

На правах рукописи



**МАК ВАН БИЕН**

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Волгоград – 2024

Работа выполнена на кафедре «Электротехника» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор,  
**Шилин Александр Николаевич.**

**Официальные оппоненты:** **Коняхин Игорь Алексеевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Университет ИТМО», г. Санкт-Петербург, кафедра «Опτικο-электронных приборов и систем» профессор;

**Храмов Владимир Николаевич,**  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный университет», кафедра «Лазерной физики», заведующий.

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.», г. Саратов.

Защита состоится « 24 » мая 2024 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.282.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» по адресу: 400005, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Волгоградского государственного технического университета и на сайте [www.vstu.ru](http://www.vstu.ru) по ссылке <https://www.vstu.ru/upload/iblock/31e/31ea037bd9bb295c4cec68fb9032f16c.pdf>.

Автореферат разослан « » апреля 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Кузнецова Надежда Сергеевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В высокотемпературных технологических процессах, именно в металлургии при производстве проката и труб, в машиностроении при производстве в нагретом состоянии крупногабаритных базовых деталей нефтегазового оборудования и атомных реакторов, одной из основных контролируемых величин является температура заготовки. Для контроля температуры изделий в технологических процессах в настоящее время широко используются оптико-электронные методы и средства (пирометры). Эти средства контроля реализуют бесконтактный метод измерения, что является их существенным преимуществом. Однако подобными методами производят измерения, основываясь только на потоке излучения нагретого объекта, т. е. косвенными методами. Значение потока излучения зависит не только от температуры объекта, но и от коэффициента излучения (КИ), который, в свою очередь, зависит от температуры, длины волны, состояния поверхности и ее обработки. Поэтому основным недостатком этих приборов является неопределенность коэффициента излучения поверхности материала, что ограничивает точность измерения температуры. Функциональные зависимости этого коэффициента излучения от температуры и длины волны определяются экспериментально и представлены в справочниках в форме графиков или таблиц. Причем графики зависимостей коэффициента от температуры и длины волны в справочниках представлены отдельно в двух координатных системах, что вызывает сложности их использования. При расчете преобразований сигнала в оптоэлектронном тракте пирометра используются спектральные характеристики элементов тракта: объектива, светофильтров, зеркал и фотоприемника, которые оказывают влияние на измеряемый поток излучения. Кроме того, спектральные характеристики элементов также заданы в справочниках в численной форме с некоторой погрешностью, и поэтому расчет преобразований сигнала может быть выполнен только численно, так же с некоторой погрешностью. Необходимо отметить, что промышленные пирометры нормируются по инструментальной погрешности измерения, а именно – потока излучения. Инструментальная погрешность приводится в технических характеристиках пирометра и составляет единицы градусов температуры. Коэффициент излучения задается ориентировочно в диапазоне значений 0,1-1, т. е. зона неопределенности составляет 0,9, что является источником методической погрешности, значительно превышающей нормированное значение погрешности. Поэтому на практике использование пирометра не позволяет измерять температуру с необходимой точностью, что может сказываться на качестве выпускаемой продукции.

Таким образом, основной проблемой в пирометрии является точный учет коэффициента излучения контролируемой детали. Эта проблема существует с момента разработки и использования пирометров. История развития пирометрии в основном связана с разработкой технических средств обработки информации,

которых разработано большое количество. Однако в большинстве случаев эти средства не обеспечивают точный учет коэффициента излучения контролируемой детали. Единственный метод, позволяющий уменьшить погрешность измерения – это метод спектральных отношений. Этот метод позволяет получить наибольший эффект при измерении температуры с постоянным коэффициентом излучения, т. е. серых тел. При реализации этого метода также разработано большое количество технических средств обработки информации, которые принципиально не решают проблему точного учета коэффициента излучения. Необходимо отметить, что в связи с развитием микропроцессорной техники проблем с разработкой устройств обработки информации не существует. По этой причине публикаций по пирометрии в настоящее время очень мало.

Из вышеизложенного следует, что тема диссертационной работы актуальна.

**Степень разработанности темы исследования.** В решение проблем и задач теории и проектирования пирометрии и инфракрасной термографии внесли существенный вклад российские и зарубежные ученые.

Вопросам теории измерения температур в технике и промышленности посвящены труды Поскачя А. А., Линевега Ф., Госсорга Ж., Дроздова В.А. Сухарева В.И. и др.

Вопросам теории, расчета и конструирования оптических пирометрических преобразователей посвящены труды российских и зарубежных ученых Афанасьева А. В., Гордова А. Н., Поскачя А. А., Саяпиной В. И., Света Д. Я., Якушенкова Ю. Г., Госсорга Ж., Линевега Ф., Bendada A., Coppa P., Kimura M., Sabel T., Shimizu M., Sun X. B., William J. и других.

Вопросам инфракрасной термографии в строительных энергетических и машиностроительных объектах, методов тепловизионного контроля, методических погрешностей при тепловизионном контроле посвящены труды учёных Вавилова В. П., Нестерука Д. А., Фрунзе А. В. и др.

**Цель работы:** исследование и разработка оптико-электронных измерительных преобразователей температуры с улучшенными метрологическими характеристиками.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ существующих оптико-электронных средств измерения температуры нагретых изделий металлургии и машиностроения в процессе их производства, выявить их недостатки и сформулировать задачи дальнейших исследований по их усовершенствованию.

2. Исследовать процесс образования погрешностей оптико-электронных измерительных преобразователей температуры и на основе результатов исследования разработать методики повышения их точности.

3. Исследовать существующие методы повышения точности измерительных средств и на основе их разработать функциональную блок-схему оптико-

электронного измерительного преобразователя температуры с улучшенными метрологическими характеристиками.

4. Разработать экспериментальную лабораторную установку для исследования метрологических характеристик предложенных измерительных преобразователей.

**Предметом исследования является** точность опико-электронных преобразователей температуры информационно-измерительных систем.

**Объектом исследования является** информационно-измерительная система управления высокотемпературными технологическими процессами.

**Методы и средства исследований.** При выполнении исследований и решении поставленных в работе задач использовались методы математического, физического и цифрового моделирования, теории опических и опико-электронных систем, теории электрических цепей и автоматического управления, электроники и метрологии.

**Достоверность результатов исследования** основана на корректных теоретических построениях и строгих математических выводах, а также подтверждена результатами экспериментальных исследований.

**Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационного исследования внедрены на предприятиях Вьетнама: в Университете промышленной технологии Co., Ltd.; в THD Co., Ltd.; в Зуй Хаи Co., Ltd.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Метрологический анализ влияния коэффициента излучения на погрешность бесконтактного измерения.

2. Методика автоматической коррекции погрешности определения коэффициента излучения опико-электронной системы.

3. Функциональная блок-схема пирометра для измерения отношения интегрирующим двухтактным АЦП.

4. Способ определения коэффициента излучения и температуры объекта опико-электронным методом.

**Научная новизна** диссертации заключается в том, что

1. На основе проведенных исследований влияния функций коэффициента излучения на погрешность измерения радиационного пирометра для некоторых металлов, выявлено, что использование среднего значения коэффициента излучения перед интегралом уравнения Планка вместо функции коэффициента излучения под интегралом потока излучения позволяет значительно упростить вычисление потока излучения реального тела.

2. На основе проведенного анализа преобразования информационного сигнала в оптоэлектронном тракте радиационного пирометра разработан способ получения

функции коэффициента излучения от температуры по образцу материала, позволяющий исключить погрешность, обусловленную отличием материалов предварительной тарировки и измерения, а также спектральных характеристик пирометров при тарировке и измерении.

3. На основе анализа логометрических преобразователей, которые можно использовать в пирометрах спектрального отношения, обоснованно выбран аналого-цифровой преобразователь двухтактного интегрирования, который позволяет одним преобразователем реализовать функции двух аналого-цифровых преобразователей и цифрового вычислительного устройства. Нестабильность параметров АЦП не оказывает влияния на погрешность преобразования.

### **Теоретическая и практическая ценность работы.**

1. Разработана методика аппроксимации частотных характеристик оптических и оптоэлектронных элементов пирометров с помощью трапецеидальной формы, для построения которой необходимо 4 координаты вместо 40-50 координат, что значительно сокращает время поиска необходимых элементов и позволяет использовать математический аппарат и программы нечетких множеств.

2. Разработана экспериментальная установка для исследования погрешностей пирометра, которая подтвердила теоретические положения исследований и позволяет корректировать результаты проектирования других преобразователей.

3. На основе результатов исследований были разработаны два оптико-электронных преобразователя: радиационный и спектрального отношения, оригинальность которых подтверждена патентами на полезную модель.

**Соответствие паспорту специальности.** Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 2.2.11. «Информационно-измерительные и управляющие системы» (технические науки) по пункту 1: «Научное обоснование перспективных информационно-измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышения эффективности существующих систем» и пункту 2: «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов, частей, образцов информационно-измерительных систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений».

**Апробация работы.** Основные положения и материалы осуждались на следующих научных конференциях: Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2021. – № 2 (35), Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: XXVI г. Волгоград, 16–28 ноября 2021 г., XXVII г. Волгоград, 2–15 ноября 2022 г., XXVIII г. Волгоград, 23 октября по 06 ноября 2023 г., XV Международная конференция «Прикладная оптика-2022» в Санкт-Петербурге. (15-16 декабря 2022), LV Междунар. науч.-практ. конф. (г.

Москва, 15 сентября 2023 г.), Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Омск, 6 ноября 2023 г.).

### **Личный вклад автора.**

1. Проанализирована методика использования интегрального коэффициента излучения в энергетических пирометрах и разработана функциональная блок-схема оптико-электронного прибора для измерения температуры нагретых изделий [1, 3, 4, 5, 7, 9, 10].

2. Предложена блок-схема цифрового пирометра спектрального отношения [2, 6, 8, 14].

3. Доказан метод трапецеидальной аппроксимации, что позволяет повысить быстродействие вычислений коэффициента полезного действия приемника излучения [11, 12].

4. Предложен способа определения коэффициента излучения и температуры объекта оптико-электронным методом [1, 3, 13].

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 научных журналах, сборниках трудов всероссийских и региональных конференций, научно-издательского центра «Актуальность.РФ». Из них 3 работы – в журнале по списку ВАК РФ. Получен один патент на полезную модель.

### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 115 страницах основного текста, содержит 40 рисунков, 11 таблиц. В Списке используемой литературы – 106 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведена актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна, внедрение результатов работы, практическая ценность работы и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлены сведения о пирометрии, методах и средствах бесконтактного измерения температуры и основных проблемах измерения.

Из анализа теоретических основ пирометрии следует, что пирометры позволяют измерять поток излучения реального тела, а для того чтобы определить температуру реального тела, необходима информация о коэффициенте излучательной способности материала, который зависит от температуры, длины волны, материала и состояния поверхности. Точно учесть этот коэффициент практически невозможно, и поэтому он задается и устанавливается ориентировочно. Информация о коэффициенте излучательной способности материала приведена в различных справочниках в виде семейства графиков. Причем информация, приведенная в различных справочниках, отличается. Однако

в паспорте пирометров обычно указывается инструментальная погрешность, т. е. погрешность измерения потока излучения, которая может быть намного меньше погрешности измерения реального тела с учетом коэффициента излучения. Из анализа оптико-электронных методов и средств измерения температуры следует, что существует большое количество разработок пирометров, но практически все они решают задачи обработки измерительной информации, не учитывая влияния коэффициента излучения, за исключением пирометров спектрального отношения. Пирометры спектрального отношения позволяют получить минимальную погрешность серых тел, у которых коэффициент излучения имеет постоянное значение. Поэтому необходимо исследовать и разработать методы и средства измерения с минимальным влиянием на точность измерения коэффициента излучения.

**Во второй главе** рассмотрены физические основы радиационной пирометрии. В существующих радиационных пирометрах учитывается введением усредненного по температуре и спектральному диапазону коэффициента излучения. Для анализа погрешностей расчета потока излучения с помощью точного и среднего коэффициента излучения (КИ) проведено исследование погрешностей. Зависимость функции спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела (АЧТ) подчиняется закону Планка

$$M_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} (\exp(c_2 / (\lambda T)) - 1)^{-1}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура абсолютно черного тела,  $K$ ;  $\lambda$  – длина волны;  $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-12}$  Вт см<sup>2</sup>;  $c_2 = 1,438 \cdot 10^4$  мкм.°С.

Функция  $M_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T)$  достигает своего максимального значения при длине волны  $\lambda_m$ , которая определяется законом смещения Вина

$$\lambda_m T = B = 2896 \text{ мкм.}^{\circ}\text{С}; \quad M_{\lambda_m}^{\circ}(\lambda_m, T) = 1,315(10^{-3}T)^5. \quad (2)$$

Выражение закона Планка для реального излучателя с учетом коэффициента излучения  $\varepsilon(\lambda, T)$  имеет следующий вид:

$$M_{\lambda}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) M_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T). \quad (3)$$

Для спектрального анализа целесообразно использовать относительную (безразмерную) величину функции спектральной плотности энергетической светимости:

$$y(\lambda, T) = \frac{M_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T)}{M_{\lambda_m}^{\circ}(\lambda_m, T)} = 142,32 \cdot x_{\lambda}^{-5} \left( e^{\frac{4,9651}{x_{\lambda}}} - 1 \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $x_{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_m} = \frac{\lambda T}{c_2} \cdot \frac{1}{0,2014} = 4,9651 \frac{\lambda T}{c_2}$ .

Из выражений (3) и (4) определяется уравнение спектральной плотности для реальной детали с температурой  $T$  и коэффициентом излучения  $\varepsilon(\lambda, T)$ :

$$M_{\lambda}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) M_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot y(\lambda, T) \cdot M_{\lambda_m}^{\circ}(\lambda_m, T); \quad (5)$$

Средний коэффициент излучения в диапазоне длин волн ( $\lambda_1 - \lambda_2$ ) для температуры  $T$  вычисляется с помощью выражения:

$$\overline{\varepsilon_{\lambda_{ср}}}(T) = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot \Delta\lambda_i}{\lambda_n - \lambda_1} = \frac{\sum_{i=2}^n \frac{\varepsilon(\lambda_i) + \varepsilon(\lambda_{i-1})}{2} \cdot (\lambda_i - \lambda_{i-1})}{\lambda_n - \lambda_1}. \quad (6)$$

Спектральная плотность и поток излучения по среднему КИ в диапазоне  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  определяется по формулам:

$$\overline{M}_{\lambda}(\lambda, T) = \overline{\varepsilon_{\lambda_{ср}}}(T) \cdot y(\lambda, T) \cdot M_{\lambda_m}^o(\lambda_m, T). \quad (7)$$

$$\overline{R} = M_{\lambda_m}^o(\lambda_m, T) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \overline{\varepsilon_{\lambda_{ср}}}(T) \cdot y(\lambda, T) d\lambda = M_{\lambda_m}^o(\lambda_m, T) \cdot \overline{\varepsilon_{\lambda_{ср}}}(T) \sum_{i=1}^N y(\lambda_i, T) \cdot \Delta\lambda_i. \quad (8)$$

В качестве примера проведен анализ погрешностей расчета спектральной плотности излучения реальной детали для технологического процесса формообразования обечайки – основной базовой детали нефтегазового оборудования. Обечайка – цилиндрическая полая деталь, которая изготавливается из листового нагретого материала на валковых листогибочных машинах. Процесс формообразования детали осуществляется в диапазоне температур от 600 до 1000°C, поэтому мы выбираем диапазон длин волн от 1,14 мкм до 3,5 мкм ( $\lambda_1=1,14$  мкм и  $\lambda_2=3,5$  мкм).

На рисунке 1 представлены спектральные зависимости коэффициента излучения  $\varepsilon_{\lambda}$  материалов: 1 – алюминий ( $T=805K$ ); 2 – железо ( $T=1518K$ ); 3 – медь ( $T=1242K$ ); 4 – никель ( $T=1273K$ ) – при заданных температурах в разных длинах волн (1 – 5 мкм).

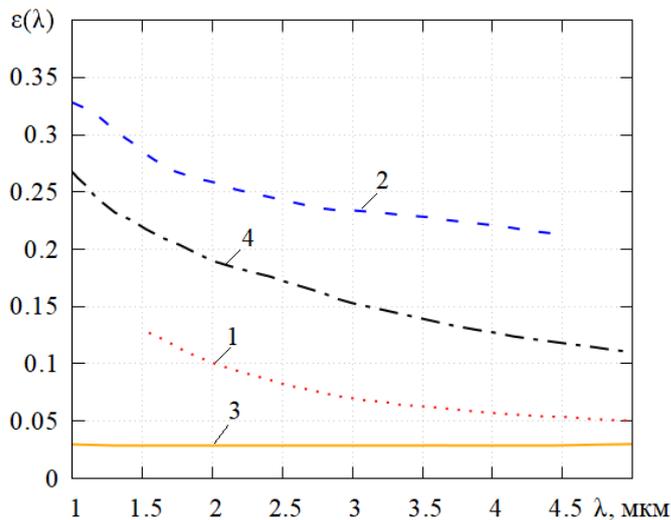


Рисунок 1. Графики зависимостей спектрального коэффициента излучения каждого материала от длины волны: 1 – алюминий; 2 – железо; 3 – медь; 4 – никель

Средние коэффициенты излучения материалов, согласно выражению (6), будут иметь следующие значения:

$$\overline{\varepsilon_{ср}}_{Al} = 0,0861; \quad \overline{\varepsilon_{ср}}_{Fe} = 0,2746; \quad \overline{\varepsilon_{ср}}_{Cu} = 0,0288; \quad \overline{\varepsilon_{ср}}_{Ni} = 0,1868.$$

Результаты расчетов потоков излучения по точному ( $R$ ) и среднему ( $\overline{R}$ ) коэффициентам излучения материалов в диапазоне длин волн  $\lambda_1 - \lambda_2$  в таблице 1.

Таблица 1. Потоки излучения по точному и среднему коэффициенту излучения материалов

Материал	T, К	$\lambda_m$ , мкм	$M_{\lambda_m}^o(\lambda_m, T)$	R, Вт/см <sup>2</sup>	$\bar{R}$ , Вт/см <sup>2</sup>	$\delta(\%)$
Алюминий	805	3,60	0,44	0,043	0,048	10,84
Железо	1518	1,91	10,6	5,252	5,597	6,57
Медь	1224	2,33	3,98	0,2127	0,2134	0,31
Никель	1273	2,27	4,40	1,279	1,260	1,46

Полученные результаты показывают, что при заданных температурах и в диапазоне длины волны от 1,14 мкм до 3,5 мкм точный поток излучения (R) приблизительно совпадает со средним значением потока излучения ( $\bar{R}$ ). Относительная погрешность составляет 0,31 – 10,84% и поэтому может быть использована для практических расчетов. Наибольшая погрешность у алюминия, что связано с особенностями материала. Эта методика позволяет значительно проще выполнять расчет потока излучения в сравнении с численным методом, поскольку средний коэффициент излучения выносится из интеграла, что позволяет использовать аналитическое выражение. Кроме того, эта методика позволяет повысить также и точность вычисления.

Преобразование потока излучения от нагретого объекта фотоприемником в электрический сигнал описывается формулой:

$$U_{\Phi} = \frac{q}{4} \left( \frac{D_{ВХ}}{f} \right)^2 \frac{s_{\lambda_{max}} R_H R_i R_{yc}}{(R_H + R_i)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda) \varepsilon(\lambda, T) \tau(\lambda) M_{\lambda}^o(\lambda, T) d\lambda, \quad (9)$$

где  $q$  – площадь диафрагмы;  $D_{ВХ}$  – диаметр входного зрачка;  $f$  – фокусное расстояние объектива;  $\tau(\lambda)$  – коэффициент пропускания оптики;  $M_{\lambda}^o(\lambda, T)$  – спектральная плотность энергетической светимости изделия;  $R_i$  – внутреннее сопротивление фотоприемника;  $R_H$  – сопротивление нагрузки;  $K_{yc}$  – коэффициент усиления усилителя фототока;  $S_{\lambda_{m}}$  – максимальная спектральная чувствительность фотоприемника;  $S_{\lambda}$  – абсолютная спектральная чувствительность фотоприемника;  $s(\lambda) = S_{\lambda} / S_{\lambda_{m}}$  – относительная спектральная чувствительность фотоприемника.

Из приведенного математического выражения (9) следует, что на точность преобразования оптического сигнала в пирометре оказывают влияние не только спектральные характеристики коэффициента излучения, но и спектральные характеристики оптических материалов и фотоприемника.

Все спектральные характеристики представлены в справочниках в виде графиков или таблиц, и поэтому аналитически рассчитать точно преобразование сигнала по формуле (9) невозможно, что ограничивает точность измерения температуры. Поэтому в пирометре предложено использовать дополнительный канал измерения нагреваемого образца контактным способом, затем по разности показаний контактного и бесконтактного измерений определять функциональную зависимость коэффициента излучения нагретого объекта от температуры  $\bar{\varepsilon}_{\lambda_{сред}}(T)$ .

При реализации этого способа отпадает необходимость поиска информации о коэффициенте излучения объекта и спектральных характеристиках оптических элементов и приемника излучения.

В этой главе решена задача определения спектральной совместимости элементов пирометра. В качестве основного критерия совместимости оптических элементов системы был использован спектральный коэффициент полезного действия (КПД)  $\chi$  преобразователя, определяющий, какая часть из общего интегрального потока излучения может быть использована или преобразована:

$$\chi = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda)\Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} s(\lambda)\varphi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda)d\lambda}, \quad (10)$$

где  $\Phi_{e\lambda m}$  – максимальная спектральная плотность входного потока излучения;  $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$  – спектральное распределение спектральной плотности входного потока излучения;  $\varphi_{e\lambda}(\lambda) = \Phi_{e\lambda}(\lambda)/\Phi_{e\lambda m}$  – относительное распределение спектральной плотности входного потока излучения.

Очевидно, что выбор элементов должен выполняться по максимальному значению КПД. Этот критерий определяет работоспособность прибора. Для решения этой задачи была разработана компьютерная программа, позволяющая выбирать элементы по максимальному значению КПД. Из анализа большого числа спектральных характеристик элементов ОЭП следует, что практически все они могут быть аппроксимированы формой трапеции. Поэтому для описания спектральных характеристик были использованы данная форма и аппарат теории нечетких множеств, что позволило значительно сократить время перебора вариантов с учетом совместимости элементов по оптическому КПД.

**В третьей главе** пирометры спектрального отношения определяют температуру по отношению сигналов от двух приемников, работающих на разных длинах волн. Такой принцип измерения температуры позволяет исключить влияние факторов, имеющих только мультипликативный характер, т. е. ослабляющих сигналы двух каналов в одинаковое число раз. Это следующие факторы: изменение расстояния до объекта, наличие защитных стекол, изменение чувствительности фотоприемников и коэффициента усиления усилителя в схемах с оптическим коммутатором и одноканальным оптико-электронным трактом. Необходимо отметить, что пирометры спектрального отношения позволяют уменьшить влияния коэффициента излучательной способности материала на погрешность измерения температуры, а для серого тела, имеющего постоянный коэффициент излучения, полностью исключить влияние коэффициента на погрешность измерения. Недостаток пирометров спектрального отношения – это сложность конструкции и настройки, а, следовательно, и их стоимость.

Наиболее совершенными логометрическими преобразователями являются интегрирующие развертывающие преобразователи с двухтактным

интегрированием. В преобразователях этого типа отклонения его основных параметров – постоянной времени и тактовой частоты – практически не оказывают влияния на точность измерения. Кроме того, эти преобразователи обладают большими функциональными возможностями: выполняют математические операции с информационными сигналами за счет использования нелинейной развертывающей функции, осуществляют коррекцию аддитивной составляющей погрешности и самодиагностику.

*Преобразователь отношения сигналов с двухтактным интегрированием.* На рис. 2 изображена функциональная блок-схема пирометра.

Пирометр представляет собой объектив 1, в плоскости изображения которого установлен составной светофильтр, состоящий из двух светофильтров 2 и 3 с различными спектральными полосами пропускания. За светофильтрами 2 и 3 установлен двухэлементный фотоприемник 4, выходы которого подключены к входу аналого-цифрового развертывающего преобразователя (АЦП) с двухтактным интегрированием 5. На схеме приняты следующие обозначения: 6 – блок усиления и перемножения; 7 – блок усиления и перемножения; 8 – формирователь весовой функции первого измерительного канала; 9 – формирователь весовой функции второго измерительного канала; 10 – интегратор; 11 – устройство сравнения; 12 – блок управления; 13 – устройство задания порогового уровня устройства сравнения; 14 – блок цифрового выходного сигнала. Элемент фотоприемника, соответствующий первой длине волны пирометра, подключен на вход блока 6, который является измерительным входом АЦП сигнала  $U_{x1}$ , а на вход блока 7, который предназначен для источника опорного напряжения  $U_0$ , подключен элемент фотоприемника, соответствующий второй длине волны  $U_{x2}$ . В рамках функциональной блок-схемы пирометра могут быть реализованы известные алгоритмы уравнивающего интегрирующего развертывающего преобразователя. Весовая функция  $g_{x1}(t)$  блока 6, определяет динамические свойства ИРП, а весовая функция  $g_{x2}(t)$  блока 7 определяет вид выходной величины ИРП. Весовая функция  $g_{x1}(t)$  в общем случае может принимать произвольные значения для реализации нелинейных функций преобразования, а весовая функция  $g_{x2}(t)$ , как правило, принимает значения +1, 0 и -1. Идеализированное уравнение преобразования интегратором 10 имеет вид:

$$R(t_k) - R(t_n) = \frac{1}{\tau_1} \int_{t_n}^{t_n+T_1} g_{x1}(t) u_{x1}(t) dt + \frac{1}{\tau_2} \int_{t_n+T_1}^{t_k} g_{x2}(t) u_{x2} dt = 0, \quad (11)$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – постоянные времени интегратора по двум входам преобразований,  $t_n$  и  $t_k$  координаты начала и конца преобразования. Из уравнения (11) следует характеристика аналого-цифрового преобразования ИРП:

$$- \int_{t_n}^{t_n+T_1} g_0(t) dt = \frac{\tau_2}{\tau_1 U_{x2}} \int_{t_n+T_1}^{t_k} g_x(t) U_{x1}(t) dt, \quad (12)$$

С учетом конкретно воспроизводимых в данном случае весовых функций  $g_x(t)$  и  $g_0(t)$ , а именно с постоянными значениями, из уравнения (12) следует выражение длительности импульса  $\Delta T$ , которое определяется отношением напряжений двух измерительных каналов фотоприемника 4:

$$\Delta T = \frac{\tau_2}{\tau_1} \cdot \frac{U_{x1}}{U_{x2}} T_1, \quad (13)$$

где  $U_{x1}$  и  $U_{x2}$  – средние значения напряжений за интервал времени;  $T_1$  – значение входного напряжения.

Интервал времени  $T_1$  первого такта имеет постоянное значение, и в это время к входу интегратора подключен первый измерительный канал с напряжением  $U_{x1}$ . Интервал времени  $\Delta T$  второго такта интегрирования определяется при подаче к входу интегратора напряжения со второго измерительного канала с напряжением  $U_{x1}$ . Момент окончания второго такта определяется устройством сравнения выходного напряжения интегратора 11 при равенстве нулю сигнала с интегратора 10. При преобразовании промежутков времени  $T_1$  и  $\Delta T$  блоком 14 в цифру методом заполнения тактовыми импульсами с длительностью  $T_0$  и равенстве постоянных времени получено выражение:

$$N_2 = \frac{U_{x1}}{U_{x2}} N_1, \quad (14)$$

С помощью блоков управления 12 и задания порогового значения 13 может осуществляться алгоритм работы с преобразованием выходного сигнала в частоту, которая так же сравнительно просто преобразуется в цифру.

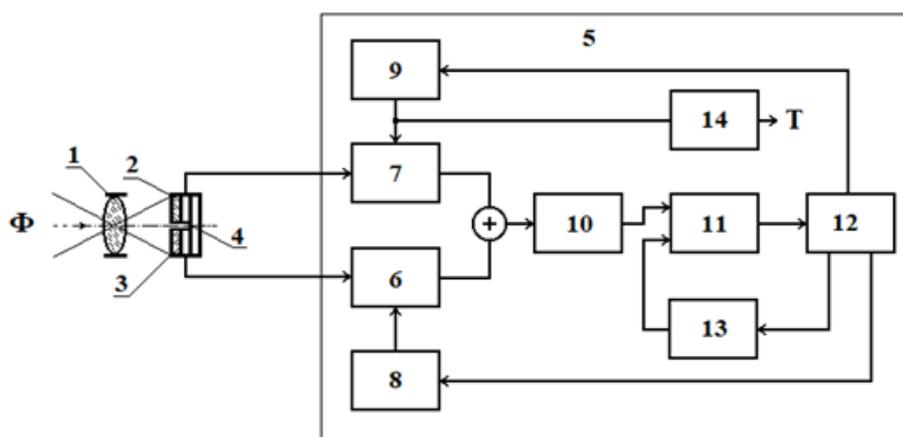


Рисунок 2. Функциональная блок-схема пирометра

При такой реализации цифровой ПСО в сравнении с известной схемой реализации выполняет три функции, а именно: функции двух аналого-цифровых преобразователей (АЦП) для каждого канала и цифрового логотрического преобразователя блока, а реализация нелинейной статической характеристики может быть реализована с помощью выбора весовой функции.

Кроме того, такой цифровой ПСО имеет хорошую защиту от сетевой помехи и позволяет значительно уменьшить влияние на погрешность измерения факторов, имеющих мультипликативный характер. По этой причине АЦП двухтактного

интегрирования рекомендуются для использования в промышленных информационно-измерительных и управляющих системах.

Таким образом, АЦП двухтактного интегрирования имеет высокую точность. Причем эта инструментальная погрешность имеет значительно меньшее значение, чем методическая погрешность, обусловленная непостоянством коэффициента излучательной способности поверхности нагретого материала. В этой главе приведена методика определения параметров пирометра спектрального отношения.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований методической погрешности, обусловленной коэффициентом излучения материала изделия, основанных на сравнении результатов измерения двух методов оптико-электронного и контактного (образцового). Экспериментальные исследования проводились на установке, блок-схема которой приведена на рис 3. Здесь приведены обозначения: 1 – измеряемый объект, 2 – объектив, 3 – приемник излучения фотодиод ФД-10ГА, 4 – усилитель 1, 5 – АЦП 1 (ADS1000), 6 – термопара К-типа, 7 – усилитель, 8 – АЦП 2 (MAX 6675), 9 – микрокомпьютер Raspberry Pi 3 (ЭВМ), 10 – клавиатура, 11 – монитор.

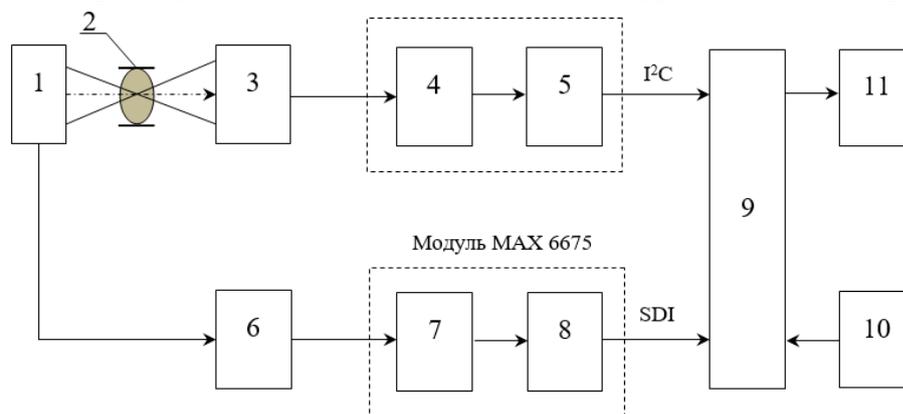


Рисунок 3. Блок-схема экспериментальной установки

Фотография экспериментальной установки для исследования погрешности пирометра приведена на рис. 14.



Рисунок 4. Фотография экспериментальной установки

На основе предложенного способа реализован энергетический пирометр (рис. 5).

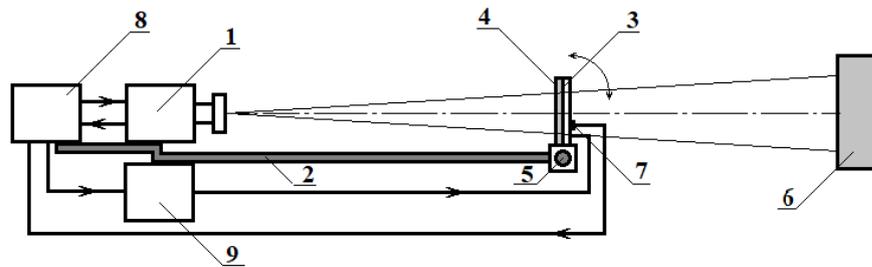


Рисунок 5. Оптико-электронное устройство для определения КИ и температуры объекта

С помощью оптико-электронного устройства (рис. 5) был получен тарировочный график (рис 6), при помощи которого по выходному сигналу пирометра определяется температура детали. При использовании промышленного пирометра, выходным сигналом которого является температура, возможно определение коэффициента излучения. В этом случае на пирометре устанавливается коэффициент излучения, равный 1.

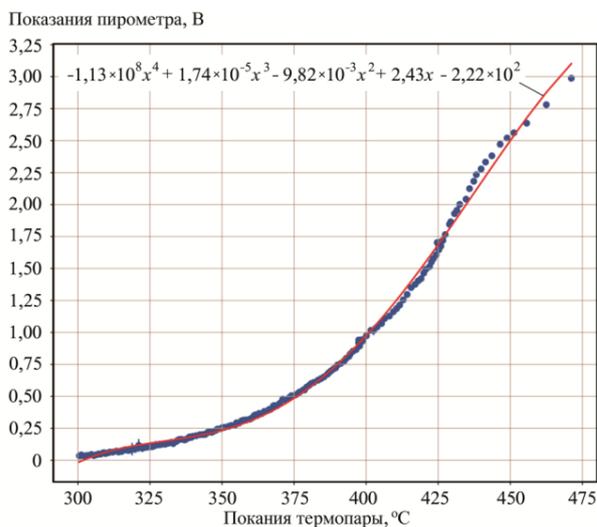


Рисунок 6. Тарировочный график оптико-электронного устройства для определения КИ и температуры объекта

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ теоретических основ пирометрии, из которого следует, что основная погрешность пирометра – методическая – определяется нестабильностью коэффициента излучательной способности материала, который зависит от температуры, длины волны, материала и состояния поверхности. Точное значение коэффициента излучения практически невозможно определить. На основании анализа была сформулирована цель исследования, а именно: исследовать и разработать методы и средства измерения температуры с минимальным влиянием на точность измерения нестабильности коэффициента излучения.
2. Из проведенного анализа устройств и схем оптико-электронных приборов измерения температуры следует, что существует большое количество разработок пирометров, но практически все они решают задачи аналоговой обработки информации. Аналоговые измерительные устройства являются источником инструментальной погрешности. Поэтому на основе анализа сформулирована цель

работы: исследовать и разработать цифровую схему обработки информации с минимальной инструментальной погрешностью.

3. Из проведенного исследования следует, что относительная погрешность расчета потока излучения нагретого тела при использовании среднего КИ в диапазоне длины волны от 1,14 мкм до 3,5 мкм в сравнении с точным расчетом потока излучения составляет 0,31 – 10,84%, а приведение реального объекта к псевдосерому объекту позволяет значительно упростить расчет, поскольку под интегралом остается только аналитическая функция Планка.

4. На основе предложенной методики определения интегрального коэффициента излучения по образцу материала разработан энергетический пирометр. Экспериментальное исследование выявило, что погрешность для железа составила 1%, а погрешность определения температуры с помощью табличных данных составляет 6,57%. Кроме того, в этом случае отпадает необходимость учитывать спектральные характеристики оптики и приемника излучения.

5. Использование аппроксимации спектральных характеристик оптических и оптико-электронных элементов трапецеидальными характеристиками позволяет использовать математический аппарат нечеткой логики и значительно ускорить расчет оптического КПД и, соответственно, проектирование с помощью морфологического синтеза оптико-электронных приборов.

6. Цифровой пирометр спектрального отношения, разработанный на основе принципа двухтактного интегрирования, выполняет функции трех основных блоков: двух АЦП и логометрического преобразователя; имеет хорошую защиту от сетевых помех, что позволяет улучшить его метрологические характеристики, поскольку сокращено число АЦП с трех до одного, и значительно повысить отношение сигнал/шум.

7. Поскольку принцип двухтактного интегрирования обладает свойствами инвариантности к изменению параметров основных элементов АЦП, погрешности которых имеют мультипликативный характер, что снижает требования к выбору элементов и соответственно стоимость готового изделия. Такие АЦП имеют высокую точность преобразования и сравнительно низкую цену.

8. Цифровой пирометр спектрального отношения при некоторой модернизации позволяет выполнять дополнительную функцию – линейризацию статической характеристики пирометра за счет введения нелинейной развертки, параметры которой вычисляются по приведенной методике. Таким образом, цифровой пирометр спектрального отношения обладает широкими функциональными возможностями.

9. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили теоретические выводы о том, что градуировка радиационного пирометра по эталонному образцу, идентичному измеряемому объекту, и использование одного пирометра для

градуировки и измерения позволяет значительно повысить точность измерения, при этом погрешность составляет менее 1%.

10. Из исследования влияния погрешностей основных элементов преобразователя с двухтактным интегрированием и внешних помех на точность определения отношения двух сигналов следует, что эта погрешность минимальна и составляет менее 0,5 %, что вполне удовлетворяет пирометрии высокотемпературных процессов.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах из перечня ВАК РФ по специальности 2.2.11

1. **Шилин, А.Н.** Оптико-электронный прибор для измерения температуры нагретых изделий / А.Н. Шилин, Б.В. Мак, Над.С. Кузнецова // Контроль. Диагностика. - 2021. - Т. 24, № 8. - С. 36-42.
2. **Шилин, А.Н.** Цифровой пирометр спектрального отношения / А.Н. Шилин, Б.В. Мак, И.А. Коптелова // Контроль. Диагностика. - 2022. - Т. 25, № 3. - С. 52-57.
3. **Шилин, А.Н.** Анализ методики использования интегрального коэффициента излучения в энергетических пирометрах / А.Н. Шилин, Б.В. Мак, И.А. Коптелова // Контроль. Диагностика. - 2023. - Т. 26, № 9. - С. 42-48.

### Другие публикации:

4. **Мак, Б.В.** Оптико-электронный прибор для измерения коэффициента излучения и температуры контролируемого объекта / Б.В. Мак // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. - 2021. - № 2 (35). - С. 48-53.
5. **Мак, Б.В.** Пирометр для измерения температуры нагретых деталей / Б.В. Мак // XXVI Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 16–28 ноября 2021 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ. - Волгоград, 2022. - С. 184-185.
6. **Мак, Б.В.** Цифровой пирометр спектрального отношения для измерения температуры нагретых деталей / Б.В. Мак // XXVII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 2–15 ноября 2022 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ. - Волгоград, 2022. - С. 230-231.
7. **Шилин, А.Н.** Радиационный пирометр для измерения коэффициента излучения и температуры нагретых деталей / А.Н. Шилин, Б.В. Мак // Прикладная оптика – 2022 : сб. тез. XV Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, 15-16 декабря 2022 г.) / НПО «Гос. оптический институт им. С. И. Вавилова», Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН [и др.]. - Санкт-Петербург, 2023. - С. 204.

8. **Мак, Б.В.** Цифровой пирометр спектрального отношения для измерения температуры твердых материалов / Б.В. Мак // *Advances in Science and Technology* : сб. ст. LV междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 15 сентября 2023 г.) / Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». - Москва, 2023. - С. 41-42.

9. **Мак, Б.В.** Анализ методики использования интегрального коэффициента излучения в радиационных пирометрах / Б.В. Мак // *Advances in Science and Technology* : сб. ст. LV междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 15 сентября 2023 г.) / Научно-издательский центр «Актуальность.РФ». - Москва, 2023. - С. 43-45.

10. **Нгуен, В.Н.** Оптико-электронная система определяет коэффициент излучения и температуру нагретых изделий / В.Н. Нгуен, Б.В. Мак, Т.А.Н. Ха // *Инновационное развитие: ключевые проблемы и направления их решения* : сб. ст. по итогам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Омск, 6 ноября 2023 г.) / отв. ред.: А. А. Сукиасян ; Агентство международных исследований. - Sterlitaamak, 2023. - С. 80-83.

11. **Нгуен, В.Н.** Повышение быстродействия вычислений коэффициента полезного действия приемника излучения методом трапециевидной аппроксимации / В.Н. Нгуен, Б.В. Мак, Т.А.Н. Ха // *Инновационное развитие: ключевые проблемы и направления их решения* : сб. ст. по итогам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Омск, 6 ноября 2023 г.) / отв. ред.: А. А. Сукиасян ; Агентство международных исследований. - Sterlitaamak, 2023. - С. 77-80.

12. **Мак, Б.В.** Определение коэффициента полезного действия приемники методом трапециевидной аппроксимации / Б.В. Мак // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 23 октября - 6 ноября 2023 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2023. - С. 171-172.

13. **Мак, Б.В.** Способ определения коэффициента излучения и температуры объекта оптико-электронным методом / Б.В. Мак, Д.А. Зиновьев // XXVIII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 23 октября - 6 ноября 2023 г.) : сб. материалов конф. / редкол.: С. В. Кузьмин (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ [и др.]. - Волгоград, 2023. - С. 165-166.

#### **Патентный документ:**

14. П. м. 216059 Российская Федерация, МПК G01J 5/08 Цифровой пирометр спектрального отношения / А.Н. Шилин, Б.В. Мак, И.А. Коптелова, Р.Г. Атаманюк; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. - 2023.

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2024 г. Заказ № \_\_\_\_ . Тираж \_\_\_\_ экз. Печ.л. \_\_\_\_

Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Отпечатано в типографии ВолГТУ

400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, корпус 7