

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по научной
работе Института проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН,
доктор технических наук, профессор
Ермолов Иван Леонидович



« 12.11.2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН) на диссертацию Заграй Ираиды Александровны «Методология комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника

Актуальность темы диссертационного исследования

Составной частью общенациональных программ развития энергетики в Российской Федерации является проведение фундаментальных и прикладных исследований, создание технологий по повышению энергоэффективности действующих энергетических установок, а также практическая реализация оптимального сжигания различного типа топливных композиций, в частности торфяного топлива. Проведение всех этапов исследования, начиная с химического состава торфа, плавкости его минеральной части, дисперсности частиц золы и заканчивая определением радиационных тепловых потоков и действительных температур факела необходимо для

повышения эффективности сжигания торфяного топлива с минимальным образованием оксидов азота и шлакованием экранных поверхностей. Диссертационная работа Заграй Ираиды Александровны направлена на комплексное исследование выше перечисленных аспектов сжигания торфа.

В диссертации представлены новые результаты экспериментальных и теоретических исследований характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок различного назначения и в деталях обсуждается проблема пирометрического определения температуры гетерогенных рабочих смесей, решение которой имеет не только важное прикладное значение, но и является принципиально важным для развития современной оптической техники, оптико-электронных приборов и систем.

Тема диссертационного исследования является несомненно **актуальной**.

Содержание и структура диссертации

Диссертация объемом 366 страниц состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 397 источников и приложения.

Содержание диссертации можно поделить на две части. Первая часть (1, 2, 3 и 4 главы) посвящена обзору фактографических данных по теме диссертации, а также описанию основных этапов выполненного комплексного исследования с использованием методов и методик определения химического состава, оптических свойств, дисперсности, радиационных характеристик газовой фазы и частиц конденсированной фазы, а также характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок.

Во второй части (5 и 6 главы) посвящены решению практических задач, которые демонстрируют новизну и достоверность созданной методики: определения характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок.

В первой главе проводится обзор исследований в области теплового излучения и пирометрирования продуктов сгорания высокоэнергетических установок и установок промышленной теплоэнергетики. Последовательно рассмотрены основные элементы развиваемой в диссертации методологии: тепловое излучение рабочих сред в энергетических установках, приборы и методы измерения температуры рабочих сред, имеющиеся фактические данные по температуре и тепловому излучению различных рабочих сред.

Важное практическое значение имеет анализ и обобщение данных по торфяному топливу в Кировской области, в частности анализ имеющихся данных по технологии факельного сжигания торфа и угля в топке парового котла БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4.

Вторая глава посвящена определению радиационных характеристик газовой фазы рабочих сред различных энергетических установок. Анализ энергетических установок различных классов позволяет установить типичные значения спектральных диапазонов и температур. Принципиальным достоинством данной главы является анализ радиационных характеристик многокомпонентных газовых смесей для рабочих сред некоторых энергетических установок: в топке котла БКЗ 210-140Ф и в факелах ракетных двигателей. Установлено, что основной вклад в суммарный коэффициент поглощения газовых смесей вносят молекулы H_2O и CO_2 .

В третьей главе анализируются радиационно-оптические характеристики частиц конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок. Приведены данные по аналитическому представлению оптических свойств (комплексный показатель преломления и его температурной зависимости) и по функциям распределения частиц угольной пыли, кокса, золы, оксида алюминия и сажи в дисперсных системах и гетерогенных продуктах сгорания энергетических установок. Судя по всему, автором впервые получены новые данные по химическому составу, дисперсности, комплексному показателю преломления и плавкости частиц

золы при сжигании торфа месторождений Кировской области в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. Важно, что автором создан банк данных по этим важным исходным свойствам для расчета радиационных характеристик единичных частиц и единичного объема. Отдельное внимание автор уделяет определению плавкостных свойств золы торфа месторождений Кировской области, которые определяют процессы шлакования топок энергетических котлов. Проведен количественный анализ величины недожога торфа в котле БКЗ-210-140Ф.

С учетом полученных данных, выполнен расчет радиационных характеристик с учетом рассеяния некоторых рабочих сред энергетических установок. Представлены результаты моделирования для частиц золы при сжигании твердых топлив (торфа и угля), частиц оксида алюминия для модельной камеры сгорания и факела РДТТ, частиц сажи в цилиндре газодизеля.

В четвертой главе излагаются основные положения разработанной в диссертации методология комплексного исследования по нахождению характеристик излучения многокомпонентных рабочих сред в спектральном интервале (0,4 – 14) мкм и диапазоне температур (300 – 3200) К. Универсальность методологии позволила охватить целый ряд энергетических установок единой расчетной методикой, но с учетом спектрального интервала и температурного диапазона. Отмечается, что поскольку основными излучающими компонентами продуктов сгорания являются водяной пар, углекислый газ, а также частицы конденсированной фазы, состоящие из золы и коксового остатка, поэтому, характер излучения таких рабочих сред одинаков при наличии индивидуальных особенностей, зависящих от количественного состава исходного топлива. Ключевым элементом разработанной методики является программный комплекс «Spektr», реализующий расчет спектральных и интегральных характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок при использовании различных топлив. Его применение открывает

новые возможности для использования оптических приборов (пирометров, тепловизоров) при исследовании указанных сред с наивысшей достоверностью и результативностью в системах контроля за температурными режимами энергетических установок.

В пятой главе демонстрируется универсальность созданной методологии для различных энергетических установок при охвате спектрального интервала (0,4 – 14) мкм и диапазона температур (300 – 3200) К. Установлены области диапазонов влияния различных факторов на радиационные характеристики и характеристики излучения, которые используются в моделировании радиационного теплообмена, при планировании, прогнозировании и интерпретации результатов физических, математических экспериментов и теплотехнических расчетов для различных энергоустановок, рабочие среды которых представляют собой гомогенные и гетерогенные продукты горения и сгорания. На примере газогенератора показано, что возможно регулировать плотность потока и излучательную способность продуктов сгорания посредством ввода разного процентного содержания охладителя. Выполненное исследование спектрального теплового излучения струй продуктов сгорания реактивных двигателей носит характер валидации созданного программного комплекса.

Анализ спектрального состава излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред позволили определить стратегию измерения температуры по спектру теплового излучения.

В шестой главе обсуждается практически важная задача определения температуры рабочих сред энергетических установок оптическими методами на основе анализа спектров излучения. Автором предложен новый подход экспериментально-расчетного определения излучательной способности, устанавливаемой на яркостных пирометрах, который позволяет измерять отдельно температуру газовой фазы в полосе излучения CO_2 и температуру частиц конденсированной фазы в полосе прозрачности газовой фазы. На примере топки парового котла БКЗ-210-140Ф показано применение

разработанной методики пирометрирования. Показано существование температурной неравновесности между газом и частицами по высоте топки парового котла при сжигании твердых топлив. По данным автора, разница температур может достигать 303 К при сжигании торфа и 291 К при сжигании угля с учетом степени выгорания топлива. При найденной температурной неравновесности и заданной степени выгорания топлива определены расчетные характеристики излучения (спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения и излучательные способности) рабочих сред факела по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твердых топлив.

Важным практическим следствием предложенной методики пирометрирования (и разработанного на ее основе программно-аппаратного комплекса для определения температуры и излучательной способности топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива) является то, что удастся вести контроль плавкости конденсированной фазы и оценивать уровень образования оксидов азота.

Заключение диссертации содержит основные выводы по работе, соответствующие цели и задачам диссертационного исследования.

Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить, что данная научная работа Заграй Ираиды Александровны является законченным научным исследованием. Диссертация написана грамотным, понятным научно-техническим языком, аккуратно оформлена по ГОСТу согласно требованиям ВАК.

В приложении содержатся акты внедрения результатов диссертационной работы на производстве, в учебном процессе и при выполнении научных исследований образовательных и научных организаций.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации Заграй И.А., определяется

логической структурой исследования. Выводы, полученные автором, соответствуют поставленной цели и задачам.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена апробацией результатов исследования на научно-практических конференциях, отражением основных результатов диссертационной работы в опубликованных автором научных трудах. Результаты диссертационного исследования, его основные положения, идеи и выводы нашли отражение в одной монографии, 65 научных работах, из которых 15 статей в журналах, входящих в базы Scopus и WoS, 8 статей в журналах из перечня ВАК. Получено государственное свидетельство на программу ЭВМ.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием фундаментальных законов теплового излучения, теплофизики, теплотехники, оптики, химии горения, современных методов и методик определения и обработки исходных экспериментальных данных (в том числе, рекомендуемых ГОСТах), 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, метода бесконтактного пирометрического измерения температуры, современного поверенного оборудования и систем обработки результатов физического эксперимента. Автором установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов расчета характеристик излучения с экспериментальными и расчетными данными, представленными в литературных источниках по данной тематике.

Практическая значимость результатов исследования

Результаты работы в виде созданного универсального модульного программного комплекса и полученные с его помощью данные по тепловому излучению многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок необходимы для:

- воздействия на процессы горения в камерах сгорания и топках различных энергетических установок;
- расчета и проектирования объектов промышленной теплоэнергетики (топок, котлов), объектов ракетной техники;
- планирования, прогнозирования и интерпретации результатов физических экспериментов, благодаря чему экономятся время и средства, повышается надежность результатов исследований;
- создания банка данных по излучательной способности указанных сред, что открывает новые возможности по использованию современных оптических приборов (пирометров и тепловизоров) с высокой достоверностью и эффективностью;
- точного определения температур газовой фазы и частиц конденсированной фазы в высокотемпературной метрологии пирометрическими методами.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в рамках диссертационного исследования научно-технические результаты рекомендуется использовать на предприятиях энергетического комплекса (ПАО «Т Плюс», АО «Татэнерго» и др.) и проектных организациях теплоэнергетического направления (НПО ЦКТИ имени И.И. Ползунова, АО «ВТИ», ООО «УралВТИ» и др.) для оценки излучательных свойств, температуры рабочих сред, процесса шлакования и уровня образования оксидов азота при сжигании природных ископаемых топлив (торфа, угля, природного газа).

Отдельные результаты и выводы работы представляют несомненный интерес для организаций ОПК, занимающихся моделированием рабочих процессов и теплообмена в ракетных двигателях (ЖРД, РДТТ, ЭРД).

Соответствие содержания диссертации научной специальности

Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.4.6. 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» по следующим пунктам паспорта: 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».

Замечания по работе

1. При описании весьма обширных результатов моделирования спектральной излучательной способности многофазных продуктов сгорания для излучающих объектов различного класса, автор уделит мало внимания корректному описанию математической постановки решаемых задач и необходимых исходных данных: геометрия расчетных областей, граничные условия, способ учета конкретных температурных зависимостей оптических свойств частиц конденсированной фазы (и есть ли в этом необходимость?).

2. Много внимания уделено учету тонкой (вращательной) структуры молекулярного спектра. Есть ли необходимость в этом при решении задач пирометрирования продуктов сгорания торфяных топлив в энергетических установках?

3. Используемые методики расчета учитывают сферическую геометрию частиц. Важно знать мнение автора диссертации об учете специфики частиц реальных размеров.

Заключение


Диссертация Заграй Ираиды Александровны является законченной работой и выполнена автором самостоятельно на высоком научном уровне.

Представленные в работе исследования достоверны, выводы обоснованы. Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. Диссертационная работа «Методология комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пунктах 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (ред. от 25.01.2024), а ее автор Заграй Ираида Александровна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника.

Диссертационная работа Заграй Ираиды Александровны и отзыв на нее обсуждены на научном семинаре лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН (протокол №11 от 23.10. 2024 г.).

Заведующий лабораторией радиационной газовой динамики ИПМех РАН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор e-mail: surg@ipmnet.ru, тел.: 8(495)434-32-38

Суржиков Сергей Тимофеевич

 19.10.2024 г.

Адрес Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН:

119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1.

Телефон: 8(495)434-00-17, e-mail: ipm@ipmnet.ru, сайт: <https://ipmnet.ru>

Подпись С.Т. Суржикова заверяю:

