

На правах рукописи



БЫКОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРИИ
ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Специальность 05.11.13 Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Москва - 2021

Работа выполнена на кафедре диагностических информационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель: Мачихин Александр Сергеевич
доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории акустооптической спектроскопии ФГБУН Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

Официальные оппоненты: Лысенко Валерий Григорьевич
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Всероссийского научно-исследовательского института метрологической службы»

Ковалев Михаил Сергеевич
кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных и оптико-электронных систем ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Защита диссертации состоится «28» сентября 2021 г. в 15 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.001 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Зал Ученого совета

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного совета МЭИ.001, д.т.н.



В.А. Барат

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Многие технологические процессы, используемые в научных исследованиях и промышленных производствах, основаны на нагреве, плавлении, варке и других высокотемпературных операциях над различными материалами. Производительность, энергоэффективность и качество выполнения этих операций в значительной степени зависит от надежности работы их ключевых, наиболее ценных узлов и компонентов: стекловаренных печей, автоклавов и реакторов, плавильных печей и иных высокотемпературных устройств. Постоянный контроль и оперативная диагностика состояния для своевременного устранения неполадок, являются необходимыми условиями эффективной и долговременной работы оборудования. Не меньшее значение имеют также дефектоскопия и контроль свойств самих объектов, подвергающихся высокотемпературной обработке. Поэтому развитие технологий неразрушающего контроля высокотемпературных процессов представляется весьма актуальной задачей.

Ключевым вопросом при решении указанных задач является тепловой контроль, заключающийся в регистрации и анализе температурных полей и позволяющий выявлять особенности протекающих процессов, обнаруживать дефекты объекта и оборудования.

Непосредственные, контактные методы контроля сталкиваются со множеством трудностей: требование температурной и коррозионной стойкости датчиков, необходимость пространственного сканирования либо размещения систем датчиков, влияния присутствия датчиков в зоне проведения исследований. Большинство этих проблем возможно избежать используя бесконтактные методы. Такие пассивные методы определения пространственного распределения температуры основаны на аппроксимации регистрируемого сигнала кривой Планка, описывающей спектральную плотность энергии излучения абсолютно черного тела (АЧТ). При этом, спектр теплового излучения объектов зависит не только от их температуры T , но и от излучательной способности ε . Эта величина, характеризующая отличие его спектра от спектра АЧТ, определяется физическими свойствами объекта и микроструктурными характеристиками его поверхности и в общем случае может зависеть как от длины волны λ , так даже и от температуры T . Значения излучательной способности ε известны для некоторых веществ и материалов в некоторых спектральных и температурных диапазонах. Однако, универсальной модели, описывающей зависимость $\varepsilon(\lambda, T)$ не существует. Для многих материалов, особенно новых и многокомпонентных, экспериментальные данные об излучательной способности ε , естественно, отсутствуют. Это приводит к необходимости, при моделировании и расчетах, зада-

вать значение излучательной способности практически произвольно, что неизбежно приводит к систематической погрешности определения температуры.

В случаях, когда исследуемый объект неоднороден и содержит элементы с различными физико-химическими и микроструктурными характеристиками, для измерения температуры $T(x,y)$ необходимо в каждом пикселе изображения корректно учитывать (задавать или измерять) величину излучательной способности ε . Поэтому применение в таких случаях методов, предполагающих пространственную однородность излучательной способности, например, тепловизионных, может приводить к существенным ошибкам измерения. Для решения подобных задач применяют методы пирометрии, называемые видеоспектрометрическими, заключающиеся в регистрации трехмерного массива данных $I(x,y,\lambda)$ и вычислении термограммы $T(x,y)$ на основе анализа спектров $I(\lambda)$ излучения объекта в каждом пикселе x,y . Широкое разнообразие современных научных и производственных задач, связанных с тепловым контролем объектов, в частности неоднородных, в условиях неизвестного пространственного распределения излучательной способности $\varepsilon(x,y)$, определяет необходимость разработки специализированных аппаратных средств и алгоритмов обработки данных.

Перспективным мультиспектральным методом измерения пространственного распределения температуры $T(x,y)$ и излучательной способности $\varepsilon(x,y)$, обеспечивающим оптимальное сочетание времени регистрации и объема регистрируемых данных, является видеоспектрометрия с использованием электронно-перестраиваемых узкополосных спектральных фильтров. Принципиальная возможность оценки распределения температуры $T(x,y)$ с помощью оптико-электронной системы (ОЭС) с акустооптическим (АО) перестраиваемым фильтром и матричным приемником излучения (МПИ) была продемонстрирована ранее, но методические аспекты практической реализации данного подхода до сих пор не проработаны. Это не позволяет в полной мере использовать возможности АО фильтров, в частности, быструю, скачкообразную спектральную адресацию, позволяющую задавать оптимальные для решаемой задачи количество, положение и порядок спектральных интервалов. Поэтому разработка методических и аппаратно-программных средств АО видеоспектрометрии для измерения пространственного распределения температуры, позволяющих создавать измерительные комплексы, является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является развитие метода определения пространственного распределения температуры с помощью акустооптической видеоспектрометрии за счет оптимизации режимов сбора гиперспектральных данных.

Достижение намеченной цели потребовало решения следующих задач.

1. Анализ возможных источников погрешности определения температуры методом спектральной пирометрии, выявление ее зависимости от отдельных параметров и режимов сбора данных.
2. Оптимизация процедуры сбора данных АО видеоспектрометром при решении задачи определения распределения температуры.
3. Разработка АО видеоспектрометра.
4. Разработка процедуры пространственно-спектральной калибровки АО видеоспектрометров, предназначенных для определения пространственного распределения температуры.
5. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для обработки данных, получаемых АО видеоспектрометром.
6. Экспериментальное подтверждение эффективности разработанных методических и аппаратно-программных средств.

Научная новизна

1. Установлены зависимости случайной составляющей погрешности определения значения температуры, измеряемой методом спектральной пирометрии, от числа и положения спектральных каналов. Получены аналитические выражения для определения оптимального положения спектральных каналов с точки зрения минимизации погрешности определения температуры.
2. Разработан алгоритм обработки спектральных изображений, получаемых с помощью АО видеоспектрометра, с целью определения пространственного распределения температуры в условиях неизвестного пространственного распределения излучательной способности.
3. Разработан и апробирован АО видеоспектрометрический измерительный комплекс, позволяющий бесконтактно определять пространственное распределение температуры микрообъектов при лазерном нагреве в ячейках высокого давления.

Практическая значимость

1. Разработано программно-методическое обеспечение, которое позволяет оптимизировать параметры измерительной системы и режим измерения с учетом условий эксперимента.
2. Разработанная процедура калибровки АО видеоспектрометров экспериментально апробирована, внедрена и показала свою эффективность при применении методов спектральной пирометрии.
3. Разработанный АО видеоспектрометрический комплекс встроен и работает в составе установки лазерного нагрева микрообъектов при высоких давлениях для оперативного бесконтактного определения распределений температуры.

Основные положения, выносимые на защиту

1. При оптимальном расположении спектральных каналов обеспечивается на 30-50% меньшая величина случайной составляющей погрешности определения температуры методом спектральной пирометрии, чем при эквидистантном расположении спектральных каналов при том же времени регистрации данных.
2. Разработанный метод поэтапной калибровки пространственных, спектральных и яркостных искажений изображения, вносимых акустооптическим видеоспектрометром, обеспечивает снижение погрешности определения температуры методом спектральной пирометрии в каждом элементе гиперспектрального изображения до уровня, не превышающего 2%.
3. Разработанные методические и аппаратно-программные средства позволяют осуществлять бесконтактное определение пространственного распределения температуры в диапазоне 1000-3000 К по поверхности микрообъектов, находящихся в ячейках высокого давления, при априори неизвестной излучательной способности.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15 международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, в числе которых 5-я Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, 2015); 10-я Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 2016); International academic forum АМО – SPITSE – NESEFF (Москва, 2016); 4-й Конгресс молодых ученых (Санкт-Петербург, 2017); Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (Суздаль, 2017-2019); International Conference on Equations of

State for Matter «ELBRUS» (Чегет, 2017-2019); 18-я Международная конференция «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург, 2018); 21-я Международная конференция «Волновая электроника и ее применение в информационных и телекоммуникационных системах» (Санкт-Петербург, 2018); 15-я Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2019); 22-я Всероссийская научно-техническая конференция по НК и ТД (Москва, 2020); 26-я Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2020); IV Международная конференция "Информационные технологии и технологии коммуникаций. Современные достижения" (Астрахань, 2020).

Отдельные результаты диссертационной работы получены в рамках проведения исследований, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований, в которых автор являлся руководителем (проект 18-38-00929) и основным исполнителем (проект 15-37-20646).

По теме диссертационной работы опубликовано 22 печатные работы, в том числе 1 патент на изобретение и 9 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК и/или международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Основные положения диссертации полностью представлены в опубликованных работах.

Достоверность результатов диссертационной работы

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается корректностью постановки задач и использованных приближений, выбором и использованием апробированных физических моделей и математических методов теоретического анализа и обработки экспериментальных данных, согласием результатов расчетов с результатами компьютерного моделирования и экспериментальными данными, сравнением с результатами, опубликованными другими авторами и полученными на основе альтернативных расчетных и экспериментальных методов.

Личный вклад автора

Вклад автора заключается в выполнении основного объема исследований. Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в получении, обработке и анализе результатов исследований. Все теоретические и экспериментальные результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Список цитируемой литературы состоит из 110 наименований, не включая публикации автора. Общий объем работы составляет 117 страниц, она содержит 34 иллюстрации и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы исследования, сформулирована цель диссертационной работы, приводится ее краткое содержание, отмечается научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит описание физических основ теплового контроля, сравнительный анализ методов бесконтактной пирометрии и примеры современных термографических задач науки и промышленности, в которых исследуемые объекты имеют априори неизвестную и существенно неоднородную излучательную способность $\varepsilon(x,y)$, что необходимо учитывать при вычислении распределения температуры T . Эта величина в каждой точке x,y определяется физическими свойствами объекта и микроструктурными характеристиками его поверхности, в общем случае зависит как от длины волны λ , так и от температуры T , и характеризует отличие спектра теплового излучения объекта от спектра АЧТ:

$$u(\varepsilon, T, \lambda) = \varepsilon(T, \lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (\exp(C_2/\lambda T) - 1)}, \quad (1)$$

где $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт·м², $C_2 = 1,43 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Для решения такого рода задач применяют методы многоволновой пирометрии или (в случае изображающих ОЭС) методы видеоспектрометрии, которые заключаются в регистрации серии из K спектральных изображений $I_k(x,y)$, получении спектральной зависимости интенсивности $I_k = I(\lambda_k)$ в каждом пикселе и решении системы K уравнений ($k = 1, 2, \dots, K$) вида $I_k = u(\varepsilon, T, \lambda_k)$ относительно T и ε , объединении полученных значений температуры в двумерную термограмму $T(x,y)$ (рис. 1).

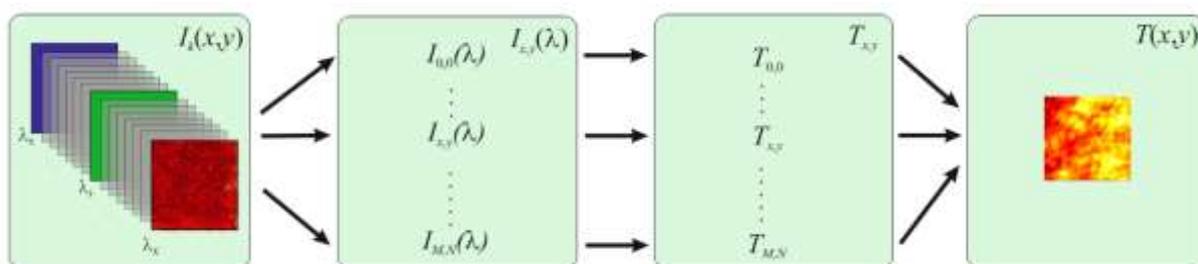


Рис. 1. Основные этапы измерения пространственного распределения температуры методом видеоспектрометрии

К настоящему времени разработано несколько видеоспектрометрических методов измерения пространственного распределения температуры, отличающихся принципом действия. Среди них наиболее перспективным является видеоспектрометрия на основе электронно-перестраиваемых узкополосных спектральных фильтров, позволяющая задавать количество спектральных интервалов и их положение оптимально для решаемой задачи с точки зрения времени регистрации, объема получаемых данных и точности измерения температуры. Среди таких фильтров наиболее перспективными являются акустооптические (АО), обеспечивающие во многих случаях оптимальное сочетание пространственного и спектрального разрешения, светосилы, диапазона и скорости перестройки, а также имеющие высокое быстродействие, возможность интерактивного управления формой аппаратной функции и другие преимущества по сравнению с иными перестраиваемыми фильтрами (табл. 1).

Таблица 1. Основные Спектральные методы измерения пространственного измерения температуры.

Показатель	Спектральный элемент				
	Несколько светофильтров	Колесо светофильтров	Спектральный растр	Дисперсионный элемент	Перестраиваемый АО фильтр
Малое время перестройки	Да	Нет	Да	Нет	Да
Количество спектральных каналов	4	3-6	3	>100	>100
Использование всей площади ПИ	Да	Да	Нет	Да	Да
Произвольная спектральная адресация	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Регулируемая ширина полосы пропускания	Нет	Нет	Нет	Нет	Да
Отсутствие подвижных элементов	Да	Нет	Да	Нет	Да
Простота сборки и юстировки	Нет	Да	Да	Да	Да
Малые масса и габариты	Нет	Да	Да	Да	Да

Излучены физические основы функционирования АО фильтров. Приведены выражения для расчета их основных параметров. Видеоспектрометры на основе АО фильтров обеспечивают произвольное число, положение, ширину и порядок задания спектральных каналов. Поэтому они предоставляют широкие возможности по разработке алгоритмов оптимального сбора и обработки данных с точки зрения времени регистрации и точности измерения температуры. Установлено, что полноценное использование предоставляемых ими широких возможностей, в частности, возможности задания количества, положения и по-

рядка селекции спектральных каналов, требует разработки оптимальных режимов их функционирования и создания специализированного методического и программного обеспечения для моделирования регистрируемых данных и анализа влияния параметров ОЭС и условий съемки на погрешность определения температуры методом спектральной пирометрии. При этом АО видеоспектрометры имеют целый ряд особенностей: квадратичная зависимость ширины полосы пропускания от длины волны, наличие пространственно-спектральных искажений, вносимых АО дифракцией, и др. Показано, что разработка методических и алгоритмических средств, позволяющих при сборе и обработке данных использовать достоинства АО видеоспектрометров с учетом данных особенностей их функционирования, может позволить разработать на их основе аппаратно-программные комплексы для высокоточного измерения пространственного распределения температуры.

Вторая глава посвящена описанию методики, алгоритмов и программного обеспечения для анализа влияния количества, положения и интенсивности спектральных каналов, параметров приемника излучения и других факторов на погрешность определения температуры методом спектральной пирометрии.

Для определения температуры T и излучательной способности ε при решении системы K уравнений используется метод наименьших квадратов:

$$p = \begin{pmatrix} \varepsilon \\ T \end{pmatrix} = \arg \min_{\varepsilon, T} \sum_{k=1}^K (I_k - u(\varepsilon, T, \lambda_k))^2. \quad (2)$$

При этом величина сигнала I_k задается следующими выражениями:

$$I_k = \begin{cases} 2^m - 1 & n_k \geq n_{\max} \\ n_k (2^m - 1) / n_{\max} & n_k < n_{\max} \end{cases}, \quad (3)$$

$$n_k = \frac{A_{\text{pix}} t_{\text{exp}} \kappa}{4(f'/D)^2} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{u(\varepsilon, T, \lambda) \eta(\lambda) \tau(\lambda) H_k(\lambda)}{E_F(\lambda)} d\lambda, \quad (4)$$

где n_{\max} – емкость потенциальной ямы приемника излучения (ПИ), m – разрядность ПИ, f'/D – диафрагменное число оптической системы (ОС), A_{pix} – площадь пикселя ПИ, t_{exp} – время накопления, κ – коэффициент, учитывающий фотонный шум ПИ, $\lambda_{\min}.. \lambda_{\max}$ – спектральный диапазон чувствительности ПИ, $\eta(\lambda)$ – спектральная зависимость квантовой эффективности ПИ, $\tau(\lambda)$ – спектральная зависимость коэффициента пропускания ОС, $H_k(\lambda)$ – функция пропускания k -го спектрального канала, $E_F(\lambda) = hc/\lambda$ – энергия фотона, h – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме.

Для случая отсутствия систематической погрешности при решении (2) получено аналитическое выражение для ковариационной матрицы $\text{cov}[p]$. Из него следует, что при одинаковом количестве сигнальных электронов $n_k = n$ во

всех спектральных каналах выражение для дисперсии измеренного значения температуры имеет вид

$$\sigma_T^2 = \frac{T^4}{C_2^2 n} \left(\sum_{k=1}^K G_k^2 - \frac{1}{K} \left(\sum_{k=1}^K G_k \right)^2 \right)^{-1}, \quad (5)$$

где $G_k = \lambda_k^{-1} \frac{\exp(C_2 T^{-1} \lambda_k^{-1})}{\exp(C_2 T^{-1} \lambda_k^{-1}) - 1}$. Показано, что величины σ_T^2 и σ_ε^2 обратно про-

порциональны уровню сигнала n , количеству K и величине $\sigma_{\lambda_k^{-1}}^2$, имеющей формальный смысл «дисперсии волновых чисел». Поэтому для снижения погрешности измерения T и ε необходимо, помимо повышения уровня сигнала n , увеличивать количество K спектральных каналов и разносить их положения λ_k по шкале длин волн. Минимальное значение σ_T^2 будет достигнуто, если K четное, половина значений λ_k равна λ_{\min} , а другая половина равна λ_{\max} . В этом случае

$$\sigma_T^2 = \frac{4T^4}{C_2^2 n K (G(\lambda_{\max}) - G(\lambda_{\min}))^2}. \quad (6)$$

Ввиду наличия шума фоторегистрации спектральная зависимость зарегистрированного сигнала I_k является случайным процессом. Исследование таких процессов может осуществляться различными численными методами. Одним из наиболее универсальных является метод Монте-Карло (ММК) – метод статистических испытаний, заключающийся в моделировании требуемой случайной величины с помощью выборки большого объема. При этом процесс описывается математической моделью на основе (2)-(4) с использованием генератора случайных величин, модель многократно обчисляется, на основе полученных данных вычисляются вероятностные характеристики рассматриваемого процесса. Для моделирования регистрируемого сигнала I_k и оценки погрешности вычисления температуры T и излучательной способности ε при решении (2) была разработана программа, блок-схема которой представлена на рис. 2.

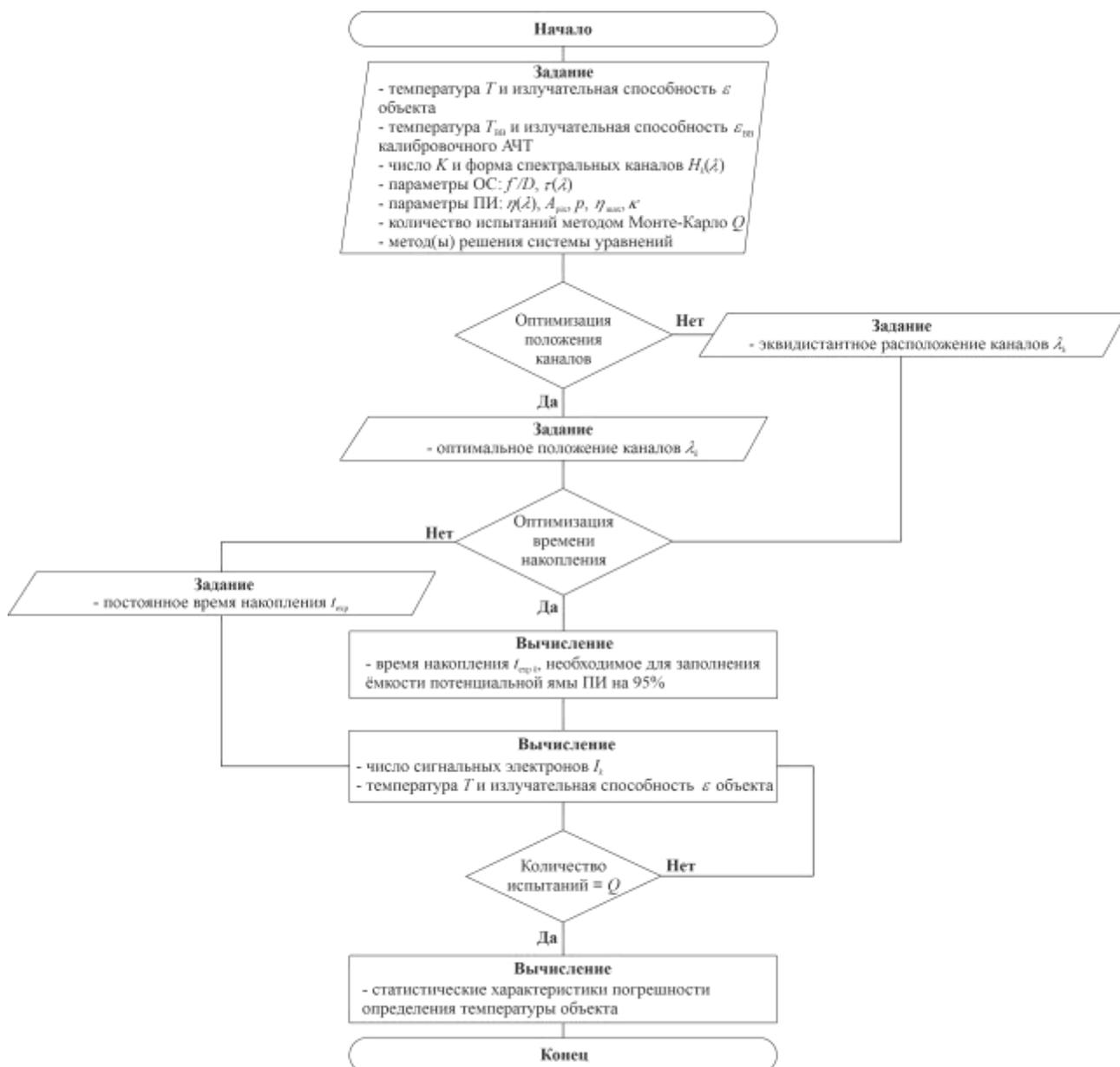


Рис. 2. Алгоритм моделирования процедуры оценки погрешности определения температуры при использовании метода спектральной пирометрии

После задания параметров ОЭС, числа K и положения λ_k спектральных каналов, температуры и излучательной способности объекта (T, ε) и калибровочного источника $(T_{LS}, \varepsilon_{LS})$, числа статистических испытаний Q программа позволяет вычислить случайную погрешность решения (2) тремя различными методами: линеаризацией, однопараметрической и двухпараметрической аппроксимацией. Разработанная программа была использована для получения зависимостей погрешности вычисления температуры T и излучательной способности ε от числа K , положения λ_k и интенсивности I_k спектральных каналов.

На рис. 3 приведен пример результатов моделирования с помощью разработанной программы при $T = 2000$ К, $\varepsilon = 0,9$, $\tau = 0,95$, $\lambda_{\min} = 400$ нм, $\lambda_{\max} = 900$ нм, использовании 10-битной $(p = 10)$ видеокамеры с сенсором PYTHON 1300,

гауссовой форме $H_k(\lambda)$ спектральных каналов с полушириной 2 нм, $Q = 100$ испытаниях ММК и трех различных режимах сбора данных.

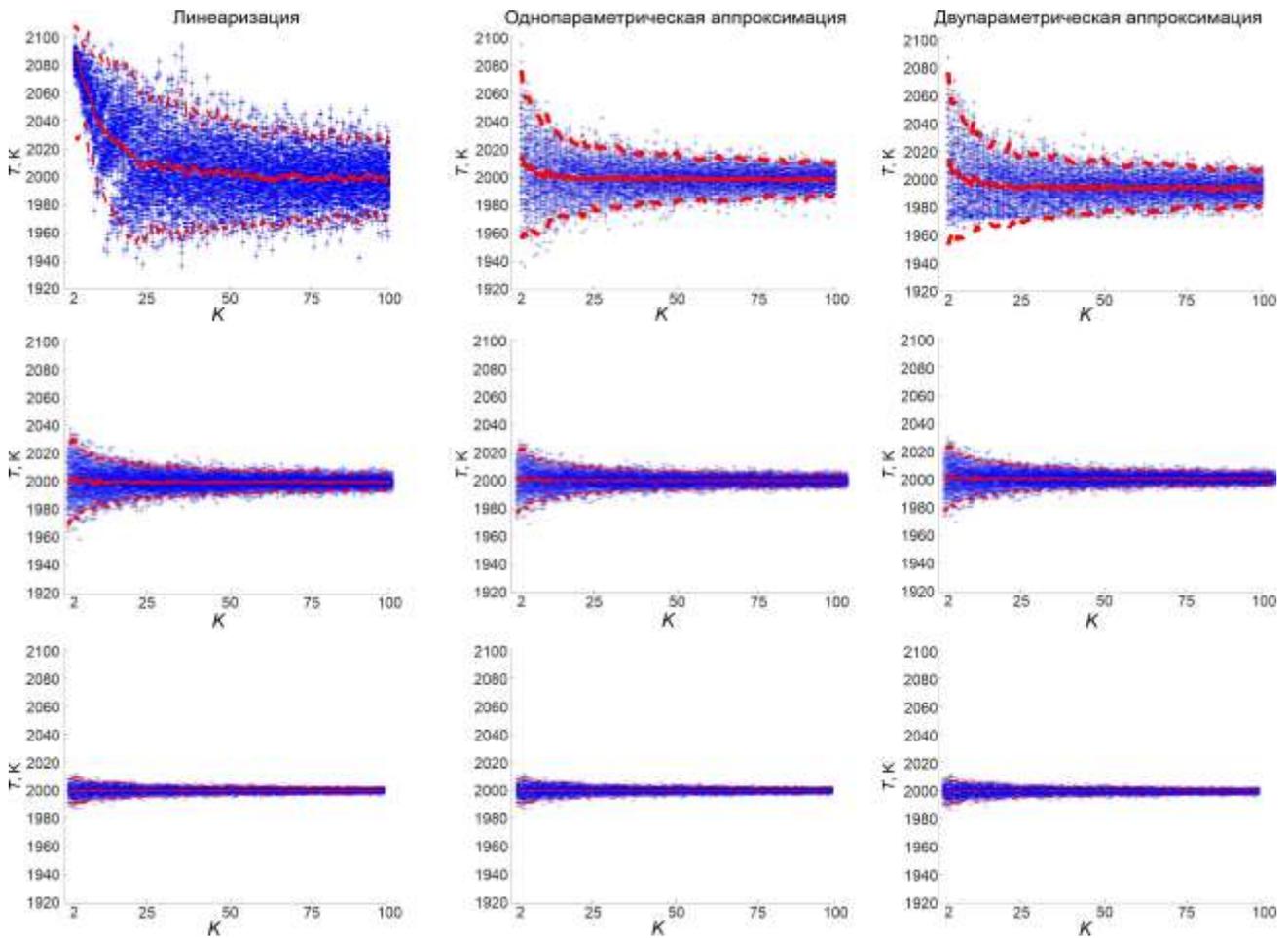


Рис. 3. Зависимость вычисленных значений температуры T (синие точки) от числа спектральных каналов K при трех различных режимах сбора данных: эквидистантном расположении каналов и постоянном времени накопления (верхний ряд), эквидистантном расположении и оптимальном времени накопления (средний ряд), оптимальном расположении и оптимальном времени накопления (нижний ряд). Красным показаны средние значения m_T , а также границы коридора $m_T - 3\sigma_T$ и $m_T + 3\sigma_T$ при каждом K .

Из графиков видно, что с увеличением числа спектральных каналов K среднее значение вычисленной температуры m_T приближается к истинному значению, а ее среднеквадратическое отклонение (СКО) σ_T уменьшается. При оптимальном времени накопления t_{exp} , соответствующем уровню сигнальных электронов $n_k = 0,95n_{\text{max}}$ в каждом спектральном канале, σ_T снижается примерно в 2 раза по сравнению с регистрацией данных при постоянном времени накопления. Еще более эффективным методом с точки зрения минимизации СКО измеряемой температуры является оптимальное расположение каналов – их груп-

пировка вблизи длин волн 450 нм и 850 нм около краев рабочего спектрального диапазона.

Для экспериментальной проверки корректности полученных теоретических выводов и результатов моделирования был собран стенд на основе монохроматора, состоящего из двух последовательно расположенных АО фильтров (рис. 4), позволяющий осуществлять регистрацию спектральных изображений $I_k(x,y)$ при произвольном количестве K , положении λ_k и порядке опроса спектральных каналов в диапазоне 590-1000 нм.

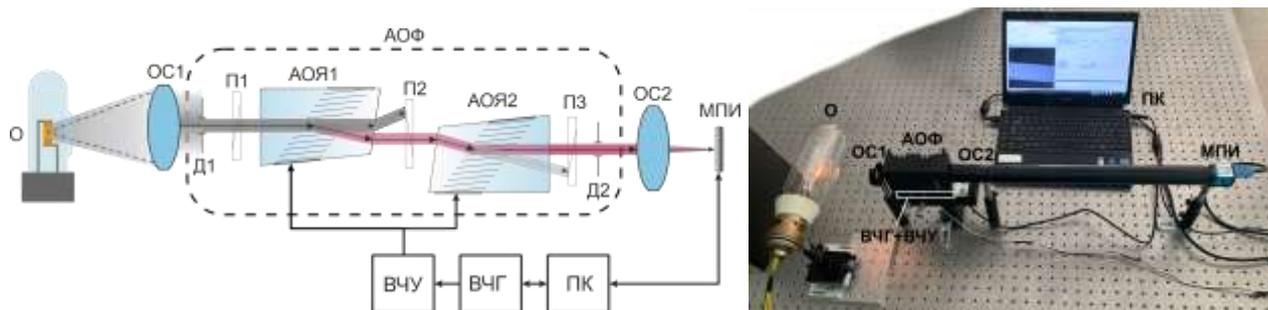


Рис. 4. Схема (слева) и внешний вид (справа) экспериментального стенда: ОС1 и ОС2 – объективы, АОЯ1 и АОЯ2 – АО ячейки, АОФ – АО фильтр, П1, П2, П3 – поляризаторы, О – исследуемый объект, Д1 и Д2 – диафрагмы, МПИ – монохромная видеокамера, ВЧГ и ВЧУ – высокочастотные генератор и усилитель, ПК – персональный компьютер

В качестве тест-объекта использовалась однородная нагреваемая постоянным током пластина из вольфрама – хорошо изученного и широко применяемого в пирометрии материала. Для определения оптимальных с точки зрения минимизации погрешности измерения температуры режимов регистрации данных были обработаны различные комбинации изображений $I_k(x,y)$ (рис. 5), соответствующих различному числу K и положению λ_k спектральных каналов.



Рис. 5. Примеры зарегистрированных спектральных изображений вольфрамовой пластины при постоянном токе 15 А и времени накопления 0,5 с

На рис. 6 показаны полученные в результате двух экспериментов, проведенных при различных значениях подаваемого тока, зависимости СКО определения температуры σ_T от числа спектральных каналов K при классическом эк-

видистантном и предложенном оптимальном расположении спектральных каналов. Видно, что в обоих экспериментах при одном и том же числе каналов K оптимальный режим обеспечивает значительно меньшее σ_T , что соответствует результатам теоретического анализа и моделирования.

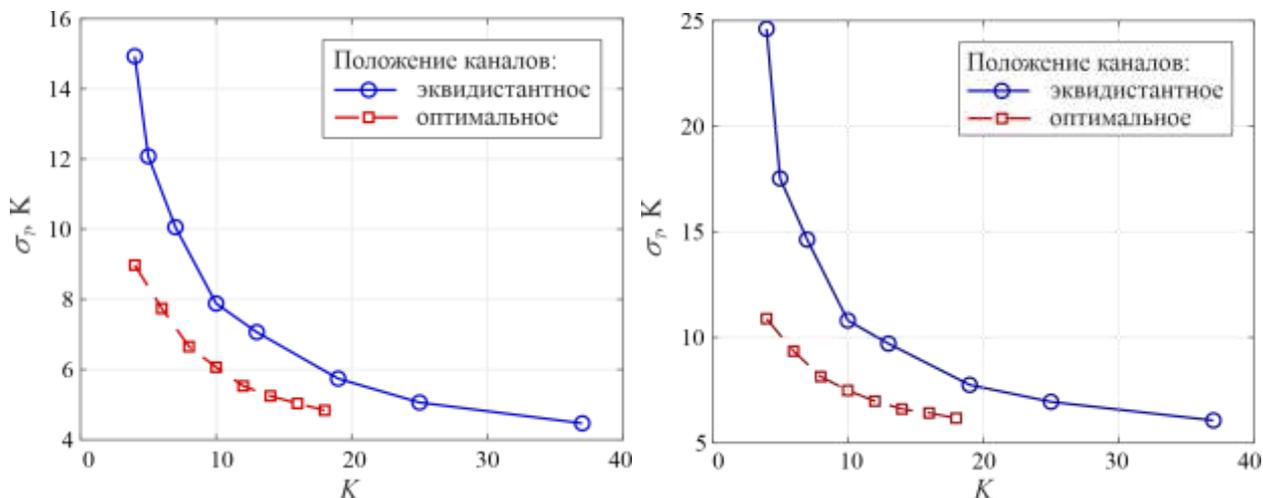


Рис. 6. Зависимость величины СКО σ_T при определении температуры от числа спектральных каналов K при токе 15 А и времени накопления 0,5 с (слева) и токе 20 А времени накопления 0,08 с (справа)

Для корректного определения оптимальных спектральных интервалов λ_1 и λ_2 были рассчитаны зависимости СКО определения температуры σ_T от них (рис. 7). При этом число каналов полагалось равным $K = 10$, а их положения определялись как $(\lambda_1 - 10, \lambda_1 - 5, \dots, \lambda_1 + 10)$ нм и $(\lambda_2 - 10, \lambda_2 - 5, \dots, \lambda_2 + 10)$ нм.

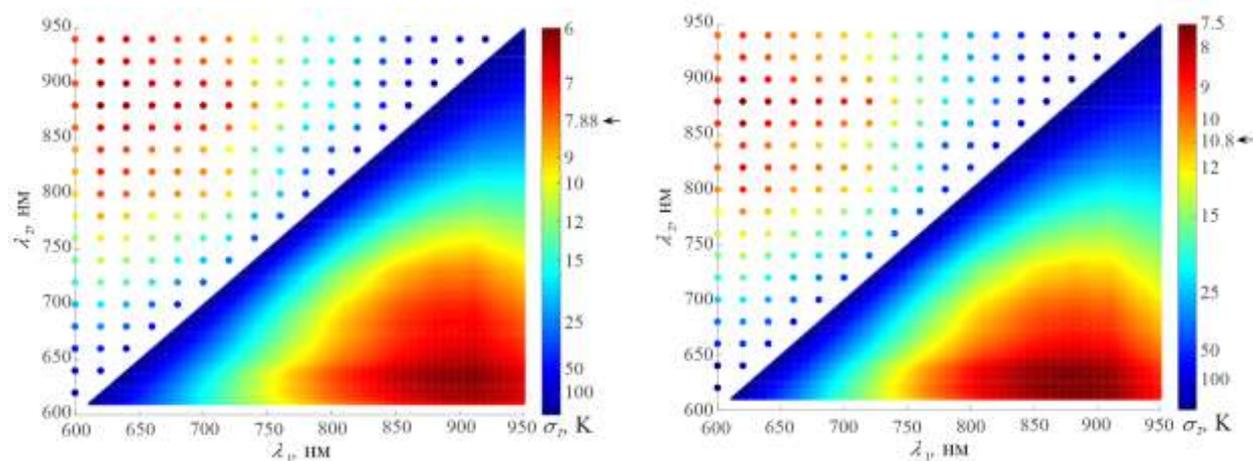
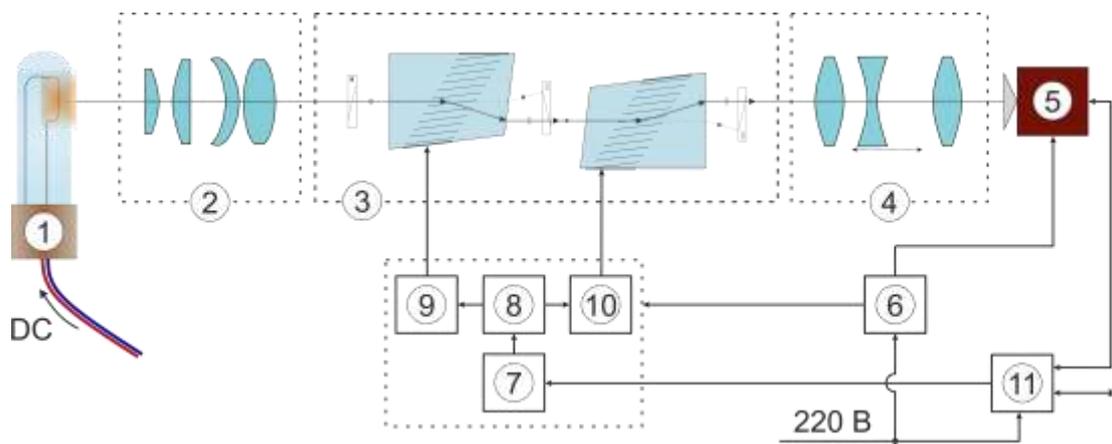


Рис. 7. Сравнение экспериментальных (верхний треугольник) и теоретических (нижний треугольник) значений СКО σ_T при различном выборе пары спектральных каналов λ_1 и λ_2 при токе 15 А и времени накопления 0,5 с (слева) и токе 20 А и времени накопления 0,08 с (справа)

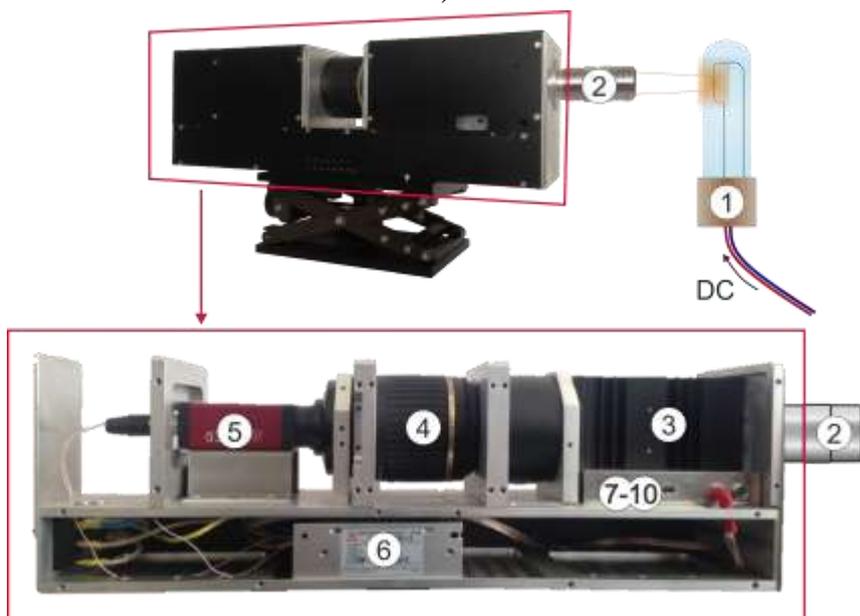
Видно, что результаты обработки экспериментальных данных близки к теоретическим расчетам. При оптимальном расположении каналов достигается минимум σ_T – значение, существенно меньшее, чем при эквидистантном расположении того же числа спектральных каналов (показаны стрелкой).

Третья глава посвящена разработке АО видеоспектрометра для определения пространственного распределения температуры и его экспериментальной отработке при исследовании образцов, находящихся внутри ячеек высокого давления, с использованием ранее разработанных методов и алгоритмов. Лазерный нагрев вещества в ячейках высокого давления является основным экспериментальным способом одновременного создания экстремальных статических давлений (>100 ГПа) и температур (>3000 К) и поэтому широко применяется в исследованиях внутренней структуры Земли, изучении фазовых переходов, синтезе новых сверхтвердых материалов и решении других научных задач. При этом распределение температуры $T(x,y)$ в области нагрева очень неоднородно. Традиционные методы определения температуры позволяют определить усредненную температуру по образцу либо весьма сложны в реализации и обеспечивают недостаточную точность ввиду малого числа фиксированных спектральных каналов. АО перестраиваемая фильтрация изображений позволяет преодолеть данные ограничения.

Для демонстрации и подтверждения этого была разработана конструкция АО видеоспектрометра для наблюдения микрообъектов. Данный прибор имеет следующие параметры: $\lambda_{\min} = 590$ нм, $\lambda_{\max} = 1100$ нм, $\delta\lambda = 5$ нм (при $\lambda = 750$ нм), пространственное разрешение 500×500 элементов. В качестве спектрального элемента используются две идентичные последовательно расположенные и развернутые на 180° в плоскости дифракции широкоапертурные АО ячейки, в качестве входной ОС – сменные микрообъективы с увеличением от $2\times$ до $50\times$, в качестве МПИ – видеокамера с сенсором CMOSIS CMV4000-3E12M1PP. Излучение от объекта 1 микрообъективом 2 коллимируется и подается на АО фильтр 3, состоящий из двух АО ячеек и трех поляризаторов. После двукратной анизотропной дифракции отфильтрованное узкополосное излучение фокусируется объективом 4 на матрице монохромной видеокамеры 5. Выделение спектральной составляющей происходит за счет изменения в диапазоне 42-88 МГц акустических частот, подаваемых на АО ячейки. Звуковые волны возбуждаются пьезоэлектрическими преобразователями при подаче ВЧ электрического сигнала, вырабатываемого генератором по командам ПК 11, передаваемых контроллером 7.



а)



б)

Рис. 8. Схема (а) и внешний вид (б) разработанного видеоспектрометра для определения пространственного распределения температуры микрообъектов. 1 – объект (лампа), 2 – микрообъектив, 3 – АО фильтр, 4 – сопрягающий объектив, 5 – видеокамера, 6 – блок питания, 7 – контроллер, 8 – ВЧ генератор, 9, 10 – ВЧ усилители, 11 – ПК

Разработанный АО видеоспектрометр вошел в состав уникальной научной установки «Лазерный нагрев в ячейках высокого давления» (рис. 9), где используется для определения пространственного распределения температуры образцов, находящихся в экстремальных условиях.

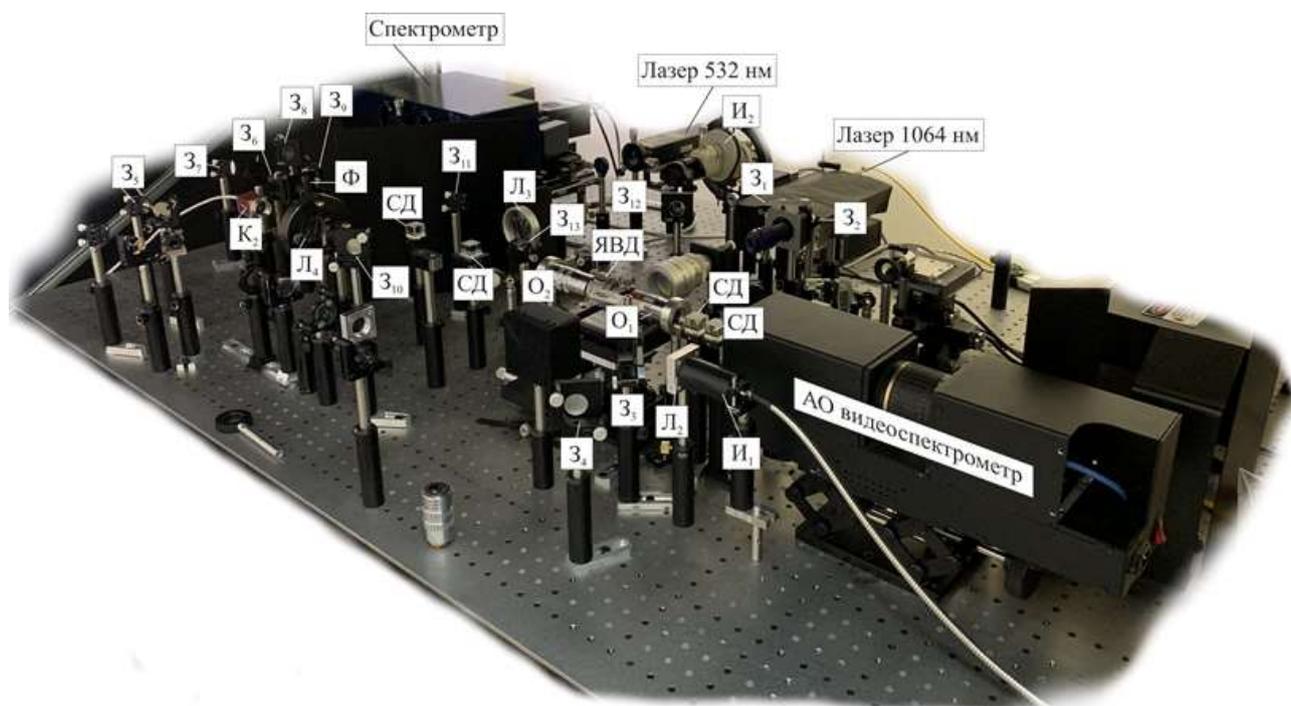


Рис. 9. Внешний вид уникальной научной установки «Лазерный нагрев в ячейках высокого давления», включающей разработанный АО видеоспектрометр: З – зеркала, Л – линзы, СД – светоделители, Ф – режекционный фильтр, И – широкополосные источники света, ЯВД – ячейка высокого давления

Для применения предложенных в главе 2 алгоритмов была разработана и апробирована многоступенчатая процедура калибровки АО видеоспектрометра и коррекции регистрируемых им изображений $I_k(x,y) = I(x,y,\lambda_k)$. Эта процедура включает в себя последовательную съемку нескольких аттестованных тест-объектов (источника широкополосного излучения, сетчатой миры, фотометрической сферы и АЧТ) и вычисление корректирующих коэффициентов, учитывающих яркостные, пространственные и спектральные искажения, вносимые прибором (рис. 10). Эти коэффициенты позволяют получить скорректированные спектральные изображения:

$$I'_k(x,y) = I(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k, \lambda_k + \Delta \lambda_k) \mu_v(x + \Delta x_k, y + \Delta y_k, \lambda_k) \mu_s(\lambda_k) + I_N(x,y,\lambda_k), \quad (7)$$

которые используются для вычисления пространственного распределения температуры $T(x,y)$ на основе решения системы уравнений (2) методом наименьших квадратов в каждом пикселе x,y .

Разработанные алгоритмы калибровки АО видеоспектрометра, оптимального сбора и коррекции гиперспектральных данных были апробированы в ходе многочисленных экспериментальных исследований различных образцов, находящихся в ячейках высокого давления и нагреваемых лазерным излучением (рис. 9).

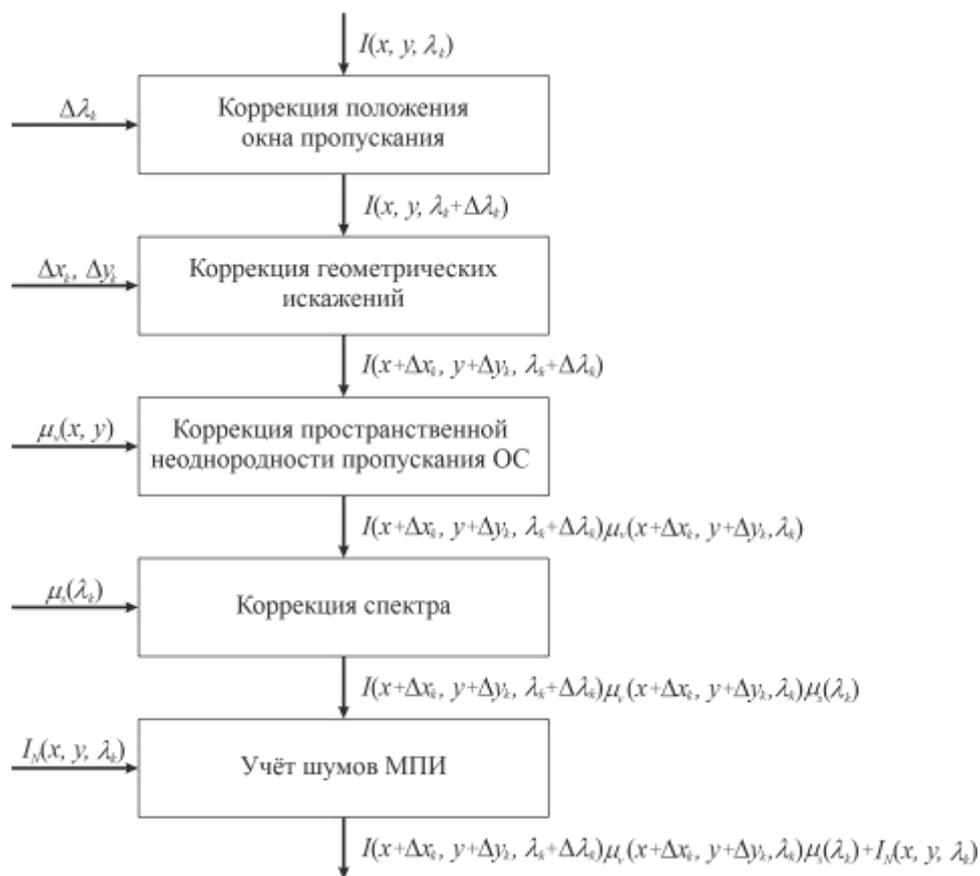


Рис. 10. Блок-схема процедуры калибровки АО видеоспектрометра

На рис. 11 приведено пространственное распределение температуры $T(x,y)$, вычисленное в результате одного из таких экспериментов, в котором в качестве образца использовалась микропластина из железа, находящаяся при давлении 55 ГПа и нагреваемая инфракрасным (1,06 мкм) лазером мощностью 15 Вт. Регистрируемые данные представляли собой $K = 26$ спектральных изображений $I_k(x,y)$ в диапазоне 700-850 нм. Вычисленные значения температуры в области нагрева согласуются с данными, полученными другим методом.

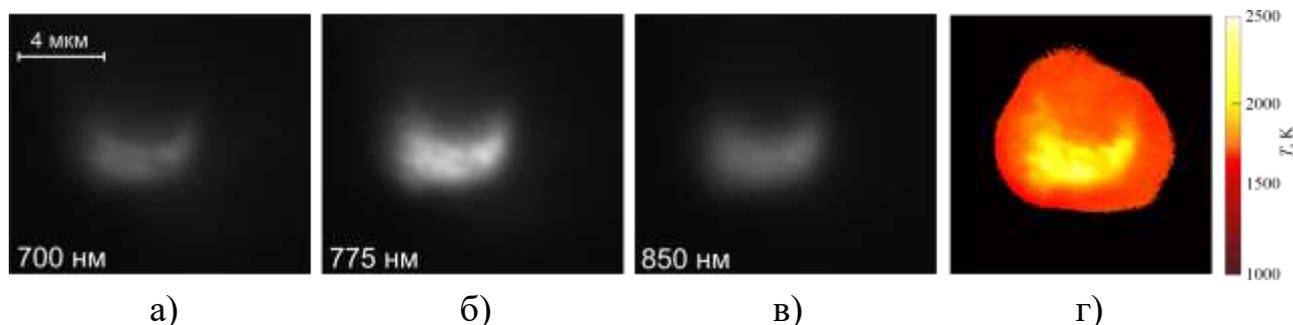


Рис. 11. Примеры зарегистрированных спектральных изображений (а-в) и вычисленное пространственное распределения температуры (г)

В Заключении перечислены наиболее важные выполненные исследования и сформулированы основные результаты работы.

1. Получены аналитические выражения для определения оптимального положения спектральных каналов с точки зрения минимизации погрешности измерения температуры методом спектральной пирометрии. Разработано программное обеспечение для анализа влияния количества и положения спектральных каналов, параметров приемника излучения и других факторов на погрешность определения температуры методом спектральной пирометрии. Результаты моделирования и экспериментов подтверждают, что по сравнению с эквидистантным расположением спектральных каналов их группирование вокруг оптимальных значений обеспечивает меньшую погрешность определения температуры.
2. Разработана процедура калибровки АО видеоспектрометров, предназначенных для определения пространственного распределения температуры. Показано, что применение этой процедуры позволяет осуществлять спектральную, пространственную и амплитудную коррекцию регистрируемых данных до уровня, необходимого для прецизионного определения температуры в каждом пикселе методами спектральной пирометрии с равномерной по кадру погрешностью.
3. Разработан алгоритм обработки гиперспектральных данных, получаемых с помощью АО видеоспектрометра, позволяющий определить пространственное распределение температуры поверхности объектов при априори неизвестном распределении излучательной способности. Алгоритм реализован в виде программного обеспечения.
4. Разработан и изготовлен АО видеоспектрометрический комплекс для определения пространственного распределения температуры микрообъектов. Он внедрен в состав уникальной научной установки «Лазерный нагрев в ячейках высокого давления». Эффективность разработанных методических и аппаратно-программных средств подтверждена в ходе многочисленных экспериментов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК и/или базу Scopus

1. Gorevoy, A. Optimization of data acquisition algorithm for temperature and emissivity distribution measurement using snapshot hyperspectral imaging systems / A. Gorevoy, A. Machikhin, A. Bykov, A. Kren // Case Studies in Thermal Engineering. - 2021. - V. 26. - № 101154.

2. Bykov, A. Thermography of inner surfaces of high-temperature industrial facilities / A. Bykov, D. Khokhlov, A. Gorevoy, M. Volkov // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - V. 1636. - P. 012031.
3. Zinin, P. Measurement of the temperature distribution on the surface of the laser heated specimen in a diamond anvil cell system by the tandem imaging acousto-optical filter / P. Zinin, A. Bykov, A. Machikhin, I. Troyan, K. Bulatov, Y. Mantrova, V. Batshev, M. Gaponov, I. Kutuza, S. Rashchenko, V. Prakapenka, S. Sharma // High Pressure Research. - 2019. - V. 39. - P. 131-149.
4. Bykov, A. Compensation of spectral image shift in AOTF-based system / A. Bykov, P. Zinin, K. Bulatov, D. Khokhlov, I. Kutuza // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - V. 1421. - P. 012031.
5. Bykov, A. Combined laser heating and tandem acousto-optical filter for 2-D temperature distribution on the surface of the heated microobject / A. Bykov, I. Kutuza, P. Zinin, A. Machikhin, I. Troyan, K. Bulatov, V. Batshev, Y. Mantrova, M. Gaponov, V. Prakapenka, S. Sharma // Journal of Physics: Conference Series. - 2018. - V. 946. - P. 012085.
6. Bykov, A. Temperature Measurement Using Endoscopic Acousto-Optical Spectral Imaging System / A. Bykov, D. Khokhlov, A. Machikhin, P. Zinin // IEEE Xplore. - 2018. - P. 1-4.
7. Bykov, A. Development of laser heating system to study phase transitions in boron rich carbons under high pressure and temperature / A. Bykov, P. Zinin, K. Bulatov, A. Machikhin, Y. Mantrova, I. Kutuza // IEEE Xplore. - 2018. - P. 222.
8. Булатов, К.М. Разработка методов изучения поведения вещества в экстремальных условиях: высокие давления и температуры / К.М. Булатов, А.А. Быков, М.И. Гапонов, П.В. Зинин, И.Б. Кутуза, А.С. Мачихин, Ю.В. Мантрова. // Физические основы приборостроения. - 2017. - № 6(3). - С. 72-82.
9. Мачихин, А.С. Акустооптический видеоспектрометр для измерения пространственного распределения температуры микрообъектов / А.С. Мачихин, В.И. Батшев, П.В. Зинин, А.В. Шурыгин, Д.Д. Хохлов, В.Э. Пожар, П.С. Мартьянов, А.А. Быков, С.В. Боритко, И.А. Троян, В.А. Казаков // Приборы и техника эксперимента. - 2017. - № 2. - С. 1-6.

Труды конференций

10. Быков, А.А. Оптимизация сбора данных для измерения температуры с использованием акустооптического фильтров / А.А. Быков, А.В. Горевой // Труды 4-й Международной конференции «Информационные технологии и технологии коммуникаций». - 2020.

11. Быков, А.А. Использование мощных лазеров для лазерного нагрева в ячейках высокого давления / А.А. Быков, К.М. Булатов, П.В. Зинин, И.Б. Кутуза // Труды 12-й Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» РНТОРЭС имени А.С. Попова. - 2019. - С. 143-144.
12. Быков, А.А. Применение зондовой видеоспектрометрической системы для теплового контроля труднодоступных объектов. / А.А. Быков, Д.Д. Хохлов, А.С. Мачихин, М.В. Волков // Труды 12-й Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» РНТОРЭС имени А.С. Попова. - 2019. - С. 145-146.
13. Хохлов, Д.Д. Применение зондовой видеоспектрометрической системы для неразрушающего контроля труднодоступных объектов / Д.Д. Хохлов, А.С. Мачихин, А.А. Быков, В.И. Батшев, А.М. Перфилов // Труды 11-й Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» РНТОРЭС имени А.С. Попова. - 2018. - С. 122-123.
14. Zinin, P. Measurement of the temperature distribution on the surface of the laser heated specimen in a diamond anvil cell system by the tandem imaging acousto-optical filter / P. Zinin, K. Bulatov, A. Bykov, A. Machikhin, I. Trojan, I. Kutuza, V. Prakapenka, V. Filonenko // Abstracts of 56th European High Pressure Research Group Meeting. - 2018. - P. 34-35.
15. Zinin, P. Measurement of the Temperature Distribution on the Surface of the Laser Heated Specimen in a Diamond Anvil Cell System by the Tandem Imaging Acousto-Optical Filter / P. Zinin, A. Machikhin, I. Trojan, K. Bulatov, A. Bykov, Y. Mantrova, V. Batshev, I. Kutuza, V. Prakapenka, S. Sharma // Program and abstracts of 9th High Pressure Mineral Physics Seminar. - 2017. - P. 186.
16. Machikhin, A. In-situ measurement of the high temperature distribution inside diamond anvil cell by means of an acousto-optical spectral imaging system / A. Machikhin, I. Troyan, A. Bykov, P. Zinin, D. Khokhlov, Y. Mantrova, I. Kutuza, V. Prakapenka // International Conference on Equations of State for Matter. - 2017. - P. 253.
17. Kutuza, I.B. Combined laser heating and Raman scattering in diamond-anvil-cell system / I.B. Kutuza, P.V. Zinin, A.A. Machikhin, I.A. Troyan, A.A. Bykov, K.M. Bulatov, V.I. Batshev, Y.I. Mantrova // International Conference on Equations of State for Matter. - 2017. - P. 254.

18. Быков, А.А. Исследование микрообъектов при высоких давлениях и температурах методом акустооптической видеоспектрометрии / А.А. Быков // М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова. - 2017. - С. 289-291.
19. Быков, А.А. Стенд для спектральных исследований и измерения распределения температуры микрообъектов при высоких давлениях и лазерном нагреве / А.А. Быков, А.С. Мачихин, В.И. Батшев // X Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. Сборник трудов: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». - 2017. - С. 35-36.
20. Bykov, A. Optical setup for spectral analysis of microscopic specimens in extreme conditions by means of acousto-optical spectrometers / A. Bykov, P. Zinin, A. Machikhin // Proceedings of the International Academic Forum AMO-SPITSE-NESEFF. - 2016. - P. 19.
21. Зинин, П.В. Мультимодальный стенд для исследования оптических свойств алмазов / П.В. Зинин, А.С. Мачихин, А.А. Быков // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ. - 2016. - С. 65-67.

Патент

22. Мачихин А.С., Быков А.А., Зинин П.В. Способ бесконтактного измерения пространственного распределения температуры и излучательной способности объекта. // Патент RU 2715089. Выдан 25.02.2020.