

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента Лаврова Владислава Васильевича на диссертационную работу Берга Ивана Александровича «Исследование методов трансформации и анализа ИК-тепловизионной видеоинформации о факельном горении газообразного топлива», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации» (информатизация и связь)

1. Актуальность темы исследования

Современное развитие информатизации связано с массовым внедрением цифровых технологий во все сферы жизнедеятельности. Одним из наиболее перспективных направлений применения цифровых технологий является телеметрия – совокупность методов сбора информации и измерения параметров, позволяющая получить необходимые сведения о состоянии удаленных объектов.

Диссертант посвятил свое исследование созданию системы телеизмерений, т.е. методов трансформации и анализа ИК-тепловизионной видеоинформации о факельном горении газообразного топлива с целью оперативного мониторинга и управления процессами сжигания топлива в промышленных агрегатах. При этом основное внимание автора направлено на поиск и оценку возможностей использования новых количественных показателей процесса горения, содержательных с теплотехнической точки зрения, и методов анализа ИК-тепловизионных изображений факела, обеспечивающие вычисление данных показателей. Эти усилия позволят в дальнейшем производить подбор оптимальных условий процесса горения и разработку методов подавления содержания вредных веществ в продуктах сгорания. Выбранная тематика является актуальной.

2. Научная новизна полученных результатов

Научная новизна полученных результатов заключается в:

– выборе, обоснованном результатами анализа плотностей распределения пикселей ИК-тепловизионных изображений факела по температуре, методов анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела, обеспечивающих вычисление количественных показателей, характеризующих процесс горения газообразного топлива;

– подтверждении стационарности во времени определенных количественных показателей процесса горения факела вне зависимости от режима подачи газообразного топлива;

– количественном описании отличий процессов горения в непрерывном и импульсном режимах подачи топлива.

3. Обоснованность и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации

Научные положения, сформулированные в диссертации, являются обоснованными и достоверными, поскольку опираются на современные перспективные методы телеметрии, активно применяемые в научных исследованиях – ИК-термографию (ИК-тепловидение), обеспечивающие получение мгновенных изображений факела на основе регистрации излучаемых им в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра волн. Диссертант сосредоточил свои усилия на исследовании методов обработки ИК-тепловизионных изображений горящего факела, обеспечивающих вычисление стационарных во времени количественных показателей процесса горения, интерпретируемых с теплотехнической точки зрения и позволяющих сравнивать друг с другом различные режимы горения факела.

Автором изучены и проанализированы достижения отечественных и зарубежных ученых, исследователей способов применения спектрального анализа для изучения горящего газового факела. Список использованной литературы содержит 112 наименований.

Обоснованность результатов, выдвинутых соискателем, подтверждается использованием адекватных методов анализа первичной информации и выбранных количественных показателей процесса горения факела, непротиворечивостью результатов анализа ИК-тепловизионных изображений факела современным представлениям о физико-химических процессах, протекающих в зоне горения при сжигании газообразного топлива. Корректность работы программного обеспечения подтверждается использованием современных методов и средств при проектировании и разработке, тестированием программного обеспечения.

4. Практическая значимость результатов диссертации

Практическая значимость работы подтверждена внедрением полученных результатов в:

– ЗАО «Инженерный центр Уралтехэнерго» (г. Екатеринбург, Россия). Методики, разработанные автором, использованы при составлении программы промышленных испытаний газовых горелок малых водогрейных котлов в ходе осуществления проектной и эксплуатационной деятельности;

– ООО «БелЭнергоПроект» (г. Москва, Россия). Результаты обработки экспериментальных данных использованы при разработке технических решений по модернизации горелочных устройств, направленных на снижение содержания оксидов азота в уходящих газах, и повышение надежности работы экранов топки парового котла.

– ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет» (г. Екатеринбург, Россия). Созданный автором программно-аппаратный комплекс использован при реализации научно-исследовательской деятельности в УралЭНИН для обучения аспирантов.

Существенным преимуществом является то, что автор имеет свидетельство о государственной регистрации объекта интеллектуальной собственности – программы для ЭВМ.

5. Оценка содержания диссертации и ее оформления

Диссертационная работа содержит 150 страниц основного текста (всего 182 с.), 60 рисунков (без приложений) и 15 таблиц. Состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 112 наименований, 4 приложений.

В *первой главе* рассмотрены вопросы организации регулирования процессов сжигания различных видов топлив с точки зрения энергоэффективности энергетического оборудования и влияние на экологию. Важное значение при этом уделяется развернутому анализу существующих методов измерения параметров процесса горения газовоздушных смесей, в особенности методам анализа данных, полученных при съёмке пламени в инфракрасном диапазоне длин волн (ИК-термографии). Диссертант отмечает основной недостаток существующих методов ИК-термографии – необходимость ручной обработки полученных с объекта исследования тепловизионных изображений пламени или факела, что сдерживает применение данной технологии в промышленных условиях.

На основании проведенного аналитического обзора состояния вопроса автором сформулирована цель работы и дана постановка задач исследования.

Вторая глава является наиболее интересной с точки зрения научной новизны. В ней рассмотрено исследование методов обработки данных, полученных при тепловизионной съёмке горящего факела при непрерывном режиме подачи топлива в горелочное устройство. Исследование проведено в лабораторных условиях с

использованием разработанного автором специализированного программно-аппаратного измерительного комплекса, обеспечивающего контроль процесса диффузионного горения газообразного топлива и автоматическую обработку мгновенных ИК-тепловизионных изображений горящего факела, обеспечивающих трансформацию первичной информации во временные ряды (ВР). Предложенный алгоритм позволил автоматизировать процессы сбора и анализа структуры первичной информации, определить новые количественные показатели на основе анализа ВР, характеризующие процесс горения газообразного топлива, оценить их статистическую устойчивость и возможность применения для анализа процессов горения при непрерывной подаче газообразного топлива.

Результаты исследования особенностей процесса горения в импульсном режиме подачи газообразного топлива отражены в *третьей главе* диссертации. Диссертант провел большой объем экспериментальных и расчетных исследований на модернизированной лабораторной установке, компьютерную обработку и спектральный анализ ИК-тепловизионных последовательностей при различной частоте пульсаций топливного клапана, что позволило определить режим подачи топлива, при котором наблюдается снижение концентрации оксидов азота NO_x в продуктах сгорания.

Полученные результаты можно использовать на практике для создания и настройки автоматической системы регулирования факельного горения газозоудшной смеси, обеспечивающей энергоэффективные режимы работы тепловых агрегатов, снижение объема побочных продуктов горения, являющихся экологически вредными, и уменьшение вероятности возникновения аварийных ситуаций.

6. Замечания и вопросы по работе

1. Предложенный автором метод контроля процесса горения газообразного топлива с использованием данных съемки ИК-тепловизионных камер основан на анализе выделенных параметров аппроксимации временных рядов. Однако такой анализ в реальном режиме времени потребует использования высокопроизводительных аппаратно-программных средств. Хотелось бы видеть в работе рекомендации по выбору конфигурации таких вычислительных средств.

2. Результаты идентификации факельного горения газообразного топлива по данным съемки ИК-тепловизионных камер существенно зависит от степени черноты

газообразных продуктов горения. Известно, что продукты горения газообразных топлив содержат поглощающие и излучающие газы, например, трехатомные CO_2 и H_2O , концентрация которых может изменяться. Каким образом учтены колебания степени черноты продуктов горения газообразного топлива на результаты обработки измерительной информации в предложенном методе обработки тепловизионного изображения?

3. В п. 3.5 диссертации при описании результатов экспериментальной проверки гипотезы о возможности уменьшения концентрации оксидов азота NO_x при использовании импульсного режима подачи топлива помимо графика на рис. 3.18 следовало бы привести вид уравнения регрессии $C_{\text{NO}_x} - f_{\text{SV}}$ с оценкой достоверности аппроксимации (коэффициент детерминированности R^2), а также количественные значения состава продуктов горения. Приведенная графическая визуализация зависимости на рис. 3.18 не в полной мере позволяет обосновать вывод о минимальной концентрации NO_x в продуктах сгорания при частоте пульсации порядка 4-5 Гц.

4. На с. 131 (сверху второй абзац) отмечено, что по измеренным с помощью газоанализатора концентрациям различных газов в продуктах сгорания «... рассчитывался коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания». Что понимается под выражением «коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания»? Каким образом он определялся?

5. В п. 2.2 при анализе первичной ИК-тепловизионной информации, полученной с помощью созданной специализированной экспериментальной установки, отсутствует интерпретация результатов, полученных с помощью разработанной программной библиотеки «Thermal Oscillations Analyzer (TOA)».

6. Почему не был использован метод мгновенных спектров (оконное преобразование Фурье) при частотном анализе временных рядов $N_k^{(1)}$, $N_k^{(2)}$?

7. Редакционные замечания:

– с. 12, сверху первый абзац: металлургические печи – это общее название, далее идут доменные и пр. Лучше «доменные печи, конвертеры, нагревательные печи и т.д.»; слово «конверторы» надо заменить на «конвертеры»;

– с. 96, надо исправить заголовок п. 3.2 «... параметров в импульсного режиме подачи...».

7. Заключение по работе

Отмеченные замечания никоим образом не снижают ценности работы. Оценивая диссертационную работу **Берга Ивана Александровича** в целом, следует отметить, что она соответствует паспорту специальности 05.13.01 и требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемых к кандидатским диссертациям. Диссертация в полной мере отвечает требованиям по актуальности работы, научной новизне, практической значимости, личному вкладу автора работы, апробации и отражению результатов в публикациях; является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны. Автореферат достоверно отражает содержание диссертации. Автор диссертации **Берг Иван Александрович** заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации» (информатизация и связь).

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Теплофизика и информатика в металлургии»
Департамента металлургии и металловедения
Института новых материалов и технологий
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
Тел. +7(343) 375-44-51
E-mail: v.v.lavrov@urfu.ru
Адрес: 620002, Россия, г. Екатеринбург,
ул. Мира, д. 28



Лавров Владислав Васильевич

Дата « 14 » апреля 2020 г.

Подпись Лаврова В.В. заверяю

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
УРФУ
МОРОЗОВА В. А.


