

На правах рукописи

Никифоров Игорь Александрович

**ИНФРАКРАСНАЯ РАДИОМЕТРИЯ ТЕРМИЧЕСКИ
НЕОДНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ
ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ**

Специальность 01.04.03 - Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород, 2010

Работа выполнена на кафедре радиотехники радиофизического факультета
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Орлов Игорь Яковлевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Снегирев Сергей Донатович.

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Мансфельд Анатолий Дмитриевич.

Ведущая организация: ФГУП «Научно-производственное предприятие
Салют».

Защита состоится “ 23 ” июня 2010г. в 13⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном
университете им. Н.И.Лобачевского (603950 г.Нижний Новгород, ГСП-20,
пр.Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского.

Автореферат разослан “ 20 ” мая 2010г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н., доцент



Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

При решении ряда научных и технических задач (радиоастрономия, физические и химические эксперименты, контроль технологических режимов, дефектоскопия, и т.д.) требуется производить измерение температуры различных объектов преимущественно бесконтактными методами. Способы, основанные на бесконтактной передаче информации от закрепленного на объекте контактного датчика, имеют ограниченную область применения и не получили широкого распространения. Это связано с особенностями контактного измерения температуры: инвазивность метода, влияние качества контакта, сложности при измерении температуры движущихся объектов и т.д. Наиболее часто задача бесконтактной термометрии решается путем применения ИК радиометров, измеряющих интенсивность собственного теплового излучения объектов, в широком диапазоне длин волн.

Температура является информативным показателем и в медицине. Так, различные устойчивые изменения температурного профиля человека часто предшествуют клиническим проявлениям патологического процесса и, следовательно, являются показателями для ранней диагностики. Перспективность применения радиометров инфракрасного излучения подтверждается практикой использования ИК тепловидения при медико-биологических исследованиях, при профилактических осмотрах населения, при оценке эффективности и выборе тактики лечения и определения сроков выздоровления. Все это требует разработки прецизионных радиометров теплового радиоизлучения, позволяющих измерять температуру человека с высокой точностью.

При создании радиометров для контроля температур технологических процессов, медико-биологических исследований, физических и химических экспериментов, возникают следующие внешние мешающие факторы:

- зависимость излучательной способности объекта от температуры, угла наблюдения и состояния поверхности;
- помеха, связанная с приемом фонового (мешающего) ИК излучения;
- нагрев оптической системы радиометра излучением объекта при измерении высоких температур с небольших расстояний;
- внешние факторы (запыление оптической системы, рентгеновское излучение, вакуум и др.);
- внешние механические воздействия на радиометр.

Итак, вышеперечисленные особенности, наряду с требованиями высокого пространственного разрешения (показатель визирования не хуже 1:50); незначительной относительной погрешностью (не превышающей 0.5% при времени накопления 1с); широким динамическим диапазоном измеряемых температур (от 20°C до 1200°C) и нелинейной зависимостью яркостной температуры объекта от его физической температуры, обуславливают

необходимость создания прецизионной микропроцессорной системы измерения ИК излучения, способной работать в сложных внешних условиях.

Цель исследования:

Целью работы является разработка принципов построения ИК радиометров, работающих в широком диапазоне измеряемых мощностей при неизвестной и/или переменной излучательной способности поверхности объекта излучения.

Задачи работы:

1. Разработка методов устранения инструментальных и методических погрешностей модуляционных ИК радиометров, вызванных изменяемыми внешними факторами;
2. Создание автоматизированной экспериментальной установки для исследования интегральных излучательных способностей объектов в широком диапазоне температур;
3. Разработка методики реализации активно-пассивной локации в ИК радиометрии и создание ИК радиометра для контроля физических температур термически неоднородных объектов с изменяющейся излучательной способностью.

Методы исследования:

В работе использовались методы статистической радиофизики, методы радиофизических измерений, методы теории сигналов и цепей, теория погрешностей, теория построения микропроцессорных систем и разработки программного обеспечения.

Научная новизна:

1. Создан модуляционный ИК радиометр с оптико-электронной системой, позволяющей исключить температурную нестабильность модуляционной камеры;
2. Разработана методика исследования в широком диапазоне температур интегральной в ИК диапазоне излучательной способности объектов и создана автоматизированной установка, реализующая предложенную методику;
3. Предложен способ устранения влияния флуктуаций частоты модуляции в модуляционном радиометре на результаты измерений;
4. Разработана методика активно-пассивной локации в ИК диапазоне и создана измерительная система для контроля физических температур термически неоднородных объектов с изменяющейся излучательной способностью;
5. Разработаны и реализованы алгоритмы микропроцессорной обработки сигнала в цифровом модуляционном ИК радиометре, обеспечивающие улучшение метрологических свойств прибора и расширение его функциональности.

Научная и практическая значимость:

1. Запатентованный способ компенсации погрешности, вызванной нестабильностью температуры модуляционной камеры может использоваться для создания комплексов радиометрических измерений;
2. Предложенная методика реализации активно-пассивной локации в ИК радиометрии позволяет уменьшить погрешность радиометрических измерений, вызванной неконтролируемым изменением излучательной способности исследуемого объекта;
3. По результатам исследований излучательных способностей лакокрасочных покрытий разработаны рекомендации на технические условия (ТУ) для материалов, используемых при покрытии теплоносителей в атомной промышленности;
4. Создание адаптированного к офтальмологическим исследованиям прецизионного ИК радиометра позволило разработать методику дифференциальной диагностики заболеваний органов зрения.

Вклад автора:

1. Разработана автоматизированная система для исследования интегральной излучательной способности в широком диапазоне температур;
2. Предложен и теоретически обоснован способ компенсации погрешности ИК радиометрии, вызванной температурной нестабильностью модуляционной камеры;
3. Разработан портативный прецизионный ИК радиометр для медико-биологических исследований;
4. Обоснована и экспериментально доказана методика реализации активно-пассивной локации в ИК радиометрии;
5. Разработан, обоснован и реализован алгоритм обработки модулированного колебания, синхронного детектирования и интегрирования сигнала в цифровом модуляционном ИК радиометре.

На защиту выносятся:

1. Модуляционный ИК радиометр с оптико-электронной системой, позволяющей исключить температурную нестабильность модуляционной камеры;
2. Методика реализации активно-пассивной локации в ИК диапазоне и ее техническое решение для ИК радиометрии термически неоднородных объектов с изменяющейся излучательной способностью;
3. Способ исключения влияния частотной нестабильности опорного колебания на погрешности измерений пироэлектрического радиометра;
4. Алгоритмы микропроцессорной обработки в цифровом модуляционном ИК радиометре, позволяющие улучшить метрологические свойства прибора и расширить его функциональность.

Публикации, апробации на конференциях, внедрение

По результатам работы опубликованы 3 статьи в центральных рецензируемых журналах из списка ВАК; получены патент РФ на изобретение и патент РФ на полезную модель; опубликованы материалы 7 докладов в Трудах научных конференций.

Результаты исследований доложены на IV Международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности", г. Санкт-Петербург, 2007г., на Всероссийской молодежной конкурс-конференции «Электроника-2007», г. Москва, 2007г., на XIV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2008), г. Воронеж, 2008г., VII Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии», 2008 г., г. Владимир, на конференциях по радиофизике в ННГУ (2006 г., 2007 г., 2008 г., 2009 г., 2010 г.).

Результаты работы получены в рамках гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-3700.2010.2), гранта РФФИ (09-02-97074), Федеральной программы «Научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт №П2308).

Результаты работы использованы в ОКБМ им. И.И.Африкантова, в Нижегородской Медицинской Академии и Нижегородском госуниверситете им. Н.И. Лобачевского.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и двух приложений. Диссертация изложена на 150 страницах, в том числе 125 страниц основного текста. Список литературы содержит 123 наименований и приведен на 11 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагаются состояние и актуальность предмета исследования, сформулированы цели работы, изложены основные результаты и раскрыты их научная и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту и сведения об апробации результатов.

В первой главе проводится обоснование выбора типа температурного датчика и спектрального диапазона работы радиометра ИК излучения, обосновывается структура прецизионного портативного ИК радиометра для высокоточных измерений термических неоднородностей. Рассмотрена запатентованная диафрагмированная двухканальная оптическая система радиометра, показана возможность использования прецизионного радиометра для медицинской дифференциальной диагностики, приведены результаты апробации разработанного радиометра.

Сфера применения ИК радиометров постоянно расширяется, при этом повышаются требования, предъявляемые к точности, чувствительности,

пространственной разрешающей способности, быстродействию и динамическому диапазону ИК радиометров.

На рис. 1 представлена структурная схема разработанного портативного прецизионного ИК радиометра.

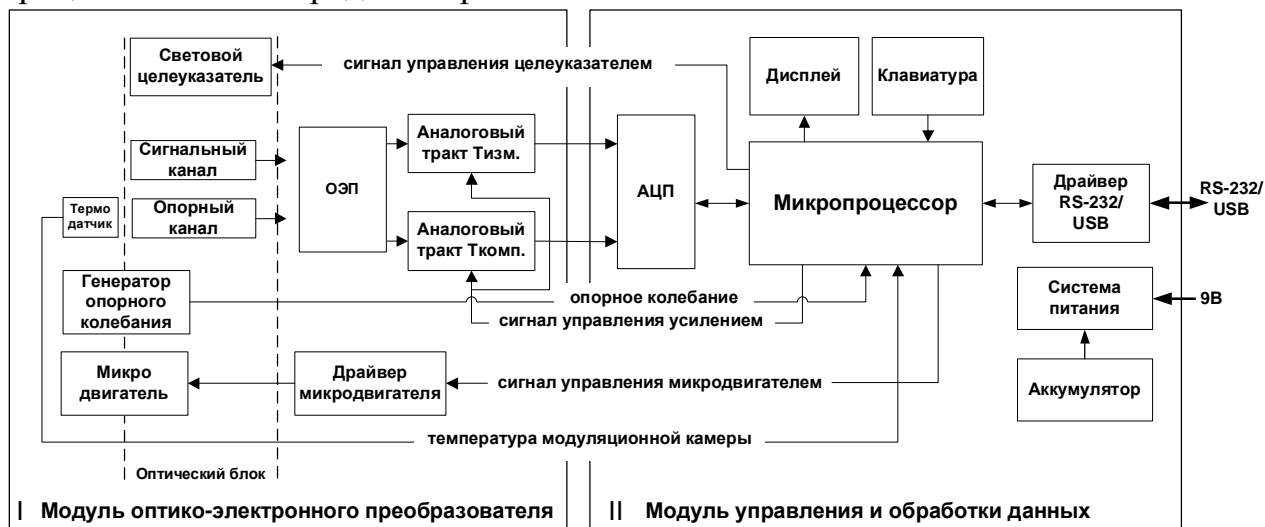


Рис. 1. Структурная схема портативного прецизионного ИК радиометра.

В качестве датчика температуры в радиометре выбран пироэлектрический приемник излучения (ППИ), отличающийся постоянством чувствительности в диапазоне 2 – 25 мкм. ППИ действует как емкостной источник напряжения и поэтому обладает малыми собственными шумами и не требует напряжения начального смещения.

Радиометр состоит из двух функционально законченных модулей: модуля оптико-электронного преобразователя (аналоговый) и модуля управления и обработки данных.

Построение радиометра на базе микропроцессорных устройств и современной элементной базы, состоящего из двух функционально законченных модулей позволило решить вопросы, связанные как с функциональностью и портативностью прибора, использования системных ресурсов и процессорного времени, подключения к ПК и в информационную сеть хост-контроллера, так и с удобством использования прибора.

Исследованы источники погрешностей модуляционной ИК радиометрии и предложены методы их уменьшения. В случае неидеальности оптической системы, в измеряемое значение будет входить величина, пропорциональная мощности излучения оптической системы, что будет приводить к погрешности (рис. 2). В работе оценена относительная погрешность $dT_{0и}$, обусловленная дрейфом температуры T_S стенок оптической системы:



Рис. 2. Рассмотрение влияния температуры оптической системы на отклик приемника.

$$dT_{0И} = \frac{\Delta T_{0И}}{T_0} = \frac{\frac{dP_s}{dT_s} \Delta T_s}{\frac{dP_0}{dT_0} T_0} = \frac{4Ae_s \Omega_s T_s^3}{4Ae_0 \Omega_0 T_0^3} \frac{\Delta T_s}{T_0} = \cot^2 q_0 \frac{e_s T_s^3 \Delta T_s}{e_0 T_0^4}, \quad (1)$$

где e_0 – коэффициент излучения объекта с температурой T_0 , e_s – коэффициент излучения стенки с температурой T_s , A – константа, характеризующая преобразование излучения ППИ, W_0 – телесный угол, стягиваемый объектом излучения, W_s – телесный угол, стягиваемый оптической системой радиометра.

В разработанном радиометре данную погрешность удалось полностью исключить конструкцией оптической системы. Предложено модулирующую систему расположить перед оптической системой радиометра (рис. 2). В результате, собственное тепловое излучение оптики будет немодулированным. Так как в радиометре используется ППИ, который реагирует только на переменную составляющую излучения, то отсутствует вклад немодулированного излучения оптической системы в выходной сигнал радиометра, т.е. исключено влияние температурных нестабильностей оптической системы на результаты измерения.

Установка диафрагм и внутреннее чернение оптических каналов позволяют сформировать требуемую диаграмму направленности, устранив влияние фонового излучения.

Для снижения влияния температуры внешней среды и колебаний температуры модулятора в разработанном радиометре в качестве опорного используется излучение эталонного термодатчика, которое является входным излучением для опорного канала оптической системы радиометра. Рассмотрим алгоритм работы ИК радиометра с двухканальной оптической системой. На рис. 3 показаны напряжения на выходе отдельных блоков радиометра.

Для линейного ППИ в составе модуляционного радиометра напряжение U_1 на выходе синхронного детектора сигнального канала пропорционально

$U_1 \sim B(T_x) - B(T_M)$, где $B(T_x)$ – яркость излучения от объекта с температурой T_x , T_M – температура модулятора, а напряжение U_2 на выходе синхронного детектора опорного канала пропорционально

$U_2 \sim B(T_0) - B(T_M)$, где T_0 – температура эталонного термодатчика. Напряжения с синхронных детекторов поступают в блок вычитания, на выходе которого формируется напряжение $U_3 = U_1 - U_2 \sim B(T_x) - B(T_0)$. Таким образом, использование дополнительного опорного канала оптической системы

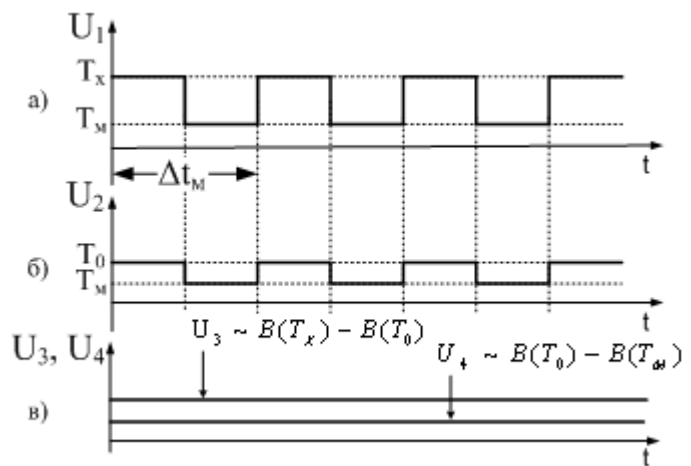


Рис. 3. Напряжения на выходе отдельных блоков радиометра.

позволяет проводить измерения радиационной температуры объекта относительно известной в каждый момент времени температуры эталонного термодатчика, исключив влияние температурной нестабильности модуляционной камеры.

Использование модуляционного способа измерения температуры требует особого внимания к погрешностям модуляции светового потока. Важно оценить погрешности используемого метода механической модуляции, в нашем случае это погрешности, связанные с нестабильностью вращения, “уходами” частоты модулирующего воздействия.

Для уменьшения погрешности, связанной с установкой и нестабильностью частоты модуляции, предложено использовать автоматическую систему управления скоростью вращения микродвигателя, построенную на базе программного пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД) и модуля широтно-импульсного модулятора микропроцессора (рис. 4). Использование этого метода стабилизации частоты приводит к значительному уменьшению вклада погрешностей, связанных с нестабильностью частоты модуляции, в измеряемое значение температуры.

Разработанный портативный прецизионный ИК радиометр прошел апробацию в Медсанчасти №50 г. Саров, где проводились исследования динамики поверхностной радиационной температуры органов зрения (рис. 5). Это позволило разработать методику дифференциальной диагностики воспалительных и дистрофических заболеваний глазного яблока, а также ранней диагностики воспалительных процессов глаза.

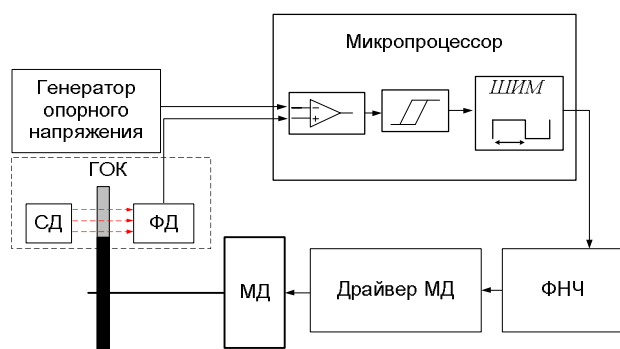


Рис. 4. Схема автоматического регулирования частоты модуляции. ГОК – генератор опорного колебания, МД – микродвигатель.

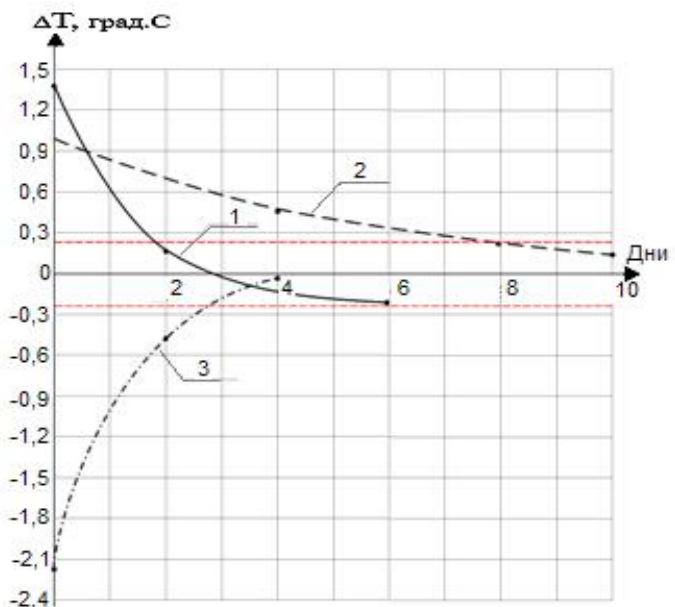


Рис. 5. Динамика температурной асимметрии в процессе лечения острого увеита (1), взлотекущего увеита (2) и сенильной макулодистрофии (3) (пунктирной линией показано среднее значение нормы)

Во второй главе рассмотрена разработанная методика и автоматизированная система для контроля излучательной способности в широком диапазоне температур, приведены результаты экспериментальных исследований излучательной способности лакокрасочных покрытий, оцениваются погрешности радиометрических измерений при неизвестной излучательной способности объекта.

Излучательная способность большинства объектов зависит от длины волны, температуры и угла наблюдения. Так, возможны два качественно различных варианта зависимости излучательной способности от температуры: в первом случае имеет место достаточно плавное изменение коэффициента (рис. 6, а); во втором случае, интегральная излучательная способность испытывает резкий скачок, например при фазовых переходах вещества (рис. 6, б).

Наиболее неблагоприятным с точки зрения задачи дистанционного измерения температуры является случай резкого изменения интегральной излучательной способности. В этом случае, предлагается производить бесконтактное измерение температуры не в точке нагрева, а на некотором расстоянии r от нее, а затем полученный результат пересчитывать в истинную температуру нагрева. При этом можно избежать проблем, связанных с неоднозначной зависимостью температуры от яркости, т.к. в точке измерения коэффициент излучения достаточно стабилен вследствие относительно невысокой температуры.

Для исследования в широком диапазоне температур интегральной в ИК диапазоне излучательной способности объектов была разработана методика и создана автоматизированная экспериментальная установка. Структурная схема автоматизированной установки представлена на рис. 7.

Суть используемого метода заключается в автоматизированной оценке радиационных свойств исследуемого покрытия, выражая их, по отношению к черному телу как к эталонному. Радиационная температура $T_{ик}$ поверхности объекта, измеренная ИК радиометром, связана с контактной температурой T_K коэффициентом

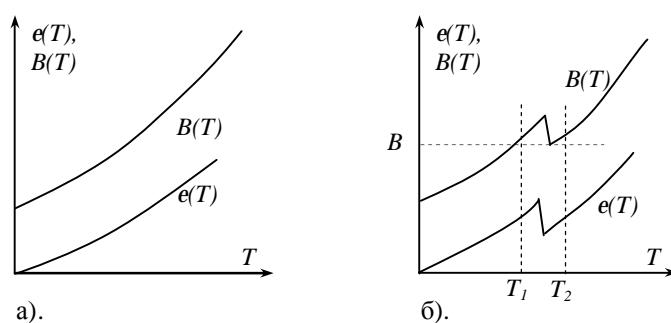


Рис. 6. Варианты зависимости коэффициента излучения от температуры.

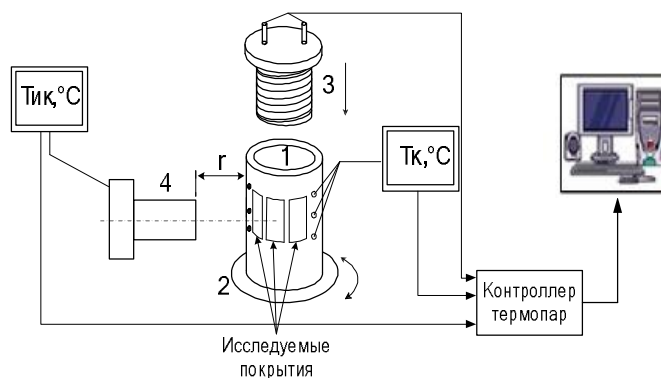


Рис. 7. Структурная схема экспериментальной установки для исследования интегральной излучательной способности покрытий. 1 – модель, на которую нанесены исследуемые покрытия; 2 – поворотный столик; 3 – нагреватель; 4 – ИК радиометр.

излучательной способности и соотношением $e = \frac{\Delta T_{ИК}}{\Delta T_K}$. В проводимых экспериментах производятся измерения контактной температуры исследуемого и выбранного за эталон образца, вычисления относительной излучательной способности для каждого проведенного измерения и усреднения полученных значений.

Контактная температура измеряется с помощью термопар типа ТХК (L), зачеканенных на модели на уровне исследуемых покрытий, что эквивалентно измерению контактной температуры. На рис. 8 представлена блок схема контроллера термопар. Контроллер термопар построен на базе микропроцессора и предназначен для опроса контактных датчиков, цифровой фильтрации и формирования пакета данных, управления работой нагревателя, организации связи с ИК радиометром и ПК по последовательному асинхронному порту USB.

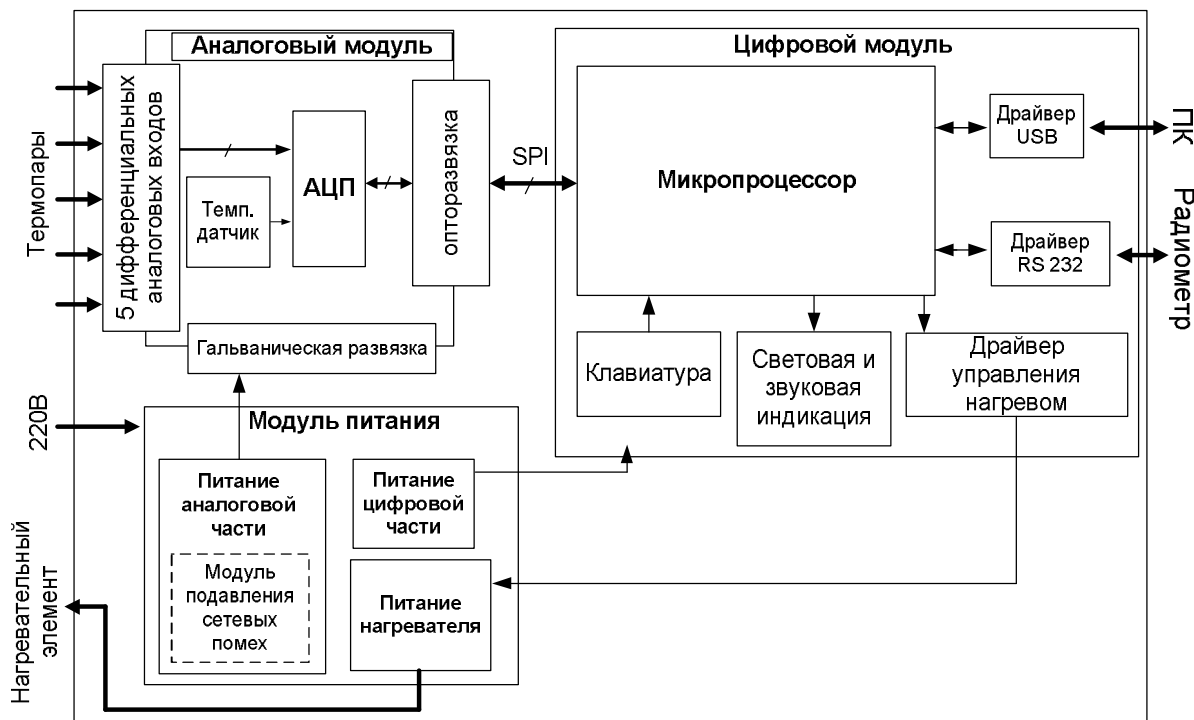


Рис. 8 Блок схема контроллера термопар.

Радиационная температура измеряется с помощью разработанного ИК радиометра с диафрагмированной оптической системой.

Построение экспериментальной системы на базе микропроцессорных устройств позволило объединить радиометрическую и контактную системы в единый измерительный комплекс, улучшить метрологические свойства системы; использование цифровой обработки сигнала дало возможность проводить эксперимент в автоматическом режиме и анализировать полученные данные с использованием ПК. Используя ПК и специально разработанное программное обеспечение можно производить необходимую обработку полученных данных (например, цифровую фильтрацию данных, вычисление

дисперсии результатов измерения), их отображение в реальном времени в виде графика, а также сохранение данных в файл.

На экспериментальной установке было проведено исследование излучательных способностей лакокрасочных покрытий и непокрытого лаком образца (модели), используемых в системах охлаждения атомных станций в диапазоне температур $30 \div 400^\circ\text{C}$. На рис. 9 приведена экспериментально снятая зависимость относительной излучательной способности лакокрасочных покрытий от контактной температуры.

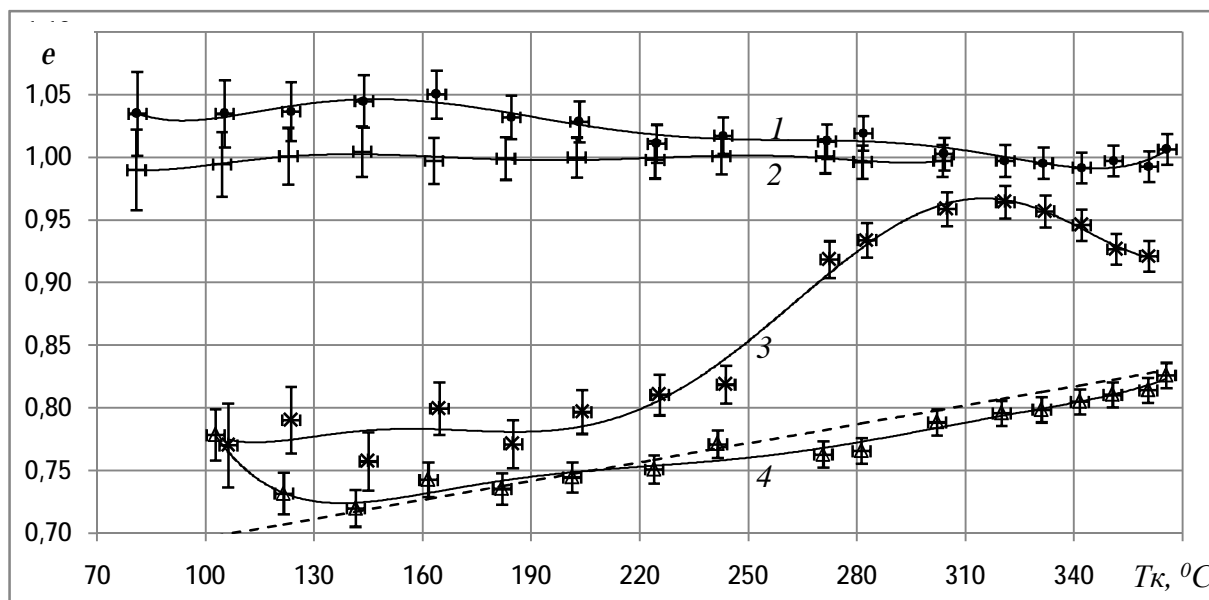


Рис. 9 Зависимость относительной излучательной способности от контактной температуры. 1 – покрытие ОС-51-03; 2 – покрытие КО814+графит (эталон); 3 – поверхность модели; 4 – покрытие КО-814.

Из рисунка видно, что излучательная способность «чистой» поверхности модели (рис. 9, 3) принимает постоянное значение равное 0.78 вплоть до температуры 200°C , затем наблюдается резкий рост до 0.96 при температуре 310°C . Было отмечено, что при температурах выше 320°C модель начала раскаляться, приобретая красный оттенок, при этом отмечается уменьшение излучательной способности поверхности модели.

Созданная автоматизированная экспериментальная установка, разработанная методика измерений и алгоритмы обработки данных позволяют контролировать излучательную способность покрытий с точностью не хуже 0.02 в широком диапазоне температур.

По итогам экспериментов были получены новые данные об интегральной излучательной способности лакокрасочных покрытий КО-814 и ОС-51-03 и разработаны рекомендации на технические условия для материалов, используемых для покрытий теплоносителей в атомной промышленности.

Результаты проведенных исследований показывают, что излучательная способность объектов зависит от температуры и состояния поверхности. При этом погрешность измерения температуры объекта методами ИК радиометрии, вызванная неопределенностью излучательной способности, может достигать десятков процентов.

Показано, что при измерении температуры объекта (T_K), мало отличающейся от температуры окружающей среды (T_ϕ), влияние его теплового излучения может вызвать значительную погрешность измерения, если излучательная способность объекта будет меньше единицы (рис. 10).

Чем меньше различие между температурами объекта измерения и окружающей среды, тем больше проявляется (в зависимости излучательной способности объекта) влияние стороннего излучения. Такое влияние необходимо учитывать, прежде всего, при измерении низких температур, например, при медико-биологических исследованиях.

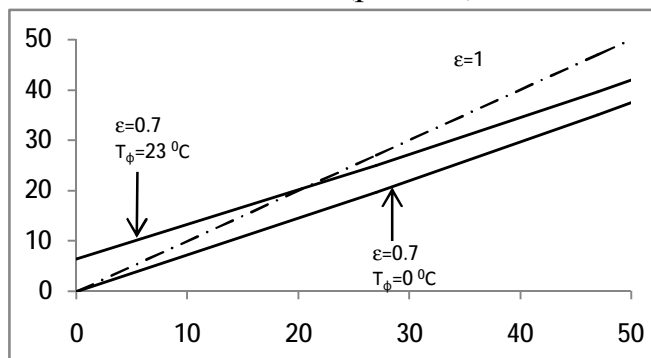


Рис. 10. Влияние температуры окружающей среды на погрешность измерения.

В третьей главе обосновывается методика реализации активно-пассивной локации в ИК радиометрии; рассмотрена созданная измерительная система для контроля физических температур термически неоднородных объектов с изменяющейся излучательной способностью; экспериментально показано, что предложенная методика позволяет уменьшить ошибку радиометрических измерений, вызванную неконтролируемым изменением излучательной способности объекта.

Для непрозрачного объекта, находящегося в состоянии термодинамического равновесия, в соответствии с законом сохранения энергии и законом Кирхгофа излучательная способность объекта $e(T, l)$ связана с отражательной способностью $r(T, l)$ зависимостью $e(T, l) = 1 - r(T, l)$.

На рис. 11 представлена структурная схема ИК радиометра физических температур, реализующего метод активно-пассивной локации и использующий методику двойной модуляции принимаемого излучения.

В радиометр введен блок подсветки широкополосным шумовым излучением объекта измерения (3). Использование широкополосного излучателя подсветки позволяет контролировать излучательную способность и физическую температуру объекта в широком диапазоне измеряемых

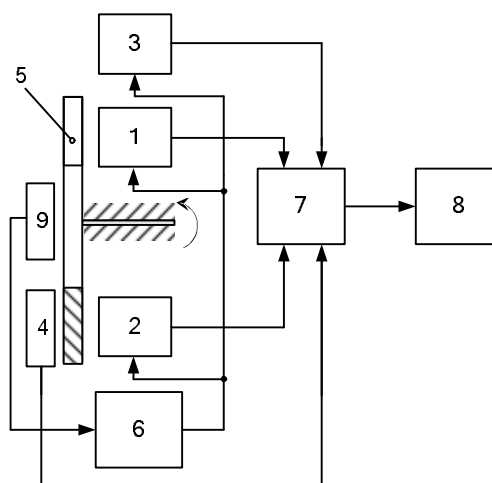


Рис. 11 Структурная схема радиометра физических температур. 1 – оптико-электронная система (ОЭС) сигнального канала, 2 – ОЭС опорного канала, 3 – ОЭС шумового излучателя, 4 – эталонный термодатчик, 5 – обтюратор, 6 – блок синхронизации, 7 – микропроцессор, 8 – регистратор, 9 – генератор опорного колебания.

температур.

Рассмотрим алгоритмы обработки сигналов, используемые в разработанном радиометре физических температур. На рис. 12 приведены напряжения на выходе отдельных блоков радиометра.

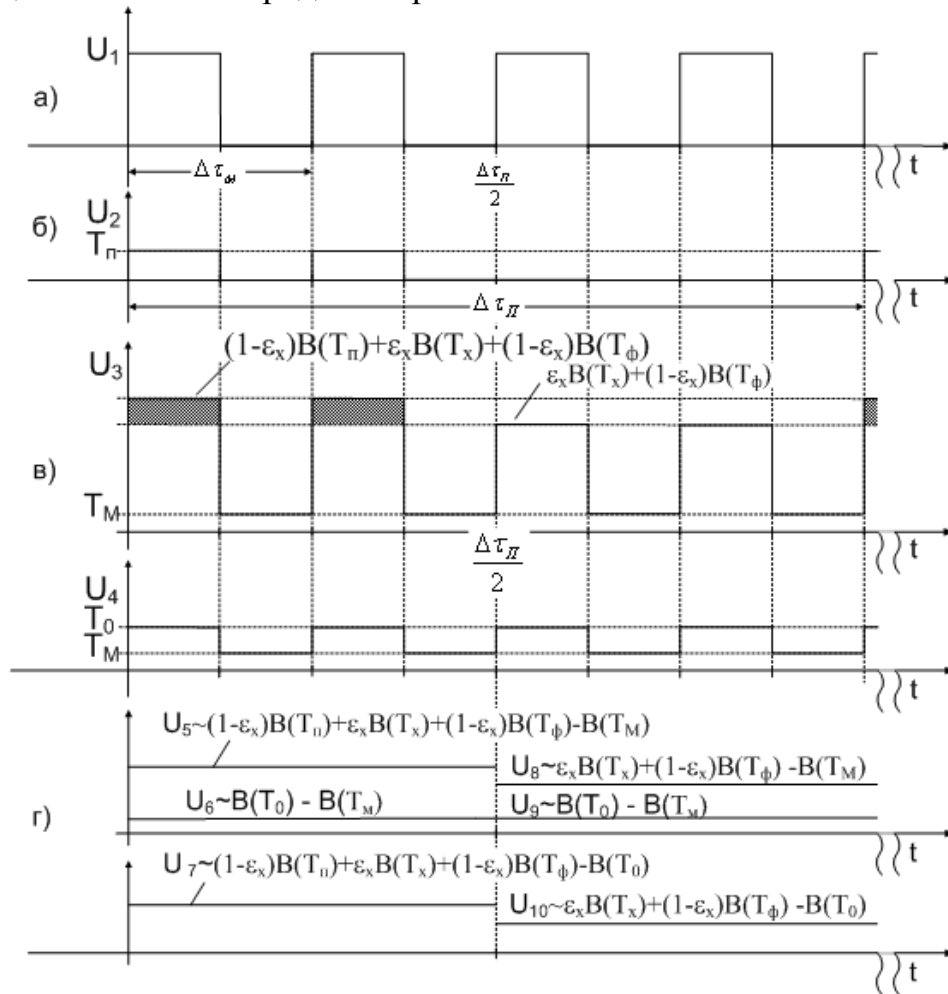


Рис. 12. Напряжения на выходе отдельных блоков радиометра.

Модулятор, имеющий температуру T_m , периодически прерывает поступление излучений на входы сигнального и опорного каналов, модулируя их интенсивность по закону меандра с периодом модуляции $\Delta\tau_m$. Чтобы избежать влияние излучения подсветки на измеряемую температуру, подсветка должна работать в импульсном режиме, синхронно с опорным колебанием радиометра, при этом на выходе синхронного детектора сигнального канала формируются напряжения $U_{\text{ПМР1}}$ и $U_{\text{ПМР2}}$, которые поступают на вход блока вычитания:

$$\begin{cases} U_{\text{ПМР1}} = e_x \cdot U(T_x) + (1 - e_x) \cdot U(T_{\text{подсв.}}) + (1 - e_x) \cdot U(T_\phi) - U(T_m) \\ U_{\text{ПМР2}} = e_x \cdot U(T_x) + (1 - e_x) \cdot U(T_\phi) - U(T_m) \end{cases} \Rightarrow U_{\text{ПМР1}} - U_{\text{ПМР2}} = (1 - e_x) \cdot U(T_{\text{подсв.}}) \quad (2)$$

Здесь e_x - излучательная способность объекта с температурой T_x , $T_{\text{подсв.}}$ - эффективная температура излучателя подсветки, T_ϕ - температура фона.

Между импульсами подсветки измеряется радиационная температура объекта, при этом на выходах сигнального и опорного каналов формируются напряжения:

$$\begin{cases} U_{\text{ИИР1}} = e_x \cdot U(T_x) + (1 - e_x) \cdot U(T_\phi) - U(T_M) \\ U_{\text{ИИР2}} = U(T_0) - U(T_M) \end{cases} \Rightarrow U_{\text{ИИР3}} = e_x \cdot U(T_x) + (1 - e_x) \cdot U(T_\phi) - U(T_0) \quad (3)$$

Здесь T_0 - температура эталонного термодатчика.

Для нахождения $U(T_{\text{подсв.}})$ необходимо откалибровать излучение подсветки на зеркальную поверхность или серое тело с известной излучательной способностью e' . При этом получим

$$\begin{cases} U'_{\text{ИИР1}} = e' \cdot U(T_x) + (1 - e') \cdot U(T_{\text{подсв.}}) + (1 - e') \cdot U(T_\phi) - U(T_M) \\ U'_{\text{ИИР2}} = e' \cdot U(T_x) + (1 - e') \cdot U(T_\phi) - U(T_M) \end{cases} \Rightarrow U(T_{\text{подсв.}}) = \frac{U'_{\text{ИИР1}} - U'_{\text{ИИР2}}}{(1 - e')} \quad (4)$$

Из формул (2) – (4) можно найти излучательную способность и физическую температуру объекта. Разработанная методика позволяет контролировать излучательную способность объекта и его физическую температуру в режиме реального времени.

Для проверки методики реализации активно-пассивной локации была разработана автоматизированная экспериментальная установка и проведена серия экспериментов. В них методом подсветки исследовалась излучательная способность различных объектов и сравнивалась с излучательной способностью, найденной традиционным способом контактных измерений. Некоторые результаты экспериментов представлены на рис. 13 и 14.

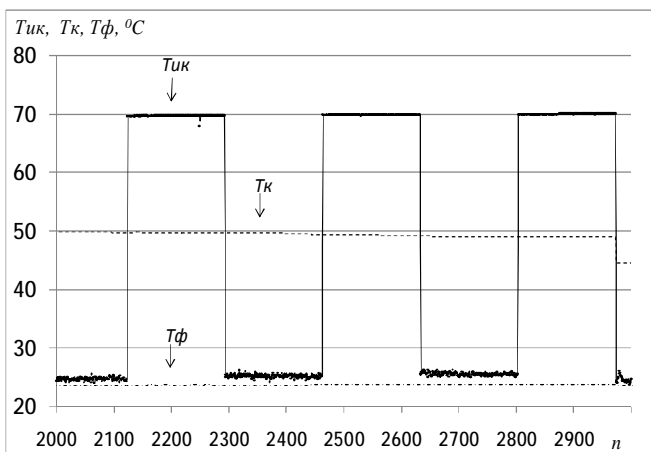


Рис. 13. Зависимость радиационной $T_{\text{ик}}$ и контактной $T_{\text{к}}$ температур алюминия и температуры фона $T_{\text{ф}}$ от отсчета n (времени).

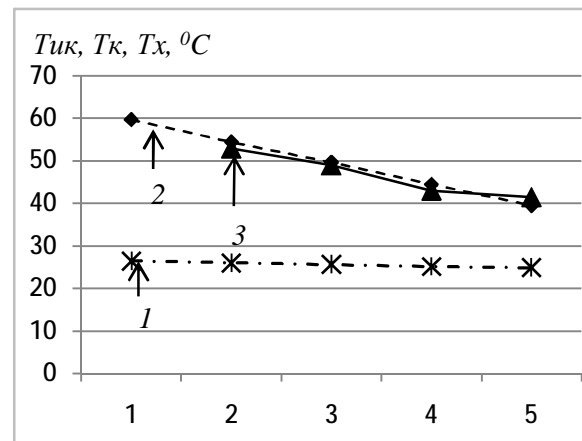


Рис. 14. Алюминий. Радиационная температура $T_{\text{ик}}$ (1), контактная температура $T_{\text{к}}$ (2) и физическая температура T_x (3), измеренная методом активно-пассивной локации.

На рис. 13 показано изменение радиационной температуры объекта при воздействии внешнего шумового излучения подсветки. Из рисунка видно, что при отсутствии излучения подсветки радиационная температура, измеряемая ИК радиометром ($T_{\text{ик}}=25^{\circ}\text{C}$) практически совпадает с температурой фона

($T_{\phi}=23^{\circ}\text{C}$) и не зависит от контактной температуры объекта ($T_{\kappa}=50^{\circ}\text{C}$). При воздействии внешнего шумового излучения мощность излучения, поступающего на вход радиометра, значительно возрастает, что говорит о высоком коэффициенте отражения объекта. Таким образом, создается возможность по величине изменения радиационной температуры определить коэффициент отражения объекта, и как следствие, найти его физическую температуру.

На рис. 14 приведена радиационная, контактная и физическая температура исследуемого объекта, пересчитанная по формулам (2), (4). Видно, что предложенная методика активно-пассивной локации в ИК диапазоне и реализованное техническое решение позволяют контролировать излучательную способность объекта и более точно отслеживать процессы, связанные с изменением физической температуры объекта во времени.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Разработанная конструкция оптико-электронной системы позволяет повысить точность радиометрических измерений, за счет того, что исключено влияние изменений внешних режимов работы радиометра, таких как дрейф температуры оптической системы, частотная нестабильность модулирующей системы, неконтролируемое изменение расстояния до объекта измерения.

Предложен способ и реализована автоматическая система регулирования частоты модуляции, построенная на базе программного ПИД-регулятора и модуля широтно-импульсного модулятора микропроцессора.

Использование в модуляционном ИК радиометре светового целеуказателя позволило контролировать расстояние до объекта измерения и площадь поверхности излучения, тем самым повысить точность радиометрических измерений.

Разработанная конструкция оптико-электронной системы не требует использования в радиометре термостатов, что позволяет реализовать компактный портативный радиометр, удобный при проведении высокоточных измерений.

Создание портативного прецизионного ИК радиометра позволило разработать методику дифференциальной диагностики воспалительных и дистрофических заболеваний глазного яблока и ранней диагностики воспалительных процессов глаза. Результаты медицинских исследований показывают перспективность использования разработанного ИК радиометра при медико-биологических исследованиях, в частности в эргономике, диспансеризации и профосмотрах населения, при оценки эффективности и выборе тактики лечения и определения сроков выздоровления.

Разработана методика и создана автоматизированная система исследования в широком диапазоне температур интегральной в ИК диапазоне излучательной способности покрытий. Использование современной элементной базы и микропроцессорных устройств позволило существенно улучшить метрологические свойства прибора, расширить функциональность, использование цифровой обработки сигнала дало возможность проводить

эксперимент в автоматическом режиме и анализировать полученные данные с использованием ПК, а также существенно упростить конструкцию, улучшить массогабаритные и стоимостные характеристики экспериментальной системы.

Применение автоматизированной системы позволило провести серию экспериментов, по итогам которых были получены новые данные об интегральной излучательной способности лакокрасочных покрытий и разработаны рекомендации на ТУ для материалов, используемых для покрытий теплоносителей в атомной промышленности.

Предложенная методика измерения интегральной излучательной способности методом активно-пассивной локации и ее техническое решение позволяет уменьшить ошибку радиометрических измерений, вызванную неопределенностью излучательной способности объекта. Методика реализации активно-пассивной локации не зависит от излучательной способности объекта и позволяет отслеживать процессы, связанные с изменением излучательной способности объектов во времени.

Использование импульсного режима работы шумового излучателя, синхронизированного с опорным колебанием радиометра, позволяет исключить влияние излучения подсветки на объект измерения и контролировать излучательную способность и физическую температуру объекта в режиме реального времени.

Разработанное и реализованное программное обеспечение позволяет осуществлять эффективное использование внутренних аппаратных ресурсов ИК радиометра, выполнять функции по измерению, преобразованию и обработке входной аналоговой информации, поддержанию параметров работы такого узла как модулирующая система, от стабильности и точности функционирования которой, зависят метрологические параметры прибора.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пат. RU2345333 МПК G01J5/10. Модуляционный радиометр инфракрасного излучения / Никифоров И.А., Орлов И.Я., Афанасьев А.В., Орлов П.И., Терентьев И.Г. – 2007132025/28, опубл. 27.01.2009.
2. Афанасьев А.В., Орлов И.Я., Никифоров И.А. Прецизионный радиометр инфракрасного излучения // Датчики и системы. – 2009. – №11. – С. 35 – 38.
3. Никифоров И.А., Афанасьев А.В., Орлов И.Я. Микропроцессорный радиометр инфракрасного излучения для медико-биологических исследований // Приборы и техника эксперимента. – № 4. – 2008. – С. 164 – 166.
4. Афанасьев А.В., Григорьев А.Ю., Орлов И.Я., Никифоров И.А. Автоматизированная система определения излучательной способности материалов в ИК диапазоне // Датчики и системы. – 2008. – №6. – С. 18 – 22.
5. Пат. на полезную модель RU70987 МПК G01J5/00. Радиометр инфракрасного излучения / Орлов И.Я., Афанасьев А.В., Никифоров И.А., Орлов П.И., Терентьев И.Г. – 2007132004/22, опубл. 20.02.2008.

6. Афанасьев А.В., Никифоров И.А., Орлов И.Я. Комплект ИК радиометров для контроля динамики тепловых полей // Сборник трудов «Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование». – г. Санкт-Петербург. – 2007г. – Том 11. – С.180 – 183.
7. Афанасьев А.В., Никифоров И.Я., Орлов И.Я. Автоматизированная система определения излучательной способности материалов в ИК диапазоне // Труды XIV международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC-2008). – г. Воронеж. – 2008. – С. 703 – 708.
8. Орлов П.И., Афанасьев А.В., Никифоров И.А., Орлов И.Я. Афанасьева О.А. Дистанционная инфракрасная радиометрия в дифференциальной диагностике дистрофических и воспалительных процессов // В кн.: Труды VII Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии», 21-23 Мая 2008г., г. Владимир – г. Суздаль. – 2008. – Том 1. – С. 52 – 56.
9. Афанасьева О.А., Никифоров И.А., Орлов И.Я. Медицинский радиометр инфракрасного излучения // В кн.: Труды VII Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии», 21-23 Мая 2008г., г. Владимир – г. Суздаль. – 2008. – Том 2. – С. 227 – 230.
10. Орлов И.Я., Афанасьев А.В., Никифоров И.А. Алгоритмы обработки данных в модуляционном ИК радиометре // В кн.: Материалы VIII Международной научно-технической конференции Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ'2009. Май 2009, г. Владимир. – 2009. – Том 2. – С. 60 – 64.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА I. ПРЕЦИЗИОННЫЙ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ИК РАДИОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ	26
1.1 Зависимость нормированной мощности теплового излучения в различных диапазонах длин волн	26
1.2 Структура прецизионного ИК радиометра	32
1.3 Инструментальные погрешности диафрагмированного модуляционного ИК радиометра	36
1.4 Алгоритмы обработки данных в микропроцессорном ИК радиометре	53
1.5 Выводы	58
ГЛАВА II ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ НА РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕКТА В ИК ДИАПАЗОНЕ	60
2.1 Автоматизированная система определения излучательной способности материалов	60

2.2	Экспериментальное определение относительной излучательной способности	74
2.3	Погрешность ИК радиометрии, обусловленная изменениями излучательной способности объекта	83
2.4	Выводы	90
ГЛАВА III. АКТИВНО-ПАССИВНАЯ ИК РАДИОМЕТРИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ		91
3.1	Контроль интегральной излучательной способности объекта методом активно-пассивной локации	92
3.2	ИК радиометр физических температур с контролем интегральной излучательной способности	96
3.3	Экспериментальное определение физической температуры объекта с помощью ИК радиометра	105
3.4	Выводы	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		121
ПРИЛОЖЕНИЕ I		125
Алгоритм работы нагревателя		125
ПРИЛОЖЕНИЕ II		133
Дистанционная ИК радиометрия в дифференциальной диагностике дистрофических и воспалительных процессов глазного яблока		133
Материалы и методы исследования		134
Результаты медицинской апробации		135
ЛИТЕРАТУРА		139