

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Заграй Ираиды Александровны на тему «Методология комплексного
исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред
энергетических установок», представленную на соискание учёной степени
доктора технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая
и прикладная теплотехника»

Актуальность темы исследования

Современный этап развития энергетики наряду с повышением требований к экологической чистоте и топливной экономичности характеризуется созданием новых энергетических установок, обеспечивающих возможность работы на разных видах топлива, в том числе новых, включая смесевые и синтетические, и местных. Повышение эффективности сжигания таких топлив и минимизация вредных выбросов в окружающую среду остаются актуальными научно-техническими задачами, решение которых должно выполняться как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации энергетических установок. Рабочие среды (продукты горения и сгорания) энергетических установок отличаются высоким уровнем теплового излучения. Тепловое излучение рабочих сред энергетических установок несёт ценную информацию о составе исследуемых сред, дисперсности, уровнях температуры и давления газовой фазы и конденсированной фазы. В связи с этим проблема математического моделирования процессов теплового излучения гомогенных и гетерогенных продуктов горения и сгорания, решению которой посвящена данная работа, является актуальной.

Для количественного определения характеристик излучения (плотностей потоков и излучательных способностей) рабочих сред в широком интервале длин волн и температур необходимы сведения по химическому составу, оптическим свойствам и дисперсности частиц, радиационным характеристикам газовой фазы и конденсированной фазы. Данные по излучательной способности важны для определения температуры многофазных и многокомпонентных рабочих сред в радиационной бесконтактной пирометрии. Кроме того, отдельное определение температуры газовой фазы и температуры частиц возможно только оптическими методами на основании знаний о спектральных особенностях излучения гетерогенных сред. Отсутствие справочных данных по излучательной способности гетерогенных продуктов сгорания ставит под сомнение корректное использование современных оптических приборов (пирометров и тепловизоров) при проведении измерений.

Диссертация Заграй И.А. посвящена комплексному исследованию характеристик излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок на основе созданной методологии, сочетающей расчётные 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.

Следует также отметить, что выполненное диссертационное исследование, направленное на использование торфа в энергетике Кировской области, соответствует распоряжению Правительства Российской Федерации «Об энергетической стратегии России на период до 2030 года», которое подразумевает максимально эффективное использование местных топливных ресурсов. В связи с вышеизложенным диссертация Заграй Ираиды Александровны, несомненно, является актуальной.

Содержание и структура диссертации

Диссертация изложена на 366 страницах машинописного текста, включает 174 рисунка и 63 таблицы. Иллюстративный материал представлен в достаточном объёме и в хорошем качестве, что даёт полное представление о выполненных исследованиях и полученных результатах. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, пояснены обстоятельства, подтолкнувшие автора к исследованию в выбранном научном направлении. Сформулирована цель работы, подробно расписаны задачи исследования, указаны объекты и предмет исследования. Показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Отмечен личный вклад автора, а также разработки и результаты, полученные при сотрудничестве с другими исследователями и организациями. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Кратко описана апробация результатов на международных и всероссийских конференциях.

В первой главе представлен обзор и анализ современного состояния исследований в области теплового излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок. Отдельно рассмотрены научные направления, связанные с работой высокоэнергетических установок (ракетных двигателей) и установок промышленной теплоэнергетики, а также области применения результатов, представляющих научный и практический интерес. Особое внимание уделено анализу методов и приборов для определения температуры рабочих сред в высокоэнергетических установках и в топках паровых котлов.

Рассмотрено значение торфа в теплоэнергетике Кировской области, обосновано его широкое использование, даны характеристики торфа четырёх местных месторождений, проанализированы особенности сжигания твёрдых топлив (торфа и угля) в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. Выделены проблемы оптимизации температурных режимов сжигания твёрдых ископаемых топлив с энергетической и экологической точек зрения. Дается обоснование того, что для контроля и определения температуры в топке парового котла наиболее подходящими являются оптические методы измерения.

Из проведённого анализа следует, что отсутствуют комплексные исследования особенностей теплового излучения многофазных и многокомпонентных рабочих сред в широком интервале длин волн и температурном диапазоне. Это ставит под сомнение корректность использования выпускаемых оптических приборов, при эксплуатации которых требуется установка излучательной способности (степени черноты) исследуемой среды в рабочем

интервале длин волн. Автором работы делается вывод о необходимости создания методологии комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования многофазных и многокомпонентных рабочих сред энергетических установок при использовании различных топлив.

Во второй главе рассмотрены методы и модели определения излучательных свойств газовой фазы, представленные в литературе. Установлены местоположение и уровень радиационных характеристик (коэффициентов поглощения) основных газовых составляющих в спектральном интервале 0,4...14 мкм. Экспериментальным и расчётным путем определён состав продуктов сгорания при сжигании торфа с «подсветкой» природным газом для реальных условий работы парового котла БКЗ 210-140Ф. Рассчитаны радиационные характеристики (коэффициенты поглощения) многокомпонентных газовых смесей в топке котла БКЗ 210-140Ф при сжигании природных топлив (торфа, угля, природного газа), а также образующихся в факелах ракетных двигателей. Спектральный характер многокомпонентных газовых смесей в основном определяется излучением молекул H_2O и CO_2 .

В третьей главе проводится создание базы данных по оптическим свойствам, химическому составу, дисперсности (размерам и функциям распределения частиц по размерам) конденсированной фазы рабочих сред энергетических установок. Систематизированы литературные данные по частицам золы угля и торфа, кокса, оксида алюминия и сажи. Проведены собственные исследования по размерам частиц золы торфа методами лазерного анализа и сканирующей электронной микроскопии. Получены экспериментальные результаты по химическому составу и показателю поглощения частиц золы торфа, изучены плавкостные свойства золы, проведён подробный анализ неполноты сгорания (недожога) торфа.

Созданный автором блок расчёта радиационных характеристик частиц конденсированной фазы на основании представленной базы данных позволил провести математическое моделирование и получить результаты по радиационным характеристикам золы и продуктов сгорания при сжигании торфа и угля, частиц оксида алюминия и продуктов сгорания для модельного РДТТ, частиц сажи в цилиндре газодизеля 4 ЧН 11,0/12,5.

В четвёртой главе проанализированы методы решения интегродифференциального уравнения переноса энергии излучения в поглощающей, рассеивающей и излучающей среде. Автором хорошо обоснован выбор метода сферических гармоник для решения поставленных в работе задач. Приведено описание разработанной методологии комплексного исследования характеристик излучения, которая включает в себя совокупность отдельных методов и методик по определению оптических свойств, радиационных характеристик и теплового излучения рабочих сред энергетических установок. Применение методологии показано на примере факельного сжигания твердых топлив в топке парового котла БКЗ 210-140Ф.

Приведено описание модульного программного комплекса «Spektr», представлены результаты его апробации на примере расчёта характеристик излучения факелов ракетных двигателей, содержащих гомогенные продукты

сгорания (модельный ЖРД), а также гетерогенные продукты сгорания (модельные и натурные РДТТ).

В работе акцентируется внимание на универсальности разработанной методологии, которая отличается многоцелевым применением по видам используемых топлив, рассматриваемым объектам, исследуемым задачам и экологическим аспектам. Программный комплекс «Spektr» имеет двойное назначение т.к. позволяет рассматривать процессы переноса теплового излучения в объектах военного назначения (ракетных двигателях) и объектах промышленной теплоэнергетики (паровых котлах).

В пятой главе представлены результаты математического моделирования на основе созданной методологии комплексного исследования. Для камеры сгорания модельного РДТТ показано влияние газовой фазы, массовой доли частиц оксида алюминия на спектральные и интегральные характеристики излучения. Для условий факела модельного РДТТ дополнительно проанализировано влияние частиц сажи разного размера, содержащихся в продуктах сгорания, на радиационные характеристики и характеристики излучения. Как показал автор, дополнительный учёт «прожекторного» эффекта (рассеяния излучения из камеры сгорания на частицах) позволяет проводить корректное сопоставление полученных теоретических и экспериментальных данных.

Проведено численное исследование по изменению характера спектра излучения ракетных двигателей (РДТТ и ЖРД) по тракту «камера сгорания – сопло – начальный участок факела – основной участок факела», что позволяет обоснованно выбирать спектральный интервал и корректно рассчитывать излучательную способность при определении температуры продуктов сгорания с помощью оптических приборов. Дополнительно оценивается количественный вклад конденсированной фазы, газовой фазы и основных газовых составляющих (H_2O и CO_2) на спектры излучения продуктов сгорания. Немаловажным является учёт химической неравновесности (когда в камере или в факеле присутствуют продукты неполного сгорания), влияние которой на спектральные характеристики излучения может достигать 60% для начального участка факела. Рассмотрено влияние скоростной и температурной неравновесностей на характеристики излучения факела модельного РДТТ при разном критическом сечении сопла и изменяющихся размерах частиц. Для условий работы газогенератора количественно установлено влияние концентрации охладителя на плотности потоков и излучательные способности.

Выполнены расчеты излучения топочных газов в паровом котле при рабочих температурах 1273, 1573 и 1773 К в процессе сжигания твёрдых топлив. Показано применение разработанной методологии для оценки экологических аспектов, связанных с поглощением солнечного излучения в атмосфере при наличии выбросов предприятий теплоэнергетики в результате сжигания твердых топлив (торфа и угля).

Шестая глава посвящена пирометрированию рабочих сред энергетических установок на примере топки парового котла БКЗ 210-140Ф при факельном сжигании торфа и угля. Разработанная научно-обоснованная методика

пирометрирования 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. Автором разработан и внедрён программно-аппаратный комплекс, созданный на основе программы «Temper» (получено свидетельство на программу ЭВМ) и пирометра Optris CTlaser F2H для полосы излучения CO_2 , для контроля температурного режима сжигания топлива при проведении режимно-наладочных испытаний и тепловых расчетов котельных агрегатов Кировского филиала ПАО «Т Плюс» (Кировская ТЭЦ-4). Доказано существование и найдена величина температурной неравновесности между газом и частицами по высоте топки парового котла при сжигании твердых топлив (торфа и угля).

Важно отметить, что в работе представлены методические рекомендации по выбору излучательной способности и результаты оценки погрешности измерения температуры газа и частиц в топке парового котла БКЗ-210-140Ф с учетом случайных и систематических погрешностей, а также неточности излучательной способности, устанавливаемой на пирометрах.

Определены расчётные спектральные и интегральные характеристики 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 при сжигании твердых топлив (торфа и угля) для определения теплонапряжённости, проведения пуско-наладочных работ, составления режимных карт котельного агрегата, пирометрического контроля и оценки шлакования экранных поверхностей и уровня образования оксидов азота.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы. В целом текст диссертации написан понятным научным языком, материал изложен логично, подробно и чётко. Практические рекомендации вполне обоснованы и вытекают из результатов работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- корректностью применения апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата;
- сопоставлением результатов работы с экспериментальными и расчётными данными других авторов;
- опытом практической реализации результатов исследования в производстве на Кировской ТЭЦ-4, в научных исследованиях лаборатории «Энергетические системы и технологии» ФИЦ КазНЦ РАН, в учебном процессе ВятГУ;
- обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских научно-практических конференциях;
- опубликованием основных результатов диссертационной работы в ведущих рецензируемых научных изданиях, в том числе рекомендованных ВАК.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается логикой построения работы, соответствием комплекса методов исследования целям и задачам диссертации. Научные положения работы, лежащие в основе представленной методологии и разработанного модульного программного комплекса «Spektr», построены с учётом того, что селективный спектр излучения рабочей среды несёт информацию о многофазности и многокомпонентности исследуемой среды, уровне температуры газовой фазы и частиц конденсированной фазы, спектральном интервале и давлении. Спектр излучения указанной среды позволяет выделить те спектральные участки, интервалы или полосы, которые пригодны для измерения температуры газа и измерения температуры частиц.

Достоверность результатов подтверждается, с одной стороны, использованием современных экспериментальных методов исследования. Например, методы сканирующей микроскопии и рентгенофлуоресцентной спектроскопии используются для определения химического состава частиц, методы малоуглового светорассеяния и электронно-сканирующей микроскопии – для определения дисперсности частиц, метод синхронного термического анализа – для определения неполноты сгорания торфа, пирометрический метод измерения – для определения температуры и т.д. С другой стороны, решающие результаты получены в диссертации методом математического моделирования, включающего методику расчёта радиационных характеристик по теории рассеяния Ми, методику численного решения интегро-дифференциального уравнения переноса энергии излучения в излучающей, поглощающей и рассеивающей среде методом сферических гармоник в P_3 -приближении.

Исследование Заграй И.А. выполнено на достаточно высоком научном уровне, полученные результаты, выводы и рекомендации обоснованы.

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

К основным положениям научной новизны представленной диссертационной работы следует отнести:

1. Разработанный новый модульный программный комплекс для расчёта 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.

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

3. Научно-обоснованную методику пирометрирования топки парового котла, в основу которой положен новый подход экспериментально-расчетного определения излучательной способности, устанавливаемой на яркостных пирометрах, который позволяет измерять отдельно температуру га-

зовой 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.

4. Опытнo-теоретическое доказательство существования температурной неравновесности между газом и частицами по высоте топки парового котла при сжигании твердых топлив (торфа и угля).

5. Программно-аппаратный комплекс для определения температуры и излучательной способности топочных газов в котлоагрегатах при сжигании твердых видов топлива (торфа и угля). В основу работы комплекса положен поиск общего решения аналитических экспериментальных и расчётных зависимостей излучательной способности от температуры при заданной массовой доле CO_2 .

6. Новые расчётные спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения и излучательные способности рабочих сред факела с учётом температурной неравновесности и степени выгорания топлива по высоте топки парового котла БКЗ-210-140Ф при сжигании твёрдых топлив (торфа и угля). Спектры теплового излучения позволяют научно обосновать выбор спектральных интервалов и соответствующих им оптических приборов для бесконтактного измерения температур газовой фазы и частиц конденсированной фазы.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что в работе выполнена унификация алгоритмов расчёта характеристик излучения многофазных и многокомпонентных поглощающих, излучающих и рассеивающих энергию излучения рабочих сред энергетических установок: котлоагрегатов промышленной теплоэнергетики, работающих на природных ископаемых топливах, и летательных аппаратов военной техники, работающих на химических ракетных топливах.

Практическая ценность работы заключается в возможности замены дорогостоящего физического эксперимента вычислительным, в приведенных в диссертации рекомендациях по планированию и интерпретации результатов измерений температуры, проводимых с использованием пирометрических приборов при обоснованном выборе излучательной способности.

Соответствие темы диссертации заявленной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» по следующим пунктам:

п. 3. – «Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; ... перенос ... энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ ...»;

п. 4 – «Процессы переноса ... энергии ... в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях. Радиационный теплообмен в прозрачных и поглощающих средах»;

п. 6 – «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках»;

п. 8 – «Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем».

Вопросы и замечания по работе:

1. Топочное устройство является газопароводяным теплообменным устройством, химические реакции горения в котором протекают относительно быстро и определяющим является процесс газодинамики, обеспечивающий перемешивание топлива с воздухом, условия зажигания и выгорания, а также процессы шлакования. Каким образом учитываются газодинамические процессы в движущейся среде, а также при взаимодействии со стенками (поверхностями нагрева)? Каким образом учитываются параметры горелки, влияющие на аэродинамику факела?

2. Как известно, в топочной камере динамически изменяются параметры оптической среды в процессе работы котельного агрегата. Как это учитывается в расчётной модели для настройки пирометра при проведении экспериментальных измерений?

3. Оправдано ли применение комплексного показателя преломления по углю при расчётах радиационных характеристик при сжигании торфа?

4. Не комментируется вопрос влияния материала смотрового окна на результаты измерений температуры в топке.

5. Не комментируется газовый состав в пламени в точке измерения, который необходим для расчета спектральной интенсивности излучения.

6. Исходные данные по химическому составу твёрдого топлива, давлению, температуре топочных газов для котла типа БКЗ-210-140 измеряли в эксперименте. Возможно ли распространить результаты работы, в том числе разработанную методику пирометрирования топки парового котла на установки другого типа, в том числе работающие на газообразном топливе, и насколько это будет трудоёмким процессом?

Высказанные замечания и вопросы не повлияли на положительную оценку диссертационной работы в целом. Диссертация Заграй Ираиды Александровны является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей большой объем экспериментальных исследований, выполненных с помощью известных и оригинальных методик, которые сделали возможным проведение математического моделирования процессов теплового излучения и пирометрирования рабочих сред при сжигании торфа и угля. Полученные автором результаты полностью соответствуют заявленной цели и поставленным задачам. Автореферат достоверно и объективно отражает основное содержание диссертации. Опубликованные работы полностью освещают материал диссертации.

Заключение

Представленная диссертационная работа Заграй Ираиды Александровны «Методология комплексного исследования характеристик излучения и пирометрирования рабочих сред энергетических установок» соответствует требованиям пунктов 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (ред. от 25.01.2024), предъявляемым на соискание учёной

степени доктора технических наук и представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Считаю, что автор диссертации Заграй Ираида Александровна заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Я, Ковальногов Владислав Николаевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Заграй Ираиды Александровны, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой «Тепловая и топливная энергетика»
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»,
доктор технических наук (05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.08 – Технология машиностроения), профессор


Ковальногов Владислав Николаевич

«26» ноября 2024 г.

432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.
Тел.: 8(8422)43-02-37, e-mail: kvn@ulstu.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (УлГТУ)

Подпись Ковальногова Владислава Николаевича заверяю:

