

На правах рукописи



Заграй Ираида Александровна

**МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ И ПИРОМЕТРИРОВАНИЯ
РАБОЧИХ СРЕД ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Казань – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»
на кафедре инженерной физики

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Кузьмин Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: **Кузнецов Гений Владимирович**
доктор физико-математических наук, профессор, профессор
НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

Гурьянов Александр Игоревич
доктор технических наук, доцент, и.о. директора института
«Авиационные технологии и инженерная физика»
ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П.А. Соловьева»

Ковальногов Владислав Николаевич
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Тепловая и топливная энергетика» ФГБОУ ВО
«Ульяновский государственный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится «19» декабря 2024 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.310.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел.: (843)519-42-58.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.03, Svetlana-zag@bk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Борисова Светлана Дмитриевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Детальное теоретическое и экспериментальное исследование недостаточно изученного процесса переноса энергии излучения в поглощающих, рассеивающих и селективно излучающих средах, содержащих газовую фазу (ГФ) и частицы конденсированной фазы (КФ) разного химического состава, представляет собой одну из важнейших задач для определения радиационного и сложного теплообмена в энергетических установках различного назначения. Кроме того, проблема математического моделирования теплового излучения рабочих сред включает в себя сложную задачу нахождения оптических свойств и размеров частиц КФ, радиационных характеристик газовых смесей и дисперсных систем.

Роль радиационных тепловых потоков возрастает в связи с увеличением мощности энергоустановок различных областей промышленности и организацией технологического режима работы этих установок, связанного с интенсификацией протекающих в них процессов с одновременным уменьшением вредных выбросов в окружающую среду. Определение характеристик теплового излучения (спектральных и интегральных плотностей потоков энергии излучения и излучательных способностей) продуктов сгорания является необходимым в решении проблем экологии, теплотехники, военной техники, метрологических и научных исследованиях, связанных с проектированием, разработкой и эксплуатацией энергетических установок.

В большинстве случаев критерием оценки совершенства рабочих процессов и эффективности энергетических установок в целом является уровень температуры рабочих сред. Использование оптических приборов (пирометров, тепловизоров) для точного бесконтактного определения температуры и температурных полей факела при сжигании газообразных топлив, а также пылевидных твердых топлив (торфа и угля) подразумевает корректную установку спектральной или интегральной излучательной способности исследуемой среды с учетом длины волны (или спектрального интервала) приемника излучения выбранного устройства. Отсутствие литературных и справочных данных по излучательным способностям многофазных и многокомпонентных рабочих сред (газовых смесей с твердыми и жидкими дисперсными частицами сложного химического состава) в широком интервале длин волн и температурном диапазоне требует проведения всего комплекса расчетных многофакторных исследований характеристик теплового излучения. Анализ опубликованных работ показал, что они посвящены решению отдельных задач теории теплового излучения и не позволяют оценивать влияние исходных факторов на промежуточные и конечные результаты. Кроме того, недостаточное внимание уделяется существующей селективности теплового излучения продуктов горения и сгорания при сжигании различных топлив.

Поэтому, в настоящее время является **актуальным** решение проблемы математического моделирования процессов теплового излучения гомогенных и гетерогенных продуктов горения и сгорания на основе методологии (технологии) комплексного исследования, сочетающей экспериментальные и расчетные методы и методики определения химического состава, оптических свойств, дисперсности, радиационных характеристик ГФ и частиц КФ, а также характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок.

Цель работы: повышение точности и интерпретируемости результатов определения спектрального состава теплового излучения и температуры продуктов горения и сгорания за счет разработки методологии комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок при использовании различных топлив.

Задачи исследования:

1. Выбор методик и получение результатов исследования химического состава торфа и золы торфа, оптических свойств и дисперсности частиц золы и шлака, плавкостных свойств золы, величины физического недожога торфа, сжигаемого в паровом котле БКЗ-210-140Ф.

2. Разработка программного модуля расчета радиационных характеристик газовой фазы, получение результатов определения спектральных коэффициентов поглощения многокомпонентных газовых смесей в зависимости от их состава.

3. Разработка программного модуля и получение результатов расчета радиационных характеристик частиц конденсированной фазы (спектральных коэффициентов ослабления, поглощения, рассеяния и индикатрис рассеяния) рабочих сред энергетических установок.

4. Разработка модульного программного комплекса для расчета спектральных и интегральных характеристик излучения (плотностей потоков энергии излучения и излучательных способностей) многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок на основе методологии комплексного исследования, сочетающей расчетные и экспериментальные методы и методики определения химического состава, оптических свойств, дисперсности, радиационных характеристик газовой фазы и частиц конденсированной фазы в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К.

5. Получение и анализ результатов расчета характеристик излучения рабочих сред энергетических установок: топочных газов при факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля) в паровом котле БКЗ-210-140Ф, продуктов горения и сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ), газогенератора.

6. Разработка методики пирометрирования топки парового котла БКЗ-210-140Ф с установлением температур газовой фазы и частиц конденсированной фазы для контроля плавкости конденсированной фазы и оценки уровня образования оксидов азота.

7. Разработка программно-аппаратного комплекса по определению температуры топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива.

8. Получение расчетных спектров излучения рабочих сред факела с учетом температурной неравновесности и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф.

Объекты исследования: многофазные и многокомпонентные рабочие среды энергетических установок, представляющие собой продукты горения и сгорания парового котла при факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля), продукты горения и сгорания высокоэнергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор).

Предмет исследования: тепловое излучение рабочих сред энергетических установок.

Научная новизна работы:

1. Разработан универсальный модульный программный комплекс «Spektr» для расчета спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок при использовании различных топлив в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К. Комплекс отличается от существующих тем, что обладает свойствами многофункционального применения в отношении его отдельных модулей и частей. Комплекс имеет двойное назначение (военное и гражданское), позволяет устанавливать закономерности переноса энергии излучения и спектральный состав теплового излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел).

2. Получены результаты расчетных исследований характеристик излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел) с учетом селективности и влияния определяющих факторов (температуры, давления, дисперсности, состава газовой и конденсированной фаз, наличия сажи и др.) на спектры теплового излучения.

3. Разработана научно-обоснованная методика пирометрирования топки парового котла, основу которой представляет новый подход экспериментально-расчетного определения излучательной способности, устанавливаемой на яркостных пирометрах. Методика отличается от существующих тем, что позволяет определять отдельно температуру газовой фазы в полосе излучения CO_2 и температуру частиц конденсированной фазы в полосе прозрачности газовой фазы на основе анализа спектров излучения рабочих сред энергетических установок. Доказано существование и найдена величина температурной неравновесности между газом и частицами по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля).

4. Разработан программно-аппаратный комплекс, основанный на применении созданной программы «Tempet» (получено свидетельство на программу ЭВМ) и пирометра Optris CTlaser F2H для полосы излучения CO_2 , который позволяет определять температуру и излучательную способность топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива (торфа и угля). Комплекс отличается от существующих тем, что его работа основана на нахождении общего решения аналитических экспериментальных и расчетных зависимостей излучательной способности от температуры при заданной массовой доле CO_2 .

5. Получены расчетные спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения и излучательные способности рабочих сред факела с учетом температурной неравновесности и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля).

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость заключается в том, с помощью созданного универсального модульного программного комплекса доказана ярко-выраженная селективность излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред при сжигании различных топлив, которую необходимо учитывать при выборе оптических приборов для бесконтактного измерения температуры. Установленные области наибольшего и наименьшего влияния различных факторов на радиационные характеристики и характеристики излучения необходимы в моделировании радиационного теплооб-

мена, при планировании, прогнозировании и интерпретации результатов физических, математических экспериментов и теплотехнических расчетов для энергоустановок (ЖРД, РДТТ, газогенераторы, паровые котлы), рабочие среды которых представляют собой гомогенные и гетерогенные продукты горения и сгорания.

С практической точки зрения исследование направлено на повышение надежности и экологичности работающих установок промышленной теплоэнергетики. При полном отсутствии в литературе информации по спектральной излучательной способности многофазных и многокомпонентных рабочих сред применение методологии комплексного исследования характеристик излучения указанных сред открывает новые возможности для использования оптических приборов (пирометров, тепловизоров) с наивысшей достоверностью и эффективностью в системах контроля за температурным режимом работы энергетических установок. Полученные расчетные характеристики излучения рабочих сред факела при сжигании твердых топлив (торфа и угля) необходимы для определения теплонапряженности, проведения пирометрического контроля и оценки шлакования экранных поверхностей и уровня образования оксидов азота. Созданные основы методологии научного исследования характеристик излучения продуктов сгорания ракетных двигателей необходимы для разработки электронно-оптических систем обнаружения и распознавания межконтинентальных баллистических ракет, летательных аппаратов, ракетных систем залпового огня, активно-реактивных снарядов, для наведения на них зенитных управляемых ракет по тепловому излучению факела, для защиты летательных аппаратов ложными тепловыми целями, а также для проведения тепловых расчетов при отработке конструкций и диагностике дефектов при огневых испытаниях двигателей.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы используются компанией ЗАО «ВяткаТорф», применяются для контроля температурного режима сжигания топлива при проведении режимно-наладочных испытаний и тепловых расчетов котельных агрегатов Кировского филиала ПАО «Т Плюс» (Кировская ТЭЦ-4). Материалы работы используются в научных исследованиях лаборатории «Энергетические системы и технологии» ФИЦ КазНЦ РАН. Результаты по оценке влияния промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на атмосферу Земли опубликованы на сайте Ria.ru медиагруппы «Россия сегодня» 27.06.2023 в 09:00. Материалы работы применяются в образовательной деятельности ВятГУ по направлению подготовки 13.03.01. Теплоэнергетика и теплотехника.

Работа выполнена в лаборатории теплофизических исследований кафедры инженерной физики ФГБОУ ВО ВятГУ в рамках НИР ПСР ВятГУ 2.3.1-5 в 2012 г., НИР ПСР ВятГУ 2.3.1-11 в 2014 г. Некоторые результаты работы получены в результате выполнения регионального гранта РФФИ 15-48-02482\15 в 2015 г., гранта РФФИ 16-07-01145 «а» в 2016-2018 гг. Тематика работы была поддержана Фондом содействия инновациям по программе «УМНИК» в 2020 г. Исследование проведено в рамках программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, создании баз данных по химическому составу, оптическим свойствам и дисперсности частиц рабочих сред энергетических установок на основании литературных и собственных экспериментальных результатов, разработке модульного программного комплекса, апробации результатов исследования, применении методологии для ус-

тановления влияния различных факторов на характеристики излучения рабочих сред энергетических установок, разработке стратегии определения температуры и интерпретации экспериментальных результатов пирометрирования топки парового котла БКЗ-210-140Ф, формулировке выводов и подготовке публикаций по теме работы.

Определение характеристик торфа и плавкости золы торфа выполнено в сотрудничестве с ИЦ «Теплотехник» ОАО «ВТИ». Установление размеров частиц и их химического состава, физического недожога торфа проведено совместно с сотрудниками НОЦ «Нанотехнологии» и лаборатории полимерных материалов ВятГУ.

В работе использовалась программа «Spektr» на языке Fortran, базовые алгоритмы которой были разработаны в ВятГУ Кузьминым В.А. и Мараткановой Е.И. Автор признателен Шмаковой Н.А. за помощь в разработке программы «Tempreg». Благодарность выражается сотрудникам Кировской ТЭЦ-4: Десяткову И.А. и Лоншакову А.С. за помощь в проведении экспериментов и полезные консультации по вопросам работы и эксплуатации котельных агрегатов.

Основные результаты диссертационной работы получены автором под руководством научного консультанта: д.т.н., профессора В.А. Кузьмина.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты определения химического состава торфа и золы торфа 4-х месторождений Кировской области, оптических свойств и дисперсности частиц золы и шлака, плавкостных свойств золы с установленными температурами деформации, сферы, полусферы, растекания и начала шлакования, величины физического недожога торфа, сжигаемого в паровом котле БКЗ-210-140Ф.

2. Программный модуль расчета радиационных характеристик газовой фазы, результаты определения спектральных коэффициентов поглощения многокомпонентных газовых смесей разного химического состава, содержащихся в продуктах сгорания энергетических установок.

3. Программный модуль и результаты расчета радиационных характеристик частиц конденсированной фазы (спектральных коэффициентов ослабления, поглощения, рассеяния и индикатрис рассеяния) рабочих сред энергетических установок.

4. Модульный программный комплекс «Spektr», состоящий из модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной газовой фазы, модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной конденсированной фазы и модуля расчета спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных рабочих сред (газ, жидкие и твердые частицы) энергетических установок в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К.

5. Результаты расчета и анализа характеристик излучения топочных газов при факельном сжигании твердых топлив (торфа и угля) в котле БКЗ-210-140Ф, а также продуктов горения и сгорания других энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератора) с демонстрацией применения модульного программного комплекса «Spektr» по двойному назначению (военному и гражданскому).

6. Методика пирометрирования топки котла БКЗ-210-140Ф и результаты определения температур газовой фазы и частиц конденсированной фазы, а также оценкой плавкости конденсированной фазы и уровня образования оксидов азота.

7. Программно-аппаратный комплекс по определению температуры топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива.

8. Расчетные спектры излучения (плотности потоков энергии излучения и излучательные способности) рабочих сред факела с учетом температурной неравновесности и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием фундаментальных законов теплового излучения, теплофизики, теплотехники, оптики, химии горения, современных методов и методик определения и обработки исходных данных, методов расчета радиационных характеристик дисперсных сред с помощью теории рассеяния, метода сферических гармоник в P_3 -приближении для решения интегро-дифференциального уравнения переноса энергии излучения для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды, метода бесконтактного пирометрического измерения температуры, современного поверенного оборудования и систем обработки результатов физического эксперимента.

Моделирование коэффициентов поглощения газовой фазы выполнено с использованием информационно-вычислительной системы «Спектроскопия атмосферных газов», разработанной в ЦНИИМАШ и институте оптики атмосферы СО РАН (на основе банков данных Nitran, Nitemp и др.). Химический состав частиц найден методом сканирующей электронной микроскопии и рентгенофлуоресцентной спектрографии. Исследование дисперсности частиц торфяной золы и показателя поглощения осуществлялось методом малоуглового светорассеяния, решением обратной задачи теории рассеяния и методом электронно-сканирующей микроскопии. Определение неполноты сгорания торфа (физического недожога) выполнено методом синхронного термического анализа, сочетающем методы термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциального термического анализа (ДТА).

Расчет радиационных характеристик частиц и характеристик излучения рабочих сред произведен с применением модульного программного комплекса «Spektr», апробация которого производилась путем сравнения результатов расчета с экспериментальными и расчетными данными для факелов модельных ЖРД и РДТТ, натурального РДТТ МБР Трайдент II. При разработке программы «Temper» и интерфейса программной части комплекса по определению температуры топочных газов использовались язык программирования Python, интерактивная среда разработки IPython, пакеты программ SciPy, математический пакет Mathcad 15.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских конференциях: Национальный конгресс по энергетике (Казань, КГЭУ, 2014 г.) (диплом II степени); Шестая Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-6 (Москва, МЭИ, 2014 г.) (диплом I степени); X Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения» (Казань, КГЭУ, 2015 г.); XX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Звенигород Московской области, НКТМ РАН, 2015 г.) (диплом I степени); Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 70-летию основания каф. ракетных двигателей КАИ (Казань, КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, 2015 г.); Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетике» (Москва, МЭИ, 2017 г.); Юбилейная конференция Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы теплообмена» и

XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Санкт-Петербург, СПбПУ, 2017 г.); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг», ICIE-2017 (Санкт-Петербург, СПбПУ, 2017 г.); Седьмая Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-7 (Москва, МЭИ, 2018 г.); 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, МФТИ, 2021 г.); XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Казань, КазНЦ РАН, 2023 г.).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 65 работ, включая 15 статей в журналах, входящих в базы Scopus и WoS, 8 статей в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России, 1 монография, 1 свидетельство на программу ЭВМ, 40 работ в других журналах и сборниках материалов конференций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» по следующим пунктам: 3 – «Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; ... перенос ... энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ ...»; 4 – «Процессы переноса ... энергии ... в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях. Радиационный теплообмен в прозрачных и поглощающих средах»; 6 – «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках»; 8 – «Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 366 страницах, включает 174 рисунка, 63 таблицы и 397 наименований в списке литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Условно диссертацию можно разделить на две части. Первая часть (главы 1 – 4) посвящена получению исходных данных, решению методологических вопросов организации комплексного исследования и моделирования характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок. Вторая часть (главы 5 и 6) посвящена решению целого ряда научно-исследовательских вопросов, имеющих практическое приложение.

В первой главе выполнен обзор литературы в области исследований теплового излучения, рассмотрены способы определения характеристик излучения и температуры рабочих сред энергетических установок, обозначена проблема оптимизации температурных режимов сжигания твердого топлива с энергетической и экологической точек зрения.

Общим вопросам теплового излучения посвящены монографии В.Н. Адрианова, К.С. Адзерихо, Е.Ф. Ноготова, В.П. Трофимова, А.Г. Блоха, Ю.А. Журавлева, Л.Н. Рыжкова, С.Т. Суржикова, Н.С. van de Hulst, Е.М. Sparrow, R.D. Cess, J.R. Howell, М.Р. Menguc, R. Siegel, М.Н. Ozisik и др.

Определением теплового излучения продуктов сгорания (ПС) в факелах ракет-

ных двигателей (ЖРД, РДТТ) и исследованием двухфазных течений в соплах занимались В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин, В.А. Кузьмин, Е.И. Маратканова, Л.Т. Гребенщиков, Л.А. Домбровский, И.М. Васенин, В.А. Архипов, В.Г. Бутов, А.А. Глазунов, В.Ф. Трофимов, Н.Н. Дьяченко, Л.И. Дьяченко, Е.П. Андреев, Ф.С. Завелевич, И.П. Макаров, А.Д. Тиранов, Н.Ф. Nelson, D.J. Carlson, M.F. Modest, Н. Zhang, Т. Ozawa, М.В. Garrison, D.A. Levin, С. Guobiao, Z. Dingqiang, Z. Xiaoying, N. Qinglin, F. Debin, D. Shikui, Т. Нeping, Н. Zhihong и др. Анализ работ показал, что при расчетах и в экспериментальных исследованиях характеристик излучения гетерогенных ПС ракетных двигателей необходимо учитывать не только радиационные характеристики газовой фазы (ГФ) и конденсированной фазы (КФ), но и принимать во внимание имеющиеся в потоках скоростную и температурную неравновесности.

Исследованием теплового излучения в промышленных энергетических установках в разные годы занимались В.Н. Адрианов, А.Г. Блох, А.С. Невский, В.И. Сагадеев, М.А. Таймаров, А.Б. Шигапов, Д.Б. Вафин, А.В. Садыков и др. Численное моделирование топочных процессов в котельных агрегатах проводили А.В. Старченко, А.С. Заворин, А.В. Гиль, В.Ф. Коняшкин, П.А. Марьяндышев, А.А. Чернов, В.К. Любов, А.С. Рубашкин, В.А. Рубашкин, М.Н. Bordbar, Т. Нуррänen, L.I. Diez, С. Cortes, А. Campo и др. В большинстве работ широко используется серое приближение при расчетах топочных процессов по нормативному методу и методике позонного теплового расчета. Наличие в реальных топочных объемах селективной излучающей среды оказывает влияние на процессы радиационного теплообмена и ограничивает широкое применение зонального метода для решения ряда задач.

Представленные в литературе технические способы и результаты измерения температуры рабочих сред с помощью многоволновой термометрии, акустических методов, методов с применением люминофорных материалов, контактных термопар и др. имеют ограниченную область применения, сложности в реализации и не позволяют провести одновременное нахождение температур газа и частиц при сжигании различных топлив. Отсутствие в литературе информации по спектральной излучательной способности для многофазных и многокомпонентных рабочих сред в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм ограничивает широкое использование выпускаемых оптических приборов (пирометров, тепловизоров) при исследовании указанных сред с наивысшей достоверностью и эффективностью в системах контроля за температурным режимом энергоустановки. Соблюдение температурного режима топки важно для предотвращения шлакования экранных поверхностей, экономии энергетических ресурсов и минимизации уровня образования оксидов азота.

В работе показана актуальность использования торфа в теплоэнергетике Кировской области ввиду существующих промышленных масштабов добычи топлива компанией ЗАО «ВяткаТорф», малых логистических затрат, возобновляемости данного местного топливного ресурса и возможностей использования его на случай чрезвычайных ситуаций. Проанализированы характеристики поставляемого торфа с 4-х месторождений Кировской области на основании данных топливной лаборатории Кировской ТЭЦ-4 и собственных исследований в сотрудничестве с ОАО «ВТИ» (табл. 1). Рассмотрена организация факельного сжигания твердых топлив (торфа и угля) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4, а также способы снижения физического и химического недожога топлива.

Таблица 1 – Характеристики торфа месторождений Кировской области

Наименование показателя	Производственный участок				Проектные данные котла БКЗ-210-140Ф	Справочник энерг. топлив
	Дымный	Пищальский	Каринский	Гороховский		
W^p , %	52,86	41,43	40,51	44,31	50	46,7
A^p , %	3,83	8,01	7,60	3,34	5,5	–
S^p , %	0,21	0,32	0,30	0,22	0,1	–
C^p , %	26,71	29,40	30,31	32,81	25,7	–
H^p , %	2,76	3,09	3,03	3,22	2,7	–
N^p , %	1,23	1,69	1,36	0,90	1,1	–
O^p , %	12,4	16,06	16,89	15,20	14,9	–
V^{daf} , %	65,82	61,21	63,3	65,76	–	67,8
$Q^p_{н}$, ккал/кг	2222	2496	2539	2808	2030	2190

На основании анализа литературных данных сформулирована цель, связанная с разработкой методологии (научных основ и базовых принципов) комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок. Применение комплексного подхода показано на примере парового котла БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа Кировской области.

Во второй главе проводится разработка программного модуля расчета радиационных характеристик ГФ, представлены результаты определения спектральных коэффициентов поглощения отдельных компонентов ГФ (H_2O , CO_2 , SO_2 и т.д.), смеси газов в котле БКЗ-210-140Ф и других энергетических установках.

Радиационные характеристики ГФ (спектральные коэффициенты поглощения $\alpha_{г\lambda}$) определяются химическим составом и зависят от массовой (объемной) доли компонентов ГФ, температуры, давления и длины волны излучения. Для аналитического расчета горения торфа (Пищальский производственный участок Кировской области) использовался элементарный состав топлива на рабочую массу (табл. 1). Расход торфа составил 24,5 т/ч, расход природного газа 5100 м³/ч. В среднем для сжигания 1 кг торфа требуется 0,21 м³ природного газа при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,25$. Химический состав компонентов ГФ определялся расчетом (по продуктам полного сгорания) и экспериментально с помощью газоанализатора ДАГ-500 (табл. 2). В качестве примера на рисунке 1 представлены спектры газовых компонентов и суммарный $\alpha_{г\lambda}$ ГФ при $p = 10^5$ Па и $T = 1273$ К. Наибольший вклад в суммарный $\alpha_{г\lambda}$ вносят молекулы H_2O и CO_2 . Роль компонентов SO_2 , N_2 и O_2 пренебрежимо мала. В данной главе также приводятся $\alpha_{г\lambda}$ ПС для низкотемпературной твердотопливной ракеты с металлизированным топливом, модельного ЖРД, котла БКЗ-210-140Ф при сжигании природного газа и угля.

Таблица 2 – Состав ГФ (в об.%) при сжигании торфа с «подсветкой» природным газом

Компоненты	В топке (расчет)	За топкой (эксперимент)
CO	–	0
CO ₂	10,5	8,9
SO ₂	0,03125	–
H ₂ O	18,4	–
N ₂	67,4	–
NO _x	–	0,0268
O ₂	3,6	5,1

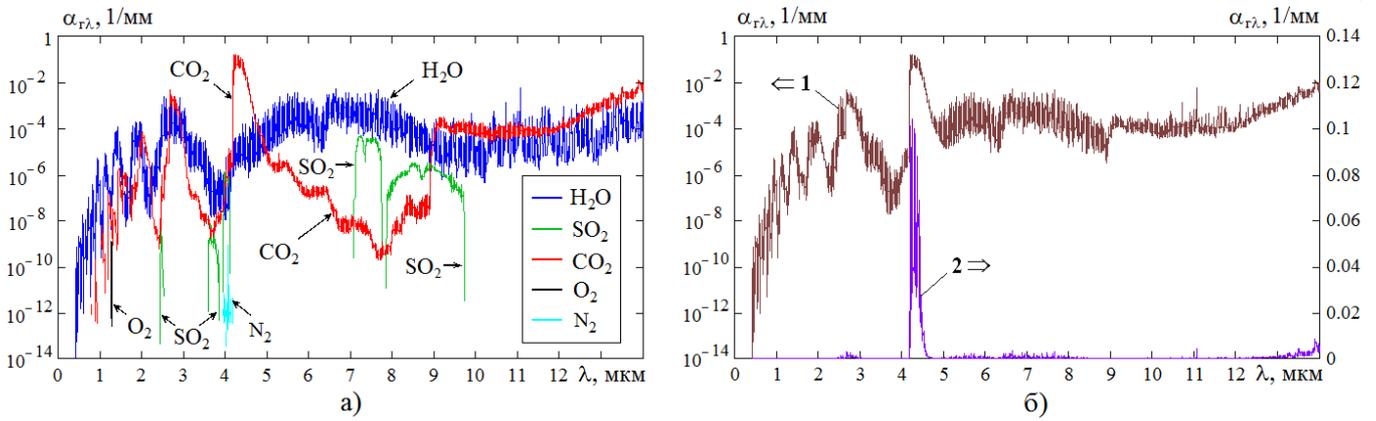


Рисунок 1 – Спектральный коэффициент поглощения ГФ $\alpha_{\Gamma\lambda}$ в паровом котле БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа с «подсветкой» природным газом: а) спектры отдельных компонентов ГФ; б) суммарный коэффициент в логарифмическом (1) и линейном (2) масштабах

В третьей главе проводится разработка программного модуля расчета радиационных характеристик частиц КФ, представлены результаты расчета для рабочих сред энергетических установок на основании созданной базы данных из литературных и собственных экспериментальных результатов определения химического состава, дисперсности и оптических свойств частиц золы, кокса, оксида алюминия и сажи.

Рассмотрены научные основы процесса переноса энергии излучения в рассеивающей и поглощающей дисперсной системе частиц. Радиационные характеристики индивидуальных частиц (РХИЧ) – эффективные сечения ослабления $\sigma_{\text{осл}}$, рассеяния $\sigma_{\text{рас}}$ и поглощения $\sigma_{\text{погл}}$ определяются по формулам:

$$\sigma_{\text{осл}} = \pi x^2 K_{\text{осл}}(m, \rho)/4, \quad \sigma_{\text{рас}} = \pi x^2 K_{\text{рас}}(m, \rho)/4, \quad \sigma_{\text{погл}} = \sigma_{\text{осл}} - \sigma_{\text{рас}}. \quad (1)$$

Здесь x – размер частицы, $K_{\text{осл}}$ и $K_{\text{рас}}$ – безразмерные факторы эффективности ослабления и рассеяния, $m = n_1 - n_2 \cdot i$ – комплексный показатель преломления (n_1 и n_2 – показатели преломления и поглощения), ρ – параметр дифракции ($\rho = \pi x/\lambda$).

Для полидисперсной системы частиц с известной функцией распределения частиц по размерам $f(x)$ справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} \kappa_{\lambda} &= N \cdot \int_0^{\infty} \sigma_{\text{осл}}(x) f(x) dx, & \alpha_{\lambda} &= N \cdot \int_0^{\infty} \sigma_{\text{погл}}(x) f(x) dx, \\ \beta_{\lambda} &= N \cdot \int_0^{\infty} \sigma_{\text{рас}}(x) f(x) dx, & \gamma_{\lambda} &= \int_0^{\infty} \gamma_0(x) f(x) dx. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь κ_{λ} , α_{λ} , β_{λ} , γ_{λ} – радиационные характеристики единичного объема (РХЕО) – спектральные коэффициенты ослабления, поглощения, рассеяния и индикатриса рассеяния. Числовая концентрация N частиц находится по формулам:

$$N = \frac{z \cdot \rho_{\Gamma}(T) \cdot v_{\Gamma}}{\langle V \rangle \cdot (1-z) \cdot \rho_{\text{ч}}(T) \cdot v_{\text{ч}}} \quad \text{или} \quad N = \frac{C_{\text{м}}}{\rho_{\text{ч}} \cdot \langle V \rangle}, \quad (3)$$

где z – массовая доля КФ, ρ_{Γ} и $\rho_{\text{ч}}$ – плотности ГФ и частиц КФ (зависят от температуры T), v_{Γ} и $v_{\text{ч}}$ – скорости газа и частиц, $\langle V \rangle$ – средний объем частиц, $C_{\text{м}}$ – массовая концентрация частиц.

Необходимость в проведении собственных исследований по химическому составу, оптическим свойствам и дисперсности частиц рабочих сред энергетических установок обуславливалась не только недостатком информации, но и отсутствием адекватности и целостности опубликованной информации по условиям применения, что ставило под сомнение ее использование в дальнейших корректных расчетах.

В ходе исследований были изучены различные образцы торфяной золы, полученные как в лабораторных условиях на начальном этапе исследования для отработки методики определения химического состава, дисперсности и оптических свойств, так и образцы золы и шлака, полученные при сжигании торфа в паровом котле БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4.

Установлено, что наиболее приемлемым для исследования химического состава золы оказался рентгенофлуоресцентный спектрофотометр EDX-720 HS фирмы «Shimadzu», позволяющий получать усредненные значения массовых долей компонентов (предельных оксидов) торфяной золы по всему объему образца.

С целью определения химического состава частиц шлака и золы произведен

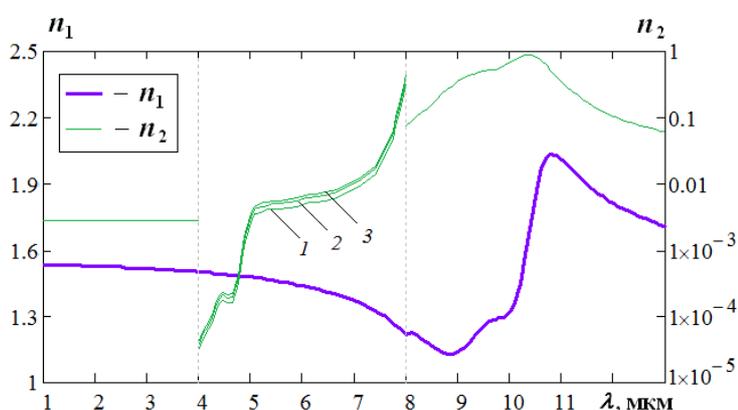


Рисунок 2 – Оптические константы частиц золы сухого отбора (получены осаждением из дымовых газов): 1 – $T = 1273$ К; 2 – $T = 1573$ К, 3 – $T = 1773$ К

отбор проб в разных частях системы парового котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4 (шлаковая ванна, под общим «коллектором», из скруббера). На основании данных по химическому составу частиц рассчитаны оптические константы золы торфа (рис. 2).

Основным компонентом КФ гетерогенных ПС модельных РДТТ являются частицы Al_2O_3 , для которых использовалось аналитическое представление оптических констант [Кузьмин В.А.]:

$$n_1 = 1,747 + 0,0066\lambda - 0,0068\lambda^2 + 0,00003 \cdot T, \quad (4)$$

$$k = -2,19 + 0,089 \cdot \lambda^{0,95} - 0,00056(3200 - T)\lambda^{-0,45}, \quad n_2 = 10^k.$$

Для модельных РДТТ система частиц конденсированного Al_2O_3 представлялась гамма-распределением:

$$f(r) = \frac{a^{b+1}}{b!} r^b e^{-ar}. \quad (5)$$

В отечественной и зарубежной литературе для описания дисперсности частиц золы, угольной пыли агрегатов промышленной теплоэнергетики, а также частиц Al_2O_3 в факеле натуральных РДТТ используется логарифмически-нормальное распределение

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \ln \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \ln x_n)^2}{2(\ln \sigma)^2}\right), \quad (6)$$

где x_n – медианный диаметр (среднеарифметическое), σ – стандартное (среднеквадратичное) отклонение диаметров от их среднего значения.

Исследования размеров частиц торфяной золы проводились с помощью сканирующего (растрового) электронного микроскопа JSM-6510LV фирмы «JEOL» с последующей статистической обработкой полученных результатов. Неправильная (угловатая) форма частиц с наличием криволинейных поверхностей характерна для торфяного шлака, полученного после провала ПС в нижнюю часть котла (холодная воронка). Эти частицы ввиду своей крупности (до 400 мкм) и тяжести не вытягиваются в сторону конвективного газотока, а попадают в шлаковую ванну. Присутствие подобных частиц говорит о наличии неполноты сгорания топлива (недожога). В шлаке содержатся несгоревшие органические частицы топлива. На рисунке 3 представлен пример микрофотографии частиц золы сухого отбора. Подавляющее большинство частицы золы сухого и мокрого отбора имеет сферическую форму и гладкую остеклованную фактуру поверхности. Размеры частиц золы составляют значения до 100 мкм. По мере движения частиц по тракту котла крупные фракции оседают, а к началу процесса гидрозолоудаления остаются частицы с размерами не более 50 мкм. Впоследствии эта зола осаждается струями воды в трубах Вентури и скрубберах и насосами откачивается на золоотвал. На рисунке 4 показаны гистограмма и функция распределения частиц золы по размерам. Кривая $P(x) = \int_0^x f(x)dx$ характеризует интегральный гранулометрический состав.

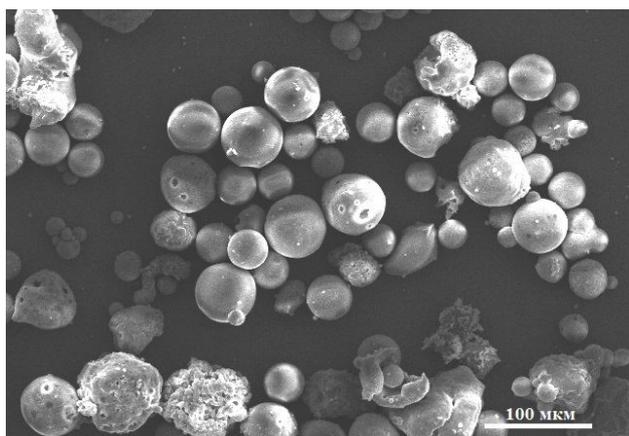


Рисунок 3 – Фотография частиц золы сухого отбора

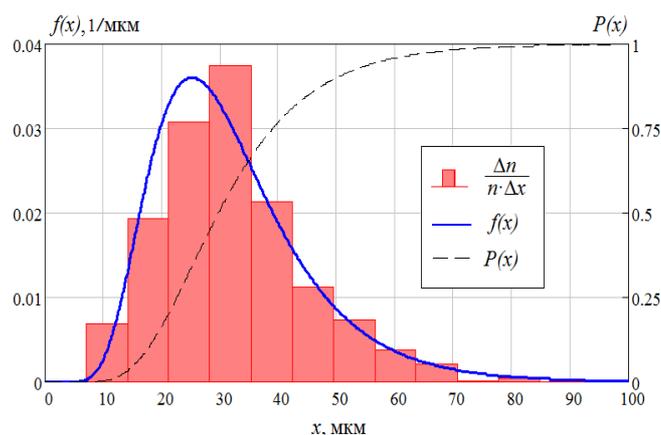


Рисунок 4 – Гистограмма и функция распределения частиц по размерам (зола сухого отбора). $x_n = 29,696$ мкм, $\sigma = 1,499$ мкм

Для проведения количественного анализа неполноты сгорания (недожога) торфа использован метод синхронного термического анализа, сочетающий методы ТГА и ДТА при одном измерении. На дериватографе DTG-60 проведено дожигание твердых ПС (до температуры 1373 К) с одновременной регистрацией величины потери массы в зависимости от температуры и времени нагрева и оценкой сопровождающих данный процесс тепловых эффектов. Величина физического недожога шлака при сжигании торфа в котле БКЗ-210-140Ф составила 4,096 %, а золы – 2,101 %.

В работе рассмотрены вопросы, связанные с эффектом шлакования топок паровых энергетических котлов и результаты определения плавкости золы торфа 4-х месторождений Кировской области. По четырем производственным участкам представлены плавкостные свойства золы (температуры деформации T_1 , сферы T_2 , полу-

сферы T_3 , растекания T_4) в зависимости от ее химического состава (табл. 3). Температура плавления минеральной части торфа, определяемая по ГОСТу 32978-2014, является усредненной и не отражает реальной температуры плавления отдельных частиц в летучей золе. Наличие таких отдельных частиц, имеющих температуру плавления ниже средней температуры плавления золы, затрудняет нахождение рабочей температуры факела, обеспечивающей наименьшее шлакование топки при сжигании торфа. Также в работе выполнено сравнение плавкостных характеристик золы торфа со справочными литературными данными. Вычислена температура начала шлакования по формулам [Алехнович А.Н.]:

$$T_{\text{шл}} = 1218 + 7,77 \cdot K/O \text{ при } K/O > 2,25, \quad (7)$$

$$T_{\text{шл}} = 1213 + \frac{52,23}{K/O} \text{ при } K/O < 2,25, \quad (8)$$

где $K = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ (сумма кислотных оксидов), $O = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (сумма основных оксидов).

Таблица 3 – Химический состав и плавкость золы торфа Кировской области

Показатель	Производственный участок				Справочник энерг.топлив
	Дымный	Пищальский	Каринский	Гороховский	
SiO ₂ , %	47,59	31,97	30,92	57,15	47,00
Al ₂ O ₃ , %	18,96	10,13	8,27	12,36	14,50
TiO ₂ , %	0,45	0,34	0,37	0,58	0,40
Fe ₂ O ₃ , %	20,84	23,42	8,33	6,13	20,40
CaO, %	4,88	18,24	31,14	9,95	12,10
MgO, %	0,62	1,14	4,30	1,32	2,20
K ₂ O, %	1,22	0,71	0,56	1,54	0,70
Na ₂ O, %	0,38	0,30	0,23	0,77	0,80
P ₂ O ₅ , %	4,02	2,65	1,80	1,54	1,90
SO ₃ , %	0,55	8,95	11,98	7,13	–
K, %	67	42,44	39,56	70,09	61,9
O, %	7,1	20,39	36,23	13,58	15,8
K/O	9,44	2,08	1,09	5,16	3,92
T ₁ , К	1473	1413	1453	1403	1513
T ₂ , К	1543	1443	1463	1453	1543
T ₃ , К	1593	1493	1463	1553	–
T ₄ , К	1623	1523	1483	1623	1653
T _{шл} , К	1291	1238	1261	1258	1248

Исследована возможность использования информации по угловой структуре индикатрисы рассеяния в области малых углов для определения показателя поглощения n_2 материала частиц торфяной золы. Применен метод решения обратной задачи с использованием лазерного анализатора «Ласка-2К» фирмы «Люмэкс» с рабочей длиной волны $\lambda = 0,67$ мкм (рис. 5 и 6).

С помощью математического моделирования исследовались радиационные характеристики частиц золы и единичного объема ПС при сжигании торфа (рис. 7) и угля; частиц оксида алюминия и ПС для условий камеры сгорания и факела модельного РДТТ; частиц сажи в цилиндре газодизеля с турбонаддувом 4 ЧН 11,0/12,5.

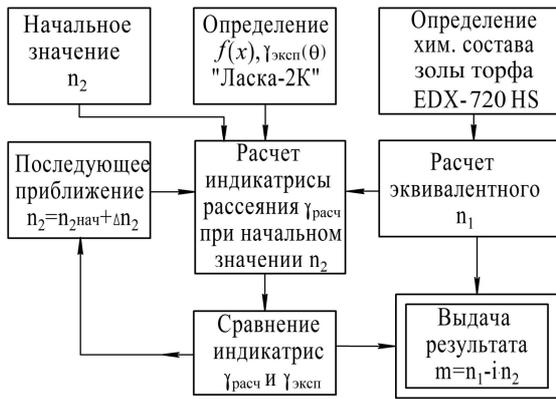


Рисунок 5 – Блок-схема определения комплексного показателя преломления

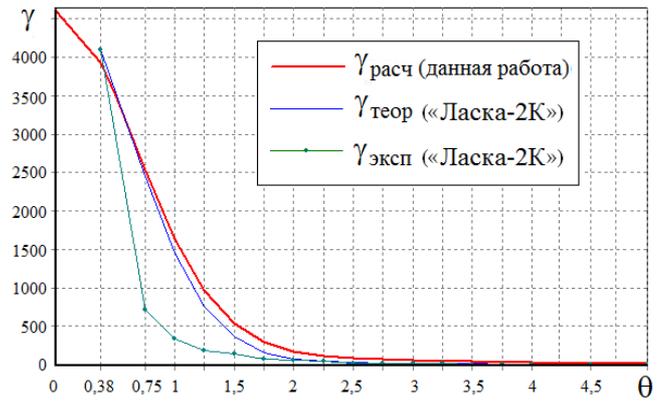


Рисунок 6 – Индикатриса рассеяния γ для образца золы ($n_1 = 1,6802, n_2 = 0,007$)

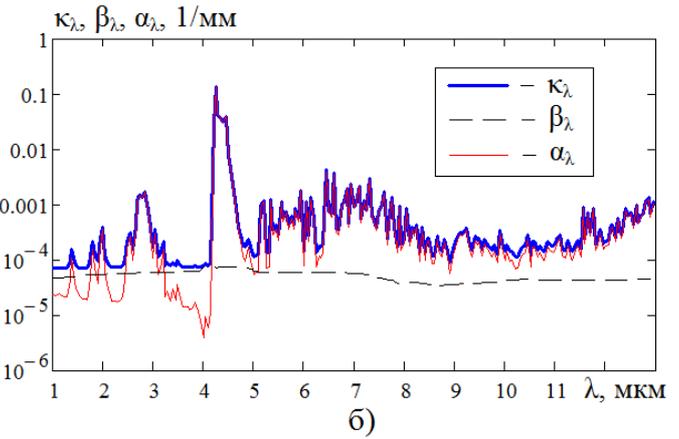
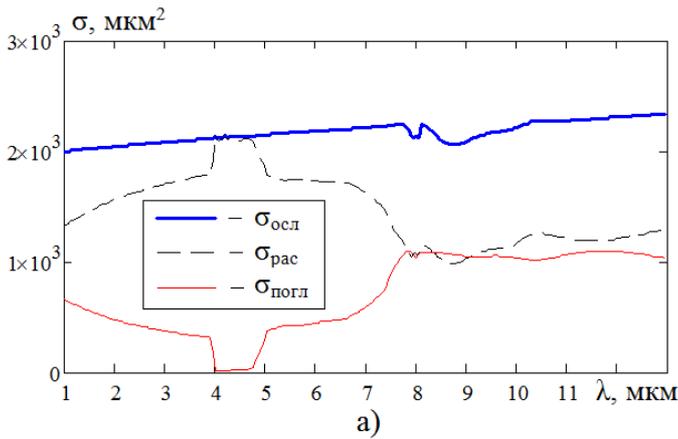


Рисунок 7 – Радиационные характеристики при сжигании газоторфяной смеси в котле БКЗ-210-140Ф, $p = 10^5$ Па, $T = 1273$ К: а) РХИЧ золы; б) РХЕО ПС

В четвертой главе представлена методика расчета спектральных и интегральных характеристик излучения (плотностей потоков энергии излучения и излучательных способностей), приведено описание модульного программного комплекса (МПК) «Spektr», который является основой разработанной методологии комплексного исследования.

Селективный спектр излучения рабочей среды несет информацию о многофазности и многокомпонентности исследуемой среды, уровне температуры ГФ и частиц КФ, спектральном интервале и давлении. Для поглощающей, рассеивающей и излучающей среды без учета поляризации падающего на объем и рассеянного им излучения уравнение переноса имеет вид:

$$(\vec{\Omega}\nabla)I_\lambda(\vec{r},\vec{\Omega}) = -\kappa_\lambda I_\lambda(\vec{r},\vec{\Omega}) + \beta_\lambda \int_{(4\pi)} I_\lambda(\vec{r}',\vec{\Omega}') \gamma_\lambda(\vec{r},\vec{r}',\vec{\Omega},\vec{\Omega}') d\omega' + \alpha_\lambda I_{\lambda\text{АЧТ}}(\vec{r}) \quad (9)$$

где I_λ – спектральная интенсивность энергии излучения в точке среды, определяемой вектором \vec{r} в направлении $\vec{\Omega}$; κ_λ – спектральный коэффициент ослабления ($\kappa_\lambda = \alpha_\lambda + \beta_\lambda$); γ_λ – индикатриса рассеяния; $I_{\lambda\text{АЧТ}}$ – спектральная интенсивность энергии излучения абсолютно черного тела (АЧТ); $\vec{\Omega}'$ – любое направление луча, из которого рассеянное излучение переходит в рассматриваемое $\vec{\Omega}$; ω' – элементарный телесный угол.

Проведены анализ и сравнительная оценка методов решения интегро-

дифференциального уравнения (ИДУ) (9) с точки зрения возможности использования их в расчетах теплового излучения. Наиболее подходящим для решения поставленных в работе задач является метод сферических гармоник с использованием метода матричной факторизации для одномерных и двумерных областей с внутренними равномерно распределенными по объему изотропными источниками. Этот метод обеспечивает хорошую сходимость, обладает безитерационной схемой расчета и учитывает такие параметры, как анизотропия рассеяния, селективность излучения, неизотермичность объема, оптические свойства, термо- и газодинамические параметры и граничные условия. Разработанный МПК «Spektr» основан на решении ИДУ переноса энергии излучения методом сферических гармоник в P_3 -приближении для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды. Индикатриса рассеяния представлялась в ряд по полиномам Лежандра P_n .

Спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения (F_λ и F) через единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению нормали, определялись по формулам:

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}) \vec{\Omega} \vec{n} d\Omega, \quad F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda, \quad (10)$$

где λ_1 и λ_2 – нижняя и верхняя границы спектрального интервала. Спектральные и интегральные излучательные способности (ε_λ и ε) находились так:

$$\varepsilon_\lambda = F_\lambda / F_{\lambda АЧТ}, \quad \varepsilon = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda АЧТ} d\lambda. \quad (11)$$

МПК «Spektr» состоит из модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной ГФ ($\alpha_{T\lambda}$), модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной КФ ($\kappa_\lambda, \alpha_\lambda, \beta_\lambda, \gamma_\lambda$) и модуля расчета спектральных и интегральных характеристик излучения ($F_\lambda, F, \varepsilon_\lambda$ и ε) многофазных рабочих сред (газ, жидкие и твердые частицы) энергетических установок в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К. МПК обладает свойствами многофункционального применения в отношении его отдельных модулей и частей. МПК имеет двойное назначение (военное и гражданское): позволяет устанавливать закономерности переноса энергии излучения и спектральный состав теплового излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел).

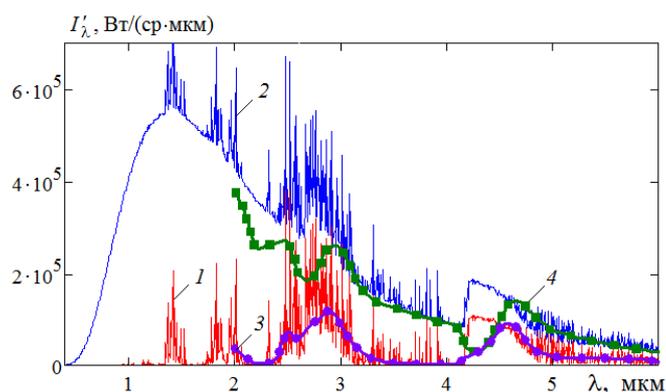


Рисунок 8 – Спектральная сила излучения факела РДТТ Трайдент II: 1 – расчет при наличии только ГФ; 2 – расчет при учете ГФ и КФ; 3 – расчет [Zhang X., Chen H.] при наличии только ГФ; 4 – расчет [Zhang X., Chen H.] при учете ГФ и КФ

нального применения в отношении его отдельных модулей и частей. МПК имеет двойное назначение (военное и гражданское): позволяет устанавливать закономерности переноса энергии излучения и спектральный состав теплового излучения рабочих сред энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел).

Апробация МПК «Spektr» производилась путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными для факелов модельных ЖРД и РДТТ, расчетными данными для факела РДТТ тактической ракеты и РДТТ МБР Трайдент II (рис. 8).

В пятой главе приведены результаты математического моделирования с применением МПК «Spektr», определено влияние определяющих факторов на характеристики излучения для энергетических установок: ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел.

Исследовано изменение характера спектра излучения ПС модельных ЖРД (рис. 9 и 10) и РДТТ (рис. 11) по тракту «камера сгорания – сопло – начальный и основной участки факела (НУФ и ОУФ)».

Для условий камеры сгорания уровень интегральной излучательной способности ПС ЖРД ($\epsilon = 0,0683$) на порядок меньше соответствующей величины для РДТТ (0,6241). Для остальных участков тракта истечения ПС различие по ϵ может составлять: (6 – 25) % (сопло, в зависимости от учета температурной неравновесности в ПС РДТТ), (4 – 33) % (НУФ, без учета наличия сажи в ПС ЖРД и в зависимости от учета температурной неравновесности в ПС РДТТ), 7 % (ОУФ). Для ЖРД сохраняется селективность излучения на всем пути истечения ПС от камеры сгорания до ОУФ (рис. 9). Причем спектральная полоса излучения CO_2 ($\lambda = 4,3$ мкм) может быть использована для пирометрического определения температуры ГФ ПС из-за высокого значения ϵ_λ . Даже незначительное содержание сажи ($z = 0,001$), которое возникает на НУФ, повышает значения F_λ и ϵ_λ на несколько порядков в зависимости от спектрального интервала, а величины F и ϵ на 13 % и более (рис. 10).

Для РДТТ (рис. 11) наблюдается резкая смена спектральной структуры излучения от сплошного (в камере сгорания) до явно выраженного селективного излучения ПС (на ОУФ). При этом оказывается слабое влияние (до 5 %) на ϵ_λ в полосе 4,3 мкм и весьма заметное (до 75 %) в спектральном интервале (0,4 – 1) мкм, соответствующем излучению КФ. В камере сгорания основным источником излучения являются частицы Al_2O_3 , имеющие сплошное излучение (рис. 11, а). При этом интегральные характеристики излучения при учете КФ (F_κ и ϵ_κ) составляют 97,8 % от соответствующих величин для гетерогенных ПС (F и ϵ). По мере движения ПС по тракту роль КФ снижается и ее влияние на интегральные величины составляет 18 % для ОУФ. Интегральные характеристики излучения ГФ (F_Γ и ϵ_Γ) составляют 6,4 % (камера сгорания), 15 % (сопло), 21 % (НУФ) и 84 % (ОУФ) от соответствующих величин (F и ϵ) для ПС. Основные излучающие компоненты ГФ H_2O и CO_2 вносят основной вклад в излучение ПС вблизи длин волн 2,7 и 4,3 мкм. В камере сгорания наблюдается примерно соизмеримое влияние компонентов H_2O и CO_2 (12,81 и 11,72 Вт/см² соответственно) на итоговое излучение ГФ. При постепенном переходе по тракту РДТТ влияние CO_2 становится преобладающим, и на ОУФ излучение CO_2 более, чем в 1,5 раза превышает излучение H_2O .

Для натурального РДТТ Трайдент II определено влияние химической неравновесности через исследование характеристик излучения продуктов неполного сгорания и ПС. Для условий камеры сгорания, при учете интегральных характеристик, справедливо допущение о наличии только ПС. Для условий НУФ различие в расчетах интегральных характеристик составляет 9,2 %. В зависимости от выбранного спектрального интервала, спектральные величины могут отличаться до 1 % для камеры сгорания и до 60 % для НУФ (вблизи длин волн $\lambda = 2,7; 4,8$ и 5 мкм).

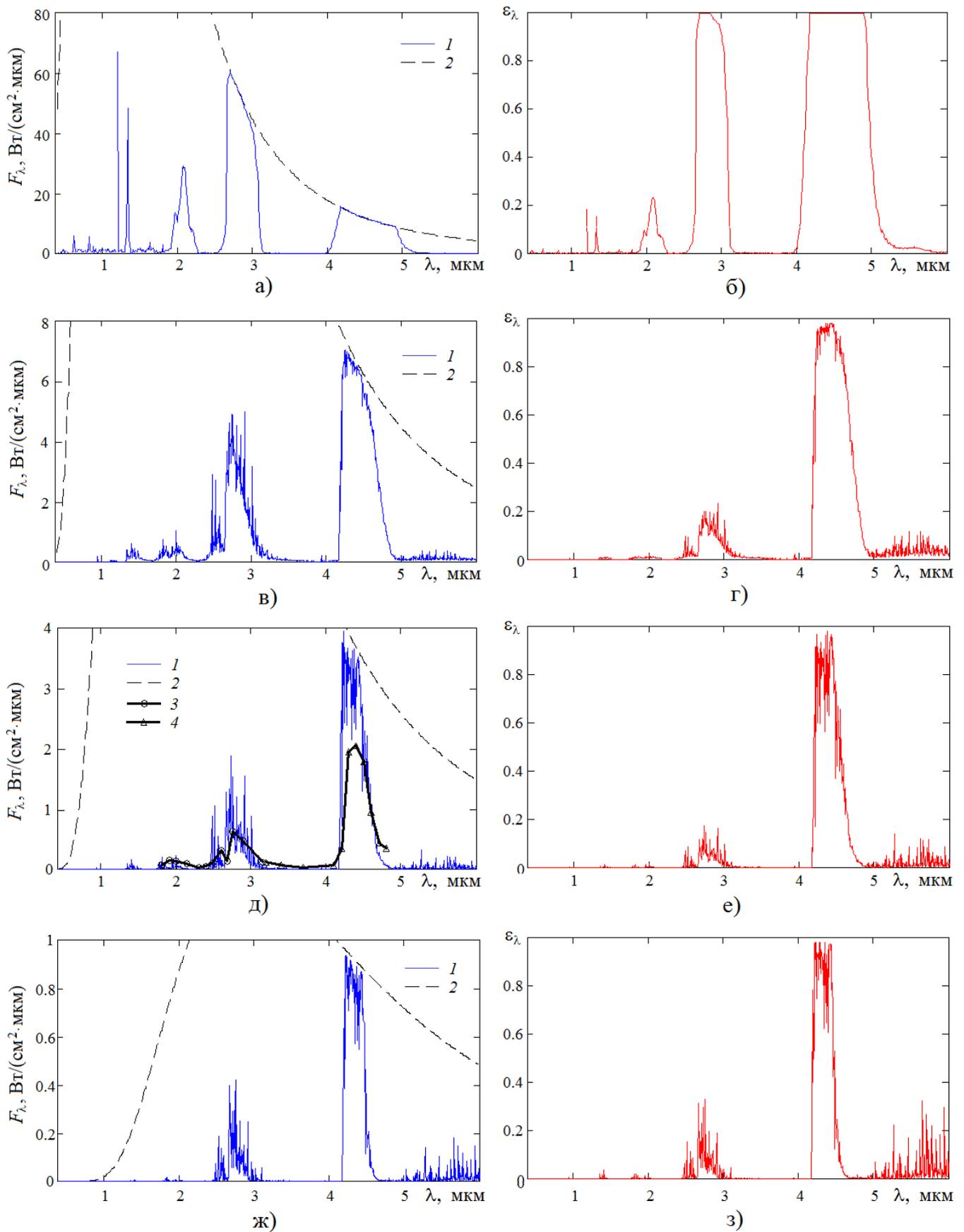


Рисунок 9 – Характеристики излучения (F_λ и ϵ_λ) ПС ЖРД: а), б) камера сгорания; в), г) сопло; д), е) НУФ; ж), з) ОУФ. 1 – расчет; 2 – функция Планка при $T = 3200$ К (а), 2200 К (в), 1660 К (д), 1000 К (ж); 3, 4 – измерения в коротковолновом и длинноволновом участках спектра соответственно [Klein L., Penzias G.J.]

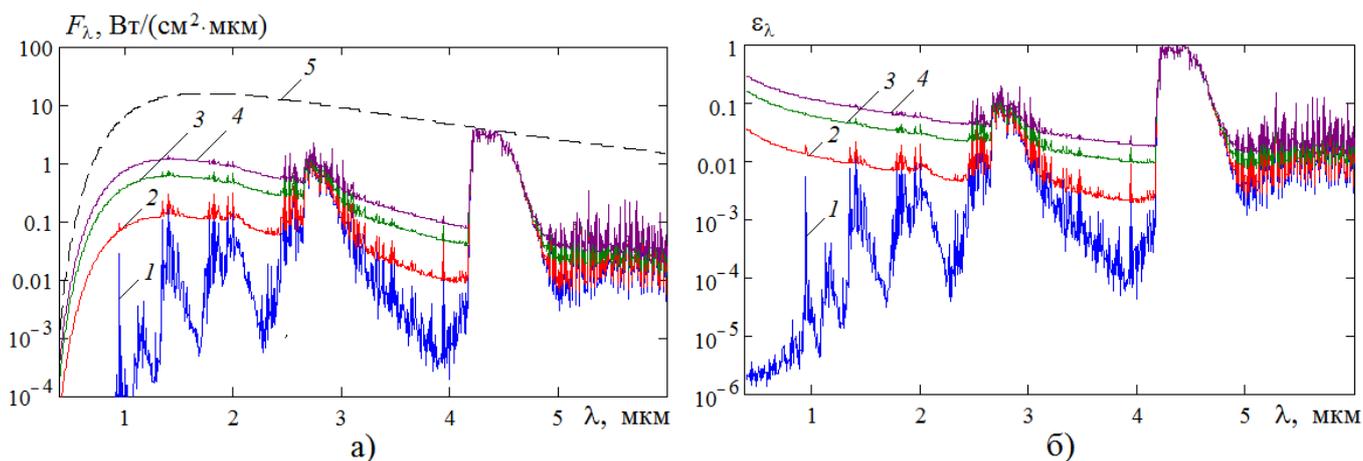


Рисунок 10 – Влияние наличия частиц сажи на характеристики излучения (F_λ и ϵ_λ) ПС для НУФ ЖРД: 1 – $z = 0$; 2 – $z = 0,001$; 3 – $z = 0,005$; 4 – $z = 0,01$; 5 – функция Планка при $T = 1660$ К

Рассмотрено влияние скоростной и температурной неравновесностей на характеристики излучения факела модельного РДТТ при разном критическом сечении сопла $d_{кр}$ (6,35 и 30,5 мм) и $f(r)$ со средним радиусом r_{43} (2,5 и 4,06 мкм) (рис. 12). Скоростная неравновесность слабо сказывается в полосах излучения ГФ и сильнее проявляется в полосах прозрачности ГФ. Отношения потоков при наличии скоростного запаздывания и при равновесном течении (F_λ^*/F_λ) в окнах прозрачности ГФ получаются примерно равны отношению скорости газа к скорости частиц в потоке (v_r/v_{ch}).

Отношение F_λ^*/F_λ при наличии температурной неравновесности изменяется в широких пределах, достигает максимума в коротковолновой области спектра и увеличивается с ростом температуры и размеров частиц. В полосах излучения ГФ 1,9; 2,7; 4,3 мкм при возрастании температуры частиц $F_\lambda^*/F_\lambda < 10$. Определяющей при расчетах характеристик излучения является температурная неравновесность, на фоне которой сильнее проявляется скоростное запаздывание частиц. Максимальное отношение результатов расчета при совместном учете скоростной и температурной неравновесностей к результатам расчета равновесного течения составило до 20,7 раз для F и до 3,37 раз для ϵ (при $d_{кр} = 6,35$ мм).

Основным из способов разогрева и снижения вязкости труднодобываемых сортов нефти является использование газогенераторов, работающих на твердом топливе. Для увеличения теплоотдачи от продуктов горения в зону горения вводят небольшое количество воды, которая в основных полосах излучения $\lambda = 1,9$ и 2,7 мкм при температурах продуктов горения (1000 – 1500) К усиливает излучение.

Методом математического моделирования исследовалось влияние концентрации охладителя ($C_{охл} = 0, 10$ и 25 %) на температуру, спектральные и интегральные характеристики излучения ПС газогенератора на твердом топливе. Расчеты проводились для различного $C_{охл}$ при давлениях на срезе сопла $p = 0,1$ МПа и в камере $p = 7$ МПа (рис. 13). С увеличением доли охладителя температура ПС уменьшается на (15 – 16) % и возрастает концентрация излучающих компонентов H_2O и CO_2 .

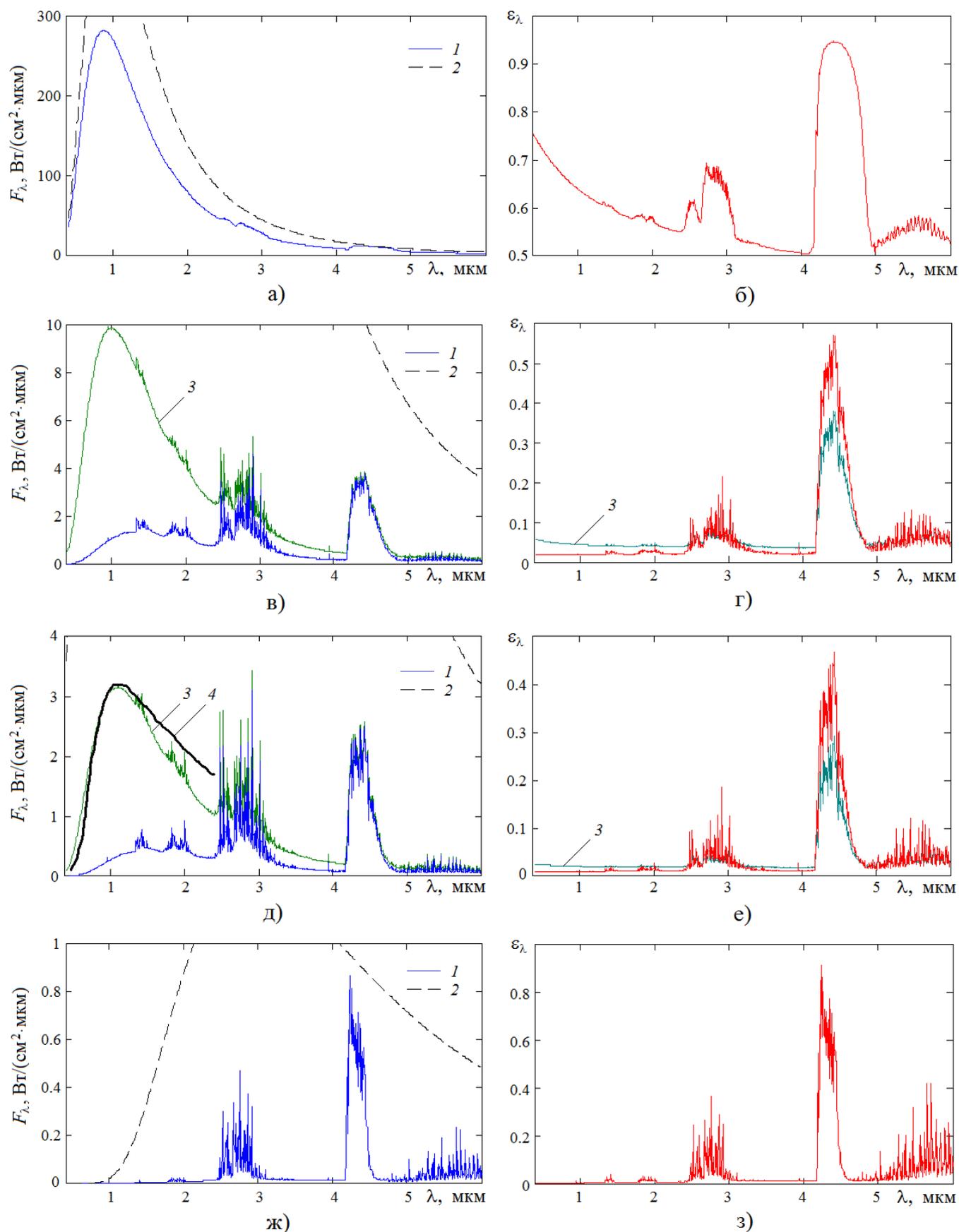


Рисунок 11 – Характеристики излучения (F_λ и ϵ_λ) ПС РДТТ: а), б) камера сгорания; в), г) сопло; д), е) НУФ; ж), з) ОУФ. 1 – расчет при равновесном течении газа и частиц; 2 – функция Планка при $T = 3200$ К (а), 2800 К (в), 2600 К (д), 1000 К (ж); 3 – расчет при учете температурной неравновесности; 4 – эксперимент [Кузьмин В.А.]

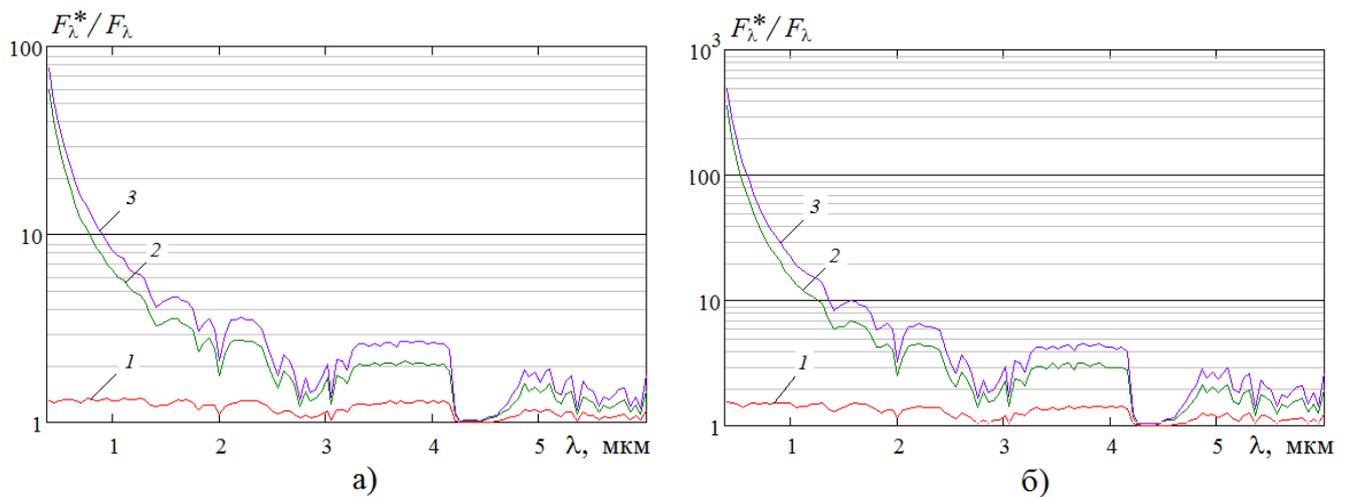


Рисунок 12 – Влияние неравновесностей на спектральную плотность потока при $d_{кр} = 30,5$ мм: а) $r_{43} = 2,5$ мкм; б) $r_{43} = 4,06$ мкм. 1 – отношение F_{λ}^* при наличии скоростной неравновесности к F_{λ} при равновесном течении; 2 – отношение F_{λ}^* при наличии температурной неравновесности к F_{λ} при равновесном течении; 3 – отношение F_{λ}^* при наличии скоростной и температурной неравновесностей к F_{λ} при равновесном течении.

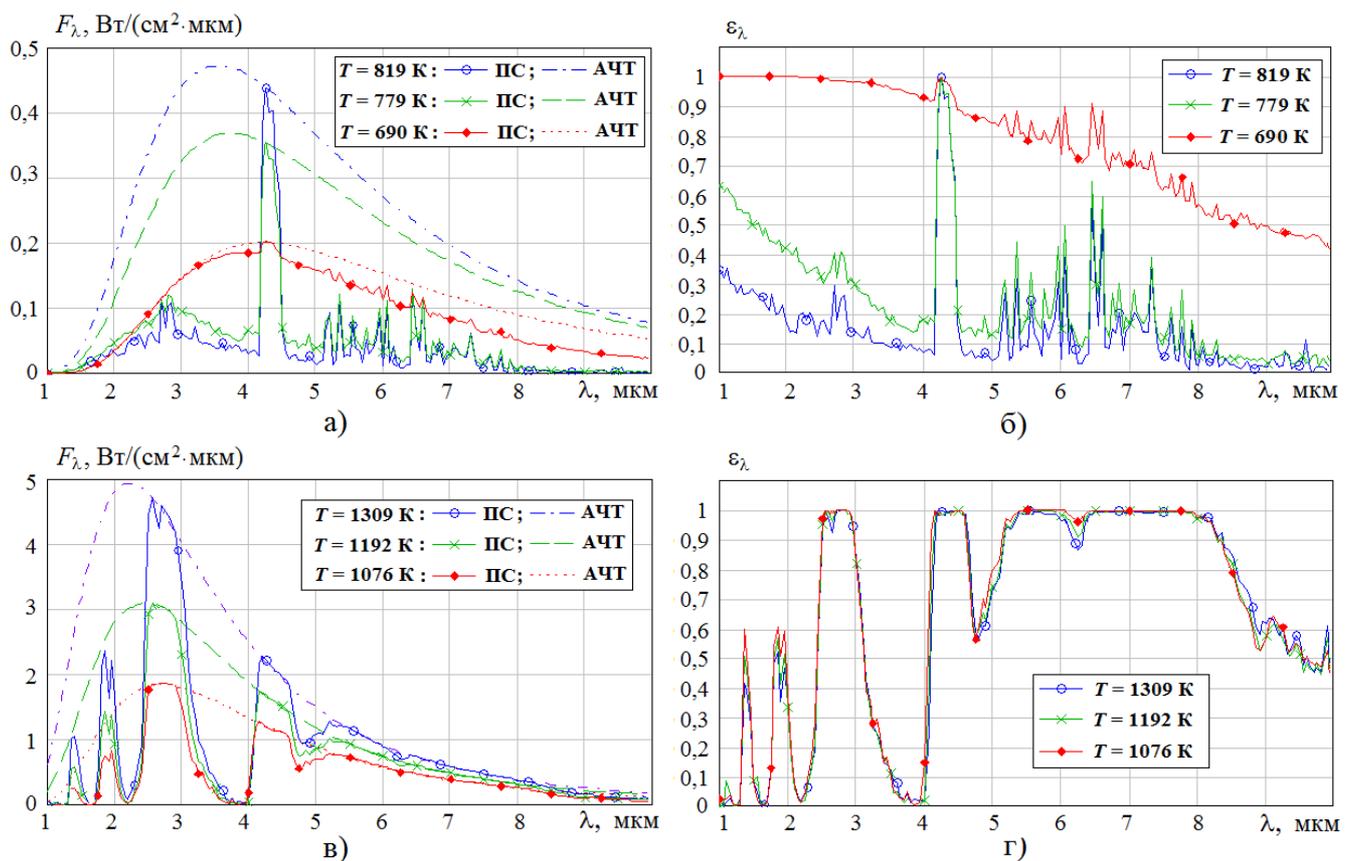


Рисунок 13 – Характеристики излучения (F_{λ} и ϵ_{λ}) ПС газогенератора: а), б) $p = 0,1$ МПа; в), г) $p = 7$ МПа

Введение охлаждающих добавок при наличии в ПС только ГФ ($p = 7$ МПа) сильнее сказывается на F_{λ} и F , чем на ϵ_{λ} и ϵ . Увеличение содержания сажи ($p = 0,1$ МПа) вызывает рост спектральных и интегральных характеристик излучения даже при введении добавок, снижающих температуру ПС.

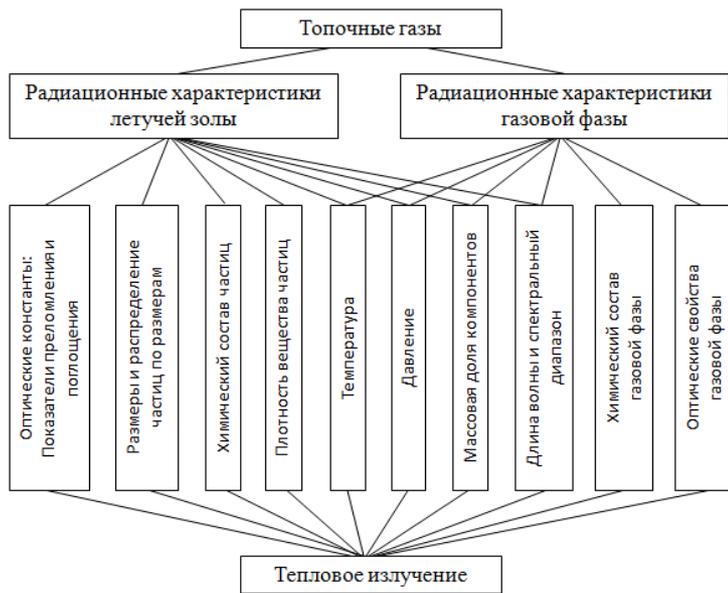


Рисунок 14 – Факторы, определяющие тепловое излучение топочных газов

Характеристик излучения ГФ (рис. 15, кривая 1), КФ (рис. 15, кривая 2) и топочных газов (ГФ + КФ) (рис. 16) при сжигании Пищальского торфа Кировской области (табл. 1), $T = 1273$ К. С учетом массовой доли КФ $z = 0,009$, массовые доли компонентов ГФ составили: $H_2O = 0,117$, $CO_2 = 0,164$, $SO_2 = 0,0007$, $N_2 = 0,668$, $O_2 = 0,04$.

С помощью разработанного МПК «Spektр» исследовались характеристики излучения топочных газов в паровом котле БКЗ-210-140Ф при факельном сжигании торфа и угля. Топочные газы представляют собой систему, состоящую из ГФ и частиц КФ (летучей золы), тепловое излучение которой зависит от многих факторов (рис. 14). Расчеты выполнены для случая сжигания торфа 4-х месторождений Кировской области при давлении $p = 10^5$ Па, температурах $T = (1273 - 1773)$ К, эффективной толщине излучающего слоя $L = 5,35$ м. В качестве примера приведены результаты расчета характеристик

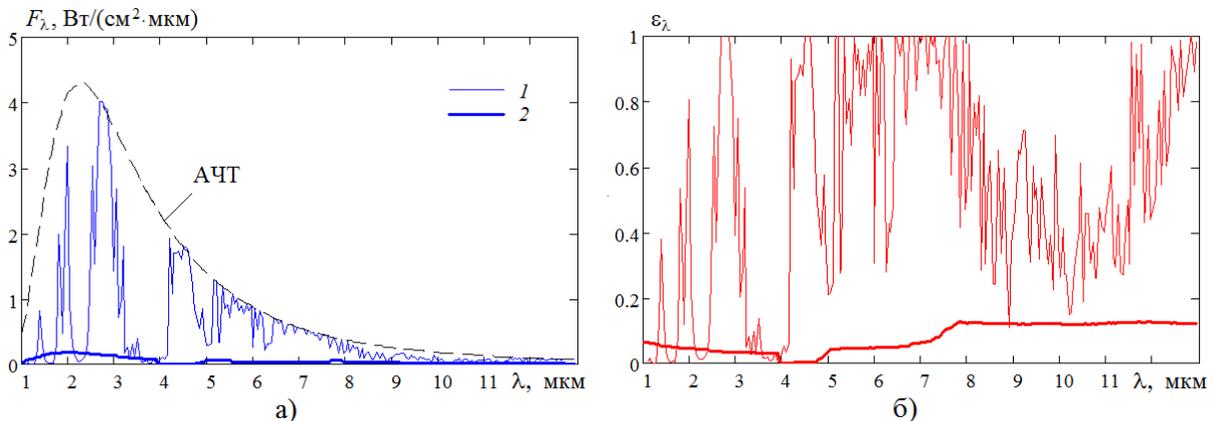


Рисунок 15 – Характеристики излучения (F_λ и ϵ_λ) ГФ и КФ при сжигании торфа: 1 – расчет для ГФ, $F_\Gamma = 5,992$ Вт/см², $\epsilon_\Gamma = 0,4140$; 2 – расчет для КФ, $F_\kappa = 0,6198$ Вт/см², $\epsilon_\kappa = 0,0428$

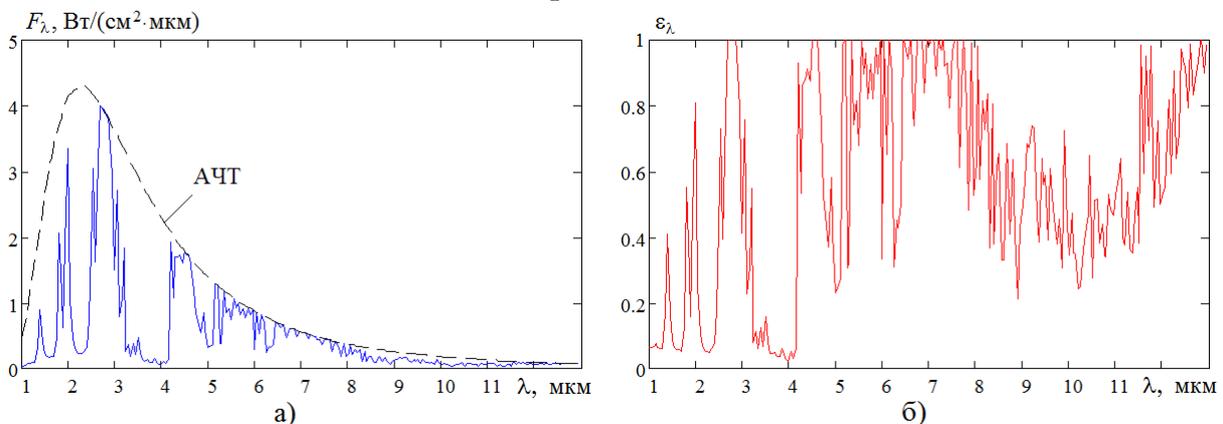


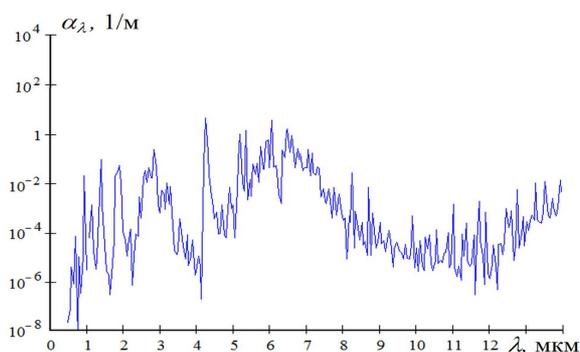
Рисунок 16 – Характеристики излучения (F_λ и ϵ_λ) топочных газов при сжигании торфа. $F = 6,321$ Вт/см², $\epsilon = 0,4367$

Расчетные значения F_λ и ε_λ показывают роль каждого компонента ГФ и КФ, а интегральные значения дают возможность оценить радиационную теплонапряженность топочной камеры. Селективный спектр излучения позволяет выделить те спектральные участки, интервалы или полосы, которые пригодны для измерения температуры ГФ и измерения температуры частиц КФ. Это открывает огромную перспективу использования большого числа выпускаемых оптических приборов (пирометров, тепловизоров) для оценки уровня температуры и температурных полей (термограмм) в энергетических установках.

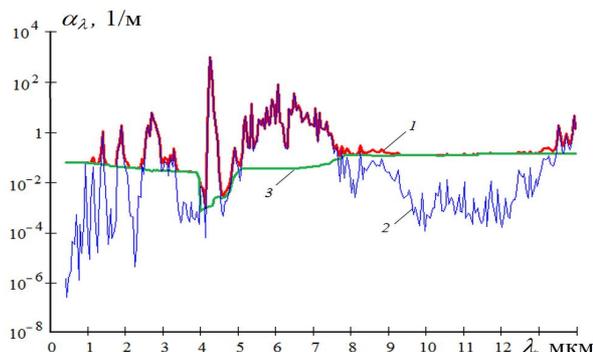
Проведена оценка влияния выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере через расчет коэффициентов поглощения α_λ и функций поглощения $A_\lambda = 1 - \exp(-\alpha_\lambda \cdot L)$ ПС при факельном сжигании твердых топлив (торфа и кузнецкого угля ДР) (табл. 4) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. Выполнены расчеты α_λ при $T = 300$ К, $p = 10^5$ Па и $\lambda = (0,4 - 14)$ мкм, а также функций поглощения при толщинах слоя $L = 5$ и 10 м (рис. 17 и 18).

Таблица 4 – Характеристики торфа и угля

Наименование показателя	Торф	Уголь
Содержание влаги W^p , %	51,8	12
Зольность A^p , %	6,3	15
Содержание серы S^p , %	0,3	0,4
Содержание углерода C^p , %	24,3	57,1
Содержание водорода H^p , %	2,6	4,1
Содержание азота N^p , %	1,4	1,8
Содержание кислорода O^p , %	13,3	9,6
Низшая теплота сгорания Q^p , ккал/кг (кДж/кг)	1933 (8093)	3673 (15378)
Выход летучих V^{dat} , %	50	42

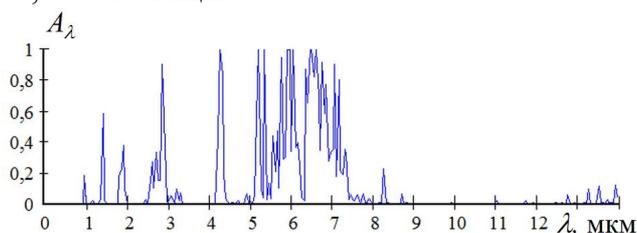


а)

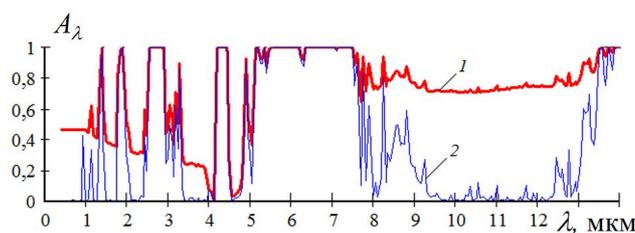


б)

Рисунок 17 – Коэффициент поглощения: а) атмосфера; б) ПС торфа. 1 – газ + частицы; 2 – газ; 3 – частицы



а)



б)

Рисунок 18 – Функция поглощения при $L = 10$ м: а) атмосфера; б) ПС торфа. 1 – газ + частицы; 2 – газ

Наличие частиц золы вносит существенный вклад в поглощение солнечного излучения продуктами сгорания в окнах прозрачности ГФ. При отсутствии системы очистки дымовых газов для оптического диапазона (0,4 – 0,78) мкм поглощение может составлять до 46 % при сжигании торфа и до 20 % при сжигании угля. В широком окне прозрачности атмосферы (7,5 – 14) мкм A_λ ПС принимает значения от 64 до 100 % при сжигании торфа и от 73 до 100 % при сжигании угля. Наибольшая оптическая толщина по α_λ ГФ приходится на компоненты H_2O и CO_2 , которые вносят основной вклад в создание парникового эффекта.

Шестая глава посвящена разработанной методике пирометрирования рабочих сред при факельном сжигании твердых топлив в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. Приводится описание программы «Tempreg» и разработанного программно-аппаратного комплекса по определению температуры топочных газов. Представлены характеристики излучения рабочих сред с учетом температурной неравномерности газа и частиц, а также степени выгорания топлива по высоте топки.

В таблице 4 приведены характеристики торфа Кировской области и кузнецкого угля ДР. Расход твердого топлива в котле БКЗ-210-140Ф составил 40,4 т/час при сжигании торфа с «подсветкой» природным газом (5000 м³/ч) и 33,16 т/час при сжигании угля. Для торфа с учетом золы $z = 0,011$ в ПС, массовые доли газовых компонентов составили: $H_2O = 0,102$, $CO_2 = 0,177$, $SO_2 = 0,001$, $N_2 = 0,669$, $O_2 = 0,04$. Для угля с учетом золы $z = 0,015$ в ПС, массовые доли газовых компонентов составили: $H_2O = 0,055$, $CO_2 = 0,207$, $SO_2 = 0,0007$, $N_2 = 0,688$, $O_2 = 0,035$.

Разработана методика измерения температуры рабочих сред в топке парового котла БКЗ-210-140Ф пирометрическим методом. На основании анализа спектров излучения ПС для исследования излучательной способности и температуры по высоте топки котла БКЗ-210-140Ф были выбраны следующие пирометры: Кельвин 2300 ПЛЦ, Raynger R3I 2MSC, Optris CTlaser F2H и Optris CTlaser F6H. Пирометры Кельвин ((1 – 1,6) мкм) и Raynger (1,6 мкм) использовались для определения температуры частиц золы и кокса в окне прозрачности ГФ. Для определения температуры топочных газов применялись пирометры Optris CTlaser F2H и F6H с программным и аппаратным обеспечением по обработке экспериментальных результатов. Основным пирометром являлся Optris CTlaser F2H, воспринимающий излучение в полосе излучения CO_2 (4,24 мкм). Дополнительно использовался пирометр Optris CTlaser F6H с рабочей длиной волны 4,64 мкм на краю полосы CO_2 . Измерения проводились с помощью всех указанных пирометров через смотровые лючки на разных высотах котла БКЗ-210-140Ф (рис. 19). Линии визирования приборов располагались перпендикулярно потокам, выходящим из горелок (все 3 горелки на одной высоте), причем факел попадал в поле зрения каждого прибора при $H = 9$ м (уровень горелок), 14 м (центральная часть факела) и 16 м (хвостовая

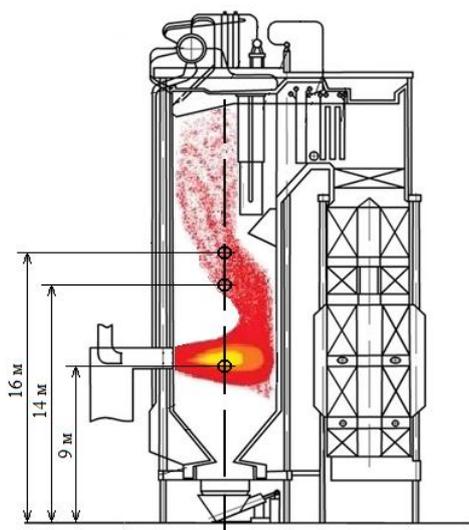


Рисунок 19 – Схема котла БКЗ-210-140Ф с размещением смотровых лючков

часть факела) и 16 м (хвостовая

часть факела). Измерения выполнялись последовательно всеми пирометрами на каждой высоте при одном режиме работы котельного агрегата. Снятие показаний пирометрами Кельвин и Raynger при выбранных H и ε_λ происходило в ручном режиме с фиксацией средней температуры по линии визирования. Регистрация температуры пирометрами Optris при заданных H и ε_λ проводилась в течение времени $t = (6 - 10)$ с. При этом на компьютер записывались массивы данных, содержащие от $6 \cdot 10^3$ до 10^4 элементов при шаге $\Delta t = 1$ мс. Инструментальная погрешность пирометров составляла $\pm 1\%$. В каждом опыте определялось среднее значение температуры \bar{T} , а также среднеквадратичное (стандартное) отклонение σ . Статистическая обработка значений измеренных температур при сжигании торфа показала, что среднеквадратичные отклонения σ составили значения от 30 до 75 К для пирометра Optris CTlaser F2H и от 10 до 34 К – для CTlaser F6H. При сжигании угля $\sigma = (25 - 72)$ К для пирометра Optris CTlaser F2H и $\sigma = (20 - 36)$ К для Optris CTlaser F6H. На рисунке 20 представлен пример серии экспериментальных данных по измерению температуры пирометром Optris CTlaser F2H при сжигании торфа. Определены зависимости средних температур \bar{T} , регистрируемых пирометрами, от установленных на них ε_λ в интервале 0,1 – 1 для торфа и 0,5 – 1 для угля с шагом $\Delta\varepsilon_\lambda = 0,1$.

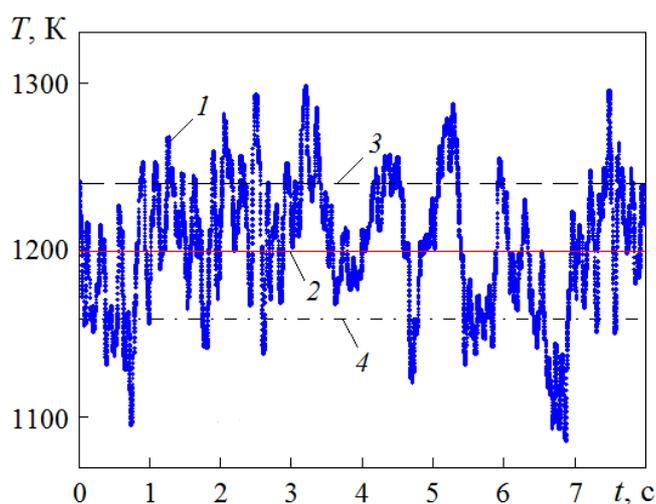


Рисунок 20 – Результаты измерения температуры пирометром Optris CTlaser F2H при $H = 9$ м и $\varepsilon = 0,9$ (сжигание торфа): 1 – экспериментальные данные; 2 – \bar{T} ; 3 – $\bar{T} + \sigma$; 4 – $\bar{T} - \sigma$

экспериментальных данных при заданных λ и H . Величина B определялась по формуле:

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \bar{T}_i}\right) - 1} \quad (13)$$

Процесс пирометрического определения температуры не возмущает и не влияет на поток, идущий от объекта исследования. Поэтому, излучение от топочных газов остается постоянным и определяется из соотношения:

$$F_\lambda = \varepsilon_\lambda \cdot F_{\lambda\text{АЧТ}} = \text{const.} \quad (14)$$

Полученные экспериментальные результаты для пирометров на указанных высотах представлены на рисунках 21 и 22.

Экспериментальные точки для \bar{T} от задаваемой ε_λ аппроксимировались для получения аналитических зависимостей $T_{\text{экс}} = f(\varepsilon_\lambda)$:

$$T_{\text{экс}} = \frac{C_2}{\lambda \ln\left(\frac{\varepsilon_\lambda}{B} + 1\right)}, \quad (12)$$

где $C_2 = 14388$ мкм·К – вторая постоянная формулы Планка; $\lambda = 1,6; 4,24$ и $4,64$ мкм для пирометров Raynger, Optris CTlaser F2H и Optris CTlaser F6H соответственно; B – коэффициент, определяемый в зависимости от серии экспериментальных данных при заданных λ и H .

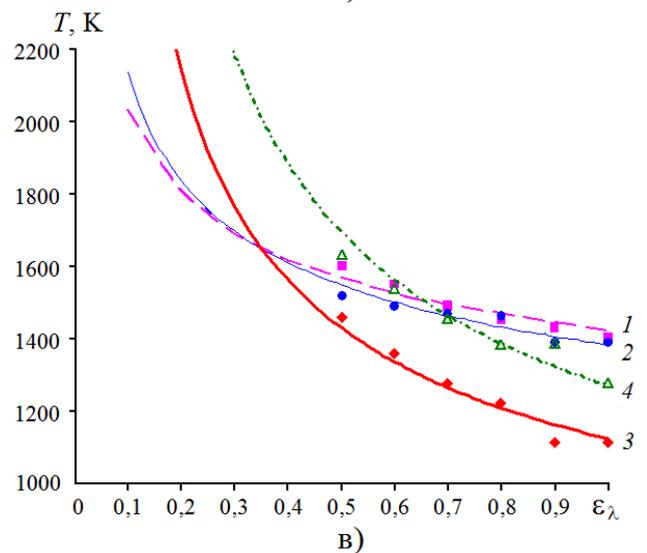
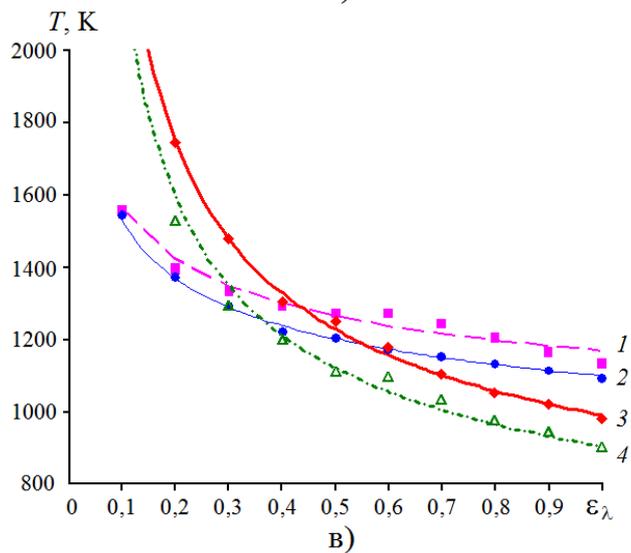
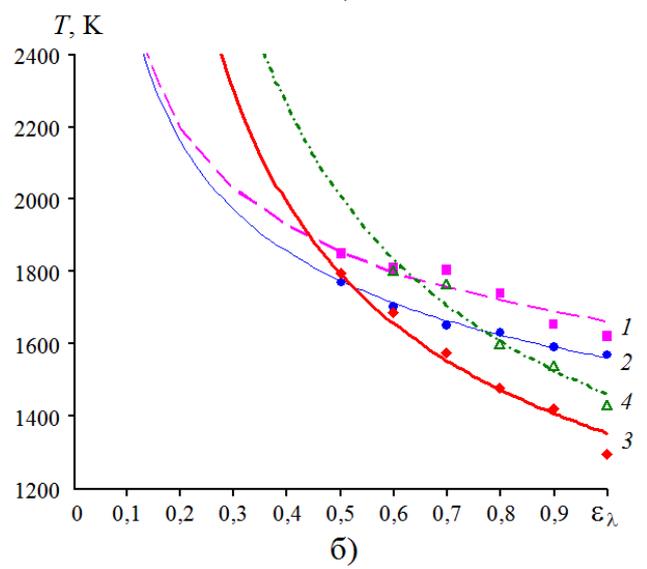
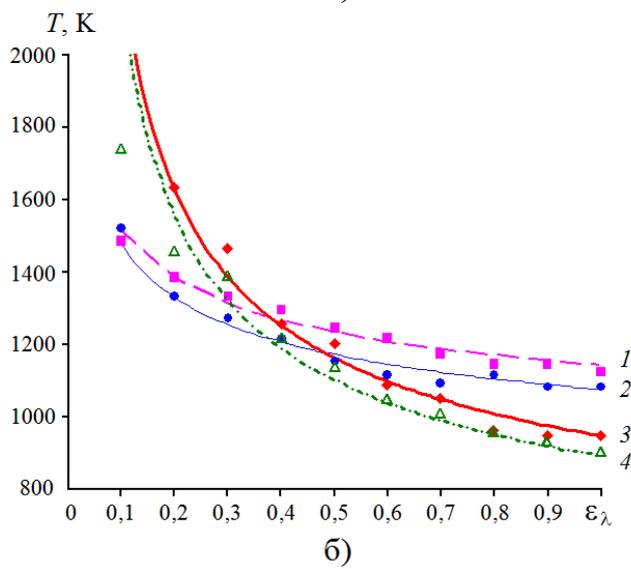
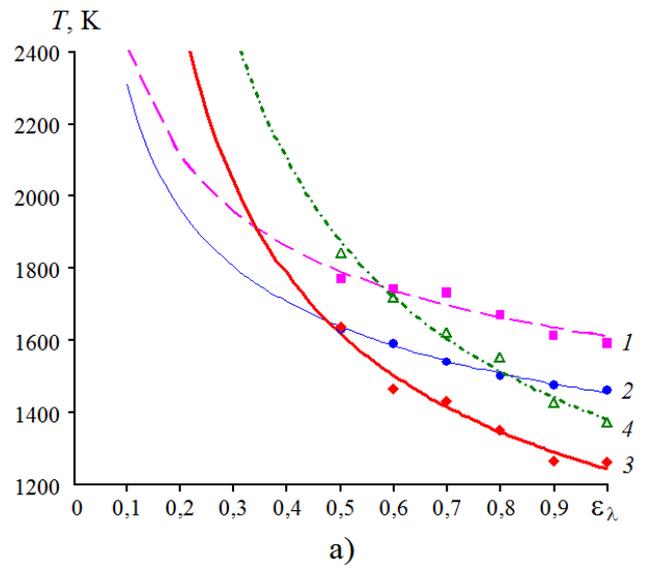
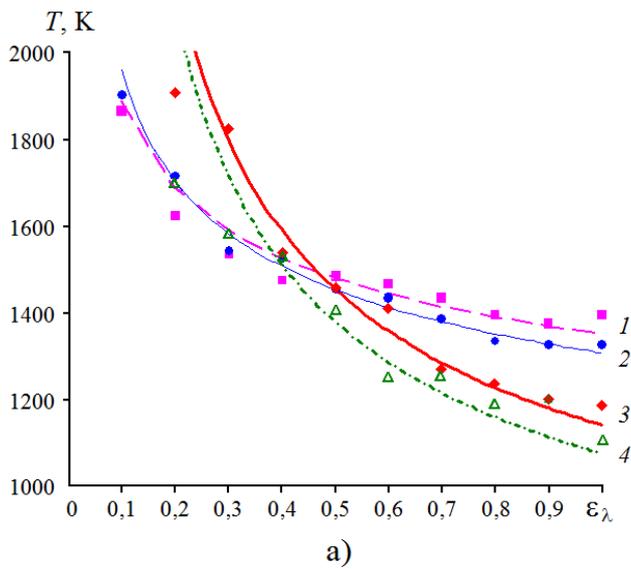


Рисунок 21 – Зависимости измеренной температуры от задаваемой ϵ_λ на пирометрах при сжигании торфа: а) $H = 9$ м; б) $H = 14$ м; в) $H = 16$ м. 1 – Кельвин 2300 ПЛЦ, 2 – Raynger R3I 2MSC, 3 – Optris CTlaser F2H, 4 – Optris CTlaser F6H

Рисунок 22 – Зависимости измеренной температуры от задаваемой ϵ_λ на пирометрах при сжигании угля: а) $H = 9$ м; б) $H = 14$ м; в) $H = 16$ м. 1 – Кельвин 2300 ПЛЦ, 2 – Raynger R3I 2MSC, 3 – Optris CTlaser F2H, 4 – Optris CTlaser F6H

Это отражают горизонтальные линии на рисунке 23, которые показывают средние плотности потоков $F_{\lambda_1}^*$ и $F_{\lambda_2}^*$ при заданных длинах волн. По графикам через пересечение функции Планка и горизонтальной прямой можно определить яркостную температуру T_y при заданной λ .

Истинная температура $T_{ГФ}$ и частиц КФ может быть определена по формуле:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_y} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[\varepsilon_\lambda + (1 - \varepsilon_\lambda) \cdot \exp \left(\frac{-C_2}{\lambda T_y} \right) \right]. \quad (15)$$

Аналитическое описание экспериментальных зависимостей $T_{\text{эксп}} = f(\varepsilon_\lambda)$ (рис. 21 и 22) подчиняется законам теплового излучения и корректно описывается известными формулами (12) и (15) при измерении температуры яркостными пирометрами. Однако, для однозначного определения температуры, помимо температуры T_y , необходимо знать ε_λ топочных газов на измеряемом участке факела при сжигании конкретного топлива. Расчеты ε_λ проводились по разработанной методологии с использованием МПК «Spektr» в спектральном интервале (4,24 – 4,64) мкм, охватывающем рабочие длины волн пирометров Optris CTlaser F2H (4,24 мкм) и Optris CTlaser F6H (4,64 мкм).

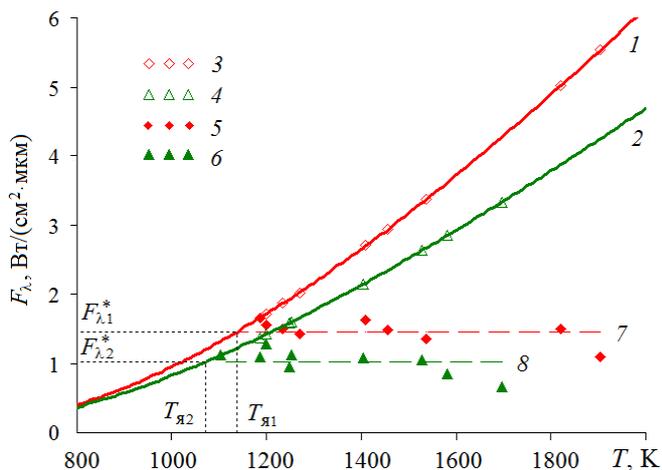


Рисунок 23 – F_λ при сжигании торфа, $H = 9$ м.

- 1 – функция Планка при $\lambda_1 = 4,24$ мкм,
- 2 – функция Планка при $\lambda_2 = 4,64$ мкм.
- 3 – $F_{\lambda_1 \text{АЧТ}}$ для температуры, измеренной пирометром Optris CTlaser F2H при заданной ε_λ ,
- 4 – $F_{\lambda_2 \text{АЧТ}}$ для температуры, измеренной пирометром Optris CTlaser F6H при заданной ε_λ ,
- 5 – F_{λ_1} топочных газов, 6 – F_{λ_2} топочных газов,
- 7 – $F_{\lambda_1}^*$, 8 – $F_{\lambda_2}^*$

которая определяется конкретным значением ε_λ . С увеличением $T_{\text{теор}}$ излучательная способность растет и, наоборот, с ее уменьшением падает (особенность данной спектральной полосы).

Неизменно высокие значения спектральной излучательной способности ($\varepsilon_\lambda > 0,8$) характерны для центра полосы излучения CO_2 (вблизи $\lambda = 4,24$ мкм). При повышении температуры также увеличивается ширина полосы в область бóльших длин волн, поэтому ε_λ резко возрастает при $\lambda = 4,64$ мкм и достигает единицы при $T > 1273$ К. На основании табличных данных получены расчетные зависимости $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$ для длин волн 4,24 и 4,64 мкм при сжигании торфа и угля. На основании экспериментальных данных (рис. 21 и 22, кривые 3 и 4) получены зависимости $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$, которые представляют собой обратные экспериментальные функции $T_{\text{эксп}} = f(\varepsilon_\lambda)$ при сжигании торфа и угля. Пересечение экспериментальной $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$ и расчетной $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$ функций для разных высот топки котла позволили определить действительные значения ε_λ и температуры T топочных газов (рис. 24, табл. 5).

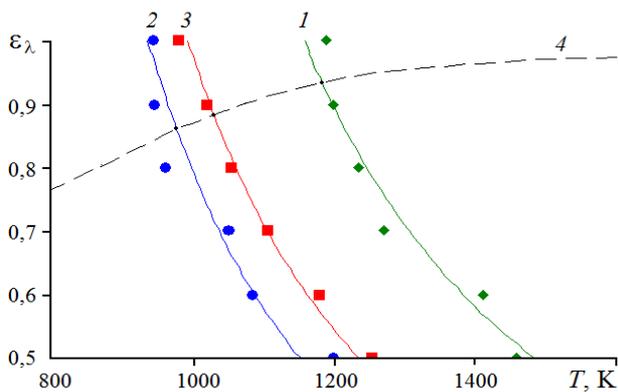


Рисунок 24 – Зависимости ε_λ от температуры при сжигании торфа, $\lambda = 4,24$ мкм: 1 – функция $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$ при $H = 9$ м, 2 – функция $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$ при $H = 14$ м, 3 – функция $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$ при $H = 16$ м, 4 – расчетная функция $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$

Разработана и составлена программа «Tempreg» на языке Python, использующая пирометр Optris CTlaser F2H для полосы излучения CO_2 , которая позволяет определять температуру и излучательную способность топочных газов при факельном сжигании заданного вида твердого топлива (торфа и угля) (рис. 25).

Создан программно-аппаратный комплекс по определению температуры топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива.

Таблица 5 – Спектральная излучательная способность и температура топочных газов при сжигании торфа и угля на разных высотах H топки котла

$H, \text{ м}$	Торф				Уголь			
	$\lambda_1 = 4,24$ мкм		$\lambda_2 = 4,64$ мкм		$\lambda_1 = 4,24$ мкм		$\lambda_2 = 4,64$ мкм	
	$\varepsilon_{\lambda 1}$	$T_{\text{г}}, \text{ К}$	$\varepsilon_{\lambda 2}$	$T_{\text{г}}, \text{ К}$	$\varepsilon_{\lambda 1}$	$T_{\text{г}}, \text{ К}$	$\varepsilon_{\lambda 2}$	$T_{\text{г}}, \text{ К}$
9	0,934	1182	0,871	1154	0,949	1268	0,999	1382
14	0,860	978	0,633	1034	0,960	1376	1	1461
16	0,883	1031	0,650	1042	0,925	1154	1	1273

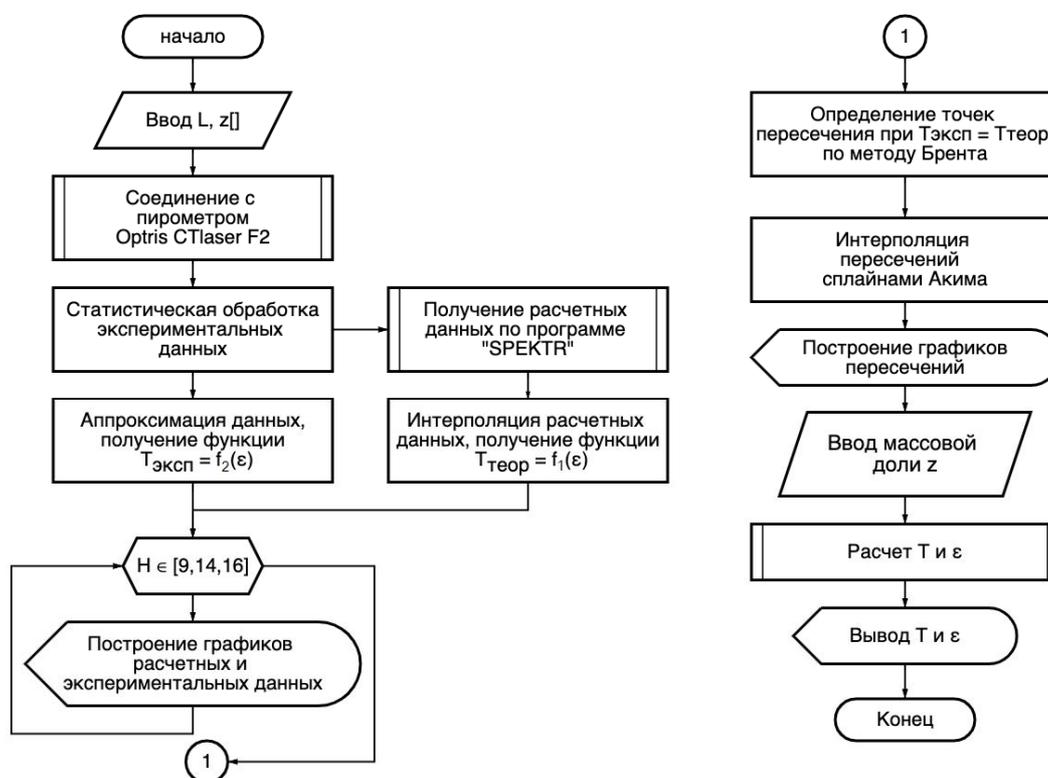


Рисунок 25 – Блок-схема решения задачи определения температуры и излучательной способности топочных газов

Комплекс включает в себя: 1) аппаратную часть, состоящую из пирометра Optris CTlaser F2H, воспринимающего излучение в полосе CO₂ (4,24 мкм); 2) программную часть, состоящую из ПО «Compact Connect» и программы «Temper», которые позволяют производить дистанционное управление значениями излучательной способности, записывать результаты измерений температуры на ПК, проводить статистическую обработку данных за все время пирометрических измерений; 3) соединительные элементы (кабели, USB-интерфейсы) и крепежные приспособления. Разработанный комплекс является универсальным и позволяет определять температуру для конкретного типа энергетического котла во всех возможных режимах его работы при сжигании различных топлив (торфа и угля). Использование комплекса позволяет контролировать температурный режим сжигания топлива для предотвращения процесса шлаковывания топки и минимизации выбросов оксидов азота.

Для определения температуры КФ проведены расчеты по разработанной методологии с использованием МПК «Spektr» в области прозрачности ГФ при $\lambda = 1,6$ мкм и в спектральном интервале (1 – 1,6) мкм, которые охватывают рабочие длины волн пирометров Raynger и Кельвин соответственно. В таблице 6 указаны исходные данные для расчета характеристик излучения при сжигании торфа и кузнецкого угля с учетом степени выгорания топлива по высоте топки. В полосе прозрачности ГФ при $\lambda_3 = 1,6$ мкм ϵ_λ остается постоянной из-за независимости оптических констант КФ от температуры. Интегральная величина ϵ в интервале $\lambda_4 = (1 - 1,6)$ мкм с повышением температуры в диапазоне $\Delta T_{\text{теор}} = (1173 - 1673)$ К для торфа и (1373 – 1773) К для угля уменьшается до 2,4 % для торфа и до 0,4 % для угля, что обусловлено влиянием полос излучения ГФ. Неизменно высокие значения спектральной ($\epsilon_\lambda \geq 0,69$) и интегральной излучательной способности ($\epsilon \geq 0,695$) характерны для КФ при сжигании угля. Это обусловлено меньшей по сравнению с торфом дисперсностью частиц кокса и золы и, соответственно, большей числовой концентрацией частиц. Например, при $H = 9$ м массовая концентрация частиц угольного кокса только на 7 % превосходит аналогичную величину для торфяного кокса.

Таблица 6 – Исходные данные для расчета ϵ_λ и ϵ при сжигании торфа (угля)

Параметр	Высота			
	$H = 9$ м	$H = 14$ м	$H = 16$ м	
Температура ГФ T_r , К	1182 (1268)	978 (1376)	1031 (1154)	
Степень выгорания топлива β^{CT}	0,9	0,96	0,98	1
Массовая доля золы z_3	0,00949 (0,01346)	0,01012 (0,01436)	0,01033 (0,0147)	0,011 (0,015)
Массовая доля кокса z_k	0,00512 (0,00572)	0,00205 (0,00229)	0,00102 (0,00114)	–
Массовая концентрация золы C_m , г/м ³	2,805 (3,82)	3,616 (3,75)	3,502 (4,58)	3,573 (4,67)
Числовая концентрация золы N , 1/см ³	49,56 (3,85·10 ³)	63,89 (3,78·10 ³)	61,87 (4,62·10 ³)	63,13 (4,71·10 ³)
Массовая концентрация кокса C_m , г/м ³	1,513 (1,62)	0,731 (0,598)	0,347 (0,358)	–
Числовая концентрация кокса N , 1/см ³	150,1 (6,65·10 ³)	72,58 (2,46·10 ³)	34,42 (1,47·10 ³)	–

Средний объем коксовых частиц угля $\langle V \rangle = 330 \text{ мкм}^3$, для торфа – $2,83 \cdot 10^4 \text{ мкм}^3$. В результате число коксовых частиц в единице объема отличается в 44 раза ($6,65 \cdot 10^3 \text{ 1/см}^3$ для угля и $150,1 \text{ 1/см}^3$ для торфа).

На рисунке 26 представлены графики полученных экспериментальных и расчетных функций при сжигании торфа для разных высот топки котла. Результаты по определению излучательной способности и температуры КФ с помощью пирометров Raunger и Кельвин приведены в таблице 7. С учетом содержащихся в КФ частиц кокса и золы торфа, разница показаний между пирометрами Raunger и Кельвин составила 18, 37 и 9 К для высот $H = 9, 14, 16 \text{ м}$ соответственно.

Учет наличия в КФ только частиц золы ($\beta^{\text{cr}} = 1$ при $H = 16 \text{ м}$) приводит к разнице температур в 70 К. В случае сжигания кузнецкого угля с учетом содержащихся в КФ частиц кокса и золы разница показаний между пирометрами Raunger и Кельвин составила 153, 95 и 33 К для высот $H = 9, 14, 16 \text{ м}$ соответственно. Учет наличия в КФ только частиц золы ($\beta^{\text{cr}} = 1$ при $H = 16 \text{ м}$) приводит к разнице температур в 29 К. У пирометров Raunger и Кельвин показатели визирования отличаются почти в 6 раз и измеряемая температура усредняется по существенно различным областям. С этим связана разница в показаниях приборов для одной и той же высоты H . К тому же Raunger воспринимает спектральную плотность потока F_λ при длине волны 1,6 мкм, а Кельвин – интегральную F , которая включает помимо излучения частиц КФ также воздействие ГФ в полосе (1 – 1,6) мкм. Поэтому, даже в пределах небольшой области пространства разница температур составляет до 153 К.

Таким образом, в работе доказано существование температурной неравновесности в топке парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа и угля. Для определения температурной неравновесности выбраны показания пирометров Optris CTlaser F2H и Raunger, используемые для измерения температуры газа и частиц соответственно (табл. 8).

Проведена оценка неопределенности измерения температуры с учетом случайных и систематических погрешностей (δ_{AB}), а также погрешности аппроксимации экспериментальных зависимостей (δ_{R}). Например, суммарная относительная неопределенность определения температуры δ_{ABR} топочных газов при сжигании торфа находится в пределах (4,6 – 7,9) %, что соответствует $\Delta T_{\text{ABR}} = (47,4 – 93,4) \text{ К}$. Проведена дополнительная оценка погрешности измерения температуры газа и частиц в зависимости от неточности ε_λ , устанавливаемой на пирометрах (рис. 27). Усредненное значение $\varepsilon_\lambda = 0,9$, выбранное для пирометра Optris CTlaser F2H при измерении температуры топочных газов, приводит к максимальной неопределенности измерения $\delta_{\text{ABR}} + \delta = 9,1 \text{ \%}$ (108 К), что соответствует $H = 9 \text{ м}$.

Для известного состава ГФ и КФ в топке парового котла БКЗ-210-140Ф по разработанной методологии и созданному МПК определялись характеристики излучения при сжигании торфа и кузнецкого угля. В расчетной модели учитывалась степень выгорания топлива по высоте топки (табл. 6), температурная неравновесность между ГФ и частицами КФ (табл. 8). На рисунках 28 – 29 приведены F_λ и ε_λ с учетом найденной температурной неравновесности между газом и частицами при сжигании торфа. В таблице 9 представлены расчетные интегральные характеристики излучения с учетом наличия в топке ГФ и КФ (F, ε), а также с учетом только частиц КФ ($F_{\text{ч}}, \varepsilon_{\text{ч}}$).

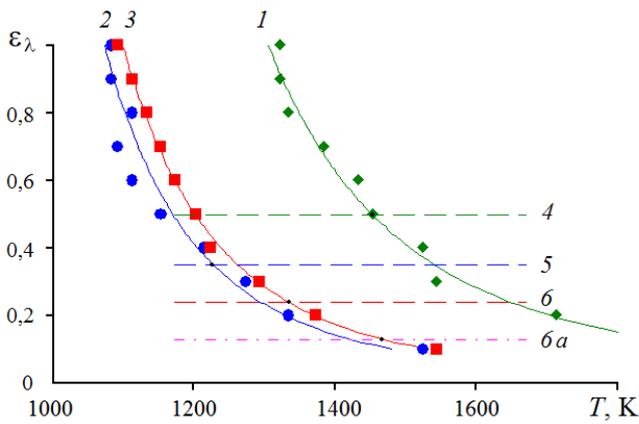


Рисунок 26 – Зависимости ε_λ от температуры при сжигании торфа, $\lambda = 1,6$ мкм: 1, 2, 3 – экспериментальные функции $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{эксп}})$; 4, 5, 6, 6а – расчетные функции $\varepsilon_\lambda = f(T_{\text{теор}})$. $H = 9$ м (1, 4), 14 м (2, 5), 16 м (3, 6, 6а). 6а – расчет для гетерогенных ПС (газ и зола)

Таблица 7 – Спектральная и интегральная излучательная способность и температура КФ при сжигании торфа и угля на разных высотах H топки котла

H , м	Состав КФ	Торф				Уголь			
		$\lambda_3 = 1,6$ мкм		$\lambda_4 = (1 - 1,6)$ мкм		$\lambda_3 = 1,6$ мкм		$\lambda_4 = (1 - 1,6)$ мкм	
		ε_{λ_3}	$T_{\text{ч}}, \text{K}$	ε_4	$T_{\text{ч}}, \text{K}$	ε_{λ_3}	$T_{\text{ч}}, \text{K}$	ε_4	$T_{\text{ч}}, \text{K}$
9	Кокс + зола	0,496	1453	0,510	1471	0,89	1484	0,889	1637
14	Кокс + зола	0,349	1228	0,398	1265	0,767	1637	0,767	1732
16	Кокс + зола	0,238	1334	0,305	1343	0,762	1445	0,766	1478
16	Зола	0,127	1471	0,219	1401	0,690	1469	0,697	1498

Таблица 8 – Значения температур ГФ и частиц КФ и величина температурной неравновесности при сжигании торфа и угля

H , м	Состав КФ	Торф			Уголь		
		$T_{\text{Г}}, \text{K}$	$T_{\text{ч}}, \text{K}$	$\Delta T, \text{K}$	$T_{\text{Г}}, \text{K}$	$T_{\text{ч}}, \text{K}$	$\Delta T, \text{K}$
9	Кокс + зола	1182	1453	271	1268	1484	216
14	Кокс + зола	978	1228	250	1376	1637	261
16	Кокс + зола	1031	1334	303	1154	1445	291
16	Зола	1031	1471	440	1154	1469	315

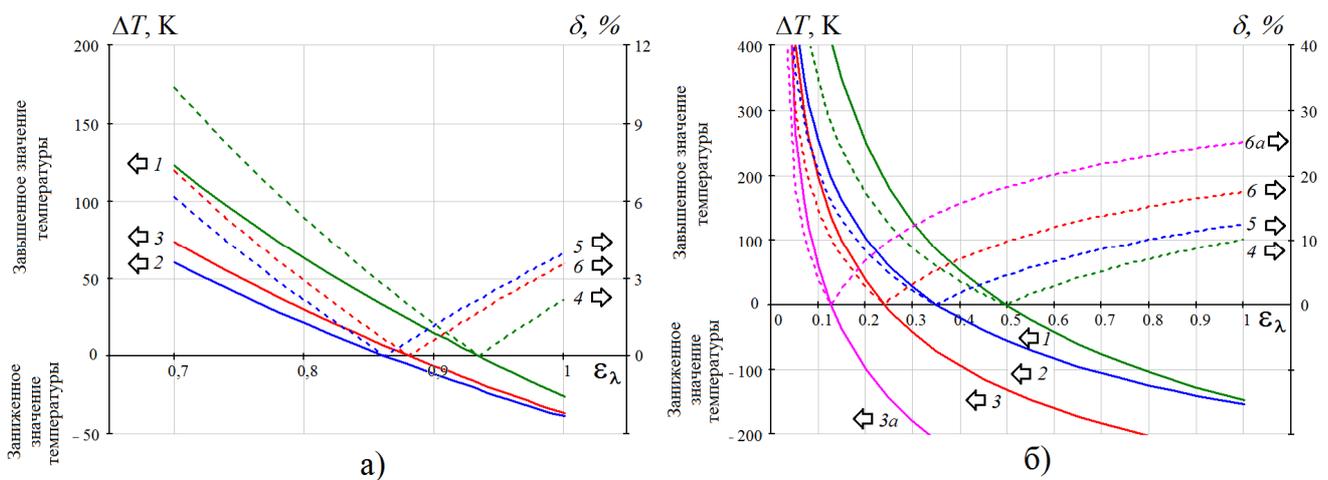


Рисунок 27 – Дополнительная погрешность измерения температуры при сжигании торфа в зависимости от неточности ε_λ , устанавливаемой на пирометрах: а) $\lambda_1 = 4,24$ мкм, $\Delta T = T - T_{\text{Г}}$, $\delta = |\Delta T|/T_{\text{Г}} \cdot 100\%$; б) $\lambda_3 = 1,6$ мкм, $\Delta T = T - T_{\text{ч}}$, $\delta = |\Delta T|/T_{\text{ч}} \cdot 100\%$. 1, 4 – $H = 9$ м; 2, 5 – $H = 14$ м; 3, 3а, 6, 6а – $H = 16$ м. 3а, 6а – Расчет для гетерогенных ПС (газ и зола)

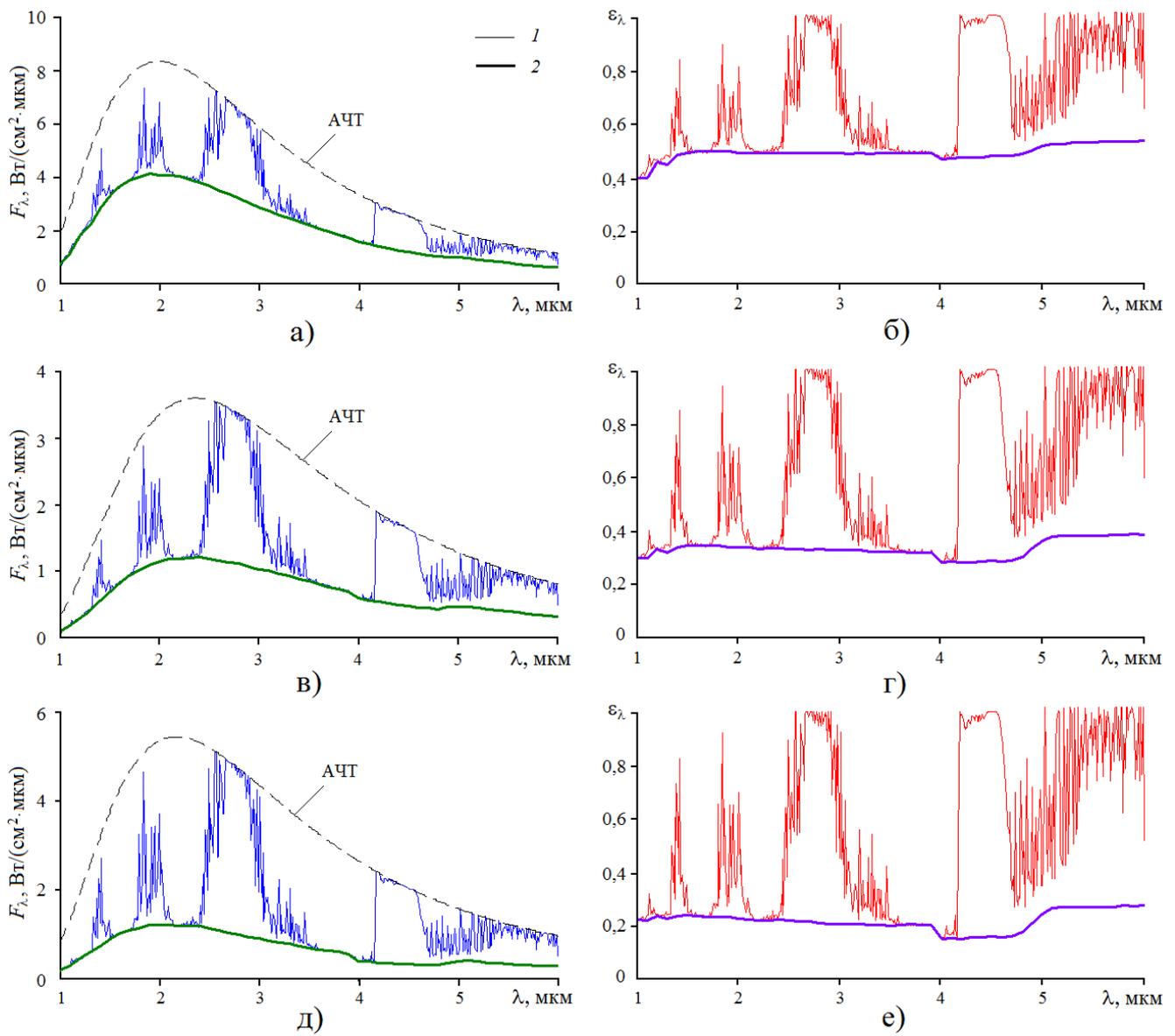


Рисунок 28 – Характеристики излучения (F_λ и ϵ_λ) рабочих сред при сжигании торфа: а), б) $H = 9$ м, $T_q = 1453$ К, $T_r = 1182$ К; в), г) $H = 14$ м, $T_q = 1228$ К, $T_r = 978$ К; д), е) $H = 16$ м, $T_q = 1334$ К, $T_r = 1031$ К. 1 – Расчет ГФ + КФ (кокс и зола); 2 – Расчет для КФ (кокс и зола)

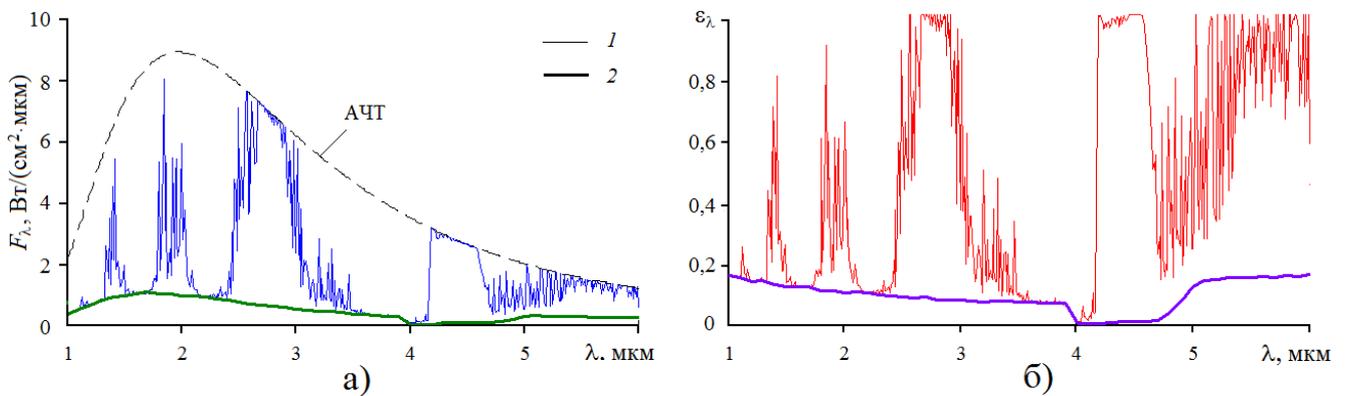


Рисунок 29 – Характеристики излучения (F_λ и ϵ_λ) гетерогенных ПС при сжигании торфа, $H = 16$ м, $T_q = 1471$ К, $T_r = 1031$ К: 1 – Расчет ГФ + КФ (зола); 2 – Расчет для КФ (зола)

Таблица 9 – Значения интегральных характеристик излучения при сжигании торфа и угля

H, м	Состав КФ	Торф				Уголь			
		F , Вт/см ²	$F_{\text{ч}}$, Вт/см ²	ε	$\varepsilon_{\text{ч}}$	F , Вт/см ²	$F_{\text{ч}}$, Вт/см ²	ε	$\varepsilon_{\text{ч}}$
9	Кокс + зола	14,12	10,71	0,6414	0,4866	21,56	21,06	0,9246	0,903
14	Кокс + зола	5,967	3,512	0,5612	0,3301	30,03	28,32	0,8313	0,7838
16	Кокс + зола	7,245	3,836	0,4744	0,2244	18,02	16,85	0,8380	0,7836
16	Зола	8,759	2,2	0,3778	0,09491	20,52	16,64	0,7947	0,7133

Выбор спектрального интервала (1 – 6) мкм обусловлен имеющимися данными по оптическим свойствам кокса и золы твердых топлив (торфа и кузнецкого угля). Величины, полученные для КФ ($F_{\text{ч}}$, $\varepsilon_{\text{ч}}$) могут составлять (25 – 76) % от суммарных величин F , ε при сжигании торфа. Величины, полученные для КФ ($F_{\text{ч}}$, $\varepsilon_{\text{ч}}$) могут составлять (81 – 98) % от суммарных величин F , ε при сжигании кузнецкого угля. Расчетные значения F_{λ} , ε_{λ} позволяют судить о роли каждого компонента ГФ и КФ, а интегральные значения дают возможность оценить радиационную теплонпряженность топочной камеры.

По температурам топочных газов проведена оценка уровня образования оксидов азота NO_x , концентрация которых составила (500 – 600) мг/м³ при сжигании торфа и (650 – 700) мг/м³ при сжигании угля.

Измеренные температуры КФ при сжигании торфа превышают температуру начала шлакования $T_{\text{шл}} = 1291$ К в корневой и хвостовой частях факела ($T_{\text{ч}} = 1453$ и 1334 К соответственно). Поэтому в газовом потоке должны наблюдаться расплавленные частицы летучей золы, вызывающие шлакование топки (рис. 3). Измеренные температуры КФ при сжигании угля превышают температуру шлакования $T_{\text{шл}} = 1274$ К по рассмотренной высоте топки $H = (9 – 16)$ м ($T_{\text{ч}} \geq 1445$ К). Вероятность шлакования высока, т.к. в газовом потоке присутствуют расплавленные частицы летучей золы.

Итогом диссертационной работы может служить схема реализации методологии (рис. 30), в которой указаны приборы (оборудование) для осуществления экспериментального исследования (ЭИ) или методы, методики, программы и комплексы для осуществления расчетного исследования (РИ) на каждом этапе. Разработанная структура методологии позволяет проводить самостоятельные исследования отдельными блоками в зависимости от поставленной задачи.

Разработанные методология и МПК «Spektr» позволили унифицировать алгоритмы расчета характеристик излучения многофазных и многокомпонентных поглощающих, излучающих и рассеивающих энергию излучения рабочих сред энергетических установок: котлоагрегатов промышленной теплоэнергетики, работающих на природных ископаемых топливах (торф, уголь, природный газ), и летательных аппаратов военной техники, работающих на химических ракетных топливах.

Использование МПК «Spektr» по двойному назначению (военному и гражданскому) может быть реализовано с различными целеполаганиями.

1. Исходная информация	
Название энергетической установки и ее назначение (гражданское, военное)	
Форма и размеры камеры сгорания, основные параметры (T, p)	
Используемое топливо, его основные характеристики, способ сжигания, степень выгорания по длине камеры сгорания	
2. Продукты горения и сгорания (гомо- и гетерогенные)	
2.1. Газовая фаза (ГФ)	
Химический состав	ЭИ: газоанализатор ДАГ-500 РИ: расчет по нормативной методике
Спектральный коэффициент поглощения $\alpha_{T,\lambda}$	РИ: расчет с использованием программного модуля и системы «Спектроскопия атмосферных газов»
2.2. Конденсированная фаза (КФ)	
Химический состав	ЭИ: рентгенофлуоресцентный спектрофотометр EDX-720 HS, электронный микроскоп JSM-6510LV
Оптические константы n_1 и n_2	РИ: расчет по аналитическим зависимостям, решение обратной задачи теории рассеяния ЭИ: лазерный анализатор микрочастиц «Ласка-2К»
Форма и размеры частиц, $f(x)$	ЭИ: электронный микроскоп JSM-6510LV, лазерный анализатор микрочастиц «Ласка-2К»
Плавкость частиц (T_1, T_2, T_3, T_4) и $T_{пл}$	ЭИ: оборудование ИЦ «Теплотехник» ОАО «ВТИ» РИ: расчет по формулам
Физический недожоги	ЭИ: дериватограф DTG-60
Радиационные характеристики ($\sigma_{осл}, \sigma_{рас}, \sigma_{погл}, \kappa_\lambda, \alpha_\lambda, \beta_\lambda, \gamma_\lambda$)	РИ: расчет с использованием программного модуля по теории рассеяния Г. Ми и различным приближениям для больших и малых частиц
3. Исследование характеристик излучения рабочих сред энергетических установок	
Спектральные и интегральные характеристики излучения ($F_\lambda, \varepsilon_\lambda, F, \varepsilon$)	РИ: расчет по МПК «Spekt» путем решения ИДУ переноса энергии излучения методом сферических гармоник в P_3 -приближении
Апробация программы	РИ: расчет по МПК «Spekt»
Характеристики излучения рабочих сред энергетических установок	РИ: расчет по МПК «Spekt» для ЖРД, РДТТ, газогенератора, парового котла
4. Пирометрирование рабочих сред энергетических установок (на примере котла БКЗ-210-140Ф)	
Зависимости $T_{экср} = f(\varepsilon_\lambda)$ для различных высот H топки	ЭИ: пирометры Optiris (в полосе излучения CO_2), Кельвин и Raynger (в окне прозрачности ГФ)
Зависимости $\varepsilon_\lambda = f(T_{теор})$	РИ: расчет по МПК «Spekt»
Совместное решение $T_{экср} = f(\varepsilon_\lambda)$ и $T_{теор} = f(\varepsilon_\lambda)$ с определением ε_λ и T	РИ: численное решение задачи определения $T_T = f(H)$ и $\varepsilon_\lambda = f(H)$ для ГФ (программа «Temper»), $T_ч = f(H)$ и $\varepsilon_\lambda = f(H)$ для КФ
Оценка неопределенности измерения температуры	РИ: расчет с учетом случайных и систематических погрешностей, а также погрешности аппроксимации

Рисунок 30 – Схема реализации методологии комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получены результаты определения химического состава торфа и золы торфа 4-х месторождений Кировской области (Дымный, Пищальский, Каринский, Гороховский), а также частиц шлака и золы, отобранных в разных частях системы парового котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4. Представлены результаты определения формы, размеров частиц шлака и золы и функции распределения частиц по размерам на основании статистической обработки полученных данных. Разработана методика определения показателя поглощения материала частиц золы торфа методом решения обратной задачи теории рассеяния. Приведены экспериментальные результаты по плавкостным свойствам золы, установлены температуры деформации, сферы, полусферы, растекания для торфа 4-х месторождений Кировской области, а также расчетные данные по температурам начала шлакования в зависимости от соотношения кислотных и основных оксидов в золе торфа и угля. Найденная величина физического недожога шлака при сжигании торфа в котле БКЗ-210-140Ф, которая составила 4,096 %, а для золы – 2,101 %.

2. Разработан программный модуль расчета радиационных характеристик ГФ, представлены результаты определения спектральных коэффициентов поглощения отдельных компонентов ГФ (H_2O , CO_2 , SO_2 и т.д.) и многокомпонентных газовых смесей в котле БКЗ-210-140Ф и других энергетических установках.

3. Разработан программный модуль расчета радиационных характеристик многокомпонентной КФ, представлены результаты расчета для частиц золы и ПС при сжигании торфа и угля в котле БКЗ-210-140Ф; частиц оксида алюминия и ПС для условий камеры сгорания и факела модельного РДТТ; частиц сажи в цилиндре газодизеля с турбонаддувом 4 ЧН 11,0/12,5.

4. Разработан МПК «Spektr» для комплексного исследования спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок. МПК состоит из модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной ГФ (газовой смеси разного химического состава), модуля расчета радиационных характеристик многокомпонентной КФ (дисперсных частиц сложного химического состава) на основе теории рассеяния, модуля расчета спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных рабочих сред (газ, жидкие и твердые частицы) на основе решения ИДУ переноса энергии излучения методом сферических гармоник в P_3 -приближении для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и температурном диапазоне (300 – 3200) К.

5. Представлены результаты расчета и анализа характеристик излучения для различных энергетических установок (ЖРД, РДТТ, газогенератор, паровой котел), показывающие применение МПК «Spektr» по двойному назначению (военному и гражданскому). Впервые продемонстрировано изменение спектральных характеристик излучения рабочих сред модельных ЖРД и РДТТ по тракту «Камера сгорания – сопло – начальный и основной участки факела». Для ЖРД сохраняется селективность излучения на всем пути истечения ПС, для РДТТ характер излучения меняется от сплошного (в камере сгорания) до явно выраженного селективного вблизи длин волн 1,4, 1,9 и 4,3 мкм (на ОУФ). Интегральные характеристики излучения ГФ (F_T и ϵ_T) составляют 6,4 % (камера сгорания), 15 % (сопло), 21 % (НУФ) и 84 % (ОУФ) от

соответствующих величин (F и ε) для гетерогенных ПС РДТТ. В камере сгорания наблюдается примерно соизмеримое влияние компонентов H_2O и CO_2 (12,81 и 11,72 Вт/см² соответственно) на итоговое излучение ГФ. Впервые для натурального РДТТ Трайдент II определено влияние химической неравновесности. Для камеры сгорания справедливо допущение о наличии только ПС. На НУФ не следует пренебрегать незавершенностью процесса горения (отличие до 60 %). Максимальное отношение результатов расчета характеристик излучения факела модельного РДТТ при совместном учете скоростной и температурной неравновесностей к результатам расчета равновесного течения составило до 20,7 раз для F и до 3,37 раз для ε (при $d_{кр} = 6,35$ мм). Исследовано влияние концентрации охладителя ($C_{охл} = 0, 10, 25$ %) на температуру, характеристики излучения ПС газогенератора при $p = 7$ МПа давлениях в камере и на срезе сопла $p = 0,1$ МПа. Проведено исследование спектров излучения топочных газов в паровом котле БКЗ-210-140Ф при сжигании торфа с установлением роли ГФ и КФ при расчетах характеристик излучения. Проведена оценка влияния выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере через расчет коэффициентов поглощения и функций поглощения ПС при сжигании торфа и кузнецкого угля в топке парового котла БКЗ-210-140Ф.

6. Разработана методика пирометрирования топки парового котла БКЗ-210-140Ф, которая включает определение температуры частиц КФ в полосе прозрачности ГФ, температуры ГФ в полосе излучения CO_2 с помощью пирометров при установлении на них обоснованных значений излучательной способности с учетом степени выгорания топлива $\beta^{ст}$ и корректной интерпретацией экспериментальных результатов. При сжигании торфа температура топочных газов в корневой части факела ($H = 9$ м) составила 1182 К, в средней части ($H = 14$ м) 978 К, а в хвостовой части ($H = 16$ м) 1031 К при использовании пирометра Optris CTlaser F2H. При сжигании угля температуры составили 1268, 1375 и 1154 К соответственно. При сжигании торфа температура частиц КФ в корневой части факела ($H = 9$ м) составила 1453 К, в средней части ($H = 14$ м) 1228 К, а в хвостовой части ($H = 16$ м) 1334 К при использовании пирометра Raynger. При сжигании угля температуры составили 1484, 1637 и 1445 К соответственно. Найдены погрешности определения температуры газа и частиц с учетом случайных и систематических погрешностей, погрешности аппроксимации экспериментальных зависимостей, а также с учетом неточности ε_λ , устанавливаемой на пирометрах. По температуре топочных газов проведена оценка уровня образования оксидов азота NO_x , концентрация которых составила (500 – 600) мг/м³ при сжигании торфа и (650 – 700) мг/м³ при сжигании угля. Измеренные температуры КФ при сжигании торфа превышают температуру начала шлакования $T_{шпл} = 1291$ К в корневой и хвостовой частях факела ($T_q = 1453$ и 1334 К соответственно). Поэтому, в газовом потоке должны наблюдаться расплавленные частицы летучей золы, вызывающие шлакование топки. Температуры КФ при сжигании угля превышают температуру $T_{шпл} = 1274$ К по высоте топки $H = (9 – 16)$ м ($T_q \geq 1445$ К). Вероятность шлакования высока т.к. в газовом потоке присутствуют расплавленные частицы золы.

7. Разработан программно-аппаратный комплекс по определению температуры топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых топлив. Комплекс включает: 1) аппаратную часть, состоящую из стационарного пирометра Optris CTlaser F2H,

воспринимающего излучение в полосе излучения CO_2 (4,24 мкм); 2) программную часть, состоящую из базового ПО «Compact Connect» и собственной программы «Temper»; 3) соединительные элементы и крепежные приспособления.

8. Рассчитаны характеристики излучения рабочих сред с учетом температурной неравновесности газа и частиц и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив (торфа и угля). Величина температурной неравновесности составляет (250 – 303) К при сжигании торфа и (216 – 291) К при сжигании угля. Учет только конечных ПС (ГФ и частиц летучей золы) повышает неравновесность до 440 К при сжигании торфа и до 315 К при сжигании угля. Поэтому, при сжигании угля для хвостовой части факела ($H = 16$ м) достаточно учитывать только частицы золы в составе топочных газов, что приводит к погрешности при измерении температуры частиц не более 2 % ($\Delta T_{\text{ч}} = 24$ К).

Перспективы дальнейшей разработки темы в гражданских условиях связаны с развитием топливно-энергетического комплекса и необходимостью проведения тепловых расчетов энергетических установок при сжигании различных топлив, появлением большого количества пирометрической и тепловизионной аппаратуры для определения температуры и температурных полей (термограмм) рабочих сред с высокой точностью и достоверностью, появлением водородной энергетики, потребностью в оценке карбонового следа и парникового эффекта при выбросе дымовых газов, а также углеродных единиц при сжигании природных и искусственных топлив. Для решения проблем военной техники является актуальной разработка электронно-оптических систем обнаружения, распознавания «свой-чужой» и наведения зенитных ракетных комплексов по тепловому излучению факела для уничтожения летательных аппаратов, подбор спектра излучения ложных тепловых целей (тепловых ловушек) для дезориентации и пустого расходования средств противовоздушной обороны противника, а также проведение оценок поражающего действия термобарических огнеметных систем.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Zagrai, I.A. Determining the steam boiler furnace gas temperature and emissivity during flame combustion of peat / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova // Thermal Engineering. 2023. Vol. 70. No. 1. P. 55–62.

2. Заграй, И.А. Определение излучательной способности и температуры топочных газов парового котла при факельном сжигании угля / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Тепловые процессы в технике. 2023. Т.15. № 3. С.133–137.

3. Заграй, И.А. Влияние промышленных выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 170–178.

4. Zagrai, I.A. Thermal emission characteristics of combustion products from rocket engines. Part 1. Investigating the nature and level of emission for model LPRE and SPRE / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova // Thermophysics and Aeromechanics. 2022. Vol. 29. No. 3. P. 427–436.

5. Zagrai, I.A. Thermal emission characteristics of combustion products from rocket engines. Part 2. Investigating the influence of various factors for SPRE / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova // Thermophysics and Aeromechanics. 2022. Vol. 29. No. 4. P. 567–577.
6. Zagrai, I.A. Investigation of emission characteristics and temperature of furnace gases in BKZ-210-140F steam boiler: milled peat combustion and support flaming with natural gas / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, I.A. Desiatkov // Thermophysics and Aeromechanics. 2021. Vol. 28. No. 2. P. 281–290.
7. Заграй, И.А. Контроль образования оксидов азота в топке парового котла с целью защиты атмосферного воздуха от загрязнения / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 126–132.
8. Zagrai, I.A. Model of solid fuel rocket engine: thermal emission characteristics from a plume calculated with account for temperature and speed non-equilibrium between gas and particle flows / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, E.I. Maratkanova // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. Vol. 26. No. 1. P. 69–77.
9. Zagrai, I.A. Investigation of thermal radiation of furnace gases generated from solid-fuel combustion in a steam boiler / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, E.I. Maratkanova, I.A. Desiatkov // Thermophysics and Aeromechanics. 2019. Vol. 26. No. 2. P. 281–294
10. Заграй, И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 27–33.
11. Zagrai, I.A. A comprehensive study of combustion products generated from pulverized peat combustion in the furnace of BKZ-210-140F steam boiler / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. P. 012226.
12. Zagrai, I.A. Modeling of thermal radiation of combustion products in the gas generator / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai, N.A. Shmakova // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017), Saint Petersburg, Russia, 16-19 May, 2017. IEEE Xplore. Pages: 1 – 5.
13. Zagrai, I.A. Simulation of thermal radiation from heterogeneous combustion products of peat burning in power plants / V.A. Kuzmin, I.A. Zagrai // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2017), Saint Petersburg, Russia, 16-19 May, 2017. IEEE Xplore. Pages: 1 – 5.
14. Zagrai, I.A. Modeling of thermal radiation of heterogeneous combustion products in the model solid rocket engine plume / V.A. Kuzmin, E.I. Maratkanova, I.A. Zagrai // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1801–1807.
15. Заграй, И.А. Исследование дисперсности и химического состава частиц в продуктах сгорания при сжигании газоторфяной смеси в паровом котле БКЗ-210-140Ф / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, И.А. Десятков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 55–63.
16. Zagray, I.A. Simulation of thermal radiation emitted by heterogeneous combustion products in the combustion chamber of a model engine / V.A. Kuz'min, E.I. Maratkanova, I.A. Zagray, R.V. Rukavishnikova // Russian aeronautics. 2016. Vol. 59. No. 1. P. 100–106.

17. Zagray, I.A. Thermal radiation of heterogeneous combustion products at the nozzle exit of the rocket microengine / V.A. Kuz'min, E.I. Maratkanova, I.A. Zagray, R.V. Rukavishnikova // Russian aeronautics. 2016. Vol. 59. No. 4. P. 579–586.

18. Zagray, I.A. Thermal radiation of heterogeneous combustion products in the model rocket engine plume / V.A. Kuz'min, E.I. Maratkanova, I.A. Zagray, R.V. Rukavishnikova // Thermophysics and Aeromechanics. 2015. Vol. 22. No. 3. P. 371–386.

19. Заграй, И.А. Исследование оптических свойств и дисперсности частиц продуктов сгорания энергетических установок, работающих на торфе / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова, Е.И. Маратканова // Тепловые процессы в технике. 2015. Т.7. № 4. С. 188–192.

20. Заграй, И.А. Комплексное исследование теплового излучения гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа в энергетических установках / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Тепловые процессы в технике. 2015. Т.7. № 10. С. 459–464.

21. Заграй, И.А. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания при сжигании торфа / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Р.В. Рукавишникова // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 58–67.

22. Заграй, И.А. Исследование характеристик излучения продуктов сгорания газогенератора / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 4 (34). С. 53–59.

23. Заграй, И.А. Определение размеров частиц сажи на различных участках системы выпуска дизеля / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, А.В. Россохин, Р.В. Рукавишникова // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. №11-12. С. 3–10.

Монография:

24. Заграй, И.А. Радиационные характеристики дисперсных систем энергетических установок / В.А. Кузьмин, И.А. Заграй // LAP Lambert Academic Publishing. 2014. 140 с. ISBN: 978-3-659-51152-3.

Свидетельство на программу ЭВМ:

25. Свидетельство РФ № 2021667438 о государственной регистрации программы для ЭВМ / Temper: № 021667015: В.А. Кузьмин, И.А. Заграй, Н.А. Шмакова, А.Л. Адеков. Заявитель Вятский гос. ун-т. Заявл. 29.10.2021. Опубл. 29.10.2021.

Подписано в печать 12.09.2024. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Усл. п. л. 2,32.

Тираж 100 экз. Заказ № 683/24

Отпечатано в ООО «Полиграфовна»
610037, г. Киров, ул. Пархоменко, д. 9
Тел. 8 (8332) 66-15-16, 66-15-15, 44-95-81
