

**ОТЗЫВ**  
**ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕНТА на диссертационную работу**  
**Заграй Ираиды Александровны**  
**«Методология комплексного исследования характеристик излучения и**  
**пирометрирования рабочих сред энергетических установок»,**  
представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника.

**Актуальность темы диссертации**

Основные проблемы мирового сообщества, как стало понятно в последние 2-3 года, заключаются в поиске решения задач обеспечения энергетической и экологической безопасности как отдельных государств, так и крупных регионов планеты (например, Европы). Попытка решения этих задач переходом от традиционной (тепловой и атомной) энергетики к нетрадиционной (ветрогенераторы и солнечные электростанции), мягко говоря, не увенчалась успехом. Оказалось, что использовать реально вырабатываемую ветрогенераторами и солнечными электростанциями электрическую энергию практически невозможно в связи с отсутствием в настоящее время мощных и надежных накопителей электрической энергии. Попытки создания таких накопителей в США, Южной Корее и Китае не дали положительных результатов. Все опытные образцы таких систем хранения энергии сгорели после коротких периодов эксплуатации. Можно сказать, что в настоящее время нет даже обоснованной концепции создания таких накопителей. Поэтому после «осознания», если так можно выразиться, бесперспективности использования новых нетрадиционных источников энергии (ветрогенераторов, в первую очередь) для решения проблем безопасности, по крайней мере, в ближайшие 10-15 лет, руководители многих государств санкционировали возврат к тепловой энергетике. Но, т.к. газ становится все более и более проблемным источником энергии по целому ряду субъективных причин (в основном связанных с политикой), основным энергоносителем в ближайшие два-три десятилетия, скорее всего, будет уголь. И, процесс, «угольного» перехода можно сказать «пошел» уже в 2023 году. Так, например, доля вырабатываемой угольными электростанциями Германии энергии в 2023 году составила 26,3% (в России аналогичный показатель составляет 16,6%, для сравнения). Более того в последние пять лет число вводимых в эксплуатацию угольных электростанций значительно превышает число выводимых в мире. В Китае в 2023 году введено в эксплуатацию новых мощностей угольных станций в девять раз больше, чем выведено из эксплуатации, а в Индии в 2023 году вывод из эксплуатации угольных мощностей был прекращен.

Но уголь объективно пока является самым, образно говоря, «грязным» топливом. При его сжигании образуются и выбрасываются в атмосферу достаточно большие объемы антропогенных оксидов и других загрязняющих атмосферу веществ. Поэтому в последние 10-15 лет усилия многих исследователей и инженеров направлены на разработку новых технологий сжигания углей и модернизацию современных. Значительные исследовательские работы при этом проводятся в направлении сжигания углей в смеси с другими веществами (в основном различные варианты биомассы). Установлены положительные эффекты снижения доли антропогенных оксидов в дымовых газах таких смесей и композиционных жидких топлив на основе угля (водоугольных, органо-водоугольных, биоводоугольных). Но пока нет достоверных экспериментальных данных, которые обеспечили бы возможность создания теории процессов подавления антропогенных оксидов при термическом разложении и горении таких композиционных топлив и смесей. Соответственно, нет и достоверного описания механизмов физических и химических процессов, приводящих к секвестированию антропогенных оксидов в продуктах сгорания топлив и смесей на основе угля. Основной характеристикой таких

сложных процессов является температура, измерение которой в условиях работы топок котельных установок представляет собой сложную задачу высокого уровня значимости. По этим причинам тема диссертации И.А. Заграй, целью которой является 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, является актуальной.

Оценивая актуальность темы диссертации И.А. Заграй следует также отметить, что по своим цели, задачам, содержанию и достигнутым результатам она соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (утверждено указом Президента РФ № 899 от 07 июля 2011 года).

### **Общая характеристика диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Рукопись содержит 366 страниц текста, 174 рисунка, 63 таблицы. Общий список литературы включает 397 наименований источников.

Во введении автор обосновала актуальность своего диссертационного исследования, сформулировала цель и задачи исследования; провела обоснование научной новизны, теоретической и практической значимости диссертации; сформулировала выносимые на защиту положения.

В первой главе представлены результаты выполненного автором диссертации анализа современного состояния теории теплового излучения в условиях энергетических установок различного назначения и наиболее значимых результатов экспериментальных исследований процессов теплового излучения в таких установках.

Также в этой главе автор приводит обоснование актуальности проблемы использования торфа в качестве энергоносителя на предприятиях теплоэнергетики Кировской области.

Вторая глава посвящена описанию разработанного И.А. Заграй программного модуля расчета радиационных характеристик газообразных продуктов сгорания разного рода топлив. Приведены результаты определения спектральных коэффициентов поглощения отдельных компонентов таких газов (отдельных компонентов и смесей).

В третьей главе приведено описание программного модуля расчета радиационных характеристик частиц конденсированной фазы продуктов сгорания топлив различного назначения. Также приведены результаты расчетов основных характеристик золы, кокса, оксида алюминия и сажи (определялись химический состав, дисперсность и оптические свойства). Проведен анализ торфяной золы и рассчитаны ее оптические постоянные. Представлены результаты определения размеров частиц золы торфа с помощью сканирующего растрового микроскопа. Установлено по результатам анализа, что частицы в основном имеют сферическую форму и гладкую поверхность. Проведен также анализ неполноты сгорания торфа (недожога) методом термического анализа. Определены температуры плавления золы, полученной на четырех производственных участках месторождения торфа в Кировской области. Проанализированы по результатам математического моделирования радиационные характеристики частиц золы при сжигании торфа и угля; частиц оксида алюминия при сжигании модельного топлива в камере модельного двигателя, а также частиц сажи в цилиндре дизельного двигателя.

Четвертая глава посвящена описанию методики расчета спектральных и интегральных характеристик излучения, приведено описание модульного программного комплекса, являющегося основой разработанной автором методологии комплексного исследования характеристик излучения рабочих сред энергетических установок.

Разработанный комплекс ориентирован на решение интегро-дифференциального уравнения переноса энергии излучения методом сферических гармоник в  $P_3$ -приближении для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды. Индикатриса рассеяния представлялась в виде ряда по полиномам Лежандра  $P_n$ . Апробация разработанного И.А. Заграй программного комплекса проведена сравнением результатов расчета основных характеристик с экспериментальными данными по факелам модельных двигателей (жидкостных и твердотопливных), а также результатами расчетов для больших двигателей.

В пятой главе приведены результаты численных исследований с использованием разработанного автором диссертации пакета. Установлено влияние группы основных значимых факторов на характеристики излучения нескольких энергетических установок. В частности показано влияние частиц сажи на характеристики излучения одного из анализировавшихся двигателей. Также проведен анализ влияния воды на температуру, спектральные и интегральные характеристики излучения продуктов сгорания газогенератора на твердом топливе. Показано, что ввод воды снижает температуру продуктов сгорания, но увеличивает концентрацию излучающих газов (воды и диоксида углерода). Рост концентрации сажи приводит к росту спектральных и интегральных характеристик излучения даже при введении охлаждающей продукты сгорания добавок. В этой главе также приведены оценки влияния выбросов предприятий теплоэнергетики на поглощение солнечного излучения в атмосфере при сжигании торфа и Кузнецкого угля.

В шестой главе приведено описание разработанной И.А. Заграй методики пирометрирования рабочих сред при факельном сжигании твердых топлив в топке парового котла БКЗ-210-140Ф. Разработан программный аппаратный комплекс по определению температуры топочных газов. Также разработана система использования ряда пирометров в рамках реализации методики измерения температуры рабочих сред. Измерения проводились через смотровые лочки на разных уровнях котла последовательно всеми пирометрами на каждом уровне при одном режиме работы котельного агрегата. В каждом эксперименте определялось среднее значение температуры, также рассчитывалось среднее квадратичное отклонение, которое составило от 30К до 75К и от 10К до 34К для двух разных пирометров при сжигании торфа. Близкие среднеквадратичные отклонения температуры получены при сжигании угля (при средней температуре продуктов сгорания около 1200К). Для экспериментальных значений средних температур получено аппроксимационное выражение, связывающее эти температуры с спектральной излучательной способностью. Также разработана программа для определения температур и излучательной способности топочных газов при факельном сжигании торфа и угля с использованием пирометра для полосы излучения  $CO_2$ .

Итоги выполненного И.А. Заграй диссертационного исследования подведены в разделе «Основные результаты работы».

### **Общая методология и методика исследования**

Методики исследований, применяемые в диссертации, включают в себя совокупность экспериментальных и теоретических подходов к изучению процессов сжигания твердых и жидких топлив и определению характеристик излучения рабочих сред энергетических установок в условиях высоких температур. Автор диссертации разработала группу методик, программно-аппаратных комплексов и программных модулей для решения задач пирометрии высокотемпературных рабочих сред. При разработке методик программно-аппаратных комплексов и программных модулей автор использовала современные представления о процессе излучения (модели, результаты исследований других ученых, математический аппарат теории излучения). При планировании, организации, проведении экспериментальных исследований по обработке результатов большое внимание уделялось анализу погрешностей (неопределенностей)

результатов измерений температур. По результатам анализа и обобщения установленных при проведении экспериментальных исследований, основных закономерностей исследовавшихся в диссертации процессов И.А. Заграй сформулирована группа методов, методик, программ и комплексов для осуществления исследований, которую можно квалифицировать как методологию. При этом все составные элементы этой методологии соответствуют по своим физико-математическим основам современным представлениям о физике процессов переноса излучения.

#### **Степень обоснованности и достоверности результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Достоверность полученных автором диссертации результатов и, соответственно, защищаемых положений и выводов определяется логической связностью всех этапов исследований. Выполнен большой объем сложных по подготовке, проведению и обработке результатов экспериментальных исследований. Для регистрации основных характеристик исследовавшихся процессов использовались как хорошо апробированные аппаратура и средства регистрации температур, так и разработанные автором диссертации программно-аппаратные комплексы и программные модули. Эксперименты в идентичных условиях проводились несколько раз с целью анализа рассеяния экспериментальных данных (неопределенностей). Все основные выводы сформулированы И.А. Заграй на основании детального анализа и последующего обобщения результатов выполненных экспериментов. Полученные И.А. Заграй результаты многократно апробировались на авторитетных международных и всероссийских конференциях, что также является косвенным доказательством достоверности и обоснованности основных результатов и выводов, приведенных в диссертации И.А. Заграй.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

И.А. Заграй получила большую группу результатов экспериментальных и теоретических исследований, соответствующих критерию новизны. По мнению автора отзыва, наиболее значимыми из них являются следующие.

1. Программный модуль расчета радиационных характеристик продуктов сгорания изучавшихся топлив и результаты определения спектральных коэффициентов поглощения многокомпонентных газовых смесей разного химического состава, содержащихся в продуктах сгорания топлив различных энергетических установок.
2. Программный модуль и результаты численного анализа радиационных характеристик частиц конденсированных продуктов сгорания топлив энергетических установок.
3. Модульный программный комплекс для расчета спектральных и интегральных характеристик излучения многокомпонентных рабочих сред энергетических установок в спектральном интервале 0,4-14мкм и диапазоне температур от 300К до 3200К.
4. Программно-аппаратный комплекс по определению температуры топочных газов котлоагрегатов при сжигании твердых топлив.
5. Методика пирометрирования достаточно широко используемого котла БКЗ-210-140Ф.
6. Результаты определения температур газов и частиц (продуктов сгорания) и также оценки плавкости частиц.
7. Результаты анализа характеристик излучения топочных газов при факельном сжигании угля и торфа, а также других достаточно типичных топлив.

**Практическая значимость полученных результатов** Диссертация И.А. Заграй имеет достаточно очевидную практическую направленность. Результаты



диссертационного исследования И.А. Заграй могут быть использованы при модернизации технологий сжигания торфа и угольно-торфяных смесей в топках котельных установок большой и малой энергетики.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Приведенные в пятой главе результаты определения характеристик излучения продуктов сгорания твердого топлива (газообразных и твердых) приведены как характеристики продуктов сгорания в камере сгорания или сопле двигателя (например, рис. 5.9, 5.10, 5.15, 5.16). Но если ориентироваться на приведенную на рис. 5.2 схему, то, очевидно, что все измерения проводятся за соплом двигателя. В рукописи недостаточно конкретно обоснована возможность оценки характеристик газообразных и твердых продуктов сгорания твердых и жидких топлив в камере сгорания и в сопле по результатам определения этих характеристик в факеле за соплом двигателя.

2. При анализе теплового излучения продуктов сгорания газогенератора на твердом топливе с охладителем водой установлено снижение температуры продуктов сгорания на 15-16%, при увеличении концентрации компонентов основных излучающих газов и паров ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ). Но остается открытым вопрос о том, как меняется при этом величина теплового потока от продуктов сгорания к нефти.

3. Автор диссертации разработала несколько программных модулей и программно-аппаратных комплексов. Но в списке основных публикаций есть только одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. В этой связи возникает вопрос об оригинальности остальных программных продуктов.

Однако число и содержание данных замечаний не снижают научной ценности представленной работы. Материал диссертации И.А. Заграй изложен последовательно и развернуто доступным и ясным для понимания языком без существенных замечаний по стилю и форме изложения, хорошо иллюстрирован.

Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы полностью соответствуют представленным в диссертации результатам исследований. Публикации также отражают основные положения диссертации. Основные результаты диссертационного исследования И.А. Заграй в полной мере опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов докторских диссертаций. Результаты диссертации были успешно апробированы на профильных международных и всероссийских конференциях.

Оформление диссертации в целом соответствует современным требованиям по подготовке рукописей и авторефератов докторских диссертаций.

Диссертация Ираиды Александровны Заграй на соискание учёной степени доктора технических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать, как новое крупное достижение в теории топочных процессов.

Тема диссертации соответствует указанной научной специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника.

#### **Общее заключение о соответствии диссертации критериям.**

Таким образом, данная диссертация является завершённой научно-квалификационной работой.

На основании анализа автореферата и рукописи диссертации можно сделать вывод, что по уровню постановки задачи, методам их решения, полученным результатам и защищаемым положениям диссертация Заграй Ираиды Александровны полностью соответствует требованиям, установленным в пп. 9-14 Положения о присуждении ученых

степеней (Постановление Правительства РФ от 24 сент. 2013 г. N 842), а её соискатель Заграй Ираида Александровна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника.

**Официальный оппонент:**

Кузнецов Гений Владимирович



ПОДПИСЬ

Доктор физико-математических наук, профессор  
специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника  
Профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова  
Инженерной школы энергетики  
[kuznetsovgy@tpu.ru](mailto:kuznetsovgy@tpu.ru)  
Тел.: 8 (3822) 60-62-48; вн. телефон: 1615.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»  
Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30,  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, тел.: 8 (3822) 60-63-33,  
[tpu@tpu.ru](mailto:tpu@tpu.ru); <http://www.tpu.ru/>  
тел.: 8(3822) 60-62-48

Согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю:

И.о. ученого секретаря Национального  
исследовательского Томского  
политехнического университета



Новикова В.Д.

26.11.2024