешности  $\Delta T$  для пирометров с различной спектральной чувствительностью. При  $T=60$ °С и  $\Delta \lambda = 3-5,5$  мкм расчетная погрешность  $\Delta T$  составила 1.1, 0.2 и 0.1 °С при коэффициенте излучения  $\varepsilon = 0.1, 0.5$  и  $0.95$  соответственно. Расчетная погрешность для пирометра со спектральной чувствительностью  $\Delta \lambda = 7-14$  мкм, приведенная на рис. 3.3. а, при дискретности  $\Delta \varepsilon = 0,01$  составила 1.4, 0.3 и 0.15 °С при коэффициенте излучения  $\varepsilon = 0.1, 0.5$  и  $0.95$  соответственно.



а)  $\Delta \lambda = 7-14$  мкм



б)  $\Delta \lambda = 3-5,5$  мкм

Рис. 3.3. Расчетные значения требований к абсолютной погрешности  $\Delta T$  поддержания температуры  $T$  образца контролируемой поверхности в зависимости от его интегрального коэффициента излучения для внесения поправки на коэффициент излучения с дискретностью  $\Delta \varepsilon = 0,01$  в показания пирометра со спектральной чувствительностью а)  $\Delta \lambda = 7-14$  мкм б)  $\Delta \lambda = 3-5,5$  мкм

### 3.1.2. Исследование влияния изменения коэффициента излучения на результат пирометрических измерений

В настоящее время в пирометрии для коррекции изменения коэффициента излучения применяются таблицы с указанием коэффициентов либо для одного значения температуры либо для узкого диапазона [59]. А зависимости изменения коэффициента излучения от температуры представляются только в публикациях для частных условий измерений. При этом следует отметить, что установки по измерению коэффициента излучения от температуры и вида материалов существуют только в исследовательских лабораториях и не введены в ГОСТы по метрологическому обеспечению в пирометрии. В случае отсутствия указания конкретной модели пирометрического преобразователя применение табличных коэффициентов может привести к существенной погрешности бесконтактного измерения температуры, особенно для низкой излучательной способности контролируемых материалов.

Известно [101], что металлы имеют малый коэффициент излучения, который увеличивается с ростом температуры металла [23,59,142]. Это объясняется тем, что проводимость металлов увеличивается при нагреве, что сопровождается уменьшением коэффициента отражения электромагнитного излучения. При этом коэффициент излучения будет рассчитываться как:

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - R(\lambda), \quad (3.2)$$

где  $R$  – коэффициент отражения.

В [23] приведено уравнение зависимости спектрального коэффициента излучения  $\varepsilon(\lambda, T)$  справедливое для большинства металлов:

$$\varepsilon_{\lambda}(T) = 0.365\sqrt{\rho[1 + \alpha(T - 293)](1/\lambda)} - 0.0667\rho[1 + \alpha(T - 293)(1/\lambda)] + 0.006\sqrt{(\rho[1 + \alpha(T - 293)](1/\lambda))^3}, \quad (3.3)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление металла, Ом·м;  $\alpha$  – температурный коэффициент изменения удельного сопротивления металла;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения, м.

В настоящей работе получено графическое решение уравнения (3.3) на примере алюминия при температурах 100, 200 и 500 °С, которое представлено на рис. 3.4. Расчеты приведены в приложении А.

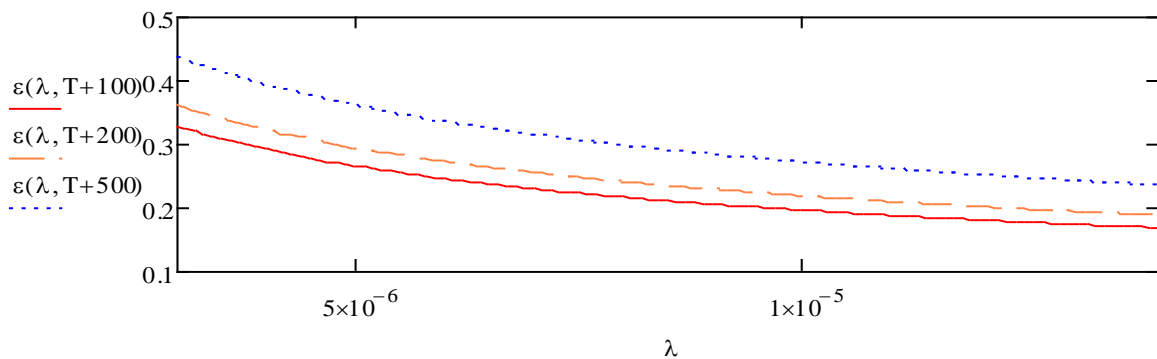


Рис. 3.4. Расчетная спектральная зависимость коэффициента излучения алюминия  $\varepsilon_A(\lambda)$  при температурах 100, 200 и 500 °С в спектральном диапазоне от 3 до 14 мкм

По зависимостям, представленным на рис. 3.4. видно, что в широком спектральном диапазоне коэффициент излучения алюминия существенно изменяется от температуры и длины волны. Например, при температуре 100 °С составил  $\varepsilon_A(3\text{мкм}) = 0.33$  и  $\varepsilon_A(14\text{мкм})=0.175$ , а при 500 °С соответственно  $\varepsilon_A(3\text{мкм}) = 0.44$  и  $\varepsilon_A(14\text{мкм})=0.245$ . В реальных условиях производства зависимость  $\varepsilon_A(\lambda, T)$  изменяется под влиянием вида обработки материала, шероховатости, окисления и загрязнения поверхности. Следовательно, использование в алгоритме работы пирометрического преобразователя

решений уравнений (3.2) и (3.3) не является достаточным условием учета реального коэффициента излучения.

Интегральный коэффициент излучения определяется в соответствии с международным стандартом [30] по классическому методу отношения мощности излучения  $F_A$ , попадающей на приемник излучения от алюминиевой поверхности при известной температуре  $T$ , к мощности излучения  $F_{AЧТ}$  попадающей на приемник излучения от АЧТ при той же температуре  $T$  как:

$$\varepsilon_A(273 + 100) = \frac{F_A(273+100)}{F_{AЧТ}(273+100)} = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \varepsilon_A(\lambda, T) \cdot (r(\lambda, T) - r(\lambda, T_0)) d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (r(\lambda, T) - r(\lambda, T_0)) d\lambda} \quad (3.4)$$

где  $\varepsilon_A(\lambda, T)$  – спектральный коэффициент излучения алюминия;  $\lambda_{max}$  -  $\lambda_{min} = \Delta\lambda$  – спектральный диапазон чувствительности приемника излучения;  $r(\lambda, T)$  – спектральная плотность яркости излучения – функция Планка;  $r(\lambda, T_0)$  - спектральная плотность яркости излучения приемника

Полученные по формуле (3.4) зависимости интегрального коэффициента излучения алюминия  $\varepsilon_A(\lambda, T)$  для спектральных диапазонов  $\Delta\lambda = 7-14$  мкм и  $\Delta\lambda_s = 3-5,5$  мкм представлены на рис. 3.5.

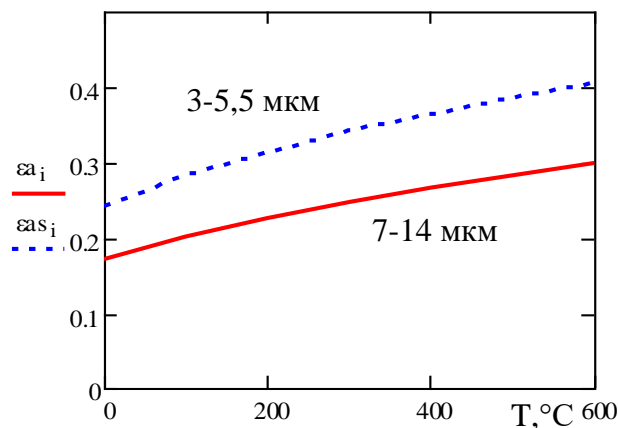


Рис. 3.5. Расчетные зависимости интегрального коэффициента излучения алюминия  $\varepsilon_A$  для спектрального диапазона  $\Delta\lambda = 7-14$  мкм и  $\varepsilon_{AS}$  для  $\Delta\lambda_s = 3-5,5$  мкм

В литературе [59] для сильно окисленного алюминия приведены значения интегрального коэффициента  $\varepsilon_A = 0,2 \dots 0,25$  в диапазоне температур  $150 \dots 500$  °С без указания типа приемника излучения. Эти данные приближенно соответствуют полученным расчетным значениям для спектрального диапазона  $\Delta \lambda = 7-14$  мкм, приведенным на рис. 3.5, где  $\varepsilon_A = 0,2 \dots 0,283$  в диапазоне температур  $100 \dots 500$  °С. Однако для относительно коротковолновых приемников излучения со спектральной чувствительностью  $\Delta \lambda_s = 3-5,5$  мкм в этом же диапазоне температур коэффициент  $\varepsilon_{AS} = 0,281 \dots 0,386$  (рис. 3.5).

Погрешность измерения температуры  $\Delta T = T_{\text{изм}} - T_{\text{ист}}$ , определяемая ошибочной установкой параметра коэффициент излучения, можно определить из уравнения (3.4), приняв  $\varepsilon_A$  за постоянную величину. При установке коэффициента излучения алюминия, определенного по АЧТ при  $100$  °С,  $\varepsilon_A = 0,2$  и проведения измерений пирометром с  $\Delta \lambda = 7-14$  мкм расчетная абсолютная погрешность измерений  $\Delta T(T_{\text{ист}})$ , представленная на рис. 3.6, составила  $130$  °С при температуре поверхности алюминия  $500$  °С. Для коротковолнового диапазона  $\Delta \lambda_s = 3-5,5$  мкм, соответственно  $60$  °С. Следовательно, для каждого типа пирометра необходимо определять зависимость интегрального коэффициента излучения от температуры.

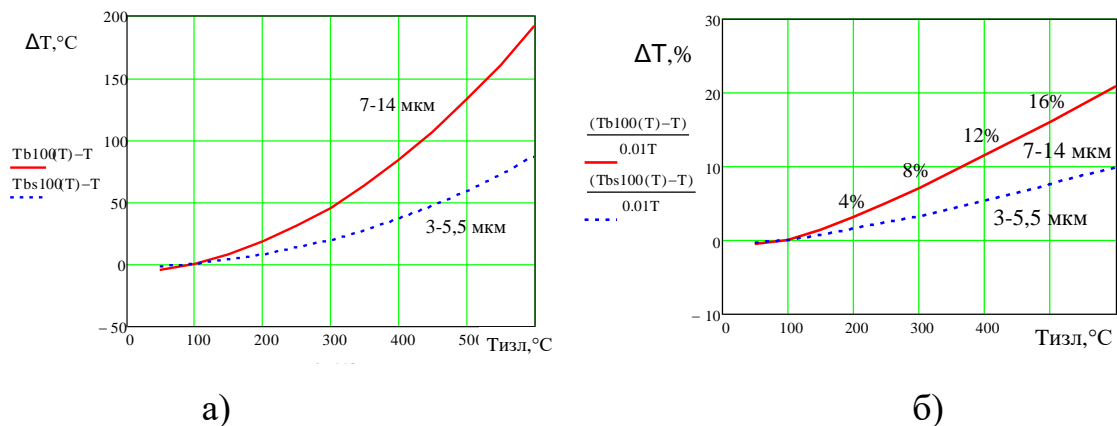


Рис. 3.6. Абсолютная а) и относительная б) погрешность при измерении температуры поверхности алюминия в диапазоне температур  $100 - 500$  °С в случае использования справочного интегрального коэффициента излучения

$\varepsilon_A(100)$  в спектральных диапазонах чувствительности  $\Delta \lambda = 7-14$  мкм и  $\Delta \lambda_s = 3-5,5$  мкм

Введение поправочных коэффициентов поэтапно в соответствии с радиационной температурой по экспериментальным зависимостям  $\varepsilon(T)$  затруднительно и также приводит к существенным погрешностям измерений. Как показывают проведенные расчеты для алюминия, результаты которых представлены на рис. 3.7, при отклонении температуры измеряемой поверхности на  $10^\circ\text{C}$  в диапазоне измеряемых температур  $100 - 500^\circ\text{C}$  возникает погрешность  $1-2^\circ\text{C}$ .

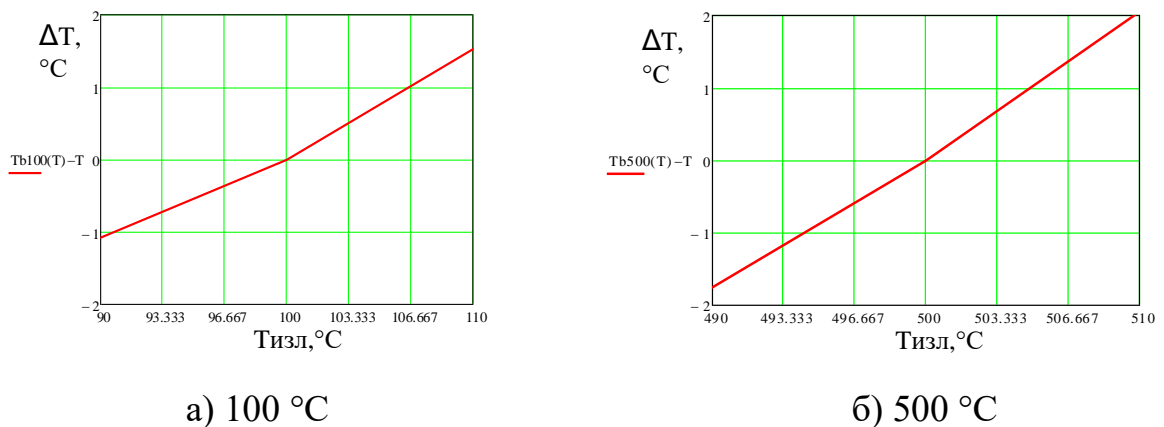


Рис. 3.7. Абсолютная погрешность определения температуры в случае использования интегрального коэффициента излучения:

а)  $\varepsilon_A(100)$  при  $100^\circ\text{C}$ ; б)  $\varepsilon_A(500)$  при  $500^\circ\text{C}$  для длинноволнового пирометра с  $\Delta \lambda = 7-14$  мкм

В результате анализа результатов представленных расчетов погрешностей измерений температуры материалов с низким коэффициентом излучения ( $\varepsilon < 0.3$ ) пирометрическим преобразователем с градуировкой по АЧТ сделан вывод о необходимости проведения градуировки средств пирометрического контроля по МПК с образцом материала объекта контроля. В противном случае методическая погрешность измерений может достигать ста процентов и более. Хотя инструментальная погрешность пирометров, отградуированных по АЧТ, может не превышать долей процента.

### 3.1.3. Исследование влияния фонового излучения на результат пирометрических измерений

Очевидно, что наличие источника излучения с высокой температурой ИФИ вне поля зрения пирометра (рис. 3.8) приводит к завышению его показаний при отражении фонового излучения от поверхности материала объекта контроля пропорционально его коэффициенту отражения  $R = 1 - \varepsilon$  (рис. 1.5)

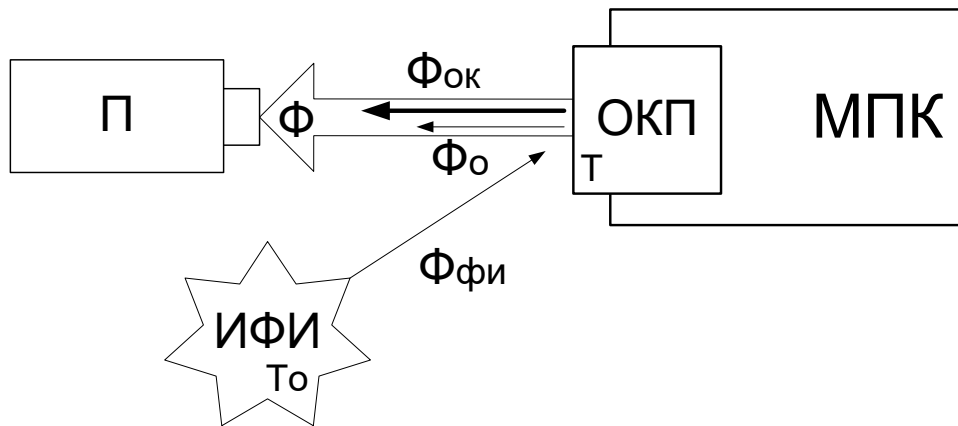


Рис. 3.8. Схема калибровки пирометра по МПК: П – пирометр; Ф – суммарный лучистый поток от поверхности МОК, попадающий в поле зрения пирометра; Фок – лучистый поток, пропорциональный температуре поверхности МОК; ИФИ – источник фонового излучения с условной температурой  $T_o$ ; Ффи – лучистый поток, соответствующий фоновому излучению; Фо – лучистый поток, отраженный от поверхности МОК.

Тогда лучистый поток на входе пирометра:

$$\Phi(T, T_o) = \Phi_{ок}(T) + \Phi_o(T_o) = A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma(T^n - T_{ши}^n) + K \cdot (1 - \varepsilon(\lambda, T)) \cdot \sigma(T_o^n - T_{ши}^n), \quad (3.5)$$

где  $T$  – истинная температура поверхности МОК, К;  $T_o$  – отраженная температура фона, К;  $T_{ши}$  – температура приемника излучения, К;  $\varepsilon$  – интегральный коэффициент излучения;  $n$  – коэффициент определяемый спектральным интервалом чувствительности приемника излучения;  $A$  – геометрический параметр визируемой оптической схемой пирометра

площади нагретой поверхности;  $K$  – геометрический параметр визируемой оптической схемой пирометра площади источника фонового излучения, отраженного от поверхности объекта контроля. Коэффициент  $K$  зависит от геометрии расположения объекта и фона [51].

В практике теплового контроля для коррекции фонового излучения определяют соответствующую ему условную отраженную радиационную температуру  $T_o$  [13,30] по методам описанным в разделе 1.4.2. Однако данные методы, с применением фольги или измерением температуры в противоположном от объекта контроля направлении, не обладают должной повторяемостью и простотой для условий производства. Кроме того большинство пирометров, применяемых в производстве, представленные в таблицах разделов 1.1 -1.3 настоящей работы, не предусматривают внесения поправки на отраженную температуру и коррекция показаний происходит изменением в настройках пирометра параметра «коэффициент излучения». В этом случае коэффициент является эффективным [23,59], что не соответствует классическим представлениям  $\varepsilon = (1-R)$ . Кроме того он имеет нелинейную зависимость от температуры ОК. Тогда в соответствии с (3.5) измеренная температура объекта контроля может быть выражена как:

$$T_{изм} = \sqrt[n]{\frac{A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma(T^n - T_{III}^n) + K \cdot (1 - \varepsilon(\lambda, T)) \cdot \sigma(T_o^n - T_{III}^n)}{\varepsilon_{эф}(\lambda, T, T_o) \cdot \sigma}}, \quad (3.6)$$

где  $\varepsilon$  - интегральный коэффициент излучения;  $\varepsilon_{эф}$  - эффективный коэффициент излучения.

В соответствии с выражениями 3.4 и 3.5 в работе произведены оценочные расчеты влияния отраженной температуры фона на эффективный коэффициент излучения и абсолютную погрешность измерений при соотношении геометрических параметров объекта и фона  $A=K/10$ .

На рис. 3.9. представлены зависимости  $\varepsilon_{эф}(T)$  для алюминия при температурах фонового источника излучения 60 и -20 °С для приемников



излучения со спектральными диапазонами чувствительности  $\Delta \lambda = 7-14$  мкм и  $\Delta \lambda_s = 3-5,5$  мкм. Относительные погрешности измерений, рассчитанные при тех же условиях, для пирометра имеющего коррекцию показаний на излучательную способность алюминия в зависимости от температуры  $\varepsilon_A(\lambda, T)$  представлены на рис. 3.10.

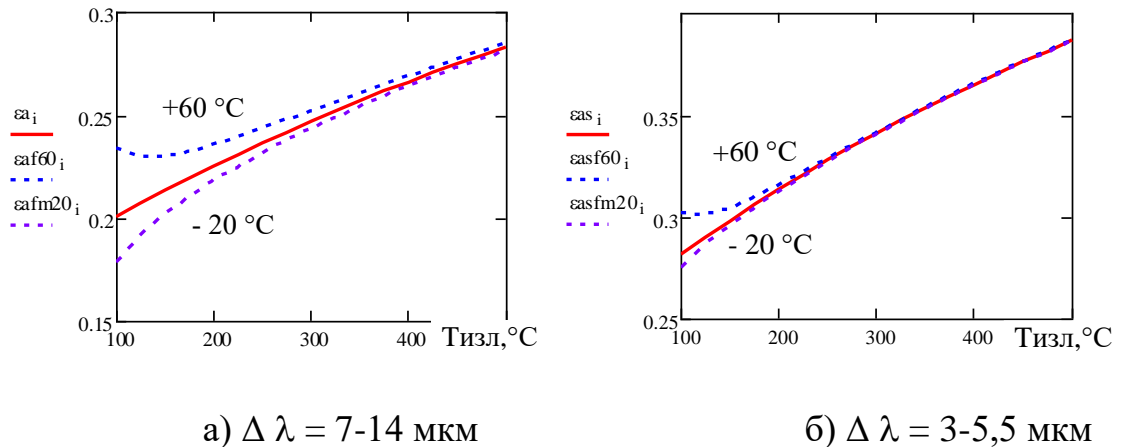


Рис. 3.9. Расчетные значения эффективного коэффициента излучения  $\varepsilon_{эф}$  для алюминия в диапазоне температур 100-500 °C при температурах фона  $T_0 = 60$  и  $-20$  °C в спектральных диапазонах чувствительности а)  $\Delta \lambda = 7-14$  мкм и б)  $\Delta \lambda_s = 3-5,5$  мкм

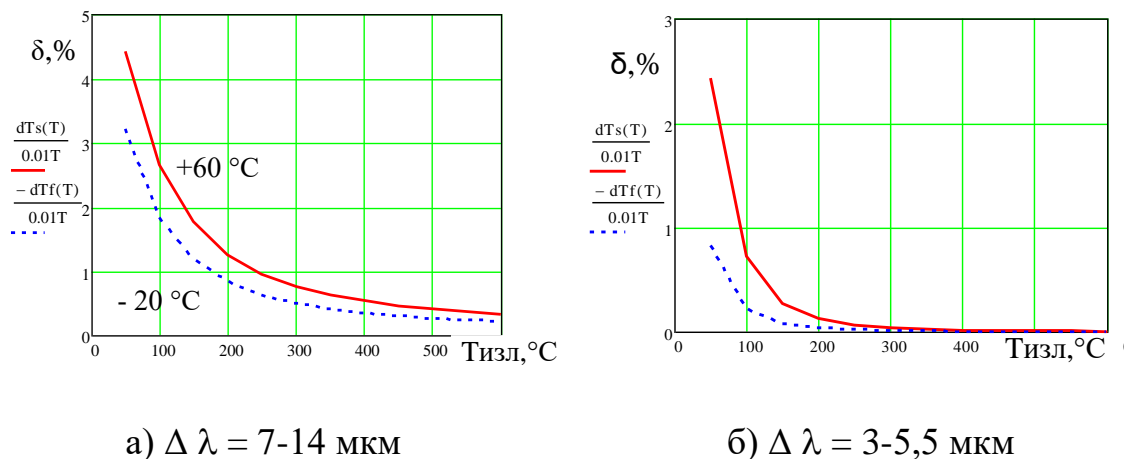


Рис. 3.10. Расчетные значения относительной погрешности  $\delta, \%$  определения температуры алюминия пирометром имеющим коррекцию  $\varepsilon_A(\lambda, T)$  в диапазоне температур 100-500 °C при температурах фона  $T_0 = 60$

(—) и  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (- - -) в спектральных диапазонах чувствительности а)  $\Delta\lambda = 7\text{-}14\text{ мкм}$  и б)  $\Delta\lambda_s = 3\text{-}5,5\text{ мкм}$

Анализ представленных на рис. 3.9 и 3.10 расчетных зависимостей показал, что в цеховых условиях даже при отсутствии мощных источников фонового излучения с высокой температурой методическая погрешность измерений будет более 1% в диапазоне до  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  для пирометра со спектральной чувствительностью  $\Delta\lambda = 7\text{-}14\text{ мкм}$ .

Представленные расчеты позволяют сделать вывод о том, что для пирометров, имеющих градуировку по модели излучателя типа АЧТ и имеющих возможность изменения параметра «коэффициент черноты», коррекцию погрешности вносимой фоновым излучением предлагается компенсировать экспериментальным определением зависимости  $\varepsilon_{\text{эф}}(\lambda, T_p)$  при постоянной  $T_0$  посредством модели пирометрического калибратора.

В соответствии с выражениями 3.4 и 3.5 эффективный коэффициент излучения определяется по уравнению:

$$\varepsilon(\lambda, T_p) = \frac{T_p^n}{T_{\text{И}}^n}, \quad (3.7)$$

где  $T_{\text{И}}$  – истинная температура поверхности МОК, К;  $T_p$  – радиационная температура измеренная пирометром имеющим градуировку по АЧТ, К;  $n$  – коэффициент определяемый спектральным интервалом чувствительности приемника излучения.

## 3.2. Разработка, исследование и применение калибраторов

### 3.2.1. Разработка калибратора на основе конструкции термопары

Для практической реализации устройства для калибровки была разработана конструкция излучателя-калибратора для метрологического обеспечения пирометров в цеховых условиях на диапазон измерения от комнатной до 500 °С.

Конструктивно калибратор выполнен на основе хромель-копелевой термопары, на чехол которой намотан нагреватель из нихромовой проволоки в керамических бусах, помещённый в теплоизоляцию (рис. 3.11) В конструкцию торца чехла термопары смонтирована головка излучения, в которую устанавливаются образцы материалов фрагментов или деталей контролируемых поверхностей.

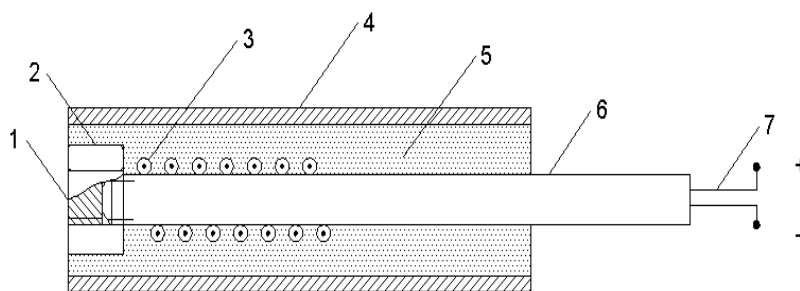


Рис. 3.11. Конструктивное исполнение излучателя-калибратора:

1 – образец контролируемой поверхности; 2 – гайка; 3 – нагревательный элемент в керамическом изоляторе; 4 – дюралевый кожух; 5 – теплоизолятор минеральная вата; 6 – термопара; 7 – «холодные» концы термопары

Образец контролируемой поверхности 1 калибратора-излучателя нагревается от нагревательного элемента 3 через чехол термопары и охлаждается в результате естественного конвективного теплообмена. Следовательно, температура поверхности излучения будет меньше температуры измеренной термопарой. При этом разность температур измеренной спаем термопары  $T_t$  и температуры на поверхности образца  $T_r$

будет зависеть от типа материала, толщины образца и коэффициента конвективного теплообмена.

Для установления соответствия температуры поверхности излучателя  $T_r$  с температурой  $T_t$ , измеренной термопарой с обратной стороны излучающей поверхности, в среде Mathcad на основе методических рекомендации в [111] произведены расчеты задаваемой температуры  $T_t$  в зависимости от толщины образца для однослойной плоской вертикальной стенки при заданном коэффициенте теплопроводности материала и граничных условиях I и III рода (рис. 3.12).

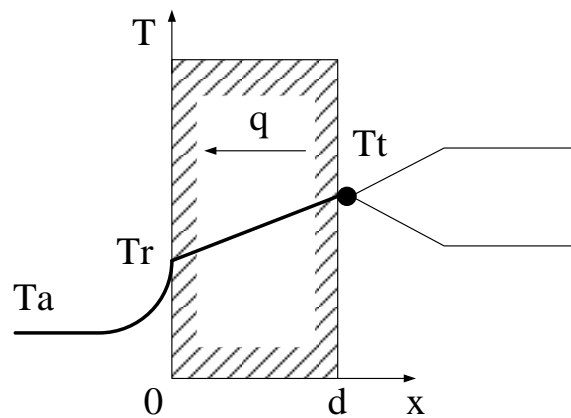


Рис. 3.12. Плоская стенка с граничными условиями I и III рода:  $T_r$  – температура охлаждаемой поверхности стенки;  $T_t$  – температура нагреваемой поверхности стенки;  $T_a$  – температура окружающего воздуха;  $d$  – толщина образца

В стационарном режиме излучателя плотность теплового потока в соответствии с законом Фурье определяется выражением [111]:

$$q = \frac{\lambda_w}{d}(T_t - T_r) = \alpha(T_r - T_a), \quad (3.8)$$

где  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности материала образца, Вт/м·К;  $d$  – толщина образца, м;  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена воздуха, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $T_r$  – температура охлаждаемой поверхности стенки, К;  $T_t$  –

температура нагреваемой поверхности стенки, К;  $T_a$  – температура окружающего воздуха, К.

Коэффициент теплообмена в воздушной среде находится на основе теплофизического моделирования [111] как:

$$\alpha = \frac{Nu_h \cdot \lambda_a}{h}, \quad (3.9)$$

где  $Nu_h$  – критерий Нуссельта;  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности воздуха при заданной температуре  $h = 0.01$  – высота поверхности.

Например, для материала со средней величиной теплопроводности (сталь 45,  $\lambda_w = 32$  Вт/м·К) в результате решения уравнения (3.8) и (3.9) получены зависимости разности температур поверхности и измеренной термопарой  $\Delta tw(d) = T_t - T_r$  от толщины образца материала, которые представлены на рис. 3.13, для температур поверхности  $T_r = 70, 200$  и  $500$  °С.

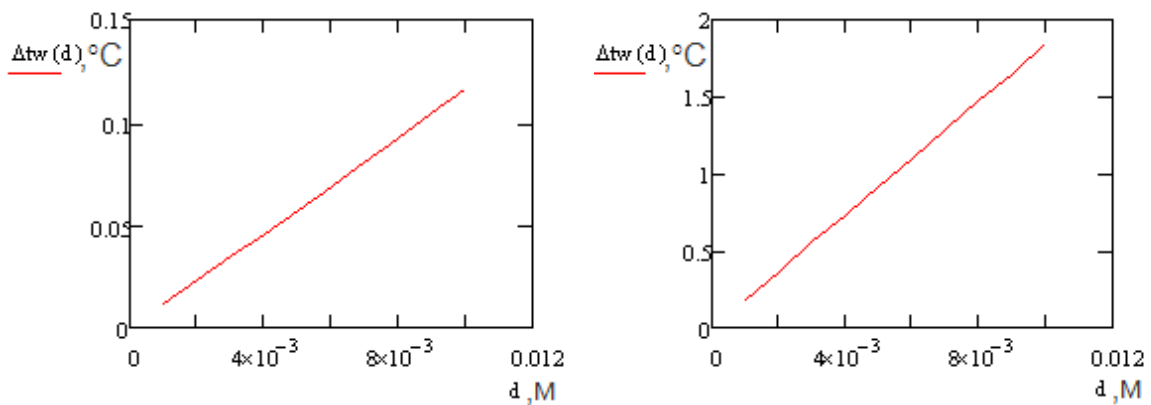


Рис. 3.13. Расчетная зависимость разности температур  $\Delta tw$  от толщины  $d$  образца «сталь 45» обусловленная конвективным теплообменом при температуре излучающей поверхности  $T_r$ : а)  $70$  °С; б)  $500$  °С

Полученные зависимости  $\Delta tw(d)$ , приведённые на рис.3.2.3 позволяют вносить поправки в процедуру калибровки пирометров по МПК на конвективный теплообмен.

Следует отметить, что в реальных эксплуатационных условиях температура среды может изменяться от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это приведёт к изменениям расчетных значений  $\alpha$  от 6,1425 до 18,23 Вт/м<sup>2</sup>·к. Значения  $\alpha$  при изменении температуры окружающей среды, рассчитанные на основе теплофизического моделирования [111], представлены в таблице 1 приложения А.

Разработанная модель пирометрического калибратора осуществляет нагрев и стабилизацию температуры образца контролируемой поверхности излучения в соответствии с функциональной схемой, приведенной на рис. 3.14.

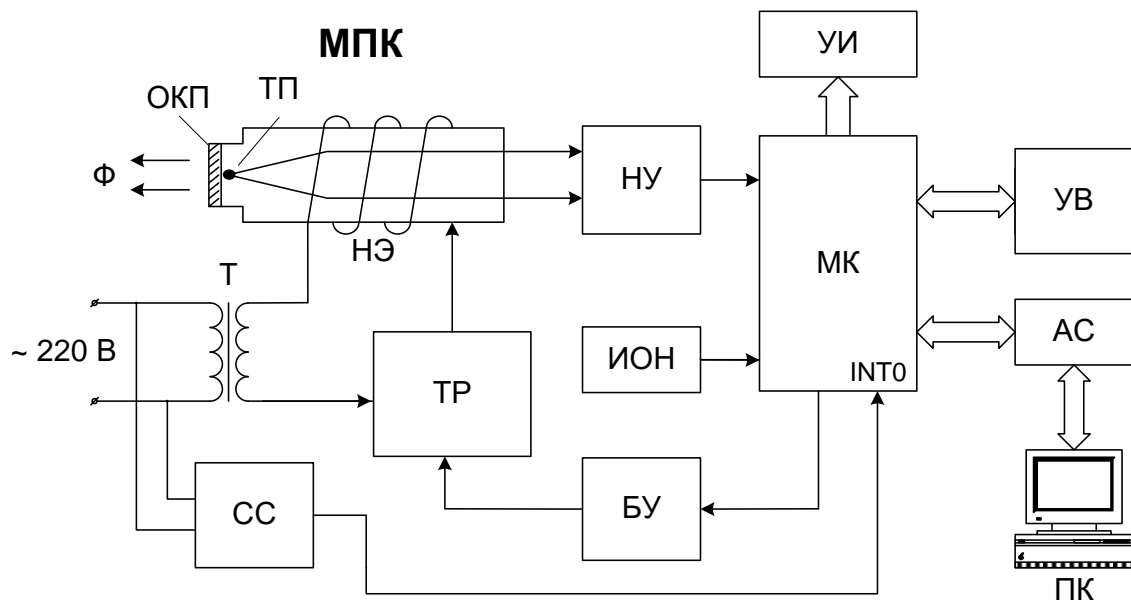


Рис. 3.14. Функциональная схема МПК

МПК – модель пирометрического калибратора,  $\Phi$  – лучистый поток, ОКП – образец материала контролируемой поверхности, ТП – термопара, НЭ – нагревательный элемент, ТР – твердотельное реле, НУ – нормирующий усилитель, МК – микроконтроллер, УИ – устройство индикации, УВ – устройство ввода, АС – адаптер связи, ПК – персональный компьютер, ИОН – источник опорного напряжения, БУ – буферный усилитель, СС – схема синхронизации с сетью, Т – трансформатор

Алгоритм работы схема терморегулятора описан в публикациях по теме настоящей диссертации [86,87,85].

Результаты расчётной оценки погрешности кусочно-линейной аппроксимации, проведенные в среде MathCad, представлены на рис. 3.15.

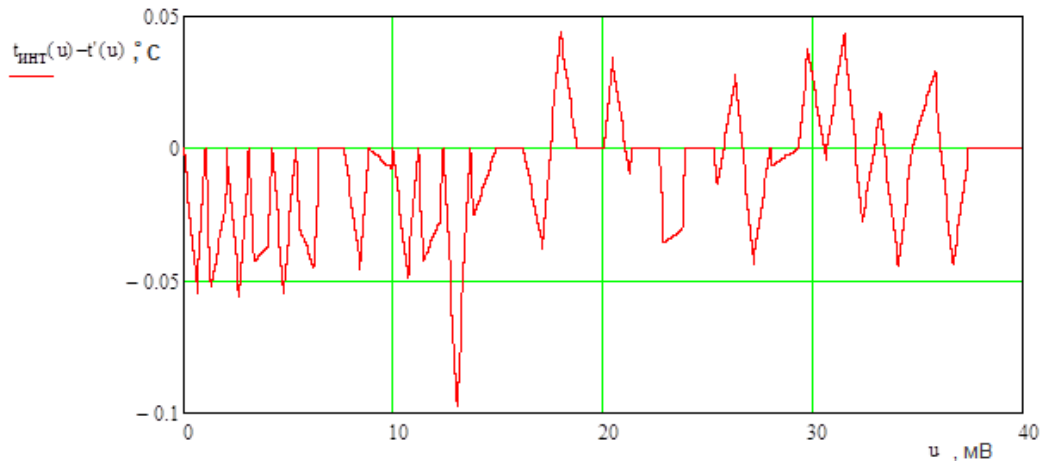


Рис. 3.15. Зависимость ошибки функции интерполяции градуировочной характеристики термопары ТХК

Из графика на рис. 3.15 следует, что при кусочно-линейной интерполяции градуировочной характеристики термопары ХК с количеством интервалов 32, погрешность измерения температуры не превышает 0,1 °С. Температурное разрешение в динамическом диапазоне 60 - 500 °С составляет соответственно 0,011 - 0,009 °С при эффективной разрядности АЦП 16 разрядов (Рис. 3.16.).

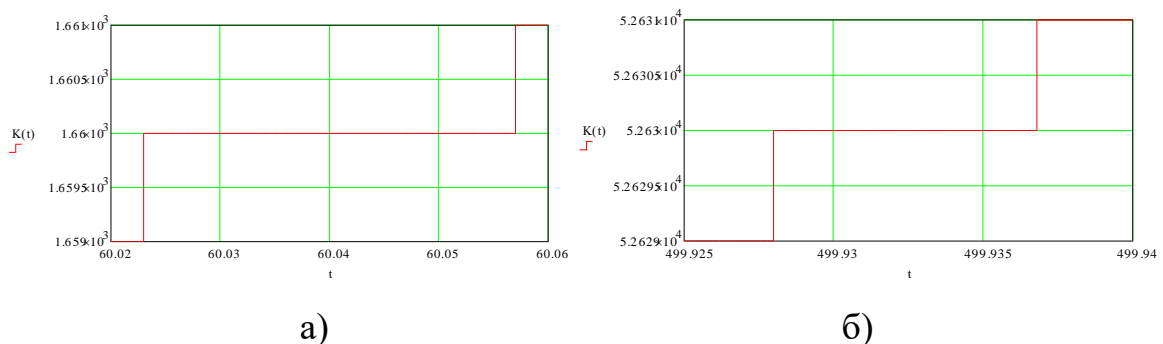


Рис. 3.16. Расчетная погрешность дискретизации при эффективной разрядности АЦП 16 разрядов при температуре: а) 60 °С; б) 500 °С

Диапазон регулирования разработанной модели калибратора составляет 60...500 °С. Погрешность поддержания температуры поверхности составляет:  $\pm 0.4$  °С в диапазоне 60...100 °С;  $\pm 0.15$  °С в диапазоне 400...500 °С. Это позволяет в практике измерений получить экспериментальные значения величины эффективного коэффициента излучения контролируемой поверхности для коррекции показаний пирометра с точностью превышающей дискретность  $\Delta\varepsilon = 0.01$ . Представленная модель калибратора применима в лабораторных и цеховых условиях и может быть рекомендована для введения в технологические регламенты калибровки средств ТК по излучению поверхностей с неизвестными коэффициентами излучающей способности.

### **3.2.2. Результаты экспериментальных исследований эффективности применения калибратора**

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по оценке параметрической погрешности измерений, связанной с ошибкой установки эффективного коэффициента излучения.

Для пирометра Optris CT LT15 (Германия) с  $\Delta\lambda = 8-14$  мкм, имеющего градуировку по АЧТ, проведена коррекция показаний в соответствии с выражением (3.7). Зависимость  $\varepsilon_{\text{эф}}(T)$  от температуры поверхности алюминия, измеренной контактным способом в калибраторе, приведена на рис. 3.17. В соответствии с классическим радиометрическим методом измерения коэффициента излучения [77] нижняя граница температурного диапазона измерений принята как  $T = T_{\text{пи}} + 20$  °С.



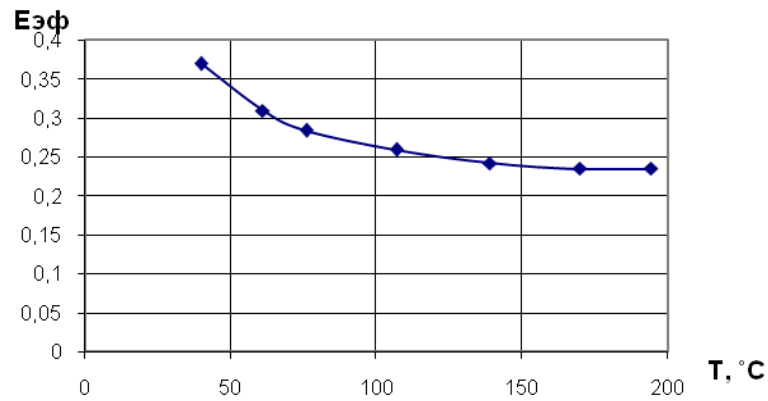


Рис. 3.17. Экспериментальная зависимость  $\varepsilon_{эф}(T)$  от температуры поверхности алюминия при температуре приемника излучения  $T_{пи} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и температуре окружающей среды  $T_0 = 24 \text{ }^\circ\text{C}$

Результаты экспериментальных исследований методической погрешности измерений, возникающей при отсутствии поправки на фоновое излучение  $\varepsilon_{эф}(T)$  и неточном введении поправки на эффективный коэффициент излучения  $\varepsilon_{эф}(T) \pm \Delta\varepsilon$ , проведённых с помощью модели пирометрического калибратора, представлены на рис. 3.18., 3.19. и 3.20.

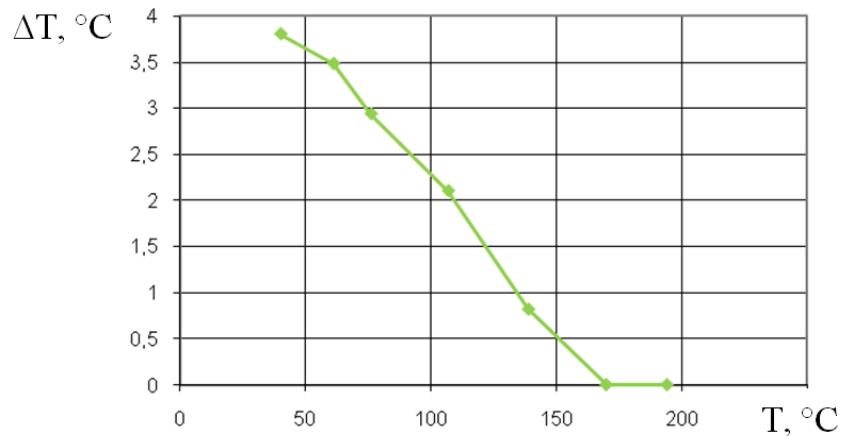


Рис. 3.18. Абсолютная погрешность измерений  $\Delta T$  пирометра Optris CT LT15 при отсутствии поправки на фоновое излучение ( $\varepsilon = 0.24 = \text{const}$ )

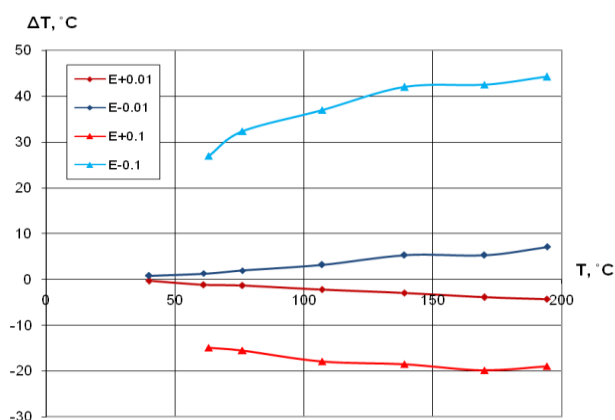


Рис. 3.19. Абсолютная погрешность измерений  $\Delta T$  пирометра Optris СТ LT15 при ошибке установки параметра коэффициент излучения

$$\Delta \varepsilon = \pm 0.1 (\blacklozenge) \text{ и } \Delta \varepsilon = \pm 0.01 (\blacksquare)$$

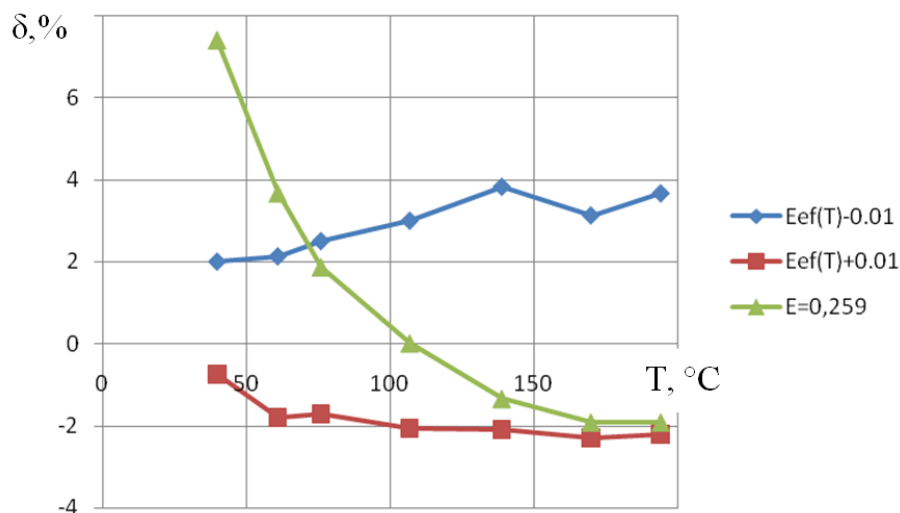


Рис. 3.20. Относительные погрешности измерений  $\delta, \%$  пирометра Optris СТ LT15 при ошибке установки параметра коэффициент излучения  $\Delta \varepsilon = \pm 0.01$  и отсутствии поправки на фоновое излучение в зависимости от температуры ( $\varepsilon = 0.259 = \text{const}$ )

По результатам проведенного эксперимента, представленным на рис. 3.20, относительная методическая погрешность измерений температуры поверхности пирометром Optris СТ LT15 при минимальной ошибке установки параметра коэффициент излучения  $\Delta \varepsilon = \pm 0.01$  в диапазоне температур 40-200 °C составила  $\delta_{\text{мет}} = 0.5 \dots 4\%$  при заявленной

инструментальной погрешности  $\delta_{\text{инс}} = 1\%$ . При отсутствии поправки на фоновое излучение  $\varepsilon_{\text{эф}}(T)$  и установке величины параметра коэффициент излучения  $\varepsilon = 0.259$ , определенном при  $107\text{ }^{\circ}\text{C}$ , показания пирометра завышены в нижнем диапазоне температур на  $7.4\%$  при  $40^{\circ}\text{C}$  и занижены на  $2\%$  в верхнем диапазоне.

Для тепловизора Flir E60 (США) с  $\Delta\lambda = 7\text{-}14\text{ мкм}$ , имеющем функцию компенсации отраженного фонового излучения, проведено исследование погрешности измерений, связанной с увеличением интегрального коэффициента излучения алюминия от температуры. Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 3.21. При окружающей температуре  $24,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  по методу диффузного отражателя [30], определена условная отраженная температура, равная  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Измеренные значения температуры введены в настройки тепловизора. Коэффициент излучения поверхности алюминия при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , измеренной контактным способом в калибраторе, составил  $\varepsilon = 0.25$  для данной модели тепловизора.

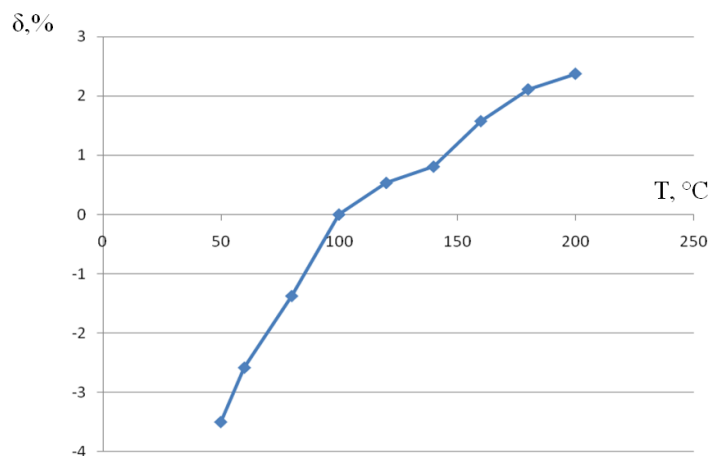


Рис. 3.21. Относительные погрешности измерений  $\delta, \%$  тепловизора Flir E60 при  $\varepsilon = 0.25$  и компенсации отраженной температуры

По результатам проведенного эксперимента, представленным на рис. 3.21, относительная методическая погрешность измерений температуры поверхности алюминия тепловизором Flir E60 составила  $\delta(50) = -3,5\%$  при уменьшении температуры ОК на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительно температуры, при

которой определен коэффициент излучения, и  $\delta(200) = +2,4 \%$  при увеличении температуры на  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно.

Таким образом, представленные результаты исследований доказывают целесообразность применения предложенной модели пирометрического калибратора в производственных условиях. Это позволит производить калибровку средств ТК в цеховых условиях с учетом неопределенности коэффициента излучения ОК и влияния на показания пирометра источников фонового излучения.

### **3.2.3. Применение калибратора в специализированном пирометре компенсационного типа**

На основе предложенной модели калибратора при участии автора настоящей работы на каф. «Электроника» ОмГТУ создан опытный образец пирометра компенсационного типа [90] со встроенным образцом излучающей поверхности. Пирометр создан на основе патента [80] в основе которого использована схема со следящим уравниванием [21,22]. В такой схеме происходит сравнение двух лучистых потоков, попадающих на приёмник излучения пирометра, от двух источников: от объекта контроля с измеряемой радиационной температурой, от встроенного источника (калибратора) с поверхностью излучения идентичной поверхности излучения ОК. При этом нагрев образца поверхности, температура поверхности которого измеряется контактным датчиком, производится за счёт уравнивающего тока по цепи отрицательной обратной связи. При равенстве лучистых потоков от контролируемой поверхности и от излучателя измеряется температура образцовой поверхности и, таким образом, определяется температура излучения поверхности объекта контроля.

В основе такого пирометра лежит предложение использования калибратора, разработка которого представлена в подразделе 3.1. Исследования практической реализации МПК, представленные в подразделе

3.2, позволили реализовать конструкцию встроенного в пирометр автономного излучателя в виде калибратора.

Известно применение калибратора в виде пирометрической лампы в высокотемпературном телевизионном пирометре [48], относительная погрешность которого не превышает 1%.

Функциональная схема установки для исследования основных параметров пирометра компенсационного типа со встроенным калибратором приведена на рис. 3.22. Он состоит из излучающей поверхности объекта контроля ОК, температура которого задается нагревательным элементом НЭ и измеряется при помощи образцовой термопары ТП и пирометра с встроенным калибратором (ПВК). При этом встроенный источник излучения И<sub>о</sub> ПВК и ОК имеют идентичные излучающие поверхности с возможностью замены образцов излучающей поверхности в ПВК (рис. 3.22).

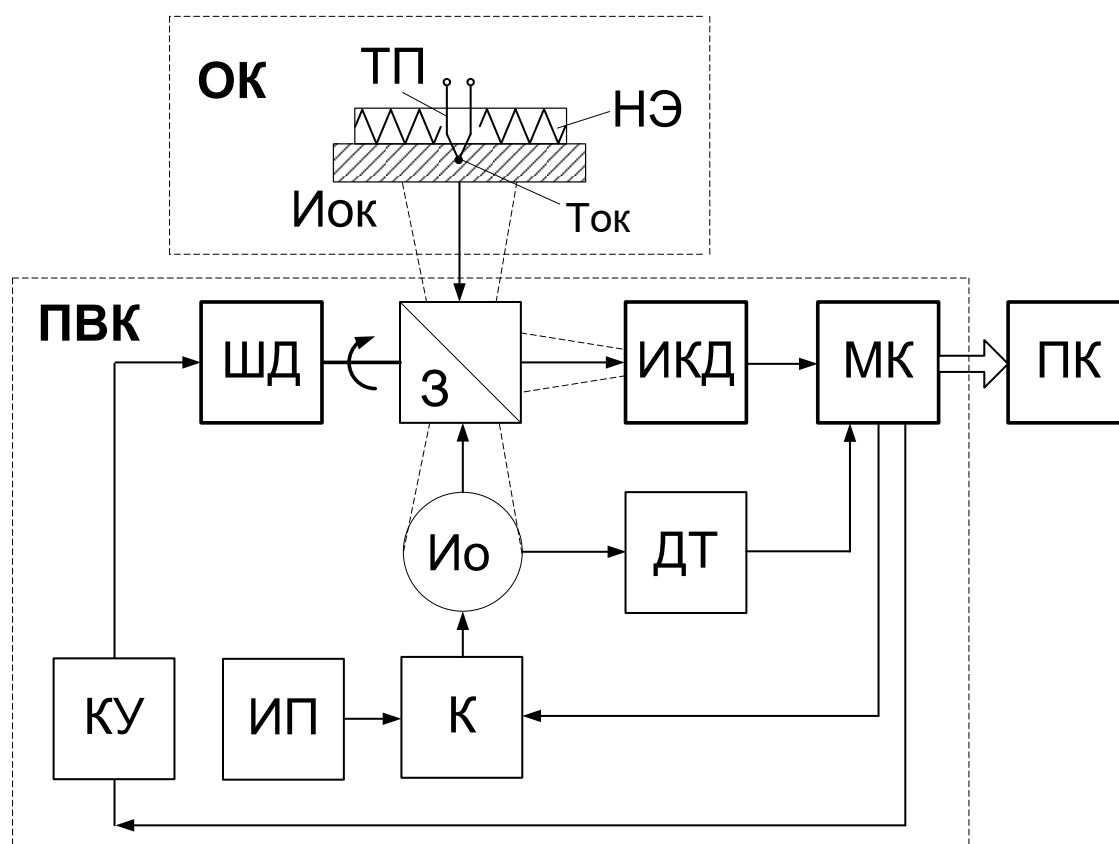


Рис. 3.22. Функциональная схема установки для исследования пирометра компенсационного типа со встроенным калибратором: ОК – объект контроля;

ПВК – пирометр со встроенным калибратором; НЭ – нагревательный элемент; ТП – термопара; Ток – температура объекта контроля; Иок – источник излучения, соответствующий объекту контроля; Ио – источник излучения, соответствующий образцу материала объекта контроля; З – поворотное зеркало; ШД – шаговый двигатель; КУ – ключ управления; К – ключ; ИКД – инфракрасный датчик; МК – микроконтроллер; ПК – персональный компьютер

Работа пирометра происходит следующим образом. Излучение от ОК попадает в поле зрения инфракрасного датчика ИКД через алюминиевое зеркало З вращающееся шаговым двигателем ШД посредством ключа управления КУ. Сигнал, соответствующий излучению от Иок, запоминается микроконтроллером МК. Далее зеркало З вращается шаговым двигателем ШД по сигналу от МК до положения при котором ИКД визируется на встроенный излучатель Ио. При этом положение зеркала контролируется оптроном с открытым каналом (на схеме не изображено). Сигналы от Иок и Ио, измеренные ИКД, сравниваются МК и по их разности формируется сигнал управления мощностью нагрева источника излучения Ио, подаваемый на нагреватель через ключ К. При достижении равенства сигналов от Иок и Ио температура Ио определяется контактным датчиком ДТ2. Данные измерений передаются на персональный компьютер ПК.

В качестве ИКД в опытном образце пирометра применен инфракрасный датчик температуры MLX90614 АСF с углом обзора  $10^\circ$ , температурным разрешением  $0.1^\circ\text{C}$  и постоянной времени  $\tau = 0.15$  с. В качестве контактных датчиков температуры использованы термопары ТХА, калиброванные относительно друг друга с погрешностью  $\pm 0.08^\circ\text{C}$  и имеющие компенсацию температуры свободных концов. Инструментальная погрешность измерения температуры ДТ составила  $0.2^\circ\text{C}$ . Временная и температурная нестабильность чувствительного элемента ПИ и электронной

схемы обработки сигнала компенсируются, так как разность сигналов  $\Delta T$  в режиме измерения температуры образца  $I_o$  контактным датчиком ДТ:

$$\Delta T = (T_{ок} + \Delta T_H) - (T_o + \Delta T_H) = 0, \quad (3.10)$$

где  $T_{ок}$  и  $T_o$  – сигналы, соответствующие температуре  $I_{ок}$  и  $I_o$  соответственно;  $\Delta T_H$  – сигнал аддитивной погрешности в результате нестабильности.

Результаты экспериментального исследования работы опытного образца пирометра с калибратором, проведенные при температуре поверхности объекта контроля  $T_{ок} = 100 \pm 0.1$  °С, представлены в табл. 3.1

Таблица 3.1

№	Материал образца	$\epsilon_{эф}(100$ °С), для $\Delta\lambda= 7-14$ мкм	абс. погр. $\Delta T$ , °С	Макс. абс. расч. погр. $\Delta T (\Delta\epsilon)$ , °С при 100 °С	Время выхода $t$ , мин
1	Алюминий окрашенный	0,95	1	0,3 (0,01) 1,3 (0,04)	3
2	Никель (фольга) отожженный	0,58	2	1,7 (0,03)	3,5
3	Алюминий	0,21	3,5	7,6 (0,05)	4
4	Никель (фольга)	~ 0,07	10	5 (0,01) 12 (0,02)	5

Анализ результатов экспериментов, представленных в таблице 3.3.1., показал преимущества пирометра компенсационного типа с встроенным калибратором при измерении температуры объектов контроля с неопределенным коэффициентом излучения. Абсолютная погрешность измерения температуры пирометром, функционирующим по предложенному

способу, составила для алюминия  $3,5^{\circ}\text{C}$ . При расчётном определении температуры алюминиевого образца по формуле (3.1) с использованием коэффициента черноты равного 0,2, взятого из справочных табличных данных [58], при параметрической ошибке введения коэффициента  $\Delta\varepsilon=0.05$ , расчетная абсолютная погрешность при температуре поверхности  $100^{\circ}\text{C}$  составила  $7.5^{\circ}\text{C}$ . Кроме того данное техническое решение автоматически учитывает зависимость коэффициента излучения металла от температуры. В отсутствии такого учета при температурах  $200^{\circ}\text{C}$  и  $500^{\circ}\text{C}$  расчетная погрешность составила  $15^{\circ}\text{C}$  и  $124^{\circ}\text{C}$ , соответственно. Следует отметить, что в альтернативном случае при измерениях, когда используются табличные значения коэффициентов излучения  $\varepsilon(T)$ , приведенные в технической документации на пирометр или в справочной литературе [58,45], погрешность измерений может достигать более 25% (рис. 3.1.5).

Реализация в пирометре предложенного технического решения позволила, как показали результаты эксперимента, более чем в два раза уменьшить погрешность, связанную с неопределенностью коэффициента черноты алюминия. Кроме того, в пирометре по функциональной схеме со следящим уравниванием, приведённой на рис. 3.3.1, приемник излучения представляет собой «нуль» индикатор и является измерительным средством для уравнивания двух потоков: от объекта контроля и от встроенного в пирометр источника излучения. Поэтому схема такого прибора является не чувствительной к температурной и временной нестабильностям параметров приемника излучения и схемы усиления.

### **3.3. Разработка и исследование протяженного излучателя**

Как показал обзор средств метрологического обеспечения, проведенный в подразделе 1.4, в настоящее время отсутствуют технические средства по определению показателя визирования пирометров. Если для низкотемпературных пирометров для этой задачи можно использовать



протяженный излучатель типа ПЧТ-540/40/100 и излучатель АЧТ-165/40/100 производства «НПП «Эталон», то для высокотемпературных пирометров с большим показателем визирования требуются высокотемпературные излучатели с большим диаметром излучающей полости.

В настоящее время для поверки показателя визирования используется методика МИ 1200-86 [69]. Схема установки для поверки показателя визирования в соответствии с этой методикой представлена на рис. 3.23.

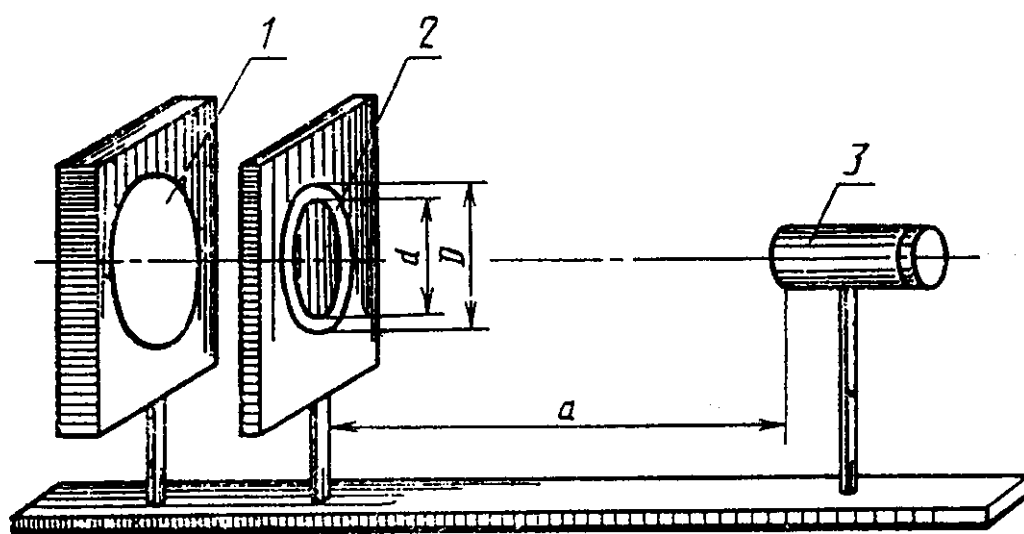


Рис. 3.23. Схема устройства для поверки показателя визирования: 1 – плоский поверхностный излучатель; 2 – кольцевая диафрагма; 3 – поверяемый пирометрический преобразователь;  $d$  и  $D$  – внутренний и внешний диаметры кольцевой диафрагмы;  $a$  – рабочее расстояние ПП.

Согласно МИ установка должна комплектоваться набором кольцевых диафрагм.

Требования к размерам излучателя устанавливаются исходя из номинального показателя визирования поверяемых ПП.

Поверяемый пирометрический преобразователь 3 должен быть установлен на расстоянии  $a$ , измеренном от его объектива до кольцевой диафрагмы 2. Расстояние  $a$  указывается в техническом описании ПП. В

соответствии с требованиями МИ 1200-86 [69] внутренний диаметр  $d$  и внешний  $D$  определяются как:

$$d = 1 \cdot a \cdot n, \quad (3.11)$$

$$D = 1.5 \cdot a \cdot n, \quad (3.12)$$

где  $n$  – номинальный показатель визирования ПП.

Например, для пирометрических преобразователей типа ТЕРА-50, у которых  $a = 1000$  мм и  $n = 1:20$ , в соответствии с выражением (3.13) внешний диаметр кольцевой диафрагмы  $D = 75$  мм. Таким образом, для поверки такого ПП эффективный диаметр излучающей поверхности плоского излучателя должен быть не менее 100 мм.

Согласно МИ 1200-86 при поверке пирометрического преобразователя по схеме на рис. 3.23 остаточное показание  $\Delta t$ , соответствующее превышению  $n$  номинального значения, не должно превышать значения указанного в технической документации на ПП конкретного типа.

Следует отметить, что метрологическое обеспечение тепловизоров также требует использования протяженных излучателей. В соответствии с ГОСТ Р 8.619-2006 [29], введенном с 01.01.2007 г, основным метрологическим средством для поверки тепловизионных приборов при воспроизведении равномерного теплового поля является эталонный (образцовый) протяженный излучатель.

Создание образцовых протяженных излучателей с верхней температурной границей излучающей поверхности более 600 °С связано с трудностями обеспечения изотермичности теплового поля излучающей поверхности при поддержании точности температуры в соответствии с требованиями ГОСТ [93,126]. Это обусловлено тем, что при увеличении площади излучающей поверхности возрастает температурный градиент между отдельными зонами поверхности, обусловленный теплопроводностью конструкции, конвективным и лучистым теплообменами. Таким образом для создания изотермической поверхности необходима не только плоскость

нагретая до заданной температуры, но и обеспечение поддержания заданного градиента температуры излучающей поверхности.

В настоящей работе предлагается выполнить протяженный излучатель в виде электрического нагревательного элемента, представляющего собой никелевую пластину размером 150x150 мм и толщиной 0.1 мм, по которой во пропускается электрический ток. Внешний вид установки протяженного излучателя приведен в приложении Б.

Функциональная схема разработанного технического решения представлена на рис. 3.24. Поддержание заданной температуры по плоскости излучающей поверхности осуществляется путем управления током, протекающим через никелевую пластину, со сканирующим пирометром (СП) в цепи обратной связи системы автоматического регулирования. В качестве алгоритма регулирования системы в целом принят алгоритм пропорционально-интегрального управления. Лучистый поток  $\Phi$ , излучаемый протяженным излучателем (ПИ), регистрируется сканирующим пирометром. Таким образом осуществляется контроль температуры по зонам излучающей поверхности. Сигнал обратной связи (ОС) поступает на микропроцессорный электронный регулятор для сравнения с заданием и формирования последующих сигналов фазо-импульсного управления твердотельными реле (ТР1- ТР3). Твердотельные реле осуществляют коммутацию сетевого напряжения первичных обмоток силовых трансформаторов Т1- Т3. При этом вторичные обмотки обеспечивают протекание токов между точками их подключения в соответствии с функциональной схемой.

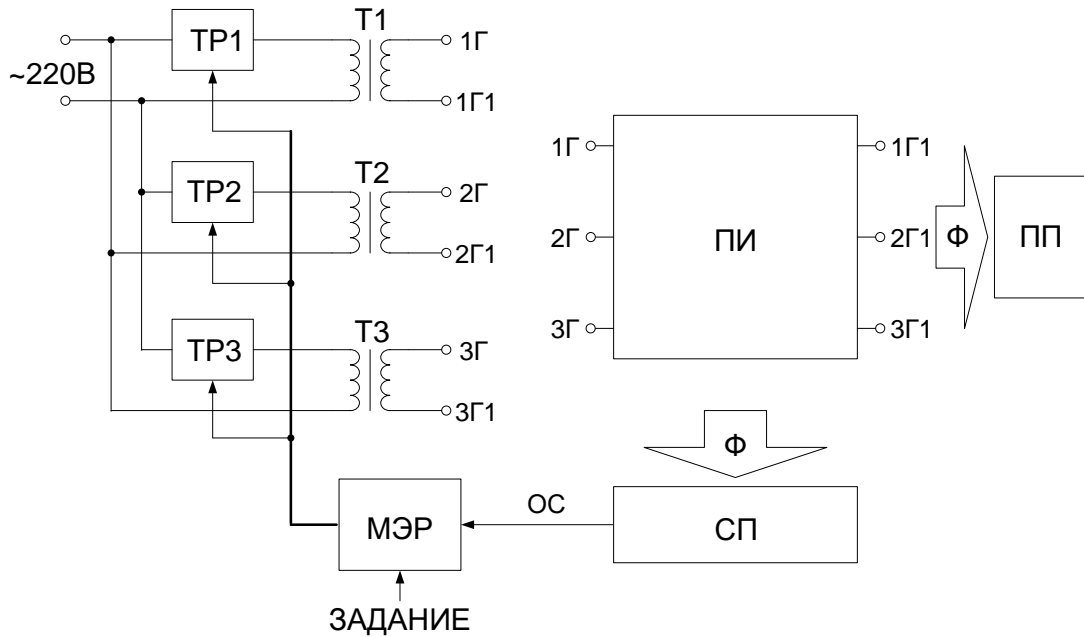
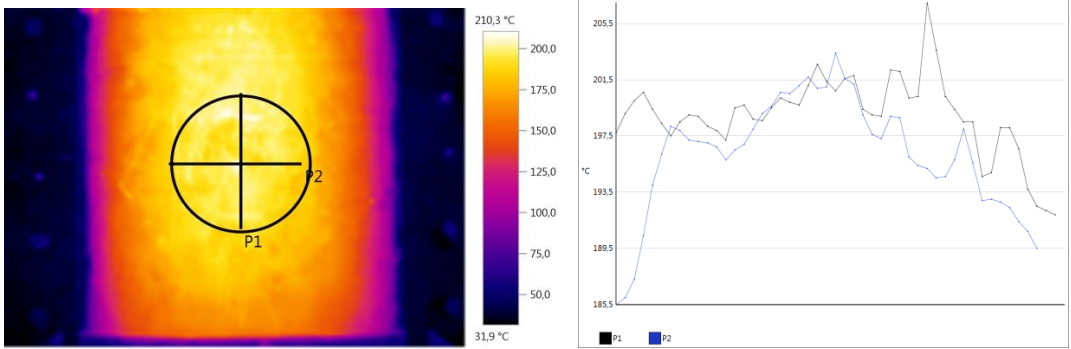


Рис. 3.24. Функциональная схема установки протяженного излучателя:

Для аналитического моделирования стационарного распределения температуры [52] протяженного излучателя применена программа FlexPDE 6.07 Student Version [98], использующая в расчетах метод конечных элементов.

При проведении испытаний макета установки пропускание электрического тока производилось по трём горизонтальным зонам между точками подключения 1Г-1Г1, 2Г-2Г1, 3Г-3Г1 вторичных обмоток трансформаторов. Рабочий температурный диапазон поверхности излучателя составил 60...1000 °С.

Экспериментальное исследование температурного поля протяженного излучателя проводилось посредством тепловизора Testo 881-1. Термограмма и температурный профиль заданной области приведены на рис. 3.25. Результаты математического моделирования с учетом поправок на реальную модель приведены на рис. 3.26. Разброс температур в заданной области диаметром 70 мм составил 25.3 °С и 19 °С для реальной и расчетной модели соответственно при средней температуре 196 °С.



Минимум: 185,0 °C Максимум: 210,3 °C Среднее значение: 196,5 °C

Рис. 3.25. Термограмма и температурный профиль заданной области ПИ при 196 °C: P1 – температурный профиль по вертикали (черн.), P2 – по горизонтали (син.)

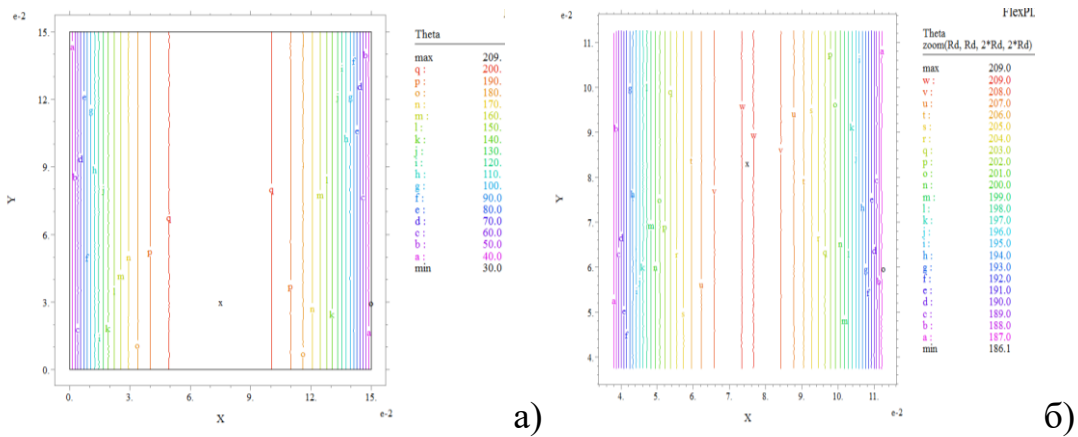
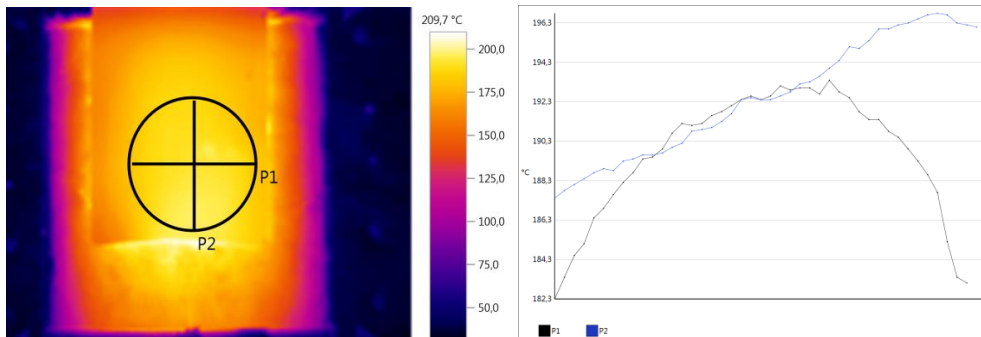


Рис. 3.26. Расчетная термограмма ПИ всей излучающей плоскости 150X150 мм (а) и центральной области 80X80 мм (б)

Анализ термограммы, приведенной на рис. 3.25., выявил недостатки опытной конструкции излучателя: неравномерность температурного профиля вследствие изгибов тонкой пластины и значительный гистерезис температуры в заданной области вследствие оттока тепла через электроды.

Для устранения неравномерности температурного профиля предложено использовать отдельную поверхность из материала с высокой теплопроводностью (медь, алюминий) нагреваемую излучением от

никелевой пластины. Как показали эксперименты, разброс температур в заданной области диаметром 70 мм уменьшился и составил 10 °С. Результат проведенного опыта с дюралевой пластиной приведен на рис. 3.27.



Минимум: 180,4 °С Максимум: 196,9 °С Среднее значение: 190,1 °С

Рис. 3.27. Термограмма и температурный профиль заданной области ПИ с дюралевой пластиной: P1 – температурный профиль по вертикали (черн.), P2 – по горизонтали (син.)

Для уменьшения градиентов температуры по горизонтали предложено применить дополнительные источники напряжения, подведенные к парам вертикально расположенных электродов электродов 1В и 2В, для прогрева приконтактной области пластины в соответствии со схемой представленной на рис 3.28.

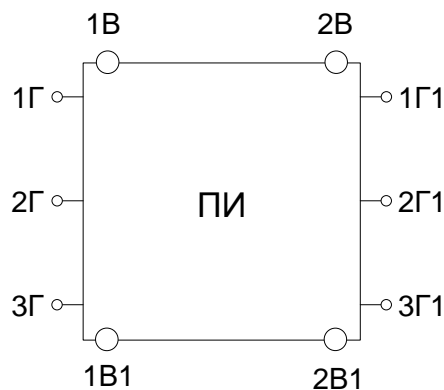


Рис. 3.28. Схема расположения электродов В для уменьшения оттока тепла через электроды Г-Г1 .

Результаты моделирования приведены на рис. 3.29. и 3.30. Расчетный градиент температурного поля в центральной области протяженного поля 80X80 мм составил 7.3 °С, центральной области 50X50 мм - 0.5 °С, а центральной области 20X20 мм соответственно 0.1 °С при введении дополнительного нагрева.

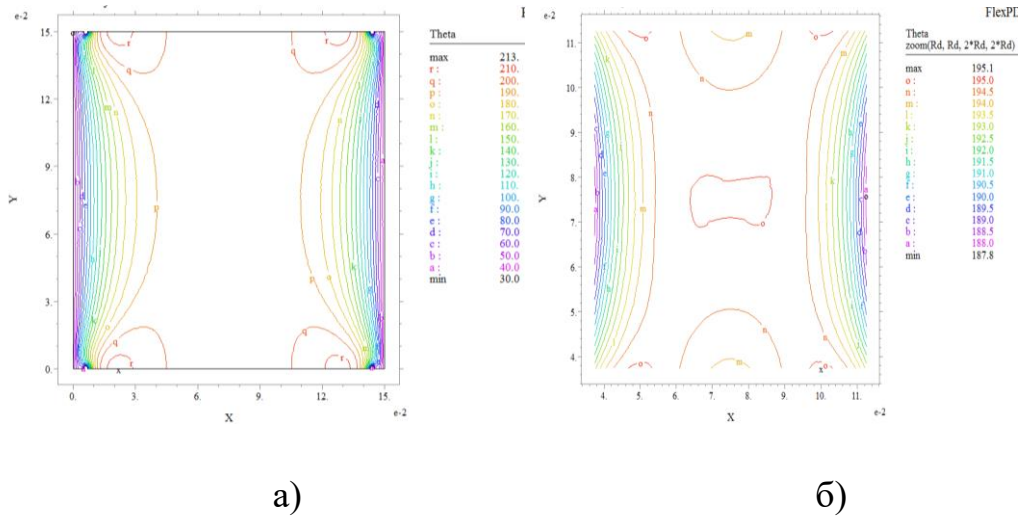


Рис. 3.29. Расчетная термограмма ПИ всей плоскости 150X150 мм (а) и центральной области 80X80 мм (б) при введении дополнительного нагрева.

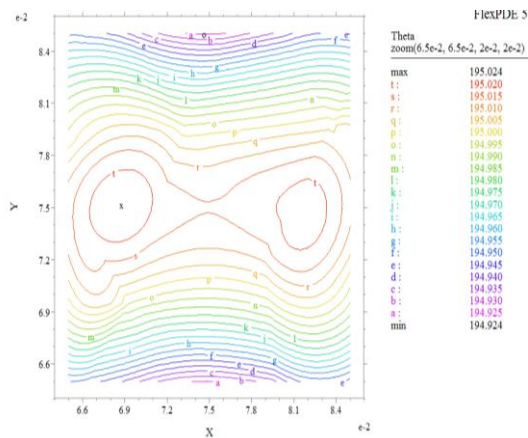


Рис. 3.30. Расчетная термограмма ПИ центральной области 20X20 мм с изотермией 0,1 °С при введении дополнительного нагрева.

### Выводы по главе 3

1. Обосновано применение и разработана конструкция модели пирометрического калибратора. Обоснование влияния неопределенности коэффициента излучения на погрешность показаний радиационного пирометра подтверждено расчетами.

2. Разработанная модель пирометрического калибратора позволяет вносить поправки на эффективный коэффициент излучения и учитывать его изменение при изменении температуры поверхности с учётом спектральных характеристик чувствительности пирометров.

3. Результаты проведенных теплофизических расчетов модели протяжённого излучателя совпадают с экспериментальными результатами излучателя.

4. Представленные в главе результаты исследования опытного образца пирометра со встроенным калибратором подтверждают его преимущество перед пирометрами других типов.



## **4. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ СРЕДСТВ И МЕТОДИК ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ**

### **4.1. Внедрение устройства и методики измерения температуры трения в трибоисследованиях**

Разработанные в рамках настоящей работы методические рекомендации и исследования, описанные в подразделах 2.14 и 3.1. позволили применить их в трибоисследованиях, проводимых на кафедре «Холодильная и компрессорная техника и технологии».

Достоверное определение температуры трущихся поверхностей при трибоисследованиях является достаточно сложной задачей [107]. Это привело к созданию большого количества экспериментальных и теоретических методик оценки температуры в зоне трения [107,10,15]. В настоящее время, из-за громоздкости расчетов, необходимости располагать большим количеством характеристик контактирующей пары трения, а также существенных ошибок, которые могут быть допущены по причине неточной оценки ряда параметров (например, наличия тонких окисных пленок) [107], в изменяющихся условиях контактирования (изменение условий охлаждения, продукты износа и т.д.) наиболее эффективным инструментом для контроля и поддержания температуры в зоне трения при проведении исследований считается экспериментальный метод. Очевидно, что наиболее практичным для этих целей является бесконтактный способ контроля температуры, что подтверждено анализом решения этой задачи, приведённым в работе [10]. Практика применения пирометров для этих целей выявила как преимущества так и недостатки данного метода. Преимуществом является не только возможность отслеживания во времени средней температуры трущейся поверхности вала, но и на быстрый отклик пирометра на изменение условий трения, что, в общем, позволяет быстро во времени менять и контролировать температурные условия работы сопряжения “вал – частичный подшипник”.

Следует отметить, что данная бесконтактная схема измерений позволяет контролировать температуру без вмешательств в конструкцию трибосопряжения (без установки щеток – токосъемников, без установки терморезисторов в материалах и т.д.). Несмотря на указанные преимущества, пирометрический метод не получил широкого распространения в трибоисследованиях в связи с особенностями и существенными сложностями измерений низких температур 30-150 °С в условиях переотражения теплового излучения.

На рис. 4.1. приведена блок-схема разработанной системы измерения температуры в составе испытательного стенда по исследованию контактной пары трения стальной вал-полимерный подшипник. Результаты работы представлены в [97,92].

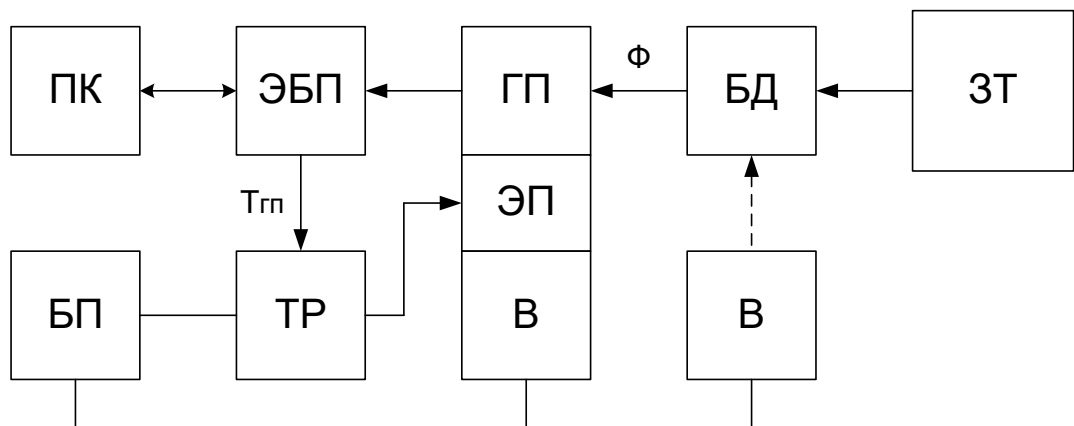


Рис. 4.1. Блок-схема измерения температуры испытательного стенда:

ПК – персональный компьютер; ЭБП – электронный блок пирометра; ГП – головка пирометра; БД – блок диафрагм; ЗТ – зона трения, нагреваемый трением; ЭП – элемент Пельтье; В – вентилятор; ТР – терморегулятор; БП – блок питания;  $\Phi$  – суммарный поток излучения на ГП;  $T_{ГП}$  – аналоговый сигнал, соответствующий температуре головки пирометра

В экспериментальных исследованиях из-за непосредственной близости расположения в трибоустановки головки пирометрического преобразователя к объекту измерения при значениях температур в зоне трения 150 °С, колебания показаний температуры ПП достигали 5-7 °С. В связи с этим было разработано устройство с активным термостатированием головки

пирометра на базе модулей Пельтье и аналогового пропорционального регулятора, приведённые на фотографии рис. 4.2, 4.3. Головка ПП 1 расположена в алюминиевом корпусе 3, тепловой контакт с которым усилен термопастой. К боковым стенкам корпуса 3 прижаты модули Пельтье 2 мощностью 80 Вт каждый, также предварительно покрытые термопастой. Отведение тепла, выделяющегося от модулей Пельтье при охлаждении головки пирометра, осуществляется с помощью радиаторов и вентиляторов 4.

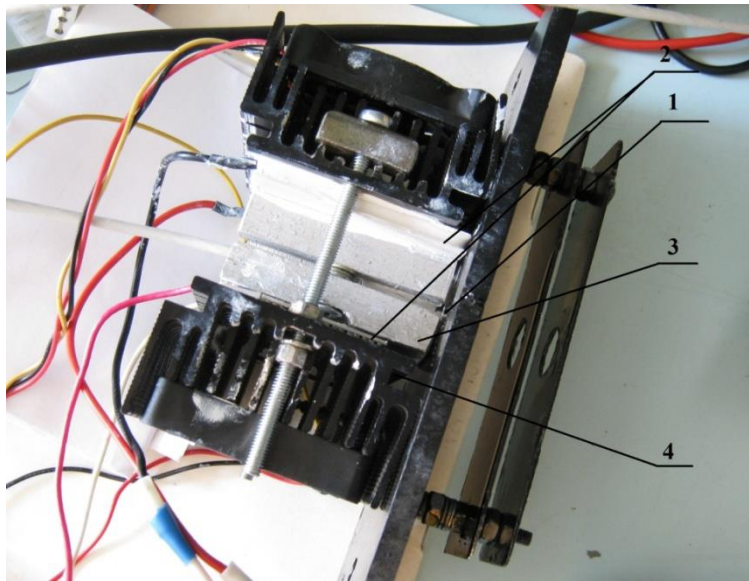


Рис. 4.2. Конструкция системы охлаждения головки пирометра ОРТСЛТ15:

1 – головка пирометра; 2 – модуль Пельтье; 3 – алюминиевый корпус ПП; 4 – радиатор и вентилятор охлаждения модуля Пельтье

Фотография узла термостатирования приведена на рис. 4.1.2.

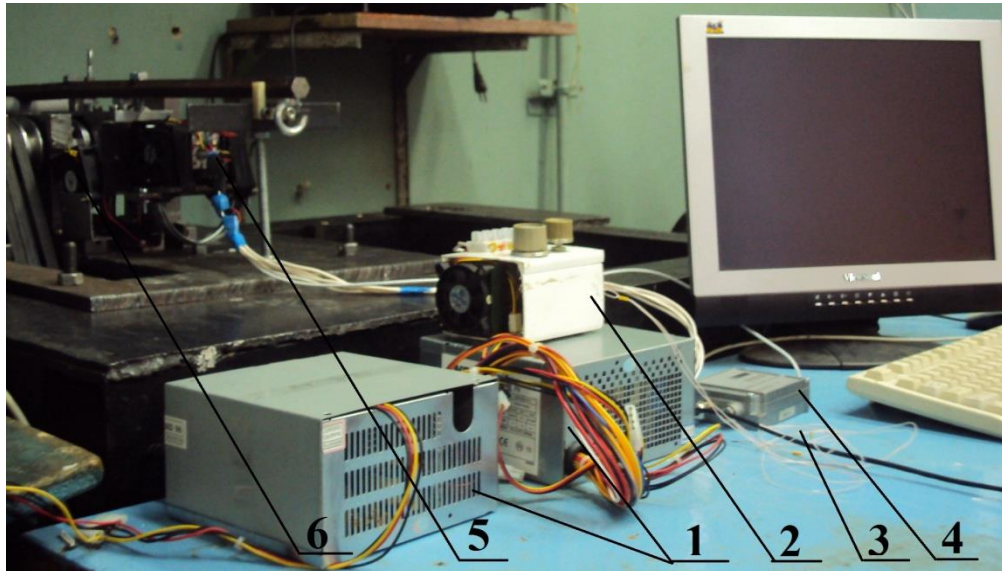


Рис. 4.3. Узел схемы термостатирования головки пирометра: 1 – блоки питания; 2 – регулятор температуры; 3 – кабель аналогового сигнала, соответствующего температуре головки пирометра; 4 – блок управления пирометра; 5 – система охлаждения головки пирометра; 6 – вентилятор охлаждения стального канала

Схема терморегулирования позволила поддерживать температуру ПП с погрешностью  $\pm 0,2$  °С.

В результате исследований по определению температуры статирования головки пирометра  $T_{АП}$ , было выявлено следующее: глубина охлаждения датчика искусственно увеличивает эффективный коэффициент излучения поверхности. Это происходит за счет увеличения влияния фонового излучения в соответствии с выражением (3.5). Соответственно повышение температуры термостата снижает влияние фонового излучения, но при значениях температуры головки пирометра выше температуры в помещении, снижается чувствительность пирометра. Оптимальным решением данной задачи в соответствии с выражением (3.5) явилось термостатирование головки пирометра на уровне температуры окружающей среды.

Применение ряда соосных диафрагм, позволяет уменьшить переотражение от смежных к измеряемой поверхностям и стабилизировать

показания прибора. Отстройка от величины фонового излучения при помощи световода [65], в виде полированной стальной трубки, также позволяет исключить попадание излучения смежных объектов в поле зрения пирометра.

С целью определения эффективности рассмотренных способов снижения влияния фонового излучения было проведено их экспериментальное исследование.

Оба способа (рис. 4.4.) позволяют снизить влияние фона, однако применение стального канала близко расположенного к объекту измерения, приводило к его постепенному прогреванию и появлению собственного фона. Применение диафрагм в условиях стенда, несмотря на более заметный эффект (в сравнении с полированным каналом) оказалось невозможным по причине существенного влияния на показания пирометра отклонения оси датчика от нормали к поверхности ОК, около  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  при отклонении в  $4\text{-}5^{\circ}$ .

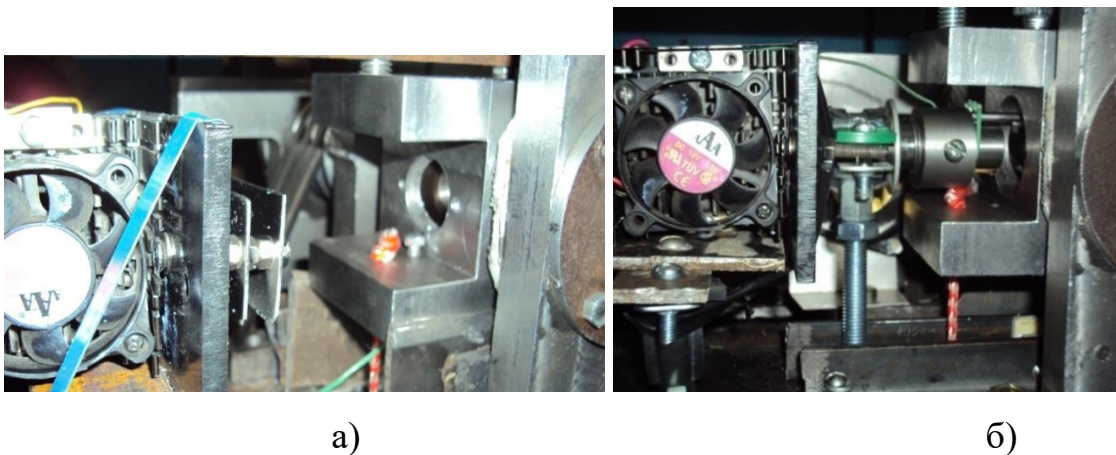


Рис. 4.4. Реализация способов снижения влияния фонового излучения: а – набор алюминиевых диафрагм; б – полированный стальной канал

Учитывая сложность выверки, контроля положения пирометра в процессе длительных исследований сопровождающихся демонтажем стенда, а также сложность проведения тарирования было принято целесообразным установить полированный стальной канал, положение которого фиксировалось и было неизменным во время проведения всего цикла испытаний. Данный канал принудительно охлаждался потоком воздуха для минимизации отклонения его температуры во время исследований. Такое

техническое решение позволило реализовать надежный инструмент для измерения температуры трущейся поверхности вала [97].

Исследование работы пирометра, в условиях эксплуатации экспериментального стенда сопровождалось контролем температуры поверхности термопарой. При этом в показания пирометра вводилась поправка на основании рекомендаций, приведённых в подразделе 2.1.4. Также в ходе данного исследования был определен эффективный коэффициент черноты  $\varepsilon_{\text{эф}} = 0,187$  близкий к истинному при  $T_{II} = 150$  °С.

Тарирование пирометра, осуществлялось по методике:

1) установка всех сборочных единиц и деталей экспериментального стенда (рис. 4.1, 4.3), предварительная подготовка к тарированию приборов.

2) производство нагрева пары трения и всего стенда путем выделения мощности трения при вращении нагруженного вала.

3) нагрев пары трения до температуры выше верхней температуры тарирования.

4) после снижения температуры поверхности трения производился снова нагрев системы. Данная процедура повторяется 3-4 раза, в течении 40 – 50 минут с целью выравнивания температур и прогрева всей системы.

5) производится тарирование пирометра по показаниям поджатой термопары к поверхности трения вала.

6) определяется уравнение связи между температурой объекта и значением температуры, измеренной пирометром.

На рис. 4.5. представлена поправочная кривая, устанавливающая связь между температурой объекта и значением температуры, измеренной пирометром.

Средняя погрешность для диапазона 30-150 °С при определении температуры поверхности пирометром по данной методике не превышает:

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{ст}}^2 + \delta_{\text{приб}}^2} = \sqrt{2,33^2 + 1,15^2} = 2,6\% \quad (4.1)$$

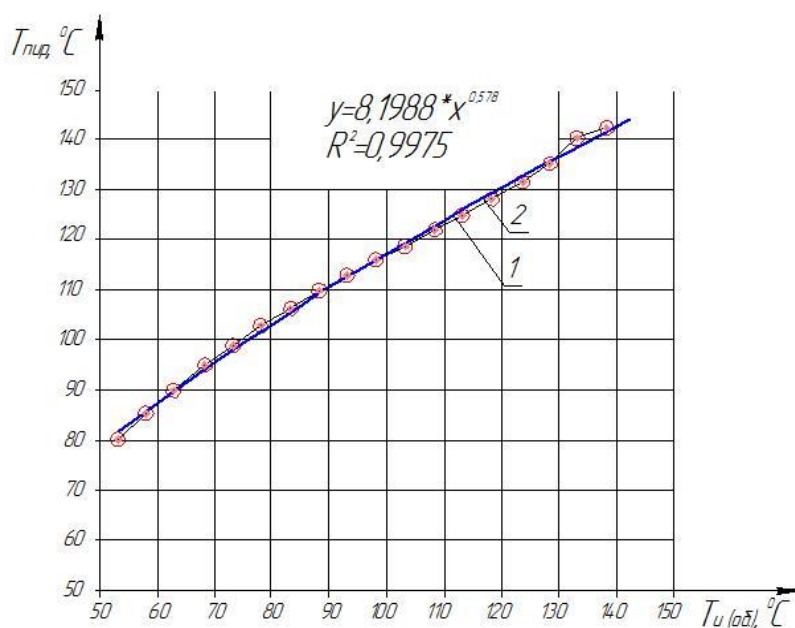


Рис. 4.5. Поправочная кривая определения истинной температуры объекта по показаниям пирометра: 1 – экспериментальные средневывборочные значения показаний пирометра; 2 – аппроксимирующая зависимость.

## 4.2. Применение специализированных пирометров в производстве асфальта

Значительная часть дефектов (при устройстве покрытий и оснований, как отмечено в [108,109,28,47], связана с отклонениями температур от регламентируемых. Например, причиной возникновения таких дефектов, как «плохая текстура», «колея от катка», «продольные и поперечные волны» и др., является «горячее» покрытие. Дефекты типа «неровная поверхность», «колеи от катка», «сетка трещин», «выкрашивание» связаны с «холодным покрытием». С перегревом и охлаждением АБС связаны такие дефекты как «колеи от катка», «неровности», «сдвиги перед вальцом» и др [19].

В этой связи, совершенно очевидна необходимость оперативного контроля температуры АБС на всех этапах её укладки, а также



температурный контроль производства оснований из битумных эмульсий, жидкого или вязкого битума.

На Омском асфальтобетонном заводе пирометр с оптической системой диафрагменного типа установлен над весовой платформой контроля отпуска асфальта так, чтобы визируемое пирометром пятно проецировалось на вершину пирамиды отгружаемого асфальта (рис. 4.6). Как показано в подразделе 1.1.5. (рис. 1.1) показания такого пирометра не зависят от расстояния или высоты отгружаемого асфальта.

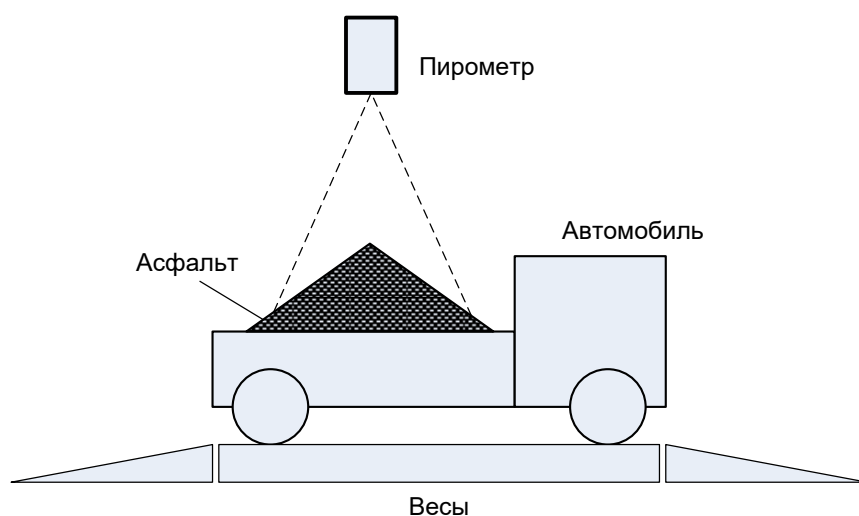


Рис. 4.6. Оптимальный вариант контроля температуры при отпуске асфальта

### 4.3. Пирометр для контроля технологического процесса в производстве техуглерода

В настоящее время производство технического углерода базируется на реакторном процессе его получения из жидкого углеводородного сырья с использованием вспомогательного топлива [7]. Более 98% потребляемого в мире технического углерода производится способами термоокислительного разложения, которое протекает в присутствии кислорода со сгоранием части сырья в реакторах цилиндрического типа. На рис. 4.7 представлен эскиз



конструкции реакторов этого типа, используемых на ОАО «ОмскТехуглерод».

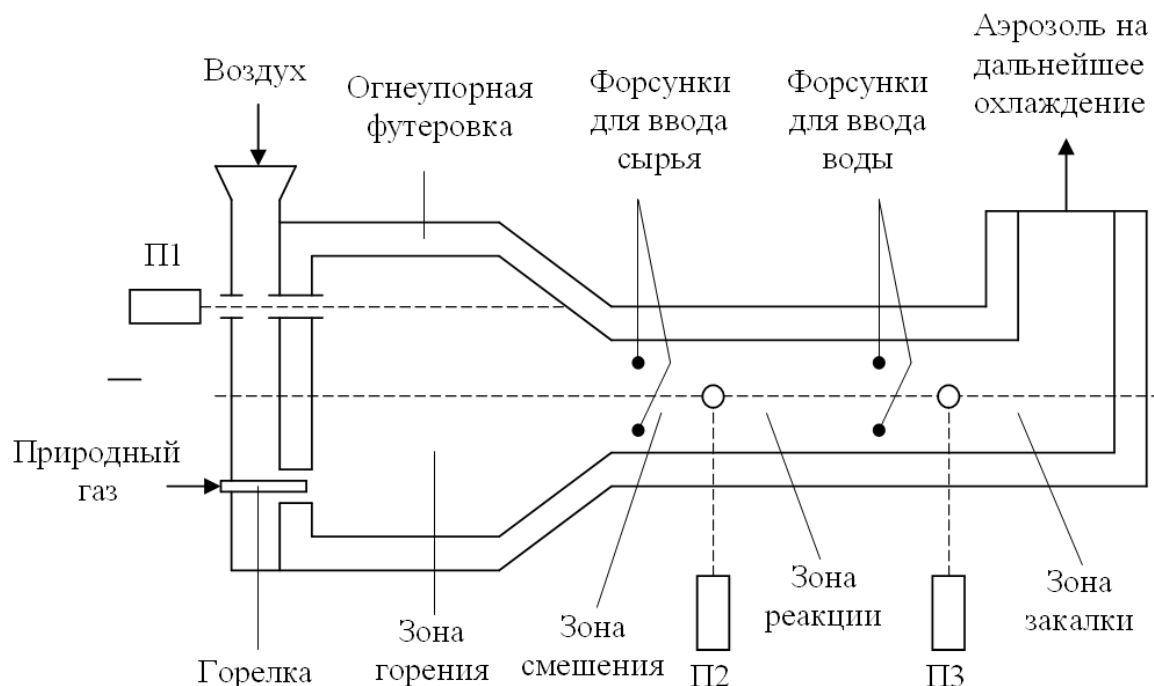


Рис. 4.7. Конструкция реактора по производству технического углерода

Энергия для процесса разложения сырья вырабатывается в камере горения в результате реакции окисления воздухом газообразного топлива (природного газа). Воздух, используемый для горения, предварительно подогревается. В зоне смешения в горячие газы, выходящие из камеры горения с помощью форсунок распыляется сырьё и происходит его частичное испарение. В зоне реакции под воздействием высоких температур происходит разложение углеводородов, находящихся в газообразной фазе, и выделение технического углерода. В хвостовой части реактора располагается зона закалки (охлаждения), в которой осуществляется впрыск воды и её испарение. Корпус реактора выполнен из стали, а изнутри футерован огнеупорным материалом. Для контроля температур в зонах горения, реакции и закалки используются пирометрические преобразователи П1, П2, П3.

Температура в зоне горения является одним из важнейших параметров технологического процесса производства технического углерода, поскольку от неё напрямую зависит производительность реактора [74].

Контур автоматического регулирования и поддержания температуры в зоне горения включает в себя пирометр П1, датчик расхода природного газа, а также датчики расхода и температуры воздуха, сигналы с которых поступают на программируемый логический контроллер (ПЛК). ПЛК может управлять расходом природного газа посредством электропневматического позиционера и регулирующего клапана. Изменение расхода природного газа приводит к изменению температуры в зоне горения. Алгоритм работы ПЛК предусматривает автоматическую корректировку соотношения расходов газ/воздух по температуре в зоне горения, измеряемой пирометром П1.

Пирометры П2 и П3 предназначены только для контроля температур в зонах реакции и закалки. В контур системы регулирования температуры в реакторе они не включаются.

В настоящее время регламент ведения технологического процесса производства технического углерода предусматривает использование пирометрических преобразователей полного излучения типа ТЕРА.

Несмотря на простоту и дешевизну пирометрических преобразователей ТЕРА они обладают такими недостатками как наличие объектива низким показателем визирования, отсутствием стандартных промышленных токовых аналоговых или цифровых интерфейсов.

Результаты исследований [42] показали, что пирометрический преобразователь типа ТЕРА (обладающий спектральной чувствительностью в диапазоне 0,4...2,5 мкм), установленный в зоне горения, занижает показания температуры в связи с влиянием полос поглощения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , характерных для несветящегося пламени природного газа.

Современная элементная база и новые технические решения, предложенные в главе 2.2, позволили создать пирометрический

преобразователь с улучшенными относительно ТЕРА характеристиками. Функциональная схема такого прибора приведена на рис. 4.8.

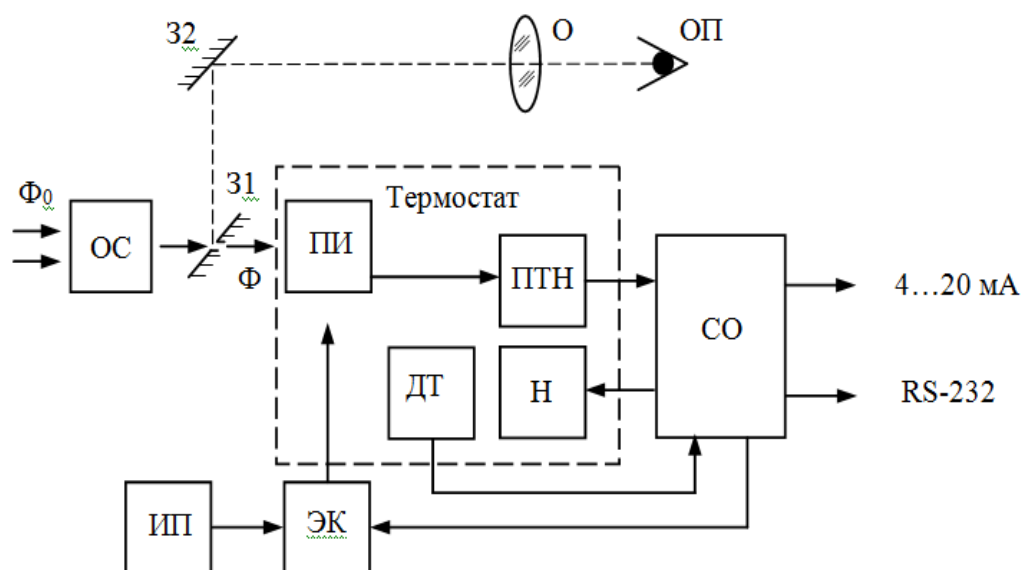


Рис. 4.8. Функциональная схема пирометрического преобразователя:

$\Phi_0$  – поток излучения от объекта;  $\Phi$  – поток излучения, попадающий на приемник излучения; ПИ – приёмник излучения; ОС – оптическая система; ПТН – преобразователь ток-напряжение; ИП – источник питания; ЭК – электронный коммутатор; ДТ – датчик температуры; Н – нагреватель; СО – схема обработки; 31 – зеркало с отверстием диафрагмой; 32 – зеркало; О – окуляр визирования; ОП – оператор.

Оптическая система создаёт изображение объекта контроля в плоскости чувствительной поверхности ПИ и, кроме того, позволяет наблюдать это изображение через зеркально-оптический окуляр, что обеспечивает беспараллаксное визирование преобразователя на объект контроля [36].

Приёмник излучения преобразует энергию попадающего на него потока излучения  $\Phi$  в электрический сигнал, пропорциональный температуре объекта контроля. В качестве ПИ используется кремниевый фотодиод S1336-18VK фирмы Hamamatsu (Япония), обладающий спектральной

чувствительностью в диапазоне 0,38...1,1 мкм (что позволило исключить влияние полос поглощения CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O).

В приборе используется схема включения фотодиода в двухспектральном режиме, описанная в главе 2.2. Анод фотодиода посредством попеременно подключается к общему проводу потенциалом 0 В либо отрицательному напряжению -15 В посредством электронного коммутатора (ЭК) на полевых транзисторах. Преобразователь ток-напряжение ПТН выполнен на основе прецизионного ОУ типа AD8551.

Для отстройки от дрейфа темнового тока фотодиода в функциональной схеме пирометра применено термостатирование. При значительных изменениях температуры окружающей среды такое решение обеспечивает минимальную дополнительную погрешность измерений. В термостате кроме фотоприёмника расположена и электронная схема ПТН, что позволило свести к минимуму ошибки измерений, вызываемые температурным дрейфом её элементов. Поддержание температуры термостата обеспечивается схемой термостатирования на уровне 55°C с погрешностью  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Регулятор температуры – цифровой, пропорционального типа, реализован на базе микроконтроллера. Измерение температуры в термостате осуществляется интегральным датчиком типа DS18B20, в качестве нагревателя Н – используется транзистор КТ972А. Время выхода термостата на рабочий режим составляет 1 минуту.

Схема обработки сигнала с ПИ и стабилизации температуры термостата выполнена на базе микроконтроллера ADUC824, имеющего 24-разрядный сигма-дельта АЦП и 16-разрядный ЦАП. Микроконтроллером осуществляется нелинейное преобразование сигнала фотоприёмника в выходной токовый сигнал пирометра 4-20 мА и цифровой посредством интерфейса RS-232.

Приведённые технические решения позволили создать пирометрический преобразователь с основной приведённой погрешностью

не более 1% в диапазоне измерений 1200 – 2000 °С, с разрешением 1°С. Дополнительная погрешность прибора в диапазоне температур окружающей среды –20 ... +50°С составляет не более 1%.

Показатель визирования 1 : 20 преобразователя создаётся диафрагмирующим отверстием диаметром 2 мм, применение объектива с диаметром выходного зрачка 35 мм позволяет увеличить показатель визирования до 1 : 150. Фотография пирометра приведена в приложении Б.

Разработанный пирометрический преобразователь введен в эксплуатацию для измерения температуры в реакторе производства технического углерода на ОАО «ОмскТехуглерод», что подтверждено актом внедрения.

#### **4.4 Бесконтактный тепловой контроль электрических контактных соединений**

При эксплуатации устройств, с высоким напряжением, одним из основных способов обеспечения безопасности, обслуживающего персонала, является защита расстоянием. В таблице 1.1, в соответствии с ПУЭ, приведены значения безопасных расстояний, в зависимости от величины электрического напряжения. При напряжении до 1000В безопасное расстояние до токоведущих частей на воздушных линиях определяется в 0,6 метра.

На сегодняшний день наиболее распространенными являются сети с напряжением 0.4-35, 100, 220 и 500 кВ. В связи с этим предложено реализовать линейку специализированных пирометров для контроля КС с расчетными показателями визирования 1:18, 1:45, 1:60 и 1:150. Или, с учетом рекомендуемых значений ГОСТ, 1:20, 1:50, и 1:150.

Конструктивные расчеты оптической части пирометра по схемы Кассегрена проведен в соответствии с методикой, изложенной во 2 главе. Результат представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Расчетные основные параметры зеркал оптической системы Кассегрена линейки пирометров для контроля КС

Показатель визирования	1:18	1:45	1:60	1:150
D1 – диаметр главного зеркала, мм	20	40	50	64
D2 – диаметр вторичного зеркала, мм	10	20	25	32
L12 – расстояние между зеркалами, мм	20	40	50	65

Работа получила поддержку Российского фонда фундаментальных исследований в рамках гранта по теме «Разработка новых пирометрических средств для задач энергосбережения» (договор №011-010/2 от 25.05.2010). В ходе проведенных исследований разработан и сконструирован опытный образец низкотемпературного пирометра для контроля КС с показателем визирования 1:240, соответствующий требованиям методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ [99]. Фотография пирометра приведена в приложении Б.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения данной работы были получены следующие результаты:

1. Показана целесообразность разработки специализированных пирометрических средств теплового контроля и их метрологического обеспечения в задачах контроля качества контактных соединений, в производстве и транспортировке асфальта, производстве технического углерода, в триботехнике.

2. Разработана методика проектирования низкотемпературного пирометра с малым показателем визирования, позволившая создать специализированный пирометр контроля качества электрических контактных соединений.

3. Обоснован новый способ создания пирометра спектрального отношения на одном фотодиоде путем управления режимами его работы. Техническая реализация пирометра существенно проще исполнения ПСО, представленных на рынке.

4. Разработанный специализированный пирометр диафрагменного типа адаптирован под тепловой контроль асфальто-бетонных смесей, его показания не зависят от расстояний до поверхностей и у него исключаются погрешности, связанные с загрязнениями оптических систем, в сравнении с пирометрами других конструкций.

5. Разработки и исследования пирометра нового типа со встроенным калибратором, решают задачу учёта температурных изменений коэффициентов излучения, что в разы уменьшает погрешности в ТК.

6. Показаны целесообразность и необходимость применения пирометрических калибраторов в условиях производства для учёта эффективных коэффициентов излучения.

7. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение для работы пирометров и калибраторов, позволили адаптировать пирометрические

измерения под различные задачи: производства технического углерода, производства асфальта, контроля качества электрических контактных соединений.

8. Разработанные устройства и методики внедрены в промышленность, научно-исследовательский и учебный процессы подготовки бакалавров, магистров и аспирантов.

9. Получен патент на изобретение, использованный в пирометре спектрального отношения.

Выполненные исследования позволили предложить решения научно-технической задачи, имеющей важное значение в области пирометрического теплового контроля, и на основе представленных в работе предложений уменьшать погрешности измерений, проектировать специализированные под производственные и исследовательские цели пирометры и средства их метрологического обеспечения.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абрамова Е.В., Будадин О.Н. Новая технология теплового контроля теплозащитных параметров ограждающих конструкций зданий и сооружений в условиях эксплуатации// Контроль. Диагностика. – 2014. - №2. С. 70-80.
2. Абрамова Е.В., Вавилов В.П., Чулков А.О., Лариошина И.А. Методические рекомендации по энергетическому аудиту строительных зданий и сооружений с использованием метода инфракрасной термографии. Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 49 с.
3. Астайкин, А.И. Основы оптоэлектроники: учеб. пособие [текст] / А.И. Астайкин, М.К. Смирнов. – М. : Высш. шк. – 2007. – 277 с.
4. Афанасьев, А.В. Инфракрасный микропроцессорный пирометр с диафрагмальной оптикой [текст] // А.В. Афанасьев, И.М. Орлов // Приборы и техника эксперимента .- 2003.-№2.-с.149-152.
5. Бажанов С.А. Тепловизионный контроль оборудования в эксплуатации (Часть 2) – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2005. – 64 с.
6. Бегунов, Б. Н. Теория оптических систем [Текст] / Б. Н. Бегунов, Н. П. Заказнов. -М.: Машиностроение, 1972. - 488 с.
7. Беленький А.М. Измерение температуры: теория, практика, эксперимент: Справочное издание в 3-х томах. Т2. Измерение температуры в промышленности и энергетике/Под ред. А.М. Беленького, В.Г. Лисиенко. - М.: Теплотехник, 2007. – 736 с.
8. Белозеров, А.Ф. Современные зарубежные тепловизионные приборы [Текст] / А.Ф. Белозеров, В.М. Иванов // Оптический журнал. 2003. №10. С. 62 – 71.
9. Бобровская, И.Н. Пироэлектрические преобразователи для измерения энергетических, пространственных и временных характеристик излучения [Текст] / И.Н. Бобровская, С.В. Гринин, С.К. Скляренко, А.Г. Чепилко // – С.Петербург.: ГОИ, 1992. – С. 51 – 52.

10. Богданович П.Н. Методы регистрации температуры при трении и механической обработке твердых тел (обзор) / П.Н. Богданович и [др.] // Трение и износ. – 2006. - №4. – с. 445-456.
11. Будадин О.Н., Слитков М.Н., Смирнов Ю.М. Тепловой контроль безопасности эксплуатации силовых электрических кабелей и электропроводки// Безопасность труда в промышленности. – 2008. - №2. С. 16-22.
12. Бузанова, А.К. Полупроводниковые фотоприёмники [Текст] / А.К. Бузанова, А.Я. Глиберман. – М.: Энергия, 1976 – 64с.
13. Вавилов В.П., Александров А.Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике.-М.: НТФ «Энергопресс», 2003/
14. Васильченко Н.В. Измерение параметров приемников оптического излучения. - М.: Радио и связь, 1983. - 320 с.
15. Веттегрень, В.И. Определение “контактной” температуры в зоне трения антифрикционного полимерного покрытия по стали / В.И. Веттегрень и [др.] // Письма в журнал технической физики. – т.32, вып. 8. – 2006. – с. 78 - 82.
16. Волф, У. Справочник по инфракрасной технике. [Текст] В 4-х тт. Т. 2. Проектирование оптических систем / У. Волф, Г. Цисис; пер. с англ. - М.: Мир, 1998.-347 с.
17. Галанов Е.К., Филатов М.К. Метрологические вопросы измерения температуры поверхностей бесконтактным методом ИК пирометрии// Оптический журнал. 2009. Т. 76, №3. С. 44-47.
18. Голованова Л.В. Общая технология цемента: Учебник для средних проф.-техн. училищ. / Голованова Л.В. – М.:Стройиздат, 1984 г. – 118 с.
19. Головей А.Д., Уплотнение и дефекты асфальтобетонного покрытия. – Кемерово : 2000.- 36с.
20. Гольдберг, Ю.А. Температурная зависимость квантовой эффективности кремниевых р-п-фотоприёмников [Текст] / Ю.А. Гольдберг, В.В. Забродский, О.И. Оболенский, Т.В. Петелина, В.Л. Суханов // Физика и техника полупроводников. – 1999, том33, вып.3. – С. 344 – 345.

21. Гордов, А.Н. Основы пирометрии [Текст] / Гордов А.Н. – М.: Металлургия, 1971. – 373 с.
22. Гордов, А.Н. Основы температурных измерений [Текст] / А.Н. Гордов, О.М. Жагулло, А.Г. Шанова // . – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.
23. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение [Текст] / Ж. Госсорг //: Пер. с фр. – М.: «Мир», 1988. – 416 с.
24. ГОСТ 14312-79 Контакты электрические. Термины и определения.
25. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций.-М.:Изд-во стандартов, 1984.
26. ГОСТ 28243-96 Пирометры. Общие технические требования. М. Изд-во стандартов, 2003. 12 с.
27. ГОСТ 8.558-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры
28. ГОСТ 9128-97 Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия.
29. ГОСТ Р 8.619–2006 – Приборы тепловизионные измерительные Методика поверки, М. ФГУП «Стандартинформ», 2006. 16 с.
30. ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013 Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Часть 1. Общие методы.
31. Гошля Р.Ю. Датчик теплового контроля на основе пьезоэлектрического кварца[текст]/ Р.Ю. Гошля, В.А. Захаренко, Д.Б. Пономарёв// Датчики и системы.- 2011.- №3.- С. 18-22.
32. Дёмкин, В.Н. Метод компенсации температурного дрейфа фотоприёмника в системе стабилизации мощности излучения [текст] / В.Н. Дёмкин, В.Е. Привалов // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 1. – С. 174-176.
33. Долганин, Ю.Н. Пирометр спектрального отношения на измерения истинной температуры углеродных сталей [текст] / Ю.Н. Долганин, В.М.

- Завьялов, Ю.К. Козлов [и др.] // Измерительная техника. – 1997. – № 2. – С. 23-25.
34. Долгих И.И, Походун А.И. и др. Измерение излучательной способности твёрдых материалов в диапазоне температур окружающей среды// Измерительная техника. – 2001. - №2 – с. 40-42.
35. Дуда В. Цемент: Пер. с нем. / Дуда В. – М.: Стройиздат, 1981 – 464 с.
36. Захаренко В.А. Инфракрасные и световые средства теплового контроля: разработка, исследование, метрологическое обеспечение и внедрение [текст] : дис. ... д-ра тех. наук / В.А. Захаренко. – Омск : ОмГТУ, 2012. – 375 с.
37. Захаренко В.А., Шкаев А.Г. К вопросу конструирования опорного излучателя в пирометрии// Омский научный вестник. – 2000. - №6 – С. 119-120.
38. Захаренко В.А., Шкаев А.Г. Обоснование выбора приемника излучения при проектировании пирометров// Динамика систем, механизмов и машин: Материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. – Омск: ОмГТУ, 2014. Кн. 2. – С. 32-34.
39. Захаренко В.А., Шкаев А.Г. Термокомпенсация чувствительности фотодиода// Наука, Техника, Инновации 2014: сборник статей Междунар. науч.- тех. конф. – Брянск: НДМ, 2014. – С. 106-109
40. Захаренко В.А., Шкаев А.Г. Технология стабилизации параметров оптико-электронной аппаратуры// Омский научный вестник. – 2010. - №1 – С. 164-166.
41. Захаренко, В.А. Импульсное фотоприёмное устройство [текст] / В.А. Захаренко, А.Г. Шкаев // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП – 2010): Матер. X Междунар. конф. – Новосибирск : НГТУ, 2010. – Т.2. – С. 75-76.
42. Захаренко, В.А. Пирометрические преобразователи в производстве технического углерода [текст] / В.А. Захаренко, Д.Г. Лобов // Измерение, контроль, информатизация: Матер. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул: АГТУ, 2004. – С. 68 – 72.

43. Захаренко, В.А. Расчет и проектирование оптико-электронных приборов [Текст] / В.А. Захаренко, Т.П. Колесникова, А.Г. Шкаев //: Учеб. Пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002. – 68 с.
44. Ивановский, В.И. Технический углерод. Процессы и аппараты: Учебное пособие – Омск: ОАО «Техуглерод», 2004. – 228 с.
45. Излучательные свойства твердых материалов. Под ред. Шейндлина А.Е. – М.: «Энергия», 1974. – 471 с.
46. Ишанин, Г.Г. Источники и приемники излучения: Учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов/ Ишанин Г. Г. [и др.] – СПб.: Политехника, 1991 – 240 с.
47. Ищенко, И.С., Калашникова Т.Н., Семёнов Д.А., Технология устройства и ремонта асфальтобетонных покрытий.- Москва : «Аир-Арт», 2001.- 176с.
48. Карачинов, В.А., Торицин С.Б., Капачинов, Д.В. Исследование характеристик телевизионного пирометра со встроенным калибратором температуры// Измерительная техника. 2008. № 7. С. 42-45.
49. Кестер, У. Аналого-цифровое преобразование / У. Кестер – М.: Техносфера. – 2007. – 1016 с
50. Кестер, У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / У. Кестер – М. : Техносфера, 2010. – 328 с.
51. Ковалева, В.В., Аверьянова, Д.Е. Анализ влияния излучения фона на работу радиационного пирометра// Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2011. Том:5 - №1 – С. 176-178.
52. Козлов, А.Г. Аналитическое моделирование стационарного распределения температуры в двумерных структурах с произвольными прямоугольными границами// Инженерная физика. – 2004. - №3 – С. 11-19.
53. Колокольников В.С. Производство цемента: Учебное пособие. / Колокольников В.С. – М.: Высшая школа, 1967 г. – 303 с.
54. Компания МХС [Электронный ресурс] / Срок службы пластичной смазки – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.mxservis.ru>, свободный – Загл. С экрана. – Яз. рус.

55. Коротаяев В. В., Мусяков В. Л. Энергетический расчет ОЭП. - СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006.
56. Котышков Е.Ю., Пономарев Д.Б. Модель инфракрасного излучателя // Материалы III Всерос. Науч.-техн. конф. «Наука и молодеж в XXI веке»– Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017.– с. 21 -24.
57. Крененчугский, Л.С. Пироэлектрические приёмные устройства [Текст] / Л.С. Крененчугский, О.В. Ройцина – Киев : Наукова думка, 1982. – 368с.
58. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Сов. радио, 1978. - 400 с.
59. Криксунов Л.З., Падалко Г.А. Тепловизоры: Справочник. – К.: Техника, 1988. – 166 с.
60. Крутиков, В.Н. История развития и состояние приёмников излучения как первичных преобразователей оптических величин, сигналов изображений / [Текст] / Крутиков В.Н. // Измерительная техника. – 2002. – №9. – С. 28 – 33.
61. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Влияние погрешностей задания рабочих параметров на точность измерения температуры инфракрасными приборами//Измерительная техника. 2016. № 1. С. 60-64.
62. Левин Е.В., Окунев А.Ю. Исследование точности измерения температуры на основе анализа энергетического баланса на приемнике излучения ИК-прибора//Измерительная техника. 2015. № 5. С. 48-52.
63. Линевег, Ф. Измерение температур в технике [Текст] / Ф. Линевег // Справочник. Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1976. – 544 с.
64. Ллойд, Дж. Системы тепловидения [Текст] / Дж. Ллойд / пер. с англ. М. В. Васильченко; под ред. А. И. Горячева. -М.: Мир, 1978. - 414 с.
65. Лобов, Д.Г. Специализированные инфракрасные пирометры для контроля технологических процессов [текст] : дис. ... канд. тех. наук / Д.Г. Лобов. – Омск : ОмГТУ, 1999. – 182 с.
66. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия: особенности, преимущества, ограничения// Фотоника. - 2012. - №1. - С. 40-45.

67. Методы пирометрии, их достоинства и недостатки. Классификация пирометров. – [Электронный ресурс] – Режим доступа. - URL: <http://www.teplomer.biz/stat/metody-pirometrii-ih-dostoinstva-i-nedostatki-klassifikaciya-pirometrov.php> (дата обращения 20.03.2016).
68. Методы расчета оптимальной настройки промышленных регуляторов/ Приезжаев А.Б. – Омск: изд-во ОмГТУ, 2002.
69. МИ 1200-86 Методические указания. ГСИ. Преобразователи первичные пирометрические полного и частичного излучения. Методика поверки. НПО "Метрология". - М., 1986. – 16 с.
70. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л., Машиностроение, 1977. – 600 с.
71. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 5: Кн. 1: В.П. Вавилов. Тепловой контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 679 с.
72. Нестерук Д.А., Вавилов В.П. Тепловой контроль и диагностика. Учебное пособие. – Томск:, 2007. – 104 с.
73. Олейник, Б.М. Приборы и методы температурных измерений[Текст] / Б.М. Олейник, С.И. Ладзина, В.П. Ладзин, О.М. Жагуло.-М.: Изд. Стандартов, 1987.- 296 с.
74. Орлов В.Ю. Производство технического углерода для резин/ В.Ю. Орлов, А.М. Комаров, Л.А. Ляпина – Ярославль: Издательство Александр Рутман, 2002. – 512 с.
75. Орлов И.Я., Афанасьев А.В., Никифоров И.А. Оптоволоконный прецизионный инфракрасный радиометр// Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского. – 2011. - №5(3) – С. 118-123.
76. Очан, Ю.С. Методы математической физики [Текст] / Ю.С. Очан – М.: Высш. Школа, 1965. – 384с.
77. Парфинский, В.А. Фотометрические методы измерения коэффициентов излучения при температурах, близких к комнатной// Оптический журнал. - 1995. - №6. - С. 73-78.

78. Пат. 2210099 Российская Федерация. М П К 7 С 05 D 23/30, G 01J 6/08. Устройство термостатирования фотоприемника//В. А. Захаренко, А.Г. Шкаев; заявитель Омский государственный технический университет. - 2001116288/09; заявл. 13.06.2001; опубл. 10.08.2003, Бюл. №22. -4 с.: ил
79. Пат. 2404412 Российская Федерация. МПК GaJ 1/44. Импульсное фотометрическое устройство / Захаренко В.А., Шкаев А.Г., Бабилов А.А. (РФ); Заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение "Омский государственный технический университет", заявл. 23.04.2008; опубл. 20.11.2010. Бюл. № 32.
80. Пат. 2456557 G01J 5/06 Российская Федерация. Способ измерения температуры/ Захаренко В.А., Кликушин Ю.Н., Орлов С.А., Шкаев А.Г. (РФ); Заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение "Омский государственный технический университет", 11.03.2011; опубл. 20.07.2012. Бюл. № 20.
81. Патент РФ №12210099. МКИ G0SD 23/30. Устройство термостатирования фотоприёмника / В.А. Захаренко, А.Г. Шкаев. Опубл. 10.08.2003. Бюл.22.
82. Патент РФ №2485458, МКИ G 01 J 05/60. Пирометр спектрального отношения/В.А. Захаренко, Д.Г. Лобов, Д.Б. Пономарев, А.Г. Шкаев, заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет». № 2011149297/28; заявл. 02.12.2011; опубл. 20.06.2013 г, Бюл. №17.-4с.: ил.
83. Пахолкин Е.В. Анализ методов оценки температуры вспышки в узлах трения (обзор) /И.О. Кобзев, Е.В. Пахолкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии . - 2010. - №2-3. – с. 9-16.
84. Пономарев Д.Б. Источник питания пирометра спектрального отношения / Зенков В.В., Пономарев Д.Б.// Россия молодая: передовые технологии в промышленность: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. - Омск: ОмГТУ, 2015. Кн. 2. – С. 61-63.



85. Пономарев Д.Б. Модель пирометрического калибратора / Захаренко В.А., Пономарев Д.Б. // Динамика систем, механизмов и машин: Материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. - Кн. 1. – С. 409 -412.
86. Пономарев Д.Б. Прецизионный терморегулятор на основе микроконтроллера ADUC824/ Захаренко В.А., Лобов Д.Г., Пономарев Д.Б.// Измерение, контроль, информатизация: Материалы шестой между-нар. науч.-техн. конф.– Барнаул, 2006.- С. 109-114.
87. Пономарев Д.Б. Терморегулируемый калибратор для пирометрии / Захаренко В.А., Пономарев Д.Б.// Наука. Технологии. Инновации: Материалы всерос. науч. конф. молодых ученых в 7-ми частях. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – Ч. 2, С. 17 -19.
88. Пономарев Д.Б., Захаренко В.А. Модель пирометрического калибратора// Динамика систем, механизмов и машин: Материалы VII Междунар. Науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. Кн. 1. – с. 409 - 412.
89. Пономарев Д.Б., Захаренко В.А. Модель пирометрического калибратора// Динамика систем, механизмов и машин// Материалы VII Междунар. Науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. Кн. 1. – с. 409 -412.
90. Пономарев Д.Б., Захаренко В.А., Кликушин Ю.Н. Пирометры компенсационного типа // Метрология. - 2014. - №4. - С. 25-31.
91. Пономарев Д.Б., Захаренко В.А., Кликушин Ю.Н. Фотодиодный пирометр спектрального отношения // Приборы. - 2014. - №8. - С. 1-4.
92. Пономарев Д.Б., Захаренко В.А., Райковский Н.А., Юша В.Л. Методика бесконтактного измерения температуры поверхности вращающегося вала бессмазочного подшипника // Вестник машиностроения. – 2012. -№3. - С. 50-51.
93. Пономарев Д.Б. Метрологические средства для пирометрии// Россия молодая: передовые технологии в промышленность: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. Кн. 1. – с. 220 -224.

94. Поскачей А.А., Чубаров Е.П. Оптико-электронные системы измерения температуры. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
95. Правила устройства электроустановок. 7-й выпуск. - Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2007.
96. Радиационные характеристики объектов контроля температуры в металлургии. Справочник. Беленький А.М. и др. – М.: изд-во Московского Государственного Института Стали и Сплавов, 2003 – 29 с., илл.
97. Райковский Н.А. Обеспечение работоспособности несмазываемых охлаждаемых подшипников скольжения малорасходных турбоагрегатов на основе моделирования тепловых процессов и совершенствования конструкций [текст] : дис. ... канд. тех. наук / Н.А. Райковский. – Омск : ОмГТУ, 2012. – 238 с.
98. Расчет и моделирование физических полей с использованием программы FlexPDE [Текст] / А. Н. Лепетаев, А. В. Косых ; ОмГТУ. - Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. - 134 с.
99. РД 153-34.0-20.363-99 Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ.
100. Рибо Г. Оптическая пирометрия. М.—Л.: ГТТИ, 1934. – 136 с.
101. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982.-296 с.
102. Свет, Д.Я. Температурное излучение металлов и некоторых веществ [Текст] / Свет Д.Я.//. – М: Металлургия, 1964. – 136 с.
103. Сеньков А .Г., Фираго В.А. Оптимизация характеристик пирометров спектрального отношения// Вестн. БГУ. Сер. 1. 2009. № 1. С. 47-54.
104. Сеньков А .Г., Фираго В.А. Оптимизация характеристик пирометров спектрального отношения// Вестн. БГУ. Сер. 1. 2008. № 3. С. 38-44.
105. Соболева, Н.А. Фотоэлектронные приборы [Текст] / Н.А. Соболева, А.Е. Меламид. – М.: Высшая школа, 1974 – 376с.
106. Справочник конструктора оптико-механических приборов / [Текст] / Под ред. В.А. Попова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742с.

107. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т. 3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1992. – 730 с. : ил.
108. СТП ОАО ДСК «Автобан»- 002-2002. Устройство покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов и асфальтобетонных и других типов смесей на основе вязких битумов. Технологический регламент.- 2002.-43с.
109. СТП ОАО ДСК «Автобан»- 003-2002. Приготовление асфальтобетонных и других битумосодержащих смесей. Технологический регламент.-2002.-30 с.
110. Тарасов, В. В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа [Текст] / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. - М.: Логос, 2004. - 444 с.
111. Теплотехника : Учеб. для вузов/ В.Н. Луканин, Шатров Н.Г., Камфер Г.Н. и др.; Под ред. Луканина В.Н. -М: Высш. Школа. – 1999. – 671с.
112. Фрунзе, А.А., Фрунзе А.В. О погрешностях измерений температуры реальных объектов энергетическими пирометрами//Датчики и системы. 2014. № 3. С. 41-43.
113. Фрунзе, А.В. Влияние методических погрешностей пирометра на выбор прибора. – Фотоника, 2012, № 3, с.46–51.
114. Фрунзе, А.В. Методические погрешности пирометров и способы их минимизации. – Метрология, 2012, № 7, с.25–38.
115. Фрунзе, А.В. Микроконтроллеры? Это же просто! Т.4 - М.: Додека, 2008 – 464 с.
116. Фрунзе, А.В. О дальнейших путях развития пирометрии. – Приборы, 2012, № 7, с.54–59.
117. Фрунзе, А.В. Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения. – Фотоника, 2009, № 4, с.32–37.
118. Фрунзе, А.В. Расчетный метод определения температуры спектрального отношения. – Измерительная техника, 2010, № 6, с.39–41.
119. Фрунзе, А.В. Об одной малоизвестной особенности пирометров спектрального отношения – Фотоника, 2013, № 3, с.86–94.

120. Чернышева, Н.С., Ионов Б.П., Ионов А.Б. Диагностика измерительной ситуации при бесконтактных измерениях температуры в сложных условиях// Омский научный вестник. – 2016. - №6 – С. 147-151.
121. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст]: научное издание / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
122. Шкаев, А.Г. Повышение термостабильности оптико-электронных приборов фотометрического и бесконтактного теплового контроля [текст] : дис. ... канд. тех. наук / А.Г. Шкаев. – Омск : ОмГТУ, 2002 . – 194 с.
123. Яковлев, А.В. Особенности применения широкополосных приемников излучения в пирометрах спектрального отношения// Автометрия. – 2004. - №4 – С. 44-49.
124. Якушенков, Ю.Г. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах [текст] / Ю.Г. Якушенков, В.М. Луканцев, М.П. Колосов.-М.: Радио и связь, 1981.-180с
125. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для студентов вузов.-4-е изд. [Текст] / Ю.Г. Якушенков – М.: Лотос, 1999. – 480 с.
126. 4000 SERIES HIGH TEMPERATURE BLACKBODY// Santa Barbara Infrared, Inc. [Электронный ресурс] URL: [http://www.sbir.com/Prod\\_Std\\_BB\\_4000\\_Series\\_High\\_Temperature\\_Blackbody.asp](http://www.sbir.com/Prod_Std_BB_4000_Series_High_Temperature_Blackbody.asp) (дата обращения: 21.12.2017).
127. Araujo A. Multi-spectral pyrometry—a review // Measurement Science and Technology. 2017. Vol. 28. 082002. DOI: 10.1088/1361-6501/aa7b4b
128. Chen H, Chen C. Determining the emissivity and temperature of building materials by infrared thermometer // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 126. P. 130–137. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.027
129. Clay R.W., Wild N.R., Bird D.J., Dawson B.R., Johnston M., Patrick R. and Sewell A. A Cloud Monitoring System for Remote// Sites Publications of the

<http://www.publish.csiro.au/paper/AS98332.htm>

130. Foate M.C, Yones E.W. High performance micromashed thermopile linear arrays / Proc. SPIE. 1998.V. 3329.P. 192 – 197.
131. Frunze A. V., A numerical method of determining the spectral-ratio temperature// Measurement Techniques. 2010. Vol. 53. P. 664-667.
132. Fu T., Liu J., Duan M., Zong A. Temperature measurements using multicolor pyrometry in thermal radiation heating environments // Review of Scientific Instruments. 2014. Vol. 85. 044901. DOI: 10.1063/1.4870252
133. Fu T., Duan M., Tang J., Shi C. Measurements of the directional spectral emissivity based on a radiation heating source with alternating spectral distributions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 90. P. 1207–1213. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.064
134. Jadin M.S., Taib S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography// Infrared Physics & Technology. 2012. Vol. 55. P. 236–245. DOI:10.1016/j.infrared.2012.03.002
135. Jadin M.S., Taib S. Two-Color Pyrometer for Process Temperature Measurement During Machining // Journal of lightwave technology. 2016. Vol. 34, NO. 4. P. 1380-1386. DOI: 10.1109/JLT.2015.2513158
136. LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7915.pdf> (дата обращения: 02.09.2015).
137. Neumann N., Banta V., Comparison of Pyroelectric and Thermopile Detectors// IRS<sup>2</sup> Conferences 2013, P. 139-143. DOI 10.5162/irs2013/iP12
138. Sen'kov A. G., Firago V. A., Reduction of methodological errors in determining the temperature of metals by two-color pyrometers// Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2006. Vol. 79. P. 768-772.
139. US6320450 Temperature sensing circuit using thermopile sensor.

140. Vardelle, M. , Renault, Th., Fauchais, P., Choice of an IR pyrometer to measure the surface temperature of a coating during its formation in air plasma spraying// High Temperature Material Processes. 2002. Vol. 6. P. 469-489.
141. Zhang F., Yu K., Zhang K., Liu Ya., Xu K., Liu Yu., An emissivity measurement apparatus for near infrared spectrum // Infrared Physics & Technology. 2015. Vol. 73. P. 275–280. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.10.001
142. Zhang Y., Zhang Y., Lu R., Shu S., Lang X., Yang L. Investigation of the normal spectral band emissivity characteristic within 7.5 to 13 $\mu$ m for Molybdenum between 100 and 500°C // Infrared Physics & Technology. 2017. Vol. 88. P. 74–80. DOI:10.1016/j.infrared.2017.11.017
143. Zhou X., Hobbs M.J., White B.S., David J. P. R., Willmott J. R., Tan C. H. An InGaAlAs–InGaAs two-color photodetector for ratio thermometry// IEEE transactions on electron devices. 2014. Vol. 61, No. 3. P. 838 -843. DOI: 10.1109/TED.2013.2297409

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет пирометра спектрального отношения, реализованного на одном фотодиоде ФД-256, и его погрешностей

$i := 0..15$       $j := 0..15$

Экспериментальные значения длины волны, мкм:

$\lambda_{эi} := (0.45 + i \cdot 0.05) \cdot 10^{-6}$

Экспериментальные значения спектральной чувствительности ФД-256, А/Вт:

$S_{kz} := \text{READPRN}("kz.txt")$

$S_{fd} := \text{READPRN}("fd.txt")$

$S_{fd100} := \text{READPRN}("fd100.txt")$

$e_{Fe} := \text{READPRN}("eFe.txt")$

Зависимость(линейная интерполяция):

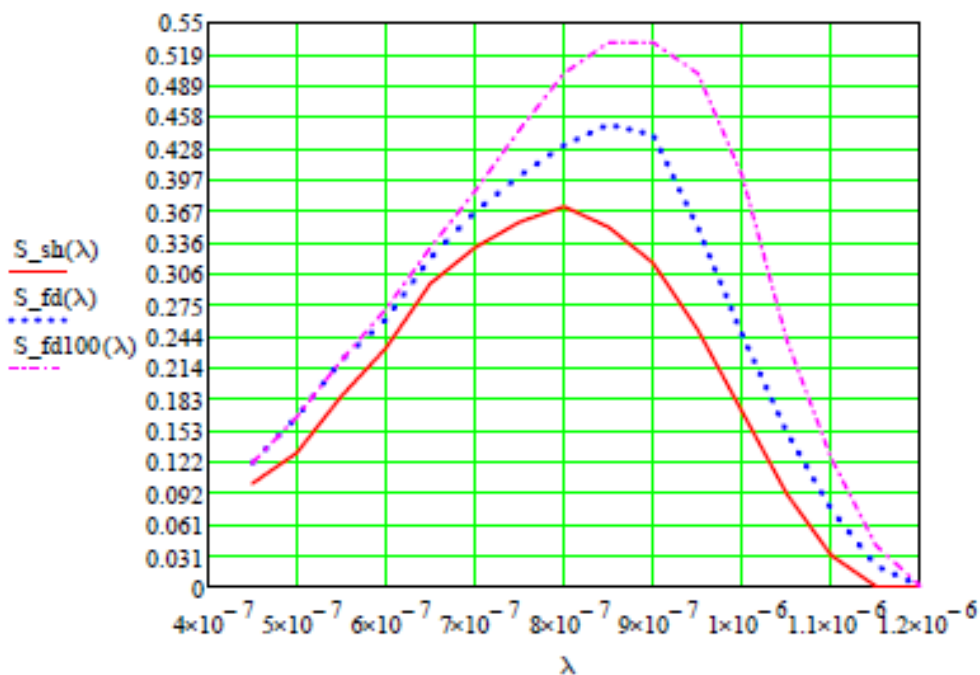
$\lambda := 0.45 \cdot 10^{-6}, 0.5 \cdot 10^{-6} .. 1.2 \cdot 10^{-6}$

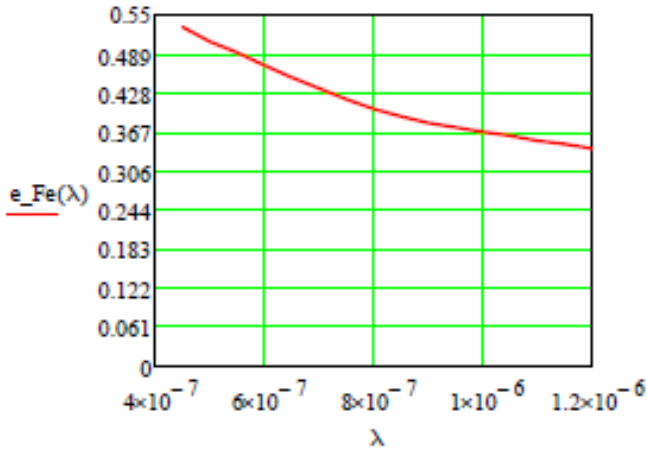
$S_{sh}(\lambda) := \text{linterp}(\lambda_{э}, S_{kz}, \lambda) \cdot 10^{-3}$

$S_{fd}(\lambda) := \text{linterp}(\lambda_{э}, S_{fd}, \lambda) \cdot 10^{-3}$

$S_{fd100}(\lambda) := \text{linterp}(\lambda_{э}, S_{fd100}, \lambda) \cdot 10^{-3}$

$e_{Fe}(\lambda) := \text{linterp}(\lambda_{э}, e_{Fe}, \lambda)$





$$T := 700 + 273, 725 + 273 .. 2000 + 273$$

$$h := 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} - \text{постоянная Планка} \quad c := 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} - \text{скорость света в вакууме}$$

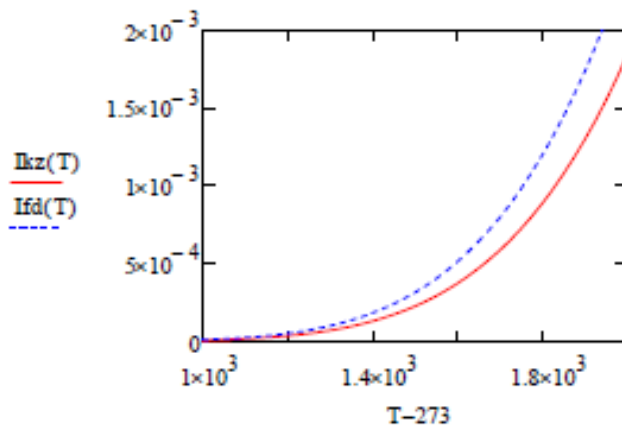
$$k_B := 1.3805 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} - \text{постоянная Больцмана}$$

$$c1 := 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \quad c2 := \frac{h \cdot c}{k_B} \quad A := \frac{25 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 10^{-4}}{(0.5)^2}$$

$$r(\lambda, T) := c1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left( e^{\frac{c2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1} \quad \text{- функция Планка} \quad A = 3.142 \times 10^{-8}$$

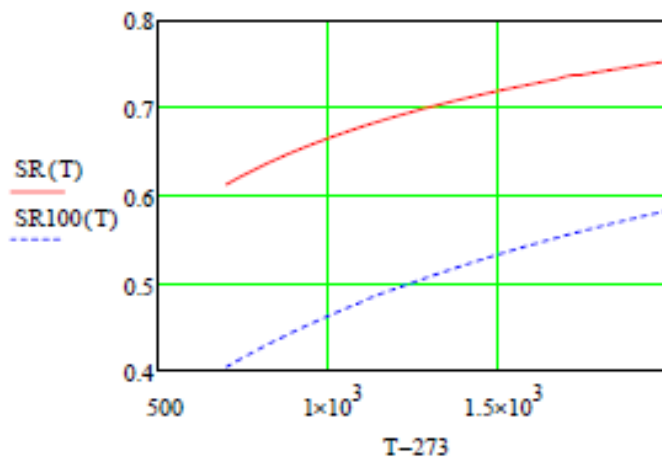
$$Ikz(T) := A \cdot \int_{0.45 \cdot 10^{-6}}^{1.2 \cdot 10^{-6}} S_{sh}(\lambda) \cdot r(\lambda, T) d\lambda \quad Ifd(T) := A \cdot \int_{0.45 \cdot 10^{-6}}^{1.2 \cdot 10^{-6}} S_{fd}(\lambda) \cdot r(\lambda, T) d\lambda$$

$$Ifd100(T) := A \cdot \int_{0.45 \cdot 10^{-6}}^{1.2 \cdot 10^{-6}} S_{fd100}(\lambda) \cdot r(\lambda, T) d\lambda$$



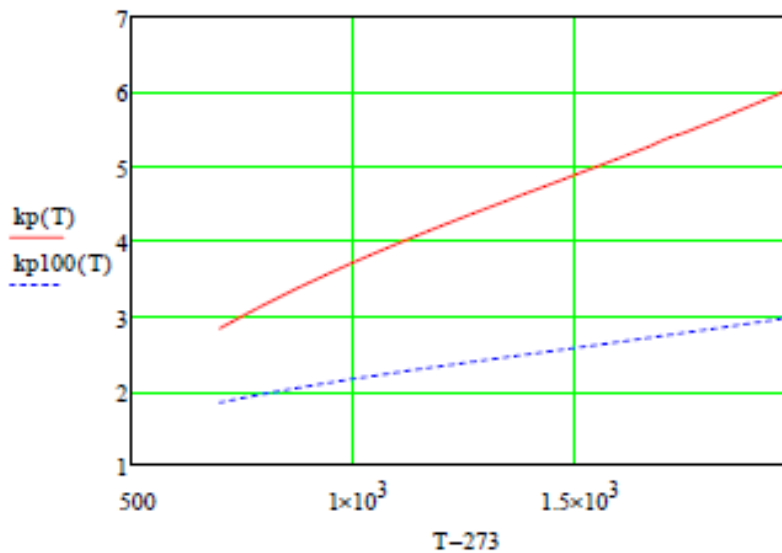


$$SR(T) := \frac{I_{kz}(T)}{I_{fd}(T)} \quad SR100(T) := \frac{I_{kz}(T)}{I_{fd100}(T)}$$



$$kp(T) := \frac{SR(T)}{T \cdot \left( \frac{d}{dT} SR(T) \right)}$$

$$kp100(T) := \frac{SR100(T)}{T \cdot \left( \frac{d}{dT} SR100(T) \right)}$$



темновой ток

$$I_t := 5 \cdot 10^{-9} \quad \Delta f := 8 \quad q_e := 1.6 \cdot 10^{-19} \quad \Delta I := \frac{I_{fd}(2000 + 273)}{2^{16}}$$

$$Tr(T) := kp(T) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q_e \cdot \Delta f}{I_{kz}(T) + I_t} + \frac{2 \cdot q_e \cdot \Delta f}{I_{fd}(T) + I_t}} \quad \Delta I = 3.712 \times 10^{-8}$$

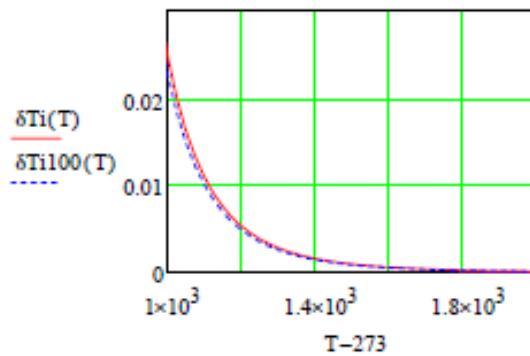
$$Tr(1273) = 2.984 \times 10^{-6} \quad Tr(1573) = 1.102 \times 10^{-6}$$

$$\delta Ti(T) := kp(T) \cdot \sqrt{(Tr(T))^2 + \left( \frac{\Delta I}{I_{kz}(T) + I_t} \right)^2 + \left( \frac{\Delta I}{I_{fd}(T) + I_t} \right)^2}$$

$$\delta Ti(1273) = 0.025 \quad \delta Ti(1573) = 2.855 \times 10^{-3}$$

$$\text{Tr}100(T) := \text{kp}(T) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q_e \cdot \Delta f}{\text{Ikz}(T) + \text{It}} + \frac{2 \cdot q_e \cdot \Delta f}{\text{Ifdl}100(T) + \text{It}}} \quad \text{Tr}100(1273) = 2.796 \times 10^{-6}$$

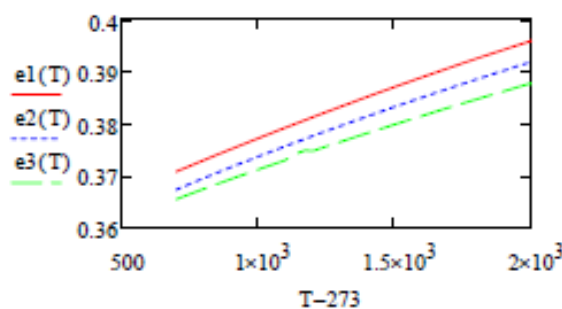
$$\delta\text{Ti}100(T) := \text{kp}(T) \cdot \sqrt{(\text{Tr}(T))^2 + \left(\frac{\Delta I}{\text{Ikz}(T) + \text{It}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{\text{Ifdl}100(T) + \text{It}}\right)^2} \quad \delta\text{Ti}100(1273) = 0.023$$



$$e1(T) := \frac{\int_{0.45 \cdot 10^{-6}}^{1.2 \cdot 10^{-6}} e_{\text{Fe}}(\lambda) \cdot S_{\text{sh}}(\lambda) \cdot r(\lambda, T) \, d\lambda}{\int_{0.45 \cdot 10^{-6}}^{1.2 \cdot 10^{-6}} S_{\text{sh}}(\lambda) \cdot r(\lambda, T) \, d\lambda}$$

$$e2(T) := \frac{\int_{0.45 \cdot 10^{-6}}^{1.2 \cdot 10^{-6}} e_{\text{Fe}}(\lambda) \cdot S_{\text{fd}}(\lambda) \cdot r(\lambda, T) \, d\lambda}{\int_{0.45 \cdot 10^{-6}}^{1.2 \cdot 10^{-6}} S_{\text{fd}}(\lambda) \cdot r(\lambda, T) \, d\lambda}$$

$$e3(T) := \frac{\int_{0.45 \cdot 10^{-6}}^{1.2 \cdot 10^{-6}} e_{\text{Fe}}(\lambda) \cdot S_{\text{fd}100}(\lambda) \cdot r(\lambda, T) \, d\lambda}{\int_{0.45 \cdot 10^{-6}}^{1.2 \cdot 10^{-6}} S_{\text{fd}100}(\lambda) \cdot r(\lambda, T) \, d\lambda}$$



$$\delta\text{Te}(T) := \text{kp}(T) \cdot \left( \frac{e1(T)}{e2(T)} - 1 \right)$$

$$\delta\text{Te}100(T) := \text{kp}100(T) \cdot \left( \frac{e1(T)}{e3(T)} - 1 \right)$$

$$\delta\text{Te}(1273) = 0.035$$

$$\delta\text{Te}100(1273) = 0.035$$

Расчет коэффициента излучения алюминия и погрешностей определения радиационной температуры в отсутствии учета  $\varepsilon(\lambda, T)$  и при наличии фоновых источников излучения

алюминий

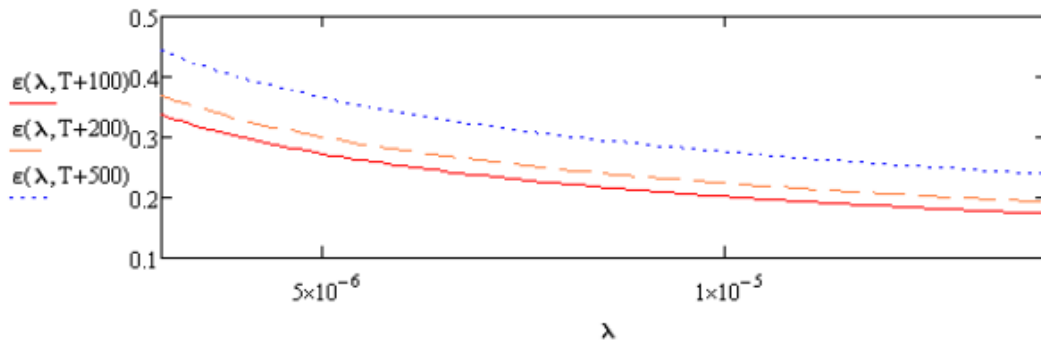
$$\rho := 2.82 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha := 3.6 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda := 3 \cdot 10^{-6}, 3.1 \cdot 10^{-6} .. 14 \cdot 10^{-6}$$

$$T_{\text{amb}} := 273 + 20$$

$$\varepsilon_{\text{amb}}(\lambda, T) := \left[ 0.365 \sqrt{\frac{\rho \cdot [1 + \alpha(T - 293)]}{\lambda}} - 0.0666667 \frac{\rho \cdot [1 + \alpha(T - 293)]}{\lambda} + 0.006 \sqrt{\left[ \frac{\rho \cdot [1 + \alpha(T - 293)]}{\lambda} \right]^3} \right]^{-1}$$



$$T_{\text{amb}} := 50 + 273, 100 + 273 .. 600 + 273$$

$$h := 6.625 \cdot 10^{-34} \quad \text{Дж} \cdot \text{с} - \text{постоянная Планка} \quad \varepsilon_{\text{amb}} := 3 \cdot 10^8$$

$$k_B := 1.3805 \cdot 10^{-23} \quad \text{Дж/К} - \text{постоянная Больцмана}$$

$$c1 := 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \quad c2 := \frac{h \cdot c}{k_B}$$

$$r(\lambda, T) := c1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left( e^{\frac{c2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1} \quad \text{- функция Планка}$$

$$d1 := \frac{11.5}{1000} = 0.012 \quad d2 := \frac{1}{50} = 0.02$$

$$S1 := \frac{(\pi \cdot d1^2)}{4} \quad S2 := \frac{(\pi \cdot d2^2)}{4}$$

$$S1 = 1.039 \times 10^{-4} \quad S2 = 3.142 \times 10^{-4} \quad L_{\text{amb}} := 1$$

$$K_{\text{amb}} := \frac{(S1 \cdot S2)}{\pi \cdot L^2} \quad K = 1.039 \times 10^{-8} \quad A_{\text{amb}} := \frac{K}{10}$$

$$T_b := 273 + 100$$

$$Fok(T) := K \cdot \int_{7 \cdot 10^{-6}}^{14 \cdot 10^{-6}} \epsilon(\lambda, T) \cdot (\pi(\lambda, T) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda$$

$$Fok60(T) := K \cdot \int_{7 \cdot 10^{-6}}^{14 \cdot 10^{-6}} \epsilon(\lambda, T) \cdot (\pi(\lambda, T) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda + A \cdot \int_{7 \cdot 10^{-6}}^{14 \cdot 10^{-6}} (1 - \epsilon(\lambda, T)) \cdot (\pi(\lambda, 273 + 60) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda$$

$$Fokf20(T) := K \cdot \int_{7 \cdot 10^{-6}}^{14 \cdot 10^{-6}} \epsilon(\lambda, T) \cdot (\pi(\lambda, T) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda + A \cdot \int_{7 \cdot 10^{-6}}^{14 \cdot 10^{-6}} (1 - \epsilon(\lambda, T)) \cdot (\pi(\lambda, 273 - 20) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda$$

$$Fbb(Tb) := K \cdot \int_{7 \cdot 10^{-6}}^{14 \cdot 10^{-6}} (\pi(\lambda, Tb) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda$$

$$\epsilon_{a100} := \frac{Fok(273 + 100)}{Fbb(273 + 100)}$$

$$\epsilon_{a100} = 0.2$$

$$Fbb(300) = 2.237 \times 10^{-7}$$

$$Fok(300) = 4.008 \times 10^{-8}$$

$$\epsilon_{a200} := \frac{Fok(273 + 200)}{Fbb(273 + 200)}$$

$$\epsilon_{a200} = 0.225$$

$$\epsilon_{a300} := \frac{Fok(273 + 300)}{Fbb(273 + 300)}$$

$$\epsilon_{a300} = 0.247$$

$$\epsilon_{a400} := \frac{Fok(273 + 400)}{Fbb(273 + 400)}$$

$$\epsilon_{a400} = 0.266$$

$$\epsilon_{a500} := \frac{Fok(273 + 500)}{Fbb(273 + 500)}$$

$$\epsilon_{a500} = 0.283$$

$$\epsilon_{a600} := \frac{Fok(273 + 600)}{Fbb(273 + 600)}$$

$$\epsilon_{a600} = 0.299$$

$$Foks(T) := K \cdot \int_{3.5 \cdot 10^{-6}}^{5 \cdot 10^{-6}} \epsilon(\lambda, T) \cdot (\pi(\lambda, T) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda$$

$$Foks60(T) := K \cdot \int_{3.5 \cdot 10^{-6}}^{5 \cdot 10^{-6}} \epsilon(\lambda, T) \cdot (\pi(\lambda, T) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda + A \cdot \int_{3.5 \cdot 10^{-6}}^{5 \cdot 10^{-6}} (1 - \epsilon(\lambda, T)) \cdot (\pi(\lambda, 273 + 60) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda$$

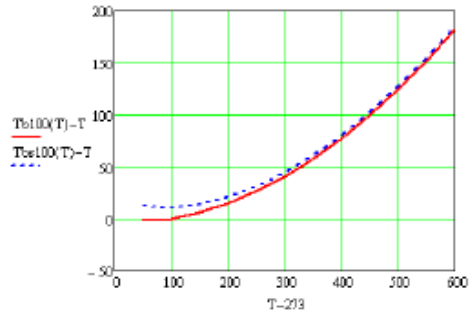
$$Foks20(T) := K \cdot \int_{3.5 \cdot 10^{-6}}^{5 \cdot 10^{-6}} \epsilon(\lambda, T) \cdot (\pi(\lambda, T) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda + A \cdot \int_{3.5 \cdot 10^{-6}}^{5 \cdot 10^{-6}} (1 - \epsilon(\lambda, T)) \cdot (\pi(\lambda, 273 - 20) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda$$

$$Fbs(Tb) := K \cdot \int_{3.5 \cdot 10^{-6}}^{5 \cdot 10^{-6}} (\pi(\lambda, Tb) - \pi(\lambda, 273 + 20)) \, d\lambda$$

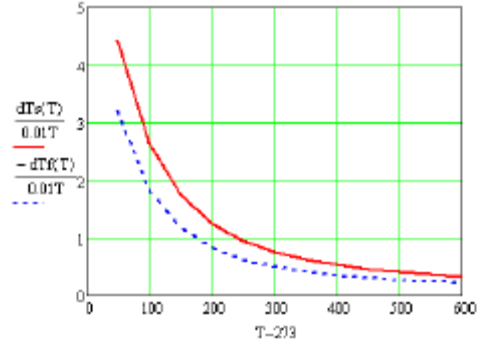
$$\epsilon_{a100} := \frac{Foks(273 + 100)}{Fbs(273 + 100)}$$

$$\epsilon_{a100} = 0.281$$

$T_a = 300$   
 $T_{b100} = 300$   
 Given  
 $\text{sol100}(\text{Pob}(T_{b100})) = \text{Fok}(T)$   
 $T_{b100}(T) = \text{Find}(T_{b100})$

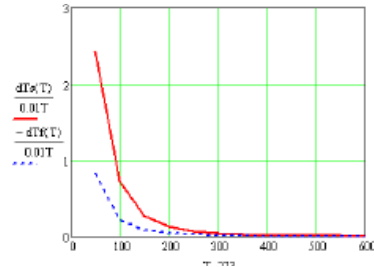


$T_{b100} = 300$   
 Given  
 $\text{sol100}(\text{Pob}(T_{b100})) = \text{Fok2}(T)$   
 $T_{b100}(T) = \text{Find}(T_{b100})$   
 $dTs(T) = T_{b100}(T) - T_{b100}(T)$



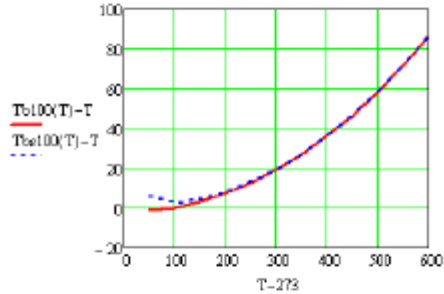
$T_{b100} = 300$   
 Given  
 $\text{sol100}(\text{Pob}(T_{b100})) = \text{Fok22}(T)$   
 $T_{b100}(T) = \text{Find}(T_{b100})$   
 $dTs(T) = T_{b100}(T) - T_{b100}(T)$

$T_{b100} = 300$   
 Given  
 $\text{sol100}(\text{Pob}(T_{b100})) = \text{Fok3}(T)$   
 $T_{b100}(T) = \text{Find}(T_{b100})$

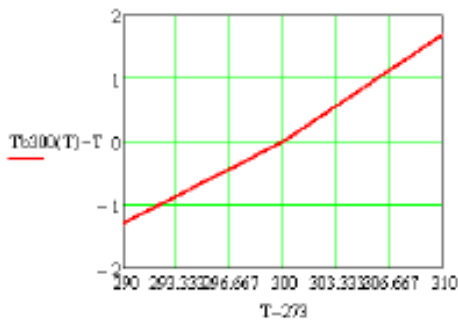


$T_{b100} = 300$   
 Given  
 $\text{sol100}(\text{Pob}(T_{b100})) = \text{Fok32}(T)$   
 $T_{b100}(T) = \text{Find}(T_{b100})$   
 $dTs(T) = T_{b100}(T) - T_{b100}(T)$

$T_{b100} = 300$   
 Given  
 $\text{sol100}(\text{Pob}(T_{b100})) = \text{Fok322}(T)$   
 $T_{b100}(T) = \text{Find}(T_{b100})$   
 $dTs(T) = T_{b100}(T) - T_{b100}(T)$



$T_{b300} = 300$   
 Given  
 $\text{sol300}(\text{Pob}(T_{b300})) = \text{Fok}(T)$   
 $T_{b300}(T) = \text{Find}(T_{b300})$

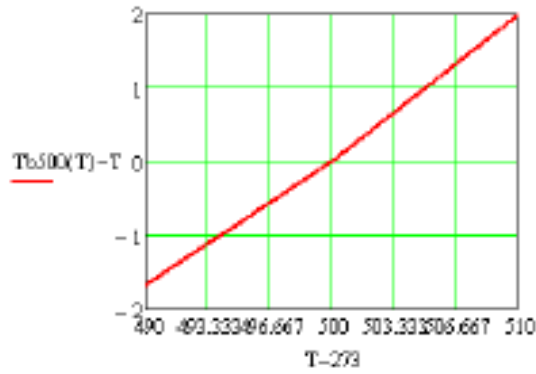


Tb500 = 500

Given

$$\text{ea500}(\text{Fbb}(\text{Tb500})) = \text{Fak}(\text{T})$$

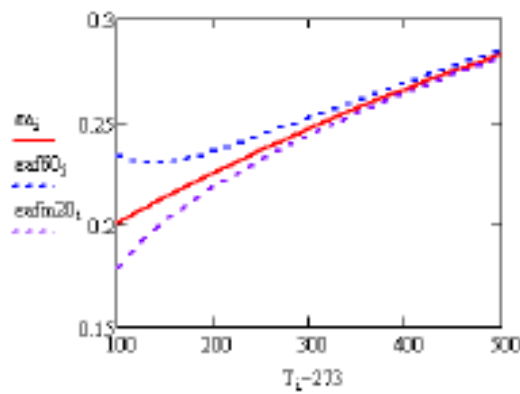
$$\text{Tb500}(\text{T}) = \text{Find}(\text{Tb500})$$



$i = 4..20$

$$T_i = 273 + i \cdot 25$$

$$\text{ea}_i := \frac{\text{Fak}(T_i)}{\text{Fbb}(T_i)} \quad \text{eaf60}_i := \frac{\text{Fak60}(T_i)}{\text{Fbb}(T_i)} \quad \text{eafm20}_i := \frac{\text{Fakm20}(T_i)}{\text{Fbb}(T_i)}$$



$$\text{eas}_i := \frac{\text{Faks}(T_i)}{\text{Fbbs}(T_i)} \quad \text{easf60}_i := \frac{\text{Faks60}(T_i)}{\text{Fbbs}(T_i)} \quad \text{easfm20}_i := \frac{\text{Faksfm20}(T_i)}{\text{Fbbs}(T_i)}$$

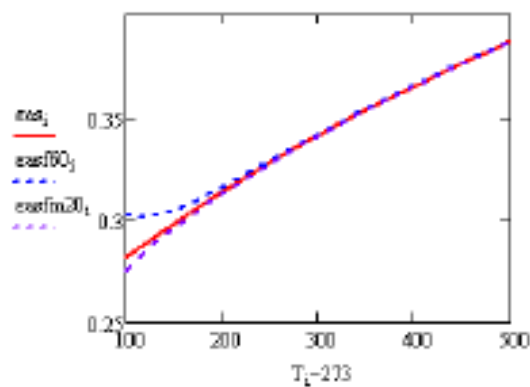


Таблица 1. Значения коэффициента теплопроводности  $\alpha$  при изменениях температур среды и поверхности образца стали

$T_a$ °C	$T_r$ °C	$Gr \cdot 10^4$	Pr	$\nu$ , $\text{м}^2/\text{с} \cdot 10^{-6}$	$N_u$	$\alpha$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К
-40	100	3,2033			5,3634	11,5713
	200	5,4868	0,728	10,04	6,5127	12,8349
	300	7,7767			7,301886	15,7248
	400	10,060			7,9174	17,0703
	500	12,350			8,463956	18,2286
-20	100	1,6641			4,326476	9,6876
	200	3,0509	0,716	12,79	5,29955	11,8638
	300	4,4377			6,0019	13,455
	400	5,8245			6,56378	14,7069
	500	7,2113			6,99796	15,6897
0	100	1,1970			3,851432	9,56709
	200	2,3941	0,707	13,28	4,855154	12,051
	300	3,5892			5,562612	13,806
	400	4,7889			6,109168	15,1632
	500	5,98595			6,55101	16,263
+20	100	0,6883			3,1925	8,41698
	200	1,5502			4,186006	11,0331

	300	2,4121	0,703	15,06	4,860262	12,81735
	400	3,2676			5,3634	14,1453
	500	4,1296			5,777148	15,2334
+40	100	0,3853			2,63062	7,39089
	200	1,0272			3,647112	10,2492
	300	1,6692	0,699	16,96	4,29072	12,051
	400	2,3111			4,770872	13,3965
	500	2,9531			5,153972	14,4729
+60	100	0,1910			2,08151	6,1425
	200	0,669	0,696		3,159298	9,3249
	300	1,14496		18,97	3,77992	11,1501
	400	1,62095			4,234532	12,4956
	500	2,101452			4,592092	13,5486



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

Рис. 1. Пирометр с оптической системой по схеме Кассегрена для контроля качества контактов



Рис. 2. Пирометр диафрагменного типа для контроля температуры асфальта



Рис. 3. Пирометр спектрального отношения и его установка на реакторе производства технического углерода



Рис. 4 Пирометрический калибратор

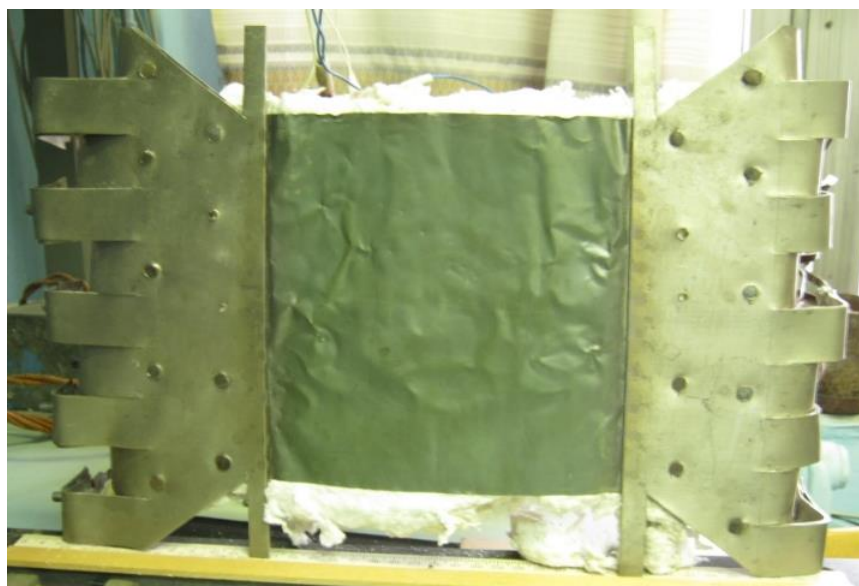


Рис. 5. Внешний вид установки протяженного излучателя

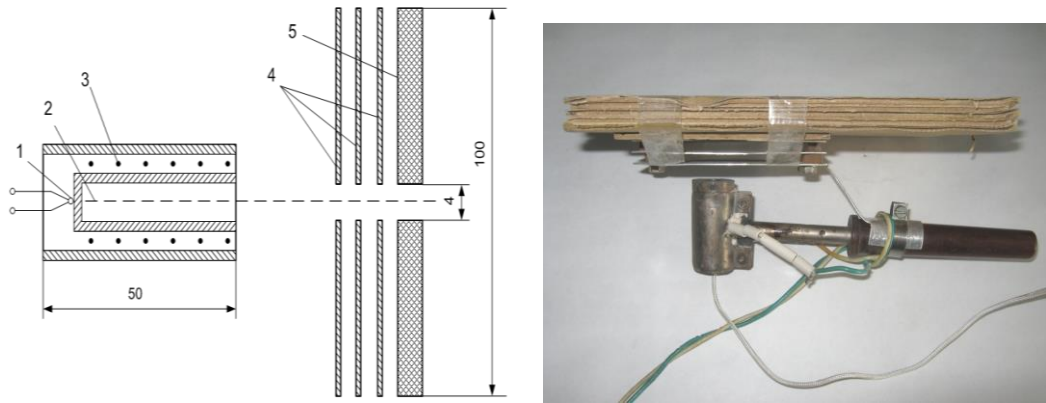


Рис. 6. Эскиз и внешний вид конструкции точечного инфракрасного излучателя

1 – термопара; 2 – излучающая полость; 3 – нагреватель нихромовая проволока; 4 – алюминиевые диафрагмы; 5 – термоизолирующая диафрагма гофрированный картон.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2485458

**ПИРОМЕТР СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ**

Изобретатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет" (RU)*

*Изобретение см. на обороте*

Заявка № 2011149297

Приоритет изобретения 02 декабря 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 июня 2013 г.

Срок действия патента истекает 02 декабря 2031 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

*Б.П. Симонов*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** <sup>(11)</sup> **2 485 458** <sup>(13)</sup> **C1**(51) МПК  
G01J 5/60 (2006.01)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2011149297/28, 02.12.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
02.12.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 02.12.2011

(45) Опубликовано: 20.06.2013 Бюл. № 17

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2290614 C1, 27.12.2006. SU 1679218 A1,  
23.09.1991. US 7217982 B2, 15.05.2007. RU  
2404412 C2, 20.11.2010.

Адрес для переписки:

644050, г.Омск, пр. Мира, 11, ОмГТУ,  
информационно-патентный отдел, О.И.  
Бабенко

(72) Автор(ы):

Захаренко Владимир Андреевич (RU),  
Лобов Дмитрий Геннадьевич (RU),  
Пономарев Дмитрий Борисович (RU),  
Шкаев Александр Геннадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования "Омский  
государственный технический университет"  
(RU)**(34) ПИРОМЕТР СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области контрольно-измерительной техники, а именно к устройствам бесконтактного измерения температуры поверхности нагретых тел методом спектрального отношения, и может быть использовано в любых отраслях промышленности для измерения температуры различных материалов и изделий. Пирометр спектрального отношения содержит объектив, фиксирующий изображение контролируемого тела на фотоприемник, перед которым установлен фильтр излучения, усилитель сигнала фотоприемника, микропроцессор с

двумя аналого-цифровыми преобразователями, индикатор температуры и элемент питания. Дополнительно введен управляемый микропроцессором переключатель, один полюс которого подключен к элементу питания, а второй - ко входу усилителя, при этом общий полюс переключателя подключен к фотоприемнику. Технический результат заключается в обеспечении возможности упрощения конструкции пирометра спектрального отношения, а также обеспечении возможности повышения чувствительности пирометра спектрального отношения. 2 ил.

RU 2 485 458 C1

RU 2 485 458 C1

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
А.В. Мышлявцев  
2018 г.

А К Т

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы Пономарева Дмитрия Борисовича, выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования « Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), на тему «Специализированные пирометрические средства теплового контроля и их метрологическое обеспечение», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Комиссия в составе:

Председатель: Юша Владимир Леонидович – зав. каф. ХКТТ, д.т.н., профессор.

Члены комиссии:

Бусаров Сергей Сергеевич - к.т.н., доцент каф. ХКТТ;

Райковский Николай Анатольевич - к.т.н., доцент каф. ХКТТ,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Д.Б. Пономарева используются в учебном процессе при проведении лабораторных занятий и в научно-исследовательской работе студентов по дисциплине: «Основы физического эксперимента» для подготовки бакалавров по направлениям 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 16.03.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения».

Методика и технические решения измерения температуры поверхности трения, разработанные при выполнении диссертации Д.Б. Пономарёвым, внедрены в руководящие документы по эксплуатации лабораторной установки для измерения температуры поверхности кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технологии».

Использованные в учебном процессе результаты диссертационной работы позволяют обеспечивать обучение на современном уровне науки и техники.


Профессор каф. ХКТТ:

 (В.Л. Юша)

Доцент каф. ХКТТ:

 (С.С. Бусаров)

Доцент каф. ХКТТ:

 (Н.А. Райковский)

ООО «Омсктехуглерод», г. Омск

## А К Т

О внедрении результатов диссертационной работы Пономарева Дмитрия Борисовича, выполненной в Омском государственном техническом университете, на тему «Специализированные пирометрические средства теплового контроля и их метрологическое обеспечение», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Комиссия в составе:

Председатель - главный метролог ООО «Омсктехуглерод» Дмитриев А.М.

члены комиссии:

Зам. главного метролога ООО «Омсктехуглерод» Коптев М.В.

Ст. инженер-метролог ООО «Омсктехуглерод» Новиков В.С.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы внедрены в систему пирометрического контроля температуры в реакторе производства технического углерода.

В системе внедрены следующие результаты исследований Д.Б. Пономарева.

1. Результаты расчетов и моделирования по реализации пирометра спектрального отношения на фотодиодном приёмнике излучения.
2. Разработанный на основе кремниевого фотодиода пирометр обеспечивает измерение температуры в реакторе производства технического углерода и работоспособен в условиях эксплуатации печи.
3. Технические решения, заложенные в алгоритм работы пирометра, обеспечивают работу прибора в условиях загрязнения защитного стекла смотрового отверстия в реакторе.

Председатель комиссии:

/А.М. Дмитриев

Члены комиссии:

/М.В. Коптев

/В.С. Новиков



**А К Т****О внедрении результатов диссертационной работы Пономарева  
Дмитрия Борисовича, «Специализированные пирометрические средства  
теплового контроля и их метрологическое обеспечение», представленной  
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Настоящим актом подтверждаю, что в ООО «Лаборатория-131» внедрены следующие результаты диссертации Д.Б. Пономарева:

1. Приборы бесконтактного инфракрасного контроля температуры контактных соединений в распределительных щитах и установках напряжением 0,4-35 КВ.
2. Калибратор для метрологического обеспечения пирометра контроля температуры контактных соединений.

Внедрённые на нашем предприятии с апреля 2016 года, технические решения, заложенные в пирометр и калибратор, разработанные Д.Б. Пономаревым при выполнении диссертационной работы, обеспечивают их эксплуатацию при сохранении метрологических параметров во всём диапазоне измерений температуры. Пирометрический калибратор обеспечивает оперативную калибровку пирометра. Программное обеспечение специализированного пирометра позволяет учитывать фоновое излучение, коэффициенты черноты и вычислять переходные сопротивления электрических контактов.

Директор ООО «Лаборатория-131»



Гошля Р.Ю.



"УТВЕРЖДАЮ"

Директор ООО «Научно-  
производственный центр Термаль»



Лобов Д.Г.

\_\_\_\_\_ 2017 г.

**А К Т**

о внедрении результатов диссертационной работы Пономарева Дмитрия Борисовича, выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), на тему «Специализированные пирометрические средства теплового контроля и их метрологическое обеспечение», представленной на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 05.11.13 - «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Комиссия в составе:

Председатель: Пономарёв Ю.Ю. - технический директор  
члены комиссии:

Захаренко В.В. - начальник электротехнической лаборатории  
Бабиков А.А. - ведущий инженер

составили настоящий акт в том, что в ООО «НПЦ Термаль» внедрены следующие результаты диссертации Д.Б. Пономарева:

1. Результаты исследований и разработки низкотемпературного пирометра с малым показателем визирования.
2. Методики и оборудование для метрологической поверки и калибровки, изготавливаемых на нашем предприятии переносных низкотемпературных пирометров и конструкций калибраторов на основе термопар.
3. Технические решения для пирометра компенсационного типа с встроенным калибратором.

Конструкторские решения и алгоритмы работы схемы управления, предложенные Пономаревым Д.Б., апробированы в опытном образце пирометра компенсационного типа с встроенным калибратором.

Председатель комиссии

Пономарёв Ю.Ю.

Члены комиссии:

Бабиков А.А.

Захаренко В.В.

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по учебной работе  
А.В. Мышлявцев  
2018 г.

АКТ

**внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы Пономарева Дмитрия Борисовича, выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования « Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), на тему «Специализированные пирометрические средства теплового контроля и их метрологическое обеспечение», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»**

Комиссия в составе:

Председатель: Кликушин Юрий Николаевич - профессор каф. электроники, д.т.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой «Электроника».


Члены комиссии:

Шкаев Александр Геннадьевич - зав. лабораториями каф. электроники, к.т.н., доцент, Вальке Алексей Александрович - к.т.н., доцент каф. электроники составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Д.Б. Пономарева используются в учебном процессе при проведении лабораторных занятий, в курсовом и дипломном проектировании, при самостоятельной работе студентов по дисциплинам: «Сенсорная электроника, датчики», «Методы и средства теплового контроля», «Оптоэлектронные средства контроля» для подготовки специалистов, бакалавров и магистров по направлениям 11.03.04 и 11.04.04.

Модель пирометрического калибратора и пирометра компенсационного типа используются в лабораторной работе «Изучение работы пирометра». Модель протяженного излучателя используется в лабораторной работе «Строчно-сканирующая тепловизионная система».

Используемые в учебном процессе результаты диссертационной работы позволяют обеспечивать обучение на современном уровне науки и техники, применять полученные компетенции при проведении курсового проектирования и при выполнении выпускных квалификационных работ.


Профессор каф. «Электроника»:

 (Ю.Н. Кликушин)

Зав.лаб каф. «Электроника»:

 (А.Г. Шкаев)

Доцент каф. «Электроника»:

 (А.А. Вальке)





## АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы Пономарева  
 Дмитрия Борисовича, выполненной в Федеральном государственном  
 бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский  
 государственный технический университет» (ОмГТУ)**

Комиссией в составе:

Председатель:

Бречкина Елена Александровна - начальник производственного отдела.

Члены комиссии:

Старкин Анатолий Сергеевич – техник по наладке и испытаниям,

Бобкова Светлана Владимировна - главный бухгалтер,

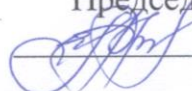
составлен настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы **«Специализированные пирометрические средства теплового контроля и их метрологическое обеспечение»**, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, внедрены нашим предприятием на асфальто-бетонном заводе (п. Николаевка) и при устройстве дорожных покрытий в г. Омске:

- пирометры диафрагменного типа для контроля температуры асфальта в кузовах автомобилей на весовой платформе его отгрузки с завода;

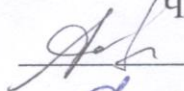
- переносной низкотемпературный пирометр для контроля температура асфальта при его укладке на дорожное полотно.

Настоящий акт составлен для представления в Учёный совет по защите диссертации Пономарева Дмитрия Борисовича

Председатель комиссии

 Бречкина Е.А.

Члены комиссии:

 Старкин А.С.

 Бобкова С.В.