



ОТЗЫВ

официального оппонента

Федина Александра Викторовича

на диссертационную работу Ваганова Михаила Александровича

«Контроль процессов горения газообразных углеводородов

методами оптической спектроскопии»,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук

по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики

материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

1. Актуальность избранной темы диссертационной работы

Повышение эффективности сжигания газообразного углеводородного топлива остается важной научно-технической проблемой. Поскольку значительную часть современной энергетики составляют тепловые электростанции, эффективность выработки электрической энергии которых составляет около 70 %, а около 30 % приходится на отходы с выбросами в окружающую среду, то увеличение коэффициента использования топлива путем совершенствования его сжигания приобретают особую актуальность.

Эта проблема решается по многим направлениям. Одним из них является разработка и внедрение спектроскопического метода контроля, обладающего высоким уровнем достоверности, для управления, в том числе, процессами сжигания в реальном масштабе времени.

Решение указанной научно-технической проблемы позволяет создавать и внедрять системы контроля процессов горения газообразных углеводородов с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

В этой связи диссертационная работа Ваганова М.А., посвященная разработке новых методов, технических средств и методик контроля процессов горения газообразных углеводородов, а также созданию на их

основе систем контроля, способных с более высокими точностью, быстродействием и достоверностью по сравнению с существующим контрольно-измерительным оборудованием выполнять контроль в режиме реального времени, представляется актуальной.

2. Содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Основной текст диссертации представлен на 310 страницах, включая 99 рисунков и 15 таблиц. Список используемой литературы содержит 202 наименования. Общий объем диссертационной работы с учетом приложений составляет 324 страницы.

Во введении обоснована актуальность исследования, проводимого в диссертационной работе, определены объект, предмет, цель и задачи исследования, указаны методы исследования, научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и содержатся сведения об апробации работы.

В первой главе выполнен анализ задач контроля процессов горения в теплоэнергетике, существующих методов их решений и технических средств контроля. В результате проведенного анализа сделан вывод, что повысить эффективность выработки тепловой энергии и снизить негативное воздействие работы теплоэнергетических установок на окружающую среду можно путем контроля и оптимизации процесса сжигания топлива. При этом количество вредных выбросов может быть снижено до 40%, а расход топлива уменьшен до 5-6%.

Во второй главе дано математическое описание спектрального прибора как информационной измерительной системы. Автором предложено математическое описание проводить в два этапа: сначала описывается линейная подсистема спектрального прибора, вычисляющая комплексный спектр анализируемого сигнала, затем описывается процесс получения

энергетического спектра, как результата дальнейшей обработки комплексного спектра детектирующей системой спектрального прибора. Применение такого подхода позволило последовательно описать прохождение анализируемого оптического сигнала через все функциональные узлы спектрального прибора от его входа до результата регистрации спектра.

В третьей главе предложен спектроскопический метод контроля процессов горения на основе регистрации, анализа и сопоставления множества спектроскопических параметров. За основной показатель достоверности контроля выбраны вероятности ошибок 1-го и 2-го рода. Поэтому в рамках разработанного спектроскопического метода была математически обоснована их связь с погрешностями спектральных измерений. Автором были впервые введены информационные характеристики спектрального прибора контроля (количество информации и информационный КПД), которые также были математически связаны с погрешностями измерений. Данные информационные характеристики могут служить критериями при сравнении спектральных приборов контроля разного типа по их результативности. На основе разработанного спектроскопического метода контроля было определено граничное условие, задающее оптимальную область допускаемых значений контролируемых параметров. Для обеспечения заданных требований к вероятностям ошибок контроля, характеризующих его достоверность, измеренные значения контролируемых параметров должны находиться в пределах этой области.

Четвертая глава посвящена технической реализации приборов контроля в форме оптических спектральных приборов – многоканального оптического спектрометра и дифракционного спектрального прибора на базе решетки. Рассмотрены вопросы улучшения их технических характеристик. Принцип действия многоканального оптического спектрометра основан на спектральном разложении сигналов с помощью набора узкополосных фильтров, которые и определяют его разрешающую способность. Это

позволяет применять оптический волоконный жгут для передачи сигналов на вход его разрешающей системы без ухудшения его разрешающей способности, что увеличивает чувствительность прибора на 15 % по сравнению со спектрометрами других типов. Особое вниманиеделено повышению разрешающей способности дифракционного спектрального прибора, что достигается за счет применения дифракционной решетки нового типа, особая топология которой перераспределяет интенсивность дифрагированного света в высшие порядки. При этом минимальная ширина штрихов решетки составляет 3 мкм. В результате разрешающая способность прибора повышена более чем на 20%. Приводятся результаты исследований энергетических потерь и искажений сигналов, возникающих при их передаче по оптоволокну, и результаты разработки методики их коррекции. Особо хочу подчеркнуть, что новизна применяемых автором технических решений подтверждается патентами на полезную модель РФ № 86734, № 100241 и № 188637 и свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668476.

В пятой главе приводятся результаты экспериментальных исследований процесса горения газообразных углеводородов и установлены зависимости спектроскопических параметров, характеризующих процесс горения пропана, от режимов его горения. Продемонстрирована возможность применения разработанных дифракционного спектрального прибора и многоканального оптического спектрометра для контроля процесса горения пропана. Установлено, что наибольшие вероятности ошибок возникали при контроле процесса горения пропана методом эмиссионной оптической спектроскопии (ЭОС), а наименьшие – при одновременном применении ЭОС и методов лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС). Одновременное применение ЭОС и ЛИЭС позволило повысить оперативность проводимого контроля путем определения взаимной связи между контролируемыми спектроскопическими параметрами и их зависимости от соотношения газ/воздух. Выявлено 22 параметра,

характеризующих процесс горения газообразного углеводородного топлива. Возможность практического применения методов спектроскопии для контроля процессов горения подтверждена экспериментальными исследованиями на реальном промышленном объекте, ООО «Промышленная группа «Фосфорит», г. Кингисепп, Ленинградская область, при измерении спектральной характеристики пламени в топке вращающейся печи обжига, которая установлена в цеху производства дефторированного фосфата.

В заключении диссертационной работы представлена обобщенная оценка проведенного исследования и приведены его основные результаты в соответствии с поставленной целью исследования и его задачами.

В приложениях приведены акты внедрения диссертационной работы в ООО «Промышленная группа «Фосфорит», АО «Научно-Исследовательский институт точной механики», ООО «Теплоэнергосервис ДКМ», АО «Кнауф Петроборд», ООО «Севзаптехника» и в образовательный процесс ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», а также патенты на полезную модель № 86734, 100241, 188637 и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668476.

Структура диссертационной работы продумана и удобна для восприятия, в выводах к каждой главе указаны работы автора, в которых опубликованы основные результаты, графический материал наглядно дополняет текстовый.

3. Основные научные результаты диссертационной работы

На основании вышеизложенного в диссертационной работе получены следующие основные научные результаты.

3.1. Предложено новое математическое описание спектрального прибора как информационной измерительной системы, позволившее разработать математические модели спектральных приборов, устанавливающие связь вход-выход для комплексных и энергетических

спектров анализируемого оптического излучения. В отличие от традиционного описания спектральных приборов, такой подход обеспечил последовательное описание прохождения анализируемого сигнала через все функциональные узлы прибора и позволил учесть влияние его конструктивных особенностей и внешних условий на результат спектрального анализа.

3.2. Разработан универсальный спектроскопический метод контроля процессов горения на основе регистрации, анализа и сопоставления множества спектроскопических параметров, позволяющий выполнять контроль различными методами оптической спектроскопии, что повышает быстродействие и оперативность проводимого контроля.

3.3. Предложено техническое решение для реализации приборов контроля на базе разработанных оптических спектральных приборов с волоконно-оптической системой передачи сигналов, которые обладают улучшенными техническими характеристиками по сравнению с известными аналогами.

3.4. Установлены новые зависимости спектроскопических параметров в спектре излучения контролируемого процесса горения газообразных углеводородов от режимов горения при раздельном и комбинированном применении эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии, позволяющие с большей достоверностью и оперативностью проводить контроль процессов горения по сравнению с существующими методами контроля.

3.5. Разработана методика спектроскопического контроля процессов горения газообразных углеводородов одновременно эмиссионной и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрией, позволяющая проводить контроль процессов горения газообразных углеводородов с требуемой достоверностью при применении приборов с минимально необходимыми характеристиками.

Особо стоит подчеркнуть, что основные результаты получены в рамках выполнения НИР по грантам РФФИ, РНФ и Президента РФ при участии (3 гранта) и непосредственном руководстве (5 грантов) Ваганова М.А.

4. Достоверность результатов диссертационной работы, их апробация и публикации автора

Достоверность результатов диссертационной работы, выдвинутых автором научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением адекватных физических моделей, корректным использованием математического аппарата, удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментальных результатов, а также практической реализацией на предприятиях реального сектора экономики.

Основные результаты диссертационной работы получили апробацию на 16 международных и 2 всероссийских конференциях; опубликованы в 64 печатных работах, из них: 1 монография, 15 статей в изданиях, рекомендованных ВАК России, в том числе 13 по научной специальности из которых 8 – без соавторов, 29 статей – в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, 3 из которых – без соавторов, 8 статей в сборниках докладов конференций и 7 отчетов о выполнении НИР. Кроме того, по теме исследования автором получено 3 патента РФ и 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Экспериментальные исследования проведены под его научным руководством и при непосредственном участии.

5. Научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы

5.1. Новизна математического описания спектрального прибора в качестве информационной измерительной системы заключается в том, что оно создано на основе математического аппарата, в частности, теории

линейных систем, теории сигналов и методов матричного анализа, который в оптической спектроскопии ранее не применялся.

5.2. Новизна спектроскопического метода контроля процессов горения состоит в том, что он основан на регистрации, анализе и сопоставлении множества спектроскопических информационных параметров и описывает процедуру контроля, технические средства контроля и параметры, характеризующие контролируемый процесс, в рамках единого математического аппарата. Метод, разработанный в диссертационной работе, имеет обобщенный характер. Он позволяет выполнять контроль процессов горения, анализируя спектральную характеристику оптического излучения, испускаемого непосредственно очагом горения, различными методами оптической спектроскопии, что повышает достоверность и оперативность проводимого контроля. Разработанный метод, исходя из заданных допустимых вероятностей ошибок контроля, сформировать требования к минимально необходимым характеристикам приборов, обеспечивающих требуемую достоверность контроля, выполнить сравнение спектральных приборов контроля разного типа по их результативности и оценить согласованность отдельных приборов при совместном их применении для решения конкретной прикладной задачи контроля процесса горения.

5.3. Новизна технических решений для приборов контроля на базе разработанных оптических спектральных приборов заключается в том, что в многоканальном спектрометре для передачи оптического излучения используется жгут волокон, увеличивая его чувствительность более чем на 15%, а в дифракционном спектральном приборе применена дифракционная решетка нового типа, увеличивая разрешающую способность более чем на 20%. Новизна применяемых технического решения подтверждена патентами РФ.

5.4. Новизна установленных спектроскопических параметров заключается в том, что установлены новые параметры и их зависимости от режимов горения при раздельном и комбинированном применении

эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии. Это позволяет повысить не только достоверность контроля, но и его оперативность путем прогнозирования направления изменения соотношения газ/воздух по взаимному изменению интенсивностей контролируемых параметров относительно друг друга.

5.5. Новизна методики подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения газообразных углеводородов одновременно эмиссионной и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрией заключается в том, что она выполняется на базе разработанного автором спектроскопического метода и позволяет проводить контроль с требуемой достоверностью при применении технических средств с минимально необходимыми характеристиками.

6. Степень обоснованности научных положений

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, четко обоснованы. Основные результаты и выводы в диссертационной работе являются новыми. Обоснованность всех результатов, сформулированных в качестве выносимых на защиту положений, подтверждается публикациями автора в ведущих отечественных и зарубежных изданиях, патентами РФ и результатами их обсуждения на многочисленных всероссийских и международных конференциях, а также апробацией ряда положений на практике.

7. Внедрение и реализация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы апробированы и использованы в АО «Научно-Исследовательский институт точной механики», ООО «Промышленная группа «Фосфорит», АО «Кнауф Петроборд», ООО «Севзаптехника», ООО «Теплоэнергосервис ДКМ», что подтверждено актами внедрения.

Результаты исследования также внедрены в образовательный процесс ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

8. Характеристика диссертационной работы в целом

Материал диссертационной работы Ваганова М.А. методически изложен верно, структурирован корректно. В каждой главе представлены содержательные выводы. Автор продемонстрировал достаточно глубокие знания в части спектроскопических методов контроля процессов горения газообразных углеводородов, математических методов моделирования.

Представленная диссертационная работа позволяет заключить, что Ваганов М.А. обладает достаточными знаниями и навыками выполнения научных исследований, а полученные им результаты имеют важное значение для теории и практики контроля процессов горения газообразных углеводородов.

9. Замечания по диссертационной работе

9.1. Представленный в п. 4.1 четвертой главы диссертационной работы сравнительный анализ технических характеристик спектральных приборов с передачей анализируемых сигналов по оптическому волокну представляется недостаточным, следовало добавить сравнение по другим параметрам, в частности по динамическому диапазону и чувствительности.

9.2. В пятой главе диссертационной работы приводятся результаты ряда экспериментов по применению ЛИЭС-метода для диагностики пламени горения, следовало бы более подробно расписать условия эксперимента, в частности привести пороговые значения оптического пробоя пламени. Знание пороговых значений необходимо как с точки зрения понимания фундаментальных процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, так и с целью определения эффективных условий применения ЛИЭС-метода.

9.3. Хорошим дополнением полученных в диссертационной работе результатов по применению метода лазерной искровой спектроскопии для контроля процессов горения газообразных углеводородов стало бы исследование, на основании которого была бы выполнена оценка чувствительности ЛИЭС-метода для анализа продуктов горения, возникающих в результате сжигания газообразных углеводородов, и оценка пределов их обнаружения.

9.4. Автор упоминает о возможности измерения температуры спектральным методом, однако этот вопрос не находит дальнейшего отражения в диссертационной работе.

9.5. Рисунки 4.7, 4.18-4.20, 5.26 нечеткие, плохо читаемые, что затрудняет оценку результатов.

10. Выводы и заключение

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Ваганова Михаила Александровича. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационного исследования.

Диссертация Ваганова Михаила Александровича «Контроль процессов горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии» является законченной научно-квалификационной работой и соответствует пунктам 1, 3, 4, 7 паспорта научной специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки).

По совокупности полученных результатов можно сделать вывод, что в диссертационной работе решена важная научно-техническая проблема оптимизации процесса горения газообразного углеводородного топлива путем разработки и внедрения спектроскопического метода контроля, обладающего более высоким уровнем достоверности по отношению к существующим методам.

Диссертация Ваганова Михаила Александровича отвечает критериям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук по специальности 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки), а ее автор, Ваганов Михаил Александрович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по этой специальности.

Официальный оппонент

Советник ректора федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева»,

доктор технических наук, профессор

Федин Александр Викторович

«13» 02 2023 г.

Подпись советника ректора федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева», доктора технических наук, профессора Федина Александра Викторовича заверяю.

Проректор по научной работе и цифровой трансформации федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева»



Красненков Николай Александрович

«13» 02 2023 г.