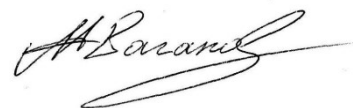


На правах рукописи



ВАГАНОВ Михаил Александрович

**КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ
УГЛЕВОДОРОДОВ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ
СПЕКТРОСКОПИИ**

Специальность 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики
материалов, изделий, веществ и природной среды (технические
науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена на кафедре конструирования и технологий электронных и лазерных средств Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный консультант:

Бестугин Александр Роальдович

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Федин Александр Викторович

доктор технических наук, профессор, советник ректора ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева»

Вениаминов Андрей Викторович

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Центра «Оптические информационные технологии» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Боритко Сергей Викторович

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерной техники отдела акустооптических информационных систем ФГБУН «Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН»

Ведущая организация:

ОАО "Авангард", 195271, Россия, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72

Защита диссертации состоится «28» марта 2023 года в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.2.384.02 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, д. 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <https://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «27» января 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.384.02,
кандидат технических наук, доцент



С.А. Назаревич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Согласно энергетической стратегии России на период до 2035 года одним из главных направлений развития энергетической отрасли является снижение негативного воздействия деятельности организаций топливно-энергетического комплекса на окружающую среду, в том числе за счет увеличения коэффициента использования топлива и снижения его удельных расходов. Основу современной энергетики составляют тепловые электростанции, вырабатывающие электрическую энергию путем преобразования тепловой, полученной в результате сжигания органического топлива. При этом на их долю приходится около 30 % всех отходов с выбросами промышленных установок, загрязняющих атмосферу. Снижения негативного воздействия работы теплоэнергетических установок на окружающую среду и расхода топлива можно добиться путем совершенствования его сжигания. Поэтому задачи контроля, диагностики и оптимизации процессов горения (ПГ), применяемых для выработки тепловой энергии, приобретают особую актуальность.

С позиции экологических и технико-экономических показателей промышленных объектов одним из самых эффективных видов топлив является природный газ, безопасное и высокоэффективное сжигание которого немислимо без применения средств контроля. Это обусловлено тем, что при избытке воздуха в результате горения выделяется большое количество оксида азота, который в атмосфере окисляется до диоксида азота, а при его недостатке происходит неполное сгорание топлива, что приводит к его перерасходу и образованию токсичных веществ: монооксида углерода, бенз(а)пирена и др.

Зачастую при определении коэффициента избытка воздуха, т.е. соотношения газ-воздух, работа систем контроля горения газообразных углеводородов основывается на измерении косвенных параметров: температуры, расхода газа и воздуха, давления, цветового изображения пламени, концентрации химических элементов, например, O_2 , CO , и CO_2 в составе дымовых газов, и т.п. Такие измерения характеризуются большой инерционностью, не позволяют определять динамику и состояние процессов, происходящих непосредственно в пламени, а учитывают лишь некоторые его интегральные характеристики, в частности, при контроле по составу уходящих газов.

Проведение контроля на основе измерения косвенных параметров, характеризующих состояние процесса горения по второстепенным признакам, приводит к снижению его достоверности, и как следствие, к увеличению удельного расхода топлива и выбросов вредных веществ в атмосферу. В случае контроля и оптимизации ПГ под достоверностью контроля подразумевается степень объективного соответствия результатов контроля действительному состоянию протекаемого ПГ. Таким образом, достоверность является показателем контроля ПГ, связанным с вероятностями принятия безошибочных решений о его состоянии, т.е. штатном или нештатном протекании.

Исходя из вышесказанного, возникает противоречие между требованиями к оптимизации режимов горения газообразного углеводородного топлива, в том числе с позиций экологической и техногенной безопасности, и несовершенством существующих промышленных систем и методов контроля процессов горения. Отсюда вытекает необходимость разработки новых методов, приборов и методик контроля процессов горения газообразных углеводородов, а также создания на их основе систем контроля, способных с более высокой достоверностью по сравнению с существующим контрольно-измерительным оборудованием выполнять контроль в режиме реального времени.

Наиболее полную и достоверную информацию, характеризующую в режиме реального времени состояние контролируемого процесса горения, можно получить, анализируя спектральную характеристику оптического излучения, испускаемого непосредственно очагом горения. Методы оптической спектроскопии можно отнести к числу наиболее чувствительных и информативных, поэтому проведение на их основе контроля ПГ газообразных углеводородов видится наиболее перспективным, в том числе с позиции повышения его достоверности. При этом, получаемая спектроскопическая

информация представляет собой множество спектроскопических информационных параметров (СИП) в виде интенсивностей отдельно стоящих спектральных линий или участков спектра излучения, испускаемого пламенем.

В данной работе вопрос контроля процессов горения газообразных углеводородов рассматривается в рамках разработанного универсального спектроскопического метода контроля, основанного на регистрации, анализе и сопоставлении множества СИП, полученных как при раздельном, так и при комбинированном применении различных методов оптической спектроскопии, и позволяющего проводить контроль ПГ с повышенной достоверностью по сравнению с существующими методами контроля.

Предлагаемые научные исследования являются развитием теории и практики оптической спектроскопии, в частности применительно к задачам контроля процессов горения газообразных углеводородов с целью повышения экологической безопасности окружающей среды. А построение автоматизированных систем контроля и диагностики процессов горения на базе методов оптической спектроскопии является новым направлением в автоматизации объектов теплоэнергетической отрасли, что подчеркивает особую актуальность проводимых в работе исследований.

Степень разработанности темы исследований. Диссертационное исследование выполнено на основе систематизированного обобщения вопроса контроля и диагностики горения газообразных углеводородов в рамках разработанного универсального спектроскопического метода контроля. При этом отдельным направлениям, относящимся к рассматриваемой научной проблеме, посвящено большое количество научных работ отечественных и зарубежных ученых.

Вопросам контроля и оптимизации процессов горения, в том числе применяемых для выработки тепловой энергии, посвящены труды Кнорре Г.Ф., Фаворского О.Н., Палеева И.И., Соколова Б.А., Тверского Ю.С., Розенфельда Э.И., Плетнева Г.П., Авдеева А.А., Яворского И. А., Юринского В.Т., French D., Miller V.G., Bailer P., и других исследователей, как отечественных, так и зарубежных.

Вопросам теоретических и экспериментальных исследований процессов горения, в том числе газообразных углеводородов, посвящены труды Похила П.Ф., Мальцева В.М., Гейдона А., Зельдовича Я.Б., Корольченко, А.Я., Гиля В. В.

Труды Тарасова К.И., Раутиана С.Г., Лебедевой В.В., Малышева В.И., Зайделя А.Н., Островского Ю.И., Островской Г.В., Скокова И.В., Павлычевой Н.К., Пейсахсона И.В., Hebling J., Marton Z., Parson, W. внесли существенный вклад в развитие оптического приборостроения и методов оптической спектроскопии в частности.

Кроме того, имеется незначительное количество работ, посвященных применению спектроскопических методов для диагностики процессов горения, в том числе газообразных углеводородов. В основном эти работы опубликованы зарубежными авторами Parameswaran T., Phuoc T.X., Stavropoulos P., среди отечественных можно выделить работы Борзова С.М. и Анцыгина В.Д.

По достоинству оценивая высокую значимость трудов перечисленных ученых и отмечая наличие разработанных методов решения отдельных научных теоретических и прикладных задач можно сделать вывод о том, что существует **противоречие** между **требованиями к снижению негативного воздействия теплоэнергетических объектов на окружающую среду**, в первую очередь за счет **оптимизации режимов горения**, и **несовершенством существующих методов и средств контроля процессов горения газообразных углеводородов, обусловленным недостаточной достоверностью проводимого контроля.**

Разрешение этого противоречия может быть достигнуто путем применения методов оптической спектроскопии. Проведение контроля на их основе позволяет существенно повысить его достоверность за счет того, что решение о состоянии ПГ принимается на основе измерения первичного параметра – спектральной характеристики излучения, испускаемого непосредственно очагом горения. Это требует разработки

универсального спектроскопического метода контроля, позволяющего его проводить различными методами оптической спектроскопии с большей достоверностью по сравнению с существующими методами и средствами контроля. Для этого требуется не только хорошо разработанный с позиции применения оптической спектроскопии подход к проведению контроля, но и теоретическое описание применяемых спектральных приборов. Существующая теория оптических спектральных приборов спектральное разложение оптического излучения объясняет на базе принципов геометрической оптики, при этом связь вход-выход спектрального прибора устанавливается в рамках классического подхода, не позволяющего выполнить последовательный анализ преобразования излучения от входа спектрального прибора до результата регистрации спектра. Однако, применение спектральных приборов для контроля процессов горения, протекание которых сопровождается высокой температурой окружающей среды, требует раздельного описания его функциональных узлов, в том числе формирующей оптики и волоконно-оптической линии передачи (ВОСП), для учета негативного воздействия окружающей среды на результат спектрального анализа.

В соответствии с вышеизложенным возникает **важная научно-техническая проблема оптимизации процесса горения газообразного углеводородного топлива, в том числе за счет обеспечения полноты его сгорания, путем разработки и внедрения спектроскопического метода контроля, характеризующегося высокой достоверностью** по отношению к существующим методам и **позволяющего** создавать и внедрять системы контроля процессов горения газообразных углеводородов с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

Обозначенное **противоречие**, представляющее собой научно-техническую проблему хозяйственного значения, предопределило выбор темы диссертационной работы, постановку цели и задач исследования.

При этом **объектом исследования** является процесс горения газообразных углеводородов, в том числе применяемых для выработки тепловой энергии, а **предметом исследования** – спектроскопические параметры, характеризующие процесс горения газообразных углеводородов, и средства оптической спектроскопии.

Цель и задачи работы. Целью настоящей работы является разработка универсального спектроскопического метода контроля процессов горения газообразных углеводородов, обеспечивающего повышение достоверности проводимого контроля, а также позволяющего создавать и внедрять системы контроля с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка математических моделей оптических спектральных приборов, применяемых для контроля процессов горения.
2. Разработка универсального спектроскопического метода контроля процессов горения газообразных углеводородов.
3. Техническая реализация приборов контроля на базе оптических спектральных приборов с применением волоконно-оптической системы передачи анализируемых сигналов.
4. Исследование технических и эксплуатационных характеристик разрабатываемых спектральных приборов контроля, в том числе с учетом искажений и энергетических потерь передаваемого анализируемого сигнала по оптическому волокну.
5. Экспериментальные исследования зависимости спектроскопических параметров, характеризующих контролируемые процессы горения газообразных углеводородов, от режимов горения методами и средствами эмиссионной оптической спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (ЛИЭС).
6. Разработка методики подготовки и проведения контроля процессов горения методами и средствами оптической спектроскопии, обеспечивающей требуемую достоверность контроля.

7. Проведение экспериментальной отработки методики подготовки и проведения контроля процесса горения газообразных углеводородов разработанным спектроскопическим методом контроля.

Методы исследования. Вопрос контроля ПГ рассматривался в рамках теории вероятностей и математической статистики. Теоретическое описание процесса анализа спектра сигнала опирается на сформулированные в теории сигналов и теории спектрального анализа понятия спектральных функций, их преобразований в рамках теории линейных систем и теории информации. В силу специфики спектроскопического метода контроля к его теоретическому описанию были применены методы матричного исчисления, теории многомерных линейных систем и вариационного исчисления. Так как в спектральных приборах контроля для передачи сигнала применяется оптическое волокно, вопросы, связанные с возникающими потерями и искажениями передаваемых по нему сигналов, рассмотрены в рамках методов теории и техники волоконно-оптической связи и волновой оптики. Для установления зависимости СИП, характеризующих протекание процессов горения, от режимов горения применяются прикладные методы эмиссионной оптической спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии. Представление и обработка полученных математических зависимостей и результатов расчета потребовало применение методов компьютерного моделирования с применением систем MathCad и MatLab. В ходе экспериментальных исследований использованы статистические методы обработки полученных результатов.

Научная новизна работы определяется следующим:

1. Предложено **новое** математическое описание спектрального прибора как информационной измерительной системы на основе математического аппарата (теория линейных систем, теории сигналов и методы матричного анализа), который в оптической спектроскопии раньше не применялся. Разработаны математические модели дифракционного спектрального прибора и многоканального оптического спектрометра, позволяющие установить связь вход-выход спектральных приборов для комплексных и энергетических спектров оптического излучения. **В отличие** от традиционного описания спектральных приборов, это позволило выполнить последовательный анализ прохождения анализируемого сигнала через все функциональные узлы спектрального прибора.

2. **Научная новизна** разработанного универсального спектроскопического метода контроля процессов горения состоит в том, что он основан на регистрации, анализе и сопоставлении множества спектроскопических информационных параметров, полученных как при раздельном, так и при комбинированном применении различных методов оптической спектроскопии, **отличающийся** тем, что описывает процедуру контроля, технические средства и спектроскопические параметры в рамках единого математического аппарата, и **позволяет** не только повысить достоверность проводимого контроля по сравнению с существующими методами, но и сформировать требования к минимально необходимым характеристикам применяемых для спектроскопического контроля приборов, обеспечивающих заданную достоверность, а также разработать методику подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения.

3. Предложена техническая реализация приборов контроля на базе разработанных оптических спектральных приборов с применением волоконно-оптической системы передачи анализируемых сигналов, **отличающихся** новизной и улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с известными прототипами. **Новизна** применяемых технических решений подтверждена патентами РФ.

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.

5. **Впервые** разработана методика подготовки и проведения спектроскопического контроля, **позволяющая** проводить контроль процессов горения газообразных углеводородов с требуемой достоверностью при применении технических средств с минимально необходимыми характеристиками.

Степень обоснованности и достоверности. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов, сформулированных и полученных в диссертационной работе, подтверждается их непротиворечивостью ранее известным положениям, корректным использованием современных аналитических и расчетных методов, применением в процессе исследований адекватных физических и математических моделей, удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментально полученных результатов, а также практической реализацией на предприятиях энергетической и химической промышленности.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость обусловлена: 1. Разработкой нового математического описания спектрального прибора как информационной измерительной системы и математических моделей спектральных приборов, что в отличие от традиционного описания спектральных приборов позволяет выполнить последовательный анализ прохождения анализируемого оптического сигнала через все функциональные узлы прибора (от его входа до результата регистрации спектра) и учесть влияние его конструктивных особенностей и внешних условий на результат спектрального анализа.

2. Теоретическим описанием процедуры контроля, технических средств и СИП, характеризующих контролируемый процесс горения, выполненным в рамках разработанного универсального спектроскопического метода контроля процессов горения на базе единого математического аппарата, что позволяет, 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.

Практическая значимость диссертации состоит в следующем: 1. Разработанный универсальный спектроскопический метод контроля позволяет проводить контроль процессов горения газообразных углеводородов с повышенной достоверностью по сравнению с существующими методами контроля, что приводит к снижению расходов топлива до 3%. Повышение достоверности проводимого контроля достигается тем, что в отличие от традиционных методов спектроскопический выполняет контроль на основе измерения первичного параметра, характеризующего состояние процесса, – спектральной характеристики излучения, испускаемого непосредственно очагом горения. Кроме того, одновременное применение разных методов спектроскопии для контроля одного и того же процесса, позволяет не только повысить его достоверность, но и дает возможность спрогнозировать направление изменения соотношения газ-воздух по взаимному изменению интенсивностей контролируемых параметров относительно друг друга, что повышает оперативность проводимого контроля.

2. Разработанные оптические спектральные приборы с применением волоконно-оптической системы передачи анализируемых сигналов позволяют создавать приборы контроля с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с прототипами. Благодаря особенностям принципа действия многоканального оптического спектрометра, для передачи оптического излучения используется жгут волокон, что повышает его чувствительность более чем на 15% относительно спектрометров других типов, а повышение его разрешающей способности может быть достигнуто путем применения спектрально-селективного элемента. В дифракционном спектральном приборе повышение разрешающей способности достигается за счет применения дифракционной решетки нового типа, что позволяет повысить его

разрешающую способность более чем на 20% по сравнению с традиционной решеткой. Применение при проектировании спектральных приборов контроля разработанной методики коррекции энергетических потерь и искажений анализируемых сигналов, возникающих при передаче их по оптическому волокну, позволяет улучшить технические и эксплуатационные характеристики разрабатываемых приборов в отличие от прототипов.

3. Разработанная методика подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения позволяет проводить контроль с требуемой достоверностью при применении технических средств с минимально необходимыми характеристиками.

4. На основе установленной зависимости от режимов горения спектроскопических параметров в спектре излучения пламени газообразных углеводородов может быть организована процедура контроля методами эмиссионной спектроскопии или лазерно-искровой спектрометрии любых объектов, в технологических процессах которых применяется сжигание газообразных углеводородов, в том числе природного газа.

Результаты работы могут быть востребованы во всех отраслях промышленности, где возникает необходимость контроля и оптимизации режимов горения газообразных углеводородов, в том числе применяемых для выработки тепловой энергии.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическое описание оптического спектрального прибора как информационной измерительной системы.

2. Универсальный спектроскопический метод контроля процессов горения.

3. Техническая реализация приборов контроля на базе оптических спектральных приборов с применением волоконно-оптической системы передачи сигналов с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

4. Экспериментальные исследования зависимости от режимов горения спектроскопических информационных параметров в спектре излучения контролируемого процесса горения газообразных углеводородов.

5. Методика подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения газообразных углеводородов и ее экспериментальная обработка.

Тематика диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 2.2.8 - Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки): п. 1 «Научное обоснование новых и совершенствование существующих методов, аппаратных средств и технологий контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующее повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»; п. 3 «Разработка, внедрение, испытания методов и приборов контроля, диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды, способствующих повышению надёжности изделий и экологической безопасности окружающей среды»; п. 4 «Разработка методического, математического, программного, технического, приборного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования материалов, изделий, веществ и природной среды, экологического мониторинга природных и техногенных объектов, способствующих увеличению эксплуатационного ресурса изделий и повышению экологической безопасности окружающей среды»; п. 7 «Автоматизация технологий, приборов контроля и средств диагностирования, способствующая снижению трудоёмкости, увеличению оперативности и достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, повышению уровня экологической безопасности окружающей среды».

Личный вклад автора. Основная идея работы, постановка задач исследований, разработка применяемого теоретического подхода, постановка, планирование и интерпретация результатов экспериментальных исследований выполнены автором лично. Результаты и выводы, содержащиеся в диссертации и выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Все экспериментальные исследования проведены при его участии и под непосредственным его руководством. Во всех работах, которые выполнены

в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении методов их решения, получении и анализе результатов.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы получены при выполнении НИР под руководством и при участии автора: 1. РФФИ НИР № 115020310156 на тему «Акустооптические перестраиваемые фильтры для лазерных информационных и телекоммуникационных систем» (2015-2017 гг.), **соисполнитель**. 2. РФФИ НИР № АААА-Б17-217062020050-5 на тему «Теоретические и экспериментальные основы создания спектрально-селективной аппаратуры оптического диапазона для контроля объектов» (2015-2016 гг.), **руководитель**. 3. РФФИ НИР № АААА-А16-116020960154-1 на тему «Методы теории сигналов и теории линейных систем в задачах спектрально-корреляционной обработки сигналов оптического диапазона» (2016-2018 гг.), **соисполнитель**. 4. РФФИ НИР № АААА-А17-117041110152-4 на тему «Разработка научно-технических основ создания приборов контроля процессов горения на базе методов бесконтактной оптической спектрометрии» (2017-2019 гг.), **руководитель**. 5. РФФИ НИР № АААА-А17-117041010189-1 на тему «Сопоставление и оценка эффективности и качества спектральных приборов при решении спектроскопических задач в экстремальных условиях» (2017 - 2019 гг.), **соисполнитель**. 6. Грант Президента РФ НИР № МК-5894.2018.8 на тему «Исследование и разработка методов и средств бесконтактной оптической спектрометрии для задач контроля процессов горения» (2018-2019 гг.), **руководитель**. 7. РФФИ НИР № АААА-А19-119091290050-1 на тему «Методы и аппаратура бесконтактной оптической спектроскопии в задачах контроля физических и технологических процессов» (2019 - 2022 гг.), **руководитель**. 8. РФФИ НИР № АААА-А20-120011590133-2 на тему «Разработка научно-технических основ формирования сигналов ошибки на базе методов бесконтактной оптической спектроскопии в системах многоальтернативного автоматического управления» (2020-2022 гг.), **руководитель**.

Результаты диссертационной работы апробированы и использованы следующими предприятиями: ООО «СЕВЗАПТЕХНИКА», АО «КНАУФ ПЕТРОБОРД», ООО «Теплоэнергосервис ДКМ», ООО «ПГ «Фосфорит», АО «НИИ ТМ», что подтверждено актами внедрения. Результаты исследования также внедрены в образовательный процесс ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации были представлены и обсуждены на IX международной конференции молодых ученых «Оптика – 2015» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.); XVIII, XIX, XX, XXI, XXII, XXIII и XXIV международных конференциях «Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems» (г. Санкт-Петербург, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.); на научной сессии ГУАП (Санкт-Петербург, 2016 и 2018 гг.); на 5 International School and Conference “Saint Petersburg OPEN 2018” on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); на IV Международной научной конференции «Информационные технологии и технологии коммуникаций. Современные достижения» (г. Астрахань, 2020 г.); на II Международной конференции “Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации (г. Красноярск, 2020 г., дист. формат); на международных научных симпозиумах «SPIE Optics + Photonics» (г. Сан-Диего, США, 2015 г.); SPIE Photonics Europe (г. Страсбург, Франция, 2018 и 2020 гг.); SPIE Optical Metrology (г. Мюнхен, Германия, 2018 г.); SPIE Optics + Optoelectronics (дист. формат, 2021 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 64 печатных работах, из них: 1 монография, 15 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 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.

По теме исследования получено 3 патента РФ и 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

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

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, указаны методы исследования, научная новизна работы и практическая и теоретическая значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и содержатся сведения об апробации работы.

В первой главе выполнен обзор задач, методов и технических средств контроля процессов горения в энергетике. Отмечено, что повысить эффективность выработки тепловой энергии и снизить негативное воздействие работы установок на окружающую среду можно путем контроля процесса сжигания топлива. При соблюдении оптимального режима горения количество вредных выбросов может быть снижено до 40%, а расход топлива уменьшен до 6%, что приводит к снижению себестоимости тепловой энергии.

В большинстве случаев режимы горения оптимизируются периодически, а коэффициент избытка воздуха определяется путем измерения косвенных параметров: температуры, давления, состава уходящих газов и т.п. Такие методы контроля являются несовершенными, что в итоге приводит к снижению достоверности и оперативности выполняемого контроля ПГ, увеличивает удельный расход топлива и выбросы вредных веществ в атмосферу. Результаты сравнительного анализа традиционных способов контроля процессов горения представлены в таблице 1.

Проведенный обзор показал, что методы спектроскопии является наиболее чувствительными и информативными и могут быть успешно применены для контроля процессов горения газообразных углеводородов с целью повышения его достоверности за счет того, что решение о состоянии процесса горения принимается на основе измерения первичного параметра – спектральной характеристики пламени.

Анализ научных работ по применению методов спектроскопии для диагностики процессов горения, показал, что они имеют узкоспециализированный прикладной характер и рассматривают только некоторые вопросы, связанные с измерением отдельных наиболее интенсивных спектральных линий или полос. При этом сведений о существовании единого спектроскопического метода контроля ПГ и тем более сведений, рассматривающих применение методов оптической спектроскопии именно с позиции процедуры контроля не обнаружено. А это имеет чрезвычайно важное значение, поскольку под контролем понимается не только измерение контролируемого параметра, но и обработка результатов измерений, правильная их интерпретация, разработка методики контроля, выбор применяемого метода и прибора. Кроме того, специфика протекания процессов горения – высокая температура и агрессивная окружающая среда – требует применения спектрометров с волоконно-оптическим зондом для передачи анализируемого излучения. Тщательный анализ научных статей и спецификаций таких приборов, а также опыт работы с ними показали, что данные приборы обладают низкими техническими характеристиками, в первую очередь из-за применения оптического волокна. Отсюда вытекает потребность создания спектральных приборов контроля, отличающихся улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с известными аналогами, а также разработки универсального спектроскопического метода контроля ПГ, позволяющего проводить его различными методами оптической спектроскопии с большей достоверностью по сравнению с существующими методами контроля.

Таблица 1 – Результаты сравнительного анализа традиционных методов контроля

№	Контр. пар-р	Приборы и методы контроля	Недостатки методов	
1	Температура	Термометры и пирометры	<ul style="list-style-type: none"> • выполняют локальное измерение; • не дают представление о динамике процесса горения; • обладают высокой инерционностью; • не дают точной информации о коэффициенте избытка воздуха. 	
2	Давление	Манометры		
3	Разряжение	Тягомеры и напоромеры		
4	Контроль состава отходящих газов с помощью газоанализаторов			
№	Контр. пар-р	Методы контроля	Недостатки методов	Общие недостатки метода контроля
4.1	Содержание O ₂	Электрохимический метод	<ul style="list-style-type: none"> • нестабильность характеристик и дрейф показаний; • значительное влияние окружающей среды; • низкое быстродействие; • требует постоянного удаления загрязнений. 	<ul style="list-style-type: none"> • определяет концентрацию O₂ в точке измерения и не дает объективной информации о полноте сгорания во всей камере; • наличие CO в продуктах сгорания искажает результат измерения кислорода; • при снижении нагрузки котла поддержание постоянной концентрации O₂ за котлом неизбежно приводит к химнедожогу, особенно при использовании топлива с переменным составом.
		Каталитический метод	<ul style="list-style-type: none"> • низкая прочность; • снижается чувствительность (из-за ингибирования катализатора); • короткий срок службы (не более 3 лет). 	
		Метод лазерной абсорбционной спектроскопии	<ul style="list-style-type: none"> • в большинстве случаев требуется дополнительный забор пробы; • недостаточное отношение сигнал/шум при регистрации прошедшего через дымовую среду опорного излучения; • наличие в среде аэрозолей и завихрений приводит к заметным флуктуациям принимаемого опорного излучения, что снижает чувствительность; • требует постоянного удаления загрязнений оптических поверхностей. 	
4.2	Содержание CO	Метод лазерной абсорбционной спектроскопии	<ul style="list-style-type: none"> • определяет концентрацию CO в точке измерения и не дает объективной информации о полноте сгорания во всей камере; • концентрация CO объективно позволяет судить уже о случившемся процессе химического недожога. При постоянном (зафиксированном) соотношении «топливо-воздух» концентрация CO в продуктах сгорания может отличаться на порядок в зависимости от турбулентности потоков и других факторов влияния 	
4.3	Содержание SO _x и NO _x	Метод лазерной абсорбционной спектроскопии	<ul style="list-style-type: none"> • не дает информации о коэффициенте избытка воздуха, только определяется содержание вредных веществ. 	

Во второй главе дано математическое описание спектрального прибора как информационной измерительной системы. Основной акцент был сделан на определение связи между спектром истинным (математическим) и физическим, т.е. получаемым в результате измерения прибором. При этом исчерпывающей характеристикой прибора является аппаратная функция (АФ), а его общая функциональная схема как информационной измерительной системы приведена на рисунке 1, где ФО – формирующая оптика; ВОСП – волоконно-оптическая система передачи; БА – блок анализа; ДС – детектирующая система; БОСИ – блок обработки спектроскопической информации.

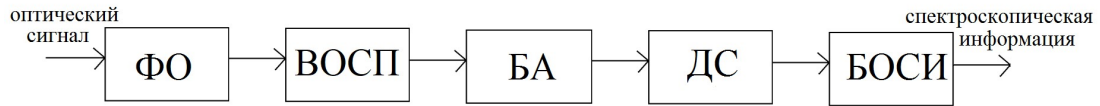


Рисунок 1 – Функциональная схема спектрального прибора

Формирующая оптика выполняет роль формирователя волнового оптического пучка, ВОСП применяется для передачи сигнала на заданное расстояние, что особенно актуально в случае контроля процессов горения, протекающих в неблагоприятных условиях, в блоке анализа выполняется спектральное разложение анализируемого излучения (в зависимости от типа прибора – представляет собой диспергирующую систему, фильтрующую систему и т.п.).

Было предложено спектральный прибор разделить на две части: формирующая оптика, волоконно-оптическая система и блок анализа образуют линейную подсистему, а детектирующая система и блок обработки спектроскопической информации – нелинейную подсистему. Тогда процесс анализа спектра оптических сигналов выполняется в два этапа: сначала вычисляется комплексный спектр анализируемого сигнала с помощью линейной части прибора, после чего он обрабатывается нелинейной подсистемой с целью получения энергетического спектра, который является результатом спектрального измерения в оптическом диапазоне и отражает состояние контролируемого процесса горения.

Было определено общее соотношение вход-выход линейной части спектрального прибора для комплексного спектра.

$$S_a(\omega, t, x, y, T) = \iiint_{\Omega X Y T} A(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T', t) S_0(\omega') d\omega' dx' dy' dT', \quad (1)$$

где $S_a(\cdot)$ – комплексный спектр, полученный спектральным прибором в результате измерения (аппаратурный спектр); $S_0(\cdot)$ – комплексный спектр анализируемого излучения; $A(\cdot)$ – полная комплексная АФ, которая была определена как:

$$A(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T', t) = \iiint_{X Y T} A_{\text{ФО}}(x, x', y, y') A_{\text{ВОСП}}(T, T', \omega, \omega') A_{\text{БА}}(\omega, \omega', t) dx' dy' dT', \quad (2)$$

где $A_{\text{ФО}}(x, x', y, y')$ – АФ формирующей оптики; $A_{\text{ВОСП}}(T, T', \omega, \omega')$ – АФ волокна; $A_{\text{БА}}(\omega, \omega', t)$ – АФ блока анализа, Ω – полоса анализируемых частот; X, Y – пределы интегрирования, определяемые конструкцией формирующей оптики; T – диапазон рабочих температур (значительной температурной зависимостью обладает ВОСП).

Входящие в соотношение (1) пространственные, температурные и частотные переменные позволяют отдельно учитывать влияние функциональных узлов прибора на его технические характеристики. Пространственные переменные позволяют учесть влияние несовершенства оптических элементов прибора (ширины щели или апертуры выходного торца оптического волокна), температурная переменная – температурную зависимость энергетической частотной характеристики волокна при применении его в условиях высоких температур, частотная переменная – частотную зависимость волокна и блока анализа.

В диссертации приводятся разработанные математические модели двух типов спектральных приборов: многоканального оптического спектрометра и дифракционного спектрального прибора.

В случае многоканального спектрометра, где спектральное разложение выполняется в n блоках узкополосной фильтрации, математическая модель, позволяющая определить связь вход-выход линейной части прибора для комплексного аппаратурного спектра, имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} S_{a1}(\omega_1, t, x, y, T) \\ S_{a2}(\omega_2, t, x, y, T) \\ \vdots \\ S_{ak}(\omega_k, t, x, y, T) \\ \vdots \\ S_{an}(\omega_n, t, x, y, T) \end{bmatrix} = \int \int \int \int_{\Omega X Y T} \begin{bmatrix} A_{11}(\cdot) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{22}(\cdot) & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{kk}(\cdot) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & A_{nn}(\cdot) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S(\omega') \\ S(\omega') \\ \vdots \\ S(\omega') \\ \vdots \\ S(\omega') \end{bmatrix} d\omega' dx' dy' dT', \quad (3)$$

где $\|S_{ak}(\omega_k, t, x, y, T)\|$ – матрица-столбец, описывающая отсчетные значения комплексного спектра анализируемого излучения, получаемые в каждом канале анализа; $\|S(\omega')\|$ – матрица-столбец, описывающая комплексный спектр на входе прибора; $A_{kk}(\cdot) = A_{kk}(\omega_k, \omega', x, x', y, y', T, T', t)$ – полная комплексная АФ k -го канала спектрометра.

Математическая модель для комплексного аппаратурного спектра линейной части дифракционного спектрального прибора была определена как:

$$S_a(\omega_x, t, x, y, T) = M \int \int \int \int_{\Omega X Y T} A_{\phi O}(x, x', y, y') A_{\text{BOC}}(T, T', \omega, \omega') S(\omega') \exp(i\omega't) \frac{\sin[(\omega(x) - \omega') \frac{t_a}{2}]}{(\omega(x) - \omega') \frac{t_a}{2}} d\omega' dx' dy' dT', \quad (4)$$

где M – коэффициент пропорциональности; $t_a = Lx/2c_0F$ – "время" анализа; L – апертура решетки; x – пространственная координата; c_0 – скорость света; F – фокусное расстояние линзы.

Соотношения (1), (3) и (4) описывают комплексный аппаратурный спектр на выходе линейной подсистемы спектрального прибора, т.е. на чувствительной поверхности фотодетектора, который является входом нелинейной подсистемы. Поскольку в оптическом диапазоне результатом спектрального измерения является энергетический спектр, получаемый комплексный спектр требует дальнейшей обработки детектирующей системой и блоком обработки спектроскопической информации.

Учитывая значительную инерционность фотоприемника по отношению к периоду оптических колебаний, соотношение, описывающее энергетический спектр оптического излучения, было определено как:

$$G_a(\omega, x, y, T) = \int_{\frac{t_R}{2}}^{\frac{t_R}{2}} i(t) dt = P(\omega) \int_{\frac{t_R}{2}}^{\frac{t_R}{2}} |S_a(\omega, t, x, y, T)|^2 dt, \quad (5)$$

где $i(t)$ – ток с выхода фотоприемника; $P(\omega)$ – коэффициент, учитывающий спектральную чувствительность фотоприемника; t_R – время интегрирования.

В результате дальнейшего математического преобразования соотношения (5) энергетический спектр был определен как:

$$\begin{aligned} G_a(\omega, x, y, T) &= \int_{-\infty}^{\infty} |A(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T')|^2 G_0(\omega') d\omega' dx' dy' dT' = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T') G_0(\omega') d\omega' dx' dy' dT' \end{aligned}, \quad (6)$$

где $G_a(\omega, x, y, T)$ – распределение энергии по частотам на выходе спектрального прибора, т.е. аппаратный энергетический спектр; $W(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T') = |A(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T')|^2$ – энергетическая АФ спектрометра; $G_0(\omega')$ – истинный энергетический спектр излучения.

В результате спектрального анализа с выхода прибора получают не истинное значение энергетического спектра анализируемого излучения, а некоторую его оценку, зависящую в том числе и от погрешности измерений.

Было получено выражение, определяющее оценку энергетического спектра излучения при анализе многоканальным оптическим спектрометром:

$$\begin{bmatrix} \bar{G}_{a1}(\omega_1, x, y, T) \\ \bar{G}_{a2}(\omega_2, x, y, T) \\ \vdots \\ \bar{G}_{ak}(\omega_k, x, y, T) \\ \vdots \\ \bar{G}_{an}(\omega_n, x, y, T) \end{bmatrix} = \int_{\Omega} \int_X \int_Y \int_T \begin{bmatrix} W_{11}(\cdot) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_{22}(\cdot) & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_{kk}(\cdot) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & W_{nn}(\cdot) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G(\omega') \\ G(\omega') \\ \vdots \\ G(\omega') \\ \vdots \\ G(\omega') \end{bmatrix} d\omega' dx' dy' dT', \quad (7)$$

где $\|\bar{G}_{ak}(\omega_k, x, y, T)\|$ – матрица-столбец, описывающая отсчетные значения оценки энергетического спектра излучения; $\|G(\omega')\|$ – матрица-столбец, описывающая энергетический спектр излучения на входе прибора; $W_{kk}(\cdot) = W(\omega_k, \omega', x, x', y, y', T, T') = |A(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T')|^2$ – полная энергетическая АФ для k -го канала многоканального спектрометра.

Получено выражение, определяющее оценку энергетического спектра излучения при анализе дифракционным спектральным прибором:

$$\begin{aligned} \bar{G}_a(\omega, x, y, T) &= C_R \int_{\omega_0 - \Delta\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega_0} \int_{x - \Delta x}^{x + \Delta x} \int_{y - \Delta y}^{y + \Delta y} \int_{T - \Delta T}^{T + \Delta T} |A_{\text{фо}}(x, x', y, y')|^2 |A_{\text{воч}}(T, T', \omega, \omega')| \frac{\sin^2[(\omega - \omega')t_r / 2]}{[(\omega - \omega')t_r / 2]^2} G_0(\omega') d\omega' dx' dy' dT' = \\ &= C_R \int_{\omega_0 - \Delta\omega_0}^{\omega_0 + \Delta\omega_0} \int_{x - \Delta x}^{x + \Delta x} \int_{y - \Delta y}^{y + \Delta y} \int_{T - \Delta T}^{T + \Delta T} W(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T') G_0(\omega') d\omega' dx' dy' dT' \end{aligned} \quad (8)$$

где $G_0(\omega) = |S_0(\omega)|^2$ – энергетический спектр сигнала за время t_r ; C_R – постоянная величина.

Соотношения (7) и (8) представляют собой математические модели многоканального оптического спектрометра и дифракционного спектрального прибора для энергетических спектров анализируемого излучения и отражают результат его однократного анализа на промежутке t , после которого результаты сбрасываются, и начинается следующий цикл измерения.

Научная новизна и теоретическая значимость предложенного математического описания спектрального прибора как информационной измерительной системы и математических моделей дифракционного спектрального прибора и многоканального оптического спектрометра состоят в том, что **в отличие** от традиционного описания спектральных приборов **они разработаны** на основе математического аппарата (теории линейных систем, теории сигналов и методов матричного анализа), который в оптической спектроскопии раньше не применялся, и **позволяют** выполнить последовательный анализ прохождения анализируемого оптического сигнала через все функциональные узлы прибора (от его входа до результата регистрации спектра) и учесть влияние его конструктивных особенностей и внешних условий на результат спектрального анализа.

В третьей главе предложен универсальный спектроскопический метод контроля процессов горения газообразных углеводородов. **Научная новизна** разработанного метода состоит в том, что он основан на регистрации, анализе и сопоставлении множества СИП, полученных как при раздельном, так и при комбинированном применении различных методов оптической спектроскопии, **отличается** тем, что описывает процедуру контроля, технические средства и спектроскопические параметры в рамках единого математического аппарата, и **позволяет** существенно повысить достоверность

проводимого контроля за счет того, что решение о состоянии процесса горения принимается на основе измерения первичного параметра – спектральной характеристики излучения, испускаемого непосредственно очагом горения.

Для измерительных систем показателем достоверности является погрешность измерений, а для систем контроля достоверность принимаемых решений характеризуется вероятностями ошибок 1-го и 2-го рода, поэтому в рамках разработанного спектроскопического метода контроля была математически обоснована их связь с погрешностями спектральных измерений. Было показано, что при описании погрешностей критерием, определяющим точность измерения прибором при наличии стационарных случайных воздействий на его входе, является среднеквадратическая погрешность, которая была определена как:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}^2 = & \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W(0) - W(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T')|^2 G_x(\omega) d\omega + \\ & + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [|W_m(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T')|^2 G_m(\omega) + G_n(\omega)] d\omega \end{aligned} \quad (9)$$

где $G_x(\omega)$ – энергетический спектр анализируемого излучения; $G_m(\omega)$ – энергетический спектр случайной помехи; $G_n(\omega)$ – энергетический спектр случайных ошибок, вносимых прибором; $W(0)$ – энергетическая АФ идеального спектрального прибора; $W_m(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T')$ – энергетическая АФ прибора по отношению к помехе.

Первый интеграл в правой части (9) определяет систематическую погрешность спектрального прибор контроля, второй интеграл - случайную погрешность.

Была рассмотрена зависимость трех составляющих суммарной среднеквадратической погрешности $\bar{\varepsilon}_\Sigma^2$ дифракционного спектрометра OceanOptics USB2000: $\bar{\varepsilon}_\alpha^2$ (систематическая погрешность оптической части спектрометра), $\bar{\varepsilon}_T^2$ (систематическая погрешность приёмно-регистрающей части) и $\bar{\varepsilon}_{ш}^2$ (случайная погрешность) от его параметров (разрешающей способности s и времени регистрации $T_{РЕГ}$) при измерении одиночной спектральной линии Na. На рисунке 2 приведены отнормированные результаты расчета.

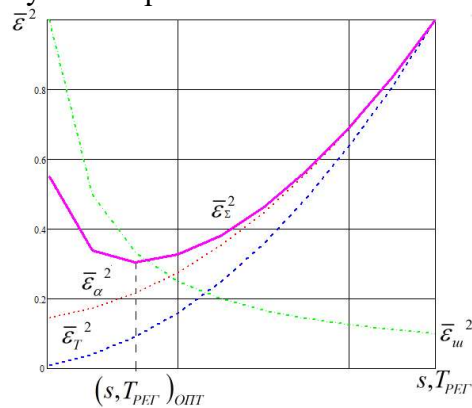
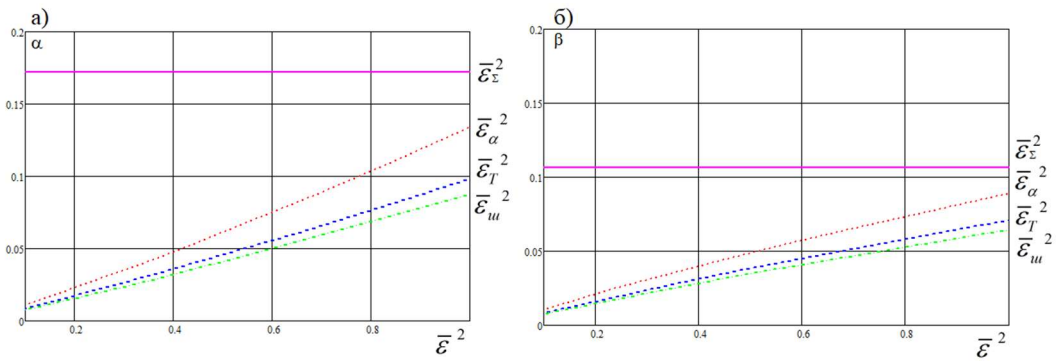


Рисунок 2 – Зависимость $\bar{\varepsilon}^2$ от параметров спектрометра

Уменьшая случайные погрешности за счет увеличения времени регистрации, систематические погрешности увеличиваются и наоборот. Причем различные составляющие вносят разный вклад в общую среднеквадратическую погрешность, поэтому при выборе спектрометра рационально определять оптимальные параметры $(s, T_{РЕГ})_{ОПТ}$, соответствующие минимуму суммарной среднеквадратической погрешности.

Было проанализировано влияние составляющих среднеквадратической погрешности спектрометра на ошибки контроля 1-го и 2-го рода путем компьютерного моделирования, результаты приведены на рисунке 3.



а) - вероятность ошибки 1-го рода; б) - вероятность ошибки 2-го рода.

Рисунок 3 – Зависимость ошибок контроля от $\bar{\epsilon}^2$

Установлено, что систематические погрешности оказывают большее влияние на результат контроля, чем случайные. Поэтому с целью минимизации этого влияния, необходимо тщательно подходить к вопросу калибровки приборов контроля.

При контроле особо актуален вопрос выбора спектрального прибора для конкретного случая контроля. Этот выбор можно выполнить на основе сравнения приборов по их результативности, т.е. применяемый прибор должен обладать такими минимально допустимыми характеристиками, при которых обеспечивается заданная достоверность проводимого контроля. Было принято, что показателем результативности прибора контроля может служить значение количества регистрируемой спектроскопической информации в единицу времени, обеспечивающего заданную достоверность проводимого контроля, и которое в свою очередь должно быть связано со среднеквадратической погрешностью прибора.

Было математически описано количество информации $I(x, f)$, содержащееся в выходном сигнале $f(t)$ спектрального прибора контроля относительно входной реализации исследуемого случайного процесса $x(t)$:

$$I(x, f) = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \ln \left(\frac{|W(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T')|^2 G_x(\omega) + |W_m(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T')|^2 G_m(\omega)}{G_n(\omega)} + 1 \right) d\omega. \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что получаемое от прибора количество информации зависит от его свойств, определяющихся энергетической аппаратной функцией $W(\cdot)$ прибора, а также от измеряемого процесса и случайных помех и ошибок.

Связь между регистрируемым количеством информации и точностью спектрального прибора контроля была установлена через определение минимального количества информации, регистрируемого идеальным прибором, и его минимальной среднеквадратической погрешностью, определенной по (9):

$$H_\epsilon(x) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^\infty \ln \max \left\{ \frac{|W(0)|^2 G_x(\omega)}{h}, 1 \right\} d\omega, \quad (11)$$

где h – положительная постоянная величина, определяемая из равенства:

$$\bar{\epsilon}^2 = \int_{-\infty}^\infty \min \left\{ h, |W(0)|^2 G_x(\omega) \right\} d\omega. \quad (12)$$

На основе полученных результатов было введено понятие информационного КПД спектрального прибора контроля:

$$\eta_{II} = \frac{H_\epsilon(x)}{I(x, f)}. \quad (13)$$

Малые значения информационного КПД спектрального прибора контроля η_{II} указывают на целесообразность дальнейшей обработки выходного сигнала с целью снижения вероятностей ошибок контроля или замену применяемого прибора на другой с

лучшими техническими характеристиками. Так как минимальное количество информации, которое необходимо для выполнения контроля с требуемой достоверностью, зависит только от свойств сигнала, а получаемое от прибора количество информации зависит, кроме того, и от погрешностей прибора и измерения, то информационный КПД характеризует согласованность свойств прибора и контролируемого процесса.

Введенные информационные характеристики спектрального прибора контроля – количество информации и информационный КПД – могут служить критериями при сравнении приборов разного типа по их результативности, позволяют выбрать соответствующий прибор при заданных допустимых вероятностях ошибок контроля и оценить согласованность приборов при совместном их применении для решения конкретной задачи контроля процесса горения.

Применение методов оптической спектроскопии позволяет выполнять контроль ПГ по множеству спектроскопических информационных параметров, формируемых в различных участках анализируемого спектра, а также по их совокупности и взаимной связи. При этом множество СИП, характеризующих один и тот же контролируемый процесс, может формироваться разными методами оптической спектроскопии.

В данной главе показано, что результатом спектрального анализа являются значения фототока с выхода спектрального прибора контроля, соответствующие каждому измеряемому спектроскопическому параметру и определяемые соотношением:

$$\begin{bmatrix} i_1(\omega_1) \\ i_2(\omega_2) \\ \vdots \\ i_n(\omega_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \int_{\omega_1 - \Delta\omega_1}^{\omega_1 + \Delta\omega_1} W_{11}(\omega_1, \omega'_1, x, x', y, y', T, T') \cdot G_0(\omega'_1) d\omega'_1 \\ M_2 \int_{\omega_2 - \Delta\omega_2}^{\omega_2 + \Delta\omega_2} W_{22}(\omega_2, \omega'_2, x, x', y, y', T, T') \cdot G_0(\omega'_2) d\omega'_2 \\ \vdots \\ M_n \int_{\omega_n - \Delta\omega_n}^{\omega_n + \Delta\omega_n} W_{nn}(\omega_n, \omega'_n, x, x', y, y', T, T') \cdot G_0(\omega'_n) d\omega'_n \end{bmatrix}. \quad (14)$$

где $W_{nn}(\omega_{nn}, \omega', x, x', y, y', T, T')$ – энергетическая АФ прибора для n -го параметра.

Соотношение (14) отражает результат однократного измерения отсчетных значений энергетического спектра на промежутке времени t_R , и характерно для любого метода спектроскопии. Значения фототока пропорциональны состоятельной асимптотически несмещенной оценке отсчетных значений энергетического спектра и каждое соответствует одному из множества истинных значений контролируемых СИП на определенной частоте, т.е. значениям интенсивности спектральных линий или участков.

В общем виде спектроскопическая система контроля представлена на рисунке 4, где f – возмущающее воздействие среды; φ – истинные значения контролируемых спектроскопических параметров; $G(\omega)$ и i – отсчетные значения энергетического спектра и фототока соответственно; ВОСП – волоконно-оптическая система передач; СП – спектральный прибор; БОСИ – блок обработки спектроскопической информации.

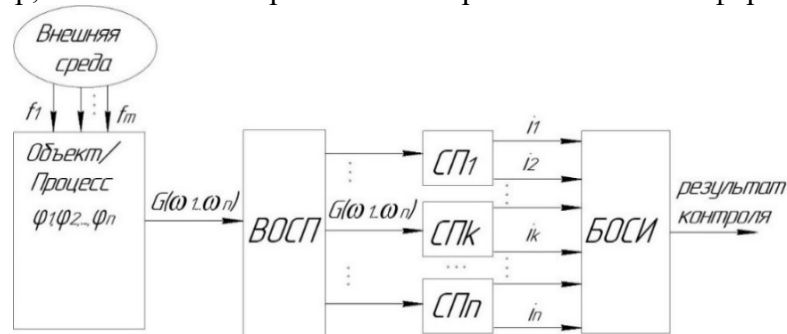


Рисунок 4 – Функциональная схема спектроскопической системы контроля

В большинстве случаев при контроле процессов горения, которые характеризуются множеством параметров в форме интенсивностей спектральных линий и участков, имеет место статистическая зависимость параметров или погрешностей спектральных измерений. Результаты моделирования показали, что при статистической зависимости параметров при статистической независимости погрешностей, вероятность ошибки 2-го рода β уменьшается с увеличением коэффициента корреляции параметров, а вероятность ошибок 1-го рода α – практически не меняется. На рисунке 5 показаны зависимости вероятностей ошибок от погрешности измерений при разных значениях коэффициента корреляции ($\rho_{12}=0; 0,5; 0,75; 0,9; 0,95; 0,99$) параметров при независимости погрешностей измерений. Аргументом кривых является соотношение δ_0/δ , где δ_0 – погрешность измерения; $\delta = -\Phi_H = \Phi_B$ – половина интервала допускаемых значений.

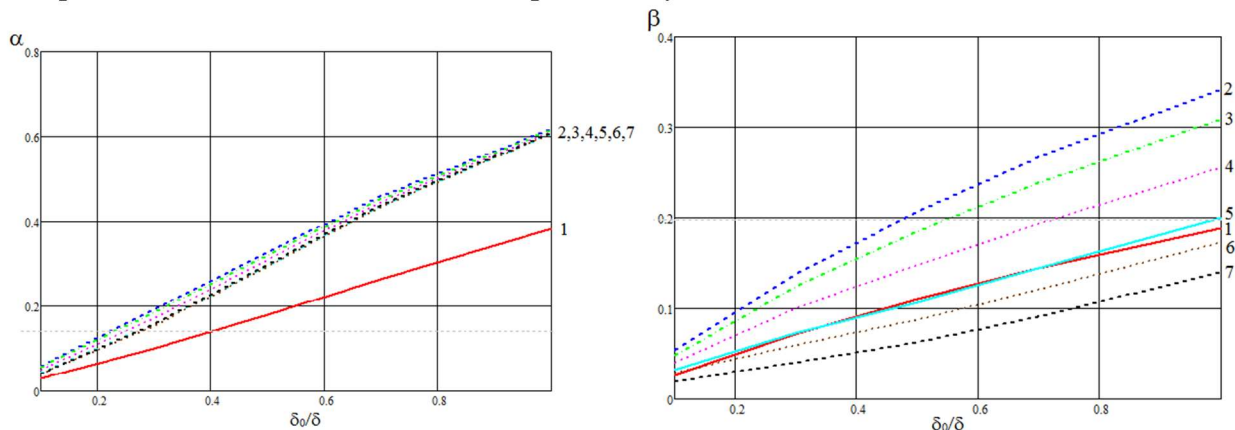


Рисунок 5 – Вероятности ошибок контроля

Стоит отметить, что статистическая зависимость погрешности спектральных измерений имеет слабое влияние как на вероятность ошибки контроля 2-го, так и 1-го рода, что также было подтверждено результатами компьютерного моделирования, приведенными в диссертации.

Исходя из этого, при спектроскопическом контроле оптимальным правилом принятия решения, обеспечивающим его требуемую достоверность, будет являться то, которое позволит минимизировать вероятность ошибки 1-го рода при ограничении сверху ошибки 2-го рода. Кроме того, минимизировать вероятность ошибки 2-го рода возможно путем правильного выбора контролируемых параметров, имеющих статистическую зависимость, что определяется на этапе подготовки к контролю. В таком случае оптимальный критерий был задан как:

$$\beta \leq \beta_{\text{дон}} = \text{const} \quad \text{и} \quad \alpha = \min \quad (15)$$

Для обеспечения требуемой достоверности контроля с учетом выбранного правила принятия решения в работе было предложено ввести дополнительные ограничения заданных пределов, в которых должны находиться результаты измерений контролируемых СИП. Тогда вероятности ошибок 1-го и 2-го рода были определены как:

$$\alpha = 1 - \frac{\int_A \dots \int_B p_\varphi(\cdot) p_\Delta(\cdot) di_1 \dots di_n d\varphi_1 \dots d\varphi_n}{\int_A \dots \int p_\varphi(\cdot) d\varphi_1 \dots d\varphi_n} \quad \text{и} \quad \beta = 1 - \frac{\int_A \dots \int_B p_\varphi(\cdot) p_\Delta(\cdot) di_1 \dots di_n d\varphi_1 \dots d\varphi_n}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_B \dots \int p_\varphi(\cdot) p_\Delta(\cdot) di_1 \dots di_n d\varphi_1 \dots d\varphi_n} \quad (16)$$

где A и B – области допускаемых значений спектроскопических параметров $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ и допускаемых значений фототока с выхода прибора i_1, \dots, i_n , пропорциональных оценке отсчетных значений энергетического спектра для каждого контролируемого параметра соответственно; $p_\varphi(\cdot) = p_\varphi(\varphi_1; \dots; \varphi_k; \dots; \varphi_n)$ и $p_\Delta(\cdot) = p_\Delta(i_1 - \varphi_1; \dots; i_k - \varphi_k; \dots; i_n - \varphi_n)$ – n -мерные плотности вероятности спектроскопических параметров и вероятности погрешности спектрального измерения соответственно.

В работе была установлена оптимальная область V допускаемых значений фототока i_1, \dots, i_n с выхода спектрального прибора контроля (соответствующих контролируемым параметрам и содержащих в себе информацию о погрешностях измерений), при которой будут обеспечены заданные требования к вероятностям ошибок контроля, а, следовательно, и его достоверность. Область была определена следующим граничным условием:

$$\frac{\int \dots \int_A p_\varphi(\cdot) p_\Delta(\cdot) d\varphi_1 \dots d\varphi_n di_1 \dots di_n}{\int \dots \int_{-\infty}^{\infty} p_\varphi(\cdot) p_\Delta(\cdot) d\varphi_1 \dots d\varphi_n di_1 \dots di_n} \geq \mu, \quad (17)$$

где числовой множитель μ определяется по заданной вероятности ошибки 2-го рода $\beta_{доп}$.

На основе полученного граничного условия (17), задающего область допускаемых значений результатов измерений контролируемых спектроскопических параметров, и исходя из заданных допустимых вероятностей ошибок контроля, можно выбрать применяемый спектральный прибор, минимальные характеристики которого обеспечат требуемую достоверность проводимого контроля.

Теоретическая значимость разработанного спектроскопического метода контроля обусловлена теоретическим описанием процедуры контроля, технических средств и спектроскопических параметров, характеризующих контролируемый процесс горения, выполненным на базе единого математического аппарата, что **позволяет**, 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 ПГ.

В четвертой главе приводятся результаты технической реализации приборов контроля в форме оптических спектральных приборов, и рассматриваются вопросы улучшения их характеристик.

В патенте РФ 86734 был предложен принцип построения многоканального оптического спектрометра, в котором спектральное разложение оптического излучения осуществляется путем применения набора узкополосных оптических фильтров. Оптическая схема прибора и фотография его макета приведены на рисунке 6, где ОК – объект контроля; ФО и 1 – формирующая оптика; ВОЖ и 2 – волоконно-оптический жгут; Л1 и Л2 – первая и вторая коллимирующие линзы; ОФ – оптический фильтр; БУФ, Ф, БПЦО и 3 – блоки узкополосной фильтрации, фотоприемники и блок последетекторной цифровой обработки соответственно; К и 4 – компьютер; 5 – БУФ в разобранном виде.

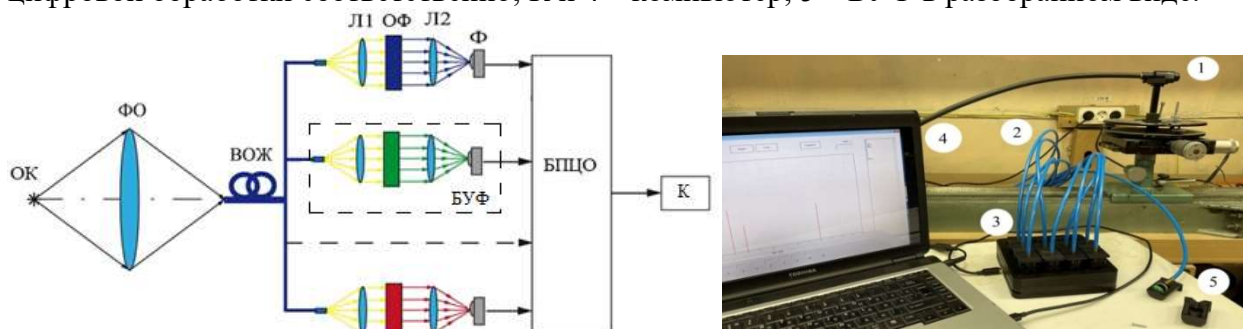


Рисунок 6 – Оптическая схема и фотография макета многоканального спектрометра

В данном макете реализовано 10 каналов (количество каналов можно увеличить), в которых были установлены узкополосные оптические фильтры со следующими средними длинами волн: 308 нм, 337 нм, 434 нм, 470 нм, 510 нм, 515 нм, 562 нм, 578 нм, 589 нм и 620 нм; полоса пропускания фильтров – 8 нм.

В работе было экспериментально установлено, что применение волоконно-оптического жгута позволяет увеличить чувствительность прибора более чем на 15 %.

Поскольку разрешающая способность многоканального спектрометра определяется полосой пропускания оптических фильтров был предложен способ повышения его разрешающей способности путем применения спектрально-селективного элемента в форме узкополосного оптического фильтра, на одной стороне которого нанесена решеткоподобная структура. На данное решение получен патент РФ 188637.

Для улучшения разрешающей способности дифракционного прибора были разработаны и исследованы новые типы решеток, работающие в высших порядках. Перераспределение интенсивности дифрагированного света в высшие порядки осуществляется за счет изменения топологии решетки, т.е. путем изменения закона расположения ее штрихов. Минимальная ширина штрихов решетки составляет 3 мкм. На программу для расчета параметров штрихов было получено свидетельство о государственной регистрации № 2021668476.

Оптическая схема и фотография макета дифракционного прибора с установленной решеткой, работающей в высших порядках, приведены на рисунке 7, где на схеме: 1 – объект контроля; 2 – блок ввода излучения; 3 – оптическое волокно; 4 – блок вывода; 5 – решетка; 6 – камерный объектив; 7 – ПЗС-детектор; 8 – блок последетекторной цифровой обработки; 9 – компьютер; на фотографии: 1 – конденсор; 2 – решетка; 3 – сферическое зеркало; 4 – устройство считывания на базе ПЗС-линейки.

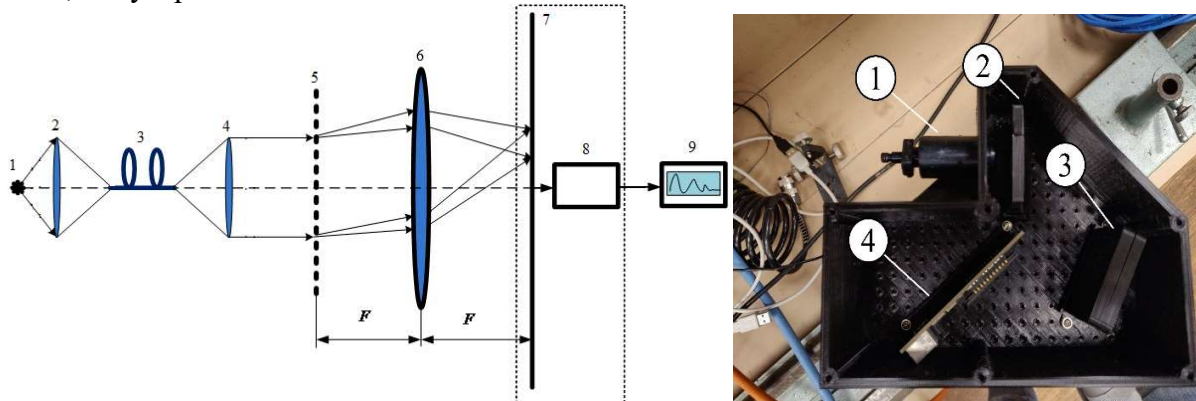


Рисунок 7 – Оптическая схема и фотография макета дифракционного прибора

Результаты расчета и эксперимента показали, что оптимальным режимом работы с точки зрения баланса разрешающей способности и чувствительности дифракционного спектрального прибора является ± 4 дифракционные порядки.

Разработанные спектральные приборы контроля обладают улучшенными техническими характеристиками по сравнению с существующими аналогами.

1. Многоканальный спектрометр: Благодаря особенностям его принципа действия, для передачи излучения можно использовать не одно волокно, а жгут волокон, что повышает его чувствительность более чем на 15%. Повышение разрешающей способности достигается путем применения спектрально-селективного элемента с решеткоподобной структурой. Набор фильтров, количество которых определяется необходимым числом контролируемых параметров, позволяет сосредоточить их на определенном участке спектра, что дает возможность анализировать конкретный участок, а не весь диапазон.

2. Дифракционный спектральный прибор: Предложенная топология решетки нового типа перераспределяет интенсивность дифрагированного света в высшие порядки, и тем самым повышает разрешающую способность прибора более чем на 20%, в том числе при применении оптического волокна в качестве линии передачи.

В таблице 2 приведены результаты сравнительного анализа характеристик спектрометров, выпускаемых фирмами OceanInsight Inc., ASD Inc., Avantes, и оптических спектральных приборов, разработанных в ГУАП.

Таблица 2 – Результат сравнительного анализа характеристик спектральных приборов

Параметр	Многоканальный оптический спектрометр (разработка ГУАП)	Дифракционный спектрометр (разработка ГУАП)	Спектрометр HR2000+ES (OceanInsight Inc)	Спектрометр FieldSpec 4 (ASD Inc)	Спектрометр AvaSpec-ULS4096 (Avantes)
Спектральный диапазон, нм	200 - 2500 нм (анализируются только определенные спектральные участки)	200-1100 нм (возможен индивидуальный выбор диапазона)	200-1100 нм Зависит от типа решётки (14 вариантов)	350-2500 нм Зависит от типа решётки (20 вариантов)	200 – 1100 нм Зависит от типа решётки (10 вариантов)
Разрешение, нм	От 0,5 до 10 нм (зависит от фильтра и диапазона)	От 0,5 до 3 нм (за счет применения решетки особой топологии)	От 1.33 до 6.8 нм (зависит от типа решетки, размера вх. щели)	3 (в видимом диапазоне) 6 (1400- 2100 нм)	От 1 до 20 нм (зависит от типа решетки, размера вх. щели)
Тип детектора	Набор фотоприемников (количество зависит от количества каналов)	линейная ПЗС (TCD1304AP)	линейная ПЗС (Sony ILX511B)	512 элементный Si- фотодиод	CMOS линейная матрица
Вес, г	От 250 г (зависит от количества каналов)	~500 г	570 г	5440 г	1155 г
Длина оптического волокна, м	Подбирается индивидуально для конкретной задачи	Подбирается индивидуально для конкретной задачи	~2	~1-5	~2
Программная коррекция спектра при использовании ОВ	Встроено в ПО	Встроено в ПО	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

Поскольку основным узлом спектрального прибора контроля, вносящим наибольшие искажения в сигналы при их передачи на расстояние, в том числе из-за воздействия окружающей среды, является волокно, при разработке таких приборов особое внимание должно быть уделено вопросам прохождения излучения по волокну.

В случае передачи излучения по волоконно-оптической системе, падающий на вход прибора фронт волны оказывается отличным от требуемого однородного и плоского, что вносит искажения при выполнении измерений. Была разработана математическая модель, позволяющая рассчитать уширение аппаратной функции для дифракционного спектрального прибора, и были проведены экспериментальные исследования влияния ВОСП на АФ дифракционного прибора. На рисунке 8 а и б представлены результаты компьютерного моделирования дифракционной картины в +1 и +2 порядках соответственно, при непосредственном падении излучения на решетку (пунктирная линия) и в случае прохождения через оптическое волокно (сплошная линия).

Результаты расчетов показывают уширение аппаратной функции более чем на 20% для одномодового волокна.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 8 в, г и д. Эксперимент состоял из трех этапов: 1) лазерное излучение проходило через дифракционную решетку без применения оптоволокна (рис. 8 в); б) лазерное излучение проходило через решетку после прохождения через одномодовое волокно PM-S405-XP (рис. 8 г); в) лазерное излучение после прохождения через многомодовое волокно Nufern-FUD-3759 (рис. 8 д).

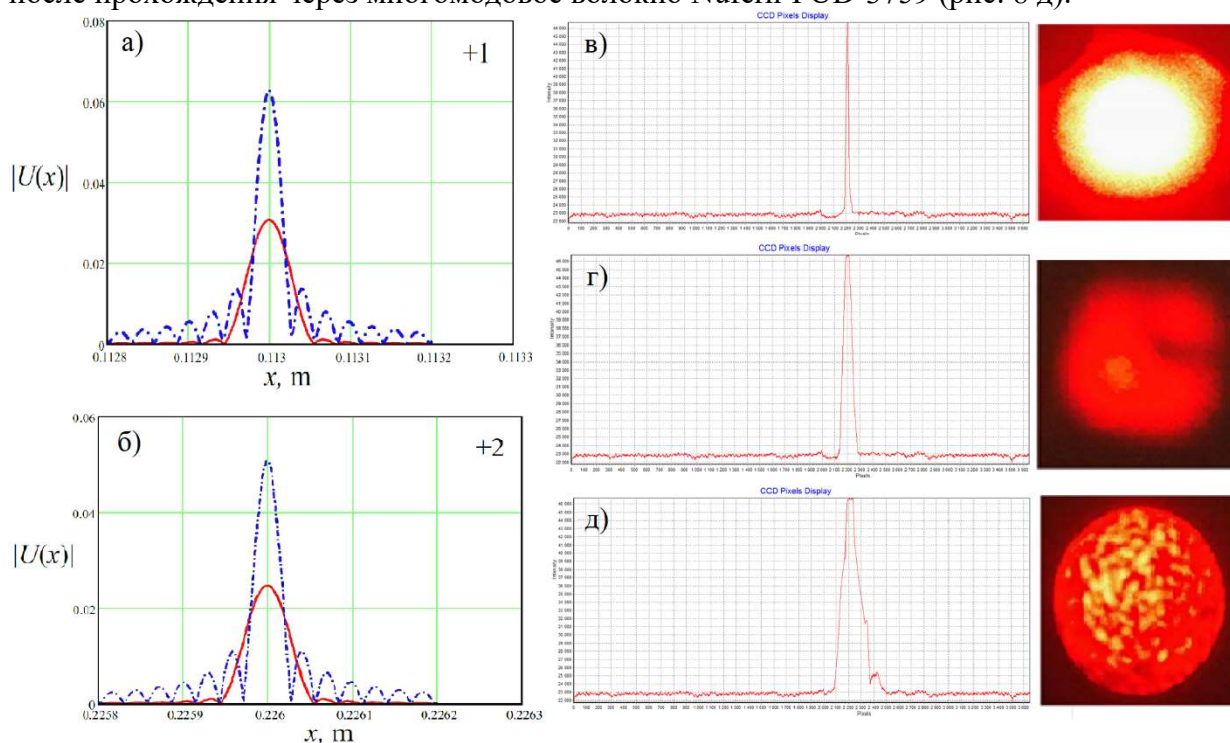


Рисунок 8 – Результаты расчета дифракционной картины в +1 и +2 порядках и эксперимента исследования влияния ВОСП на АФ дифракционного прибора

Применение оптоволокна приводит к неоднородности волнового фронта подающего на поверхность решетки оптического излучения, что проявляется в виде модуляции его интенсивности по пространству. В конечном итоге это приводит к искажению АФ спектрального прибора контроля и к ухудшению его разрешающей способности: более чем на 30% при применении одномодового волокна и более чем на 60% – при применении многомодового. Как следствие, увеличивается погрешность измерений, что непременно приводит к снижению достоверности проводимого контроля.

В диссертации приводятся результаты исследований энергетических потерь анализируемых сигналов, возникающих при вводе излучения в оптоволокно и его передаче. Зная характеристику затухания волокна и линзы, можно рассчитать потери, влияющие на эффективность передачи излучения на вход разрешающей системы спектрального прибора контроля.

Приводятся результаты теоретического расчета и экспериментального исследования энергетических потерь в системе вывода излучения, возникающих в результате непопадания части излучения на поверхность линзы. Показано, что энергетические потери при выводе излучения в явном виде зависят от расстояния между торцом оптоволокна и линзой, от ее апертуры и длины волны передаваемого излучения.

В пакете Matlab был реализован программный алгоритм, позволяющий рассчитать потери оптического излучения. Результаты моделирования для четырех длин волн: 600 нм, 850 нм, 1300 нм и 1500 нм и заданных параметров: диаметра торца волокна $d=8$ мкм, размер апертуры линзы $D=5$ см и расстояния от линзы до торца волокна $z=8$ см, – приведены на рисунке 9.

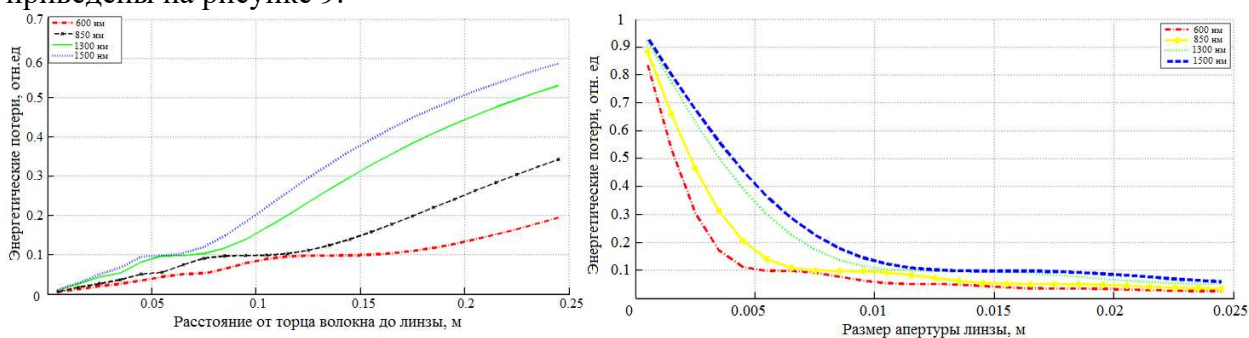


Рисунок 9 – Зависимость потерь от z и D

Полученные результаты можно использовать при проектировании волоконно-оптической системы передачи, входящей в состав спектрального прибора контроля, для подбора ее оптимальных параметров. В работе приводятся результаты экспериментальной отработки разработанной методики вычисления энергетических потерь. Полученные результаты подтверждают сходимость разработанной методики расчета энергетических потерь с экспериментальными данными.

Поскольку при контроле процессов горения входная оптическая система и волокно подвергаются воздействию высоких температур, было исследовано влияние температуры окружающей среды на искажения анализируемого сигнала при его передаче по оптическому волокну. Эксперимент проводился на разработанном стенде с применением климатической камеры УП-64ТХВ при изменении температуры от минус 20 до плюс 120 градусов по Цельсию. Фотография стенда и зависимость потерь в оптическом волокне от температуры приведена на рисунке 10, где 1 - климатическая камера УП-64ТХВ; 2 - оптическое волокно; 3 – лазер; 4 - фокусирующая линза; 5 – спектрометр; 6 – компьютер.

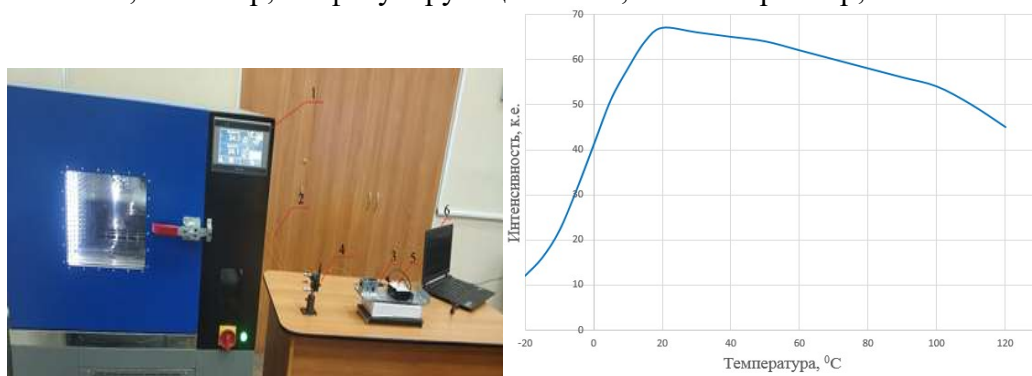


Рисунок 10 – Фотография стенда и зависимость потерь от температуры

Потери в волокне значительно увеличиваются (более 10%) при повышении температуры от 60 °С и выше. При понижении температуры значительное увеличение потерь наблюдается уже при температуре 15 °С и ниже, при этом крутизна кривой имеет более ярко выраженный характер.

Учет и корректировка всех этих искажений и потерь при проектировании спектрального прибора контроля и обработке результатов спектрального анализа при их эксплуатации позволяют улучшить характеристики разрабатываемых и применяемых приборов в отличие от прототипов.

Новизна и практическая значимость предложенной технической реализации спектральных приборов контроля с применением волоконно-оптической системы передачи анализируемых сигналов обусловлена тем, что **в отличие** от известных аналогов они **позволяют** создавать приборы контроля с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками. **Новизна** применяемых технических решений подтверждена патентами РФ.

В пятой главе приводятся результаты экспериментальных исследований спектроскопических параметров, характеризующих процесс горения газообразных углеводородов. В промышленных печах в качестве топлива применяется природный газ, тем не менее для проведения лабораторных исследований из-за доступности был выбран пропан, который имеет похожую спектральную характеристику с природным газом. В качестве методов спектроскопии были применены методы эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии.

Исследование СИП, характеризующих горение пропана, методом эмиссионной спектроскопии проводилось с помощью спектрометра USB2000+. Был разработан стенд с двухкомпонентной горелкой и макетом топочной камеры. Схема и фотография стенда (без макета топочной камеры) приведены на рисунке 11, где 1 – спектрометр; 2 – волоконно-оптический зонд; 3 – конденсор; 4 и 7 – ротаметры; 5 и 8 – манометры; 6 – вентили регулировки; ПК и 7 – компьютер; К и 5 – компрессор.

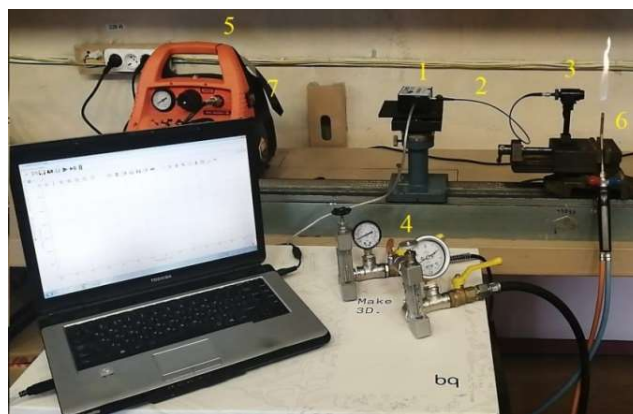
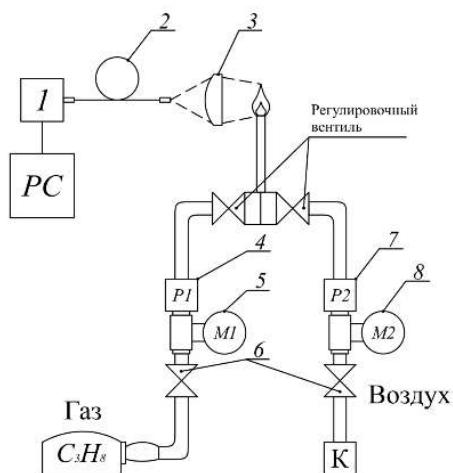


Рисунок 11 – Экспериментальный стенд

Эксперимент выполнялся в три этапа: 1. Режим горения пропана без подачи воздуха (в горении учувствует только кислород, находящийся в объеме топочной камеры). 2. Режим стехиометрического горения. 3. Режимы горения при изменении количества подаваемого компрессором воздуха относительно стехиометрического горения.

На рисунке 12 представлены нормированные спектральные характеристики пламени для четырех вариантов коэффициента избытка воздуха, т.е. соотношения газ-воздух: 0,75; 0,9; 1,0 и 1,25.

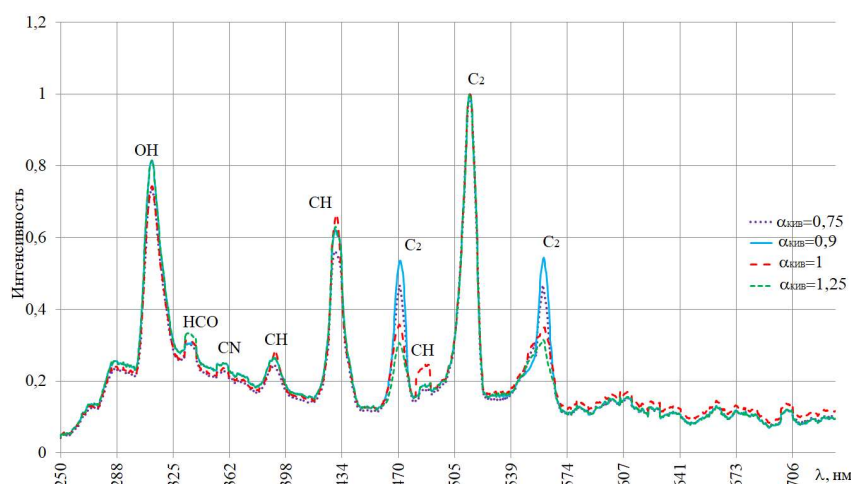


Рисунок 12 - Спектральная характеристика пламени при различных $\alpha_{\text{жив}}$

Интенсивности различных систем полос в спектре пламени пропана существенно зависят от состава горючей смеси. При незначительном количестве воздуха в спектре пламени наиболее интенсивны полосы радикала углерода C_2 , (470 нм, 515 нм и 562 нм), полоса гидроксильного радикала OH (308 нм) и достаточно интенсивны полосы радикала углеводорода CH (390 нм, 434 нм и 489 нм), интенсивности полос углеводородного пламени HCO (337,7 нм) и CN (358,8 нм) не очень велики. При избыточном количестве воздуха интенсивность полос C_2 снижается, что проявляется в изменении цвета внутреннего конуса пламени на сине-фиолетовый оттенок, при этом интенсивность полос CH остается большой, а полос HCO и CN – средней. Однако полосы углеводородного пламени лучше проявляются в бедных смесях, абсолютный максимум их может проявляться в смесях при составе близком к стехиометрическому, но в бедных смесях их интенсивность падает значительно меньше, чем интенсивность других полос, поэтому в спектре таких пламен их относительная интенсивность по сравнению с другими полосами значительно выше. При этом в спектре пламени пропана в случае стехиометрического горения или близкого к нему полосы C_2 появляются раньше по ходу реакции, чем полосы CH. Полосы OH появляются также на ранних стадиях, а полосы углеводородного пламени – раньше полос CH, но несколько позже полос C_2 .

Исследование спектроскопических параметров, характеризующих горение пропана, методом лазерно-искровой спектроскопии проводилось с помощью оптического двухканального спектрометра AvaSpec-ULS4096CL-2 и Nd:YAG лазера LOTIS II 2134U, применявшегося для возбуждения плазмы в пламени горелки. Эксперимент проводился на том же стенде. Фотография стенда (без макета топочной камеры) с ЛИЭС-установкой приведена на рисунке 13, где 1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – дублет; 4 – горелка; 5 – телескоп; 6 – волоконно-оптический зонд; 7 – спектрометр; 8 – компьютер.



Рисунок 13 – Экспериментальный стенд с ЛИЭС-установкой

На рисунке 14 представлены спектральные характеристики плазмы в пламени на двух каналах спектрометра при $\alpha_{\text{КИВ}} = 0,75; \approx 1,0$ и $1,25$.

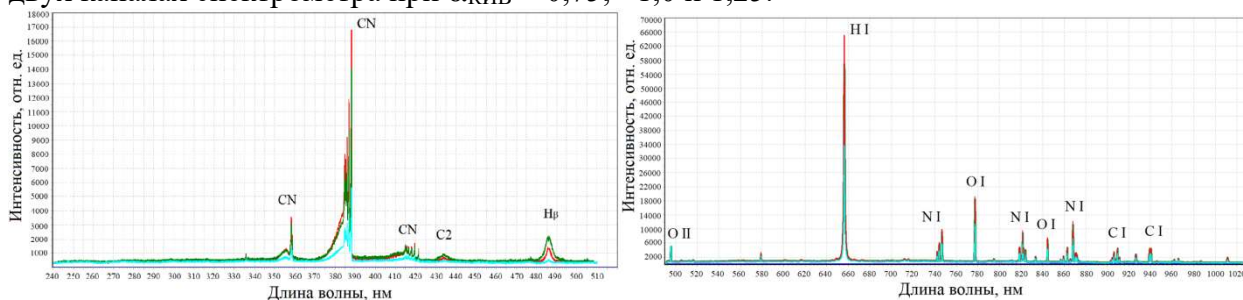


Рисунок 14 – Спектральная характеристика излучения плазмы

Наиболее интенсивные линии соответствуют линиям водорода H (656,3 нм) и кислорода O (777 нм). Также наблюдаются менее интенсивные линии кислорода O (486,1 нм и 844,6 нм), азота N (743,8 нм и 745,4 нм, 821,6 нм и 868,3 нм), углерода C (908,9 нм и 940,6 нм), а также молекулярные полосы излучения CN (355-420 нм).

Сравнивая спектральные характеристики пламени, полученные эмиссионным и ЛИЭС методами, можно выделить одну особенность. При эмиссионной спектроскопии в спектре пламени пропана наблюдалась полоса углеводорода CH с максимумом на длине волны 390 нм, а при ЛИЭС – полосы углеводородного пламени CN с максимумом на длине волны 389 нм. Это можно объяснить различной энергией возбуждения этих радикалов, а также тем, что при методе ЛИЭС спектрометр был синхронизирован с лазером и регистрировал спектр в определенный момент. В этот момент полосы CH также присутствовали в спектре пламени, но они затмевались более интенсивными полосами CN, поскольку плазма создавалась мощным лазерным излучением.

На рисунке 15 приведены отнормированные зависимости интенсивности излучения различных молекул продуктов горения пропана от коэффициента избытка воздуха.

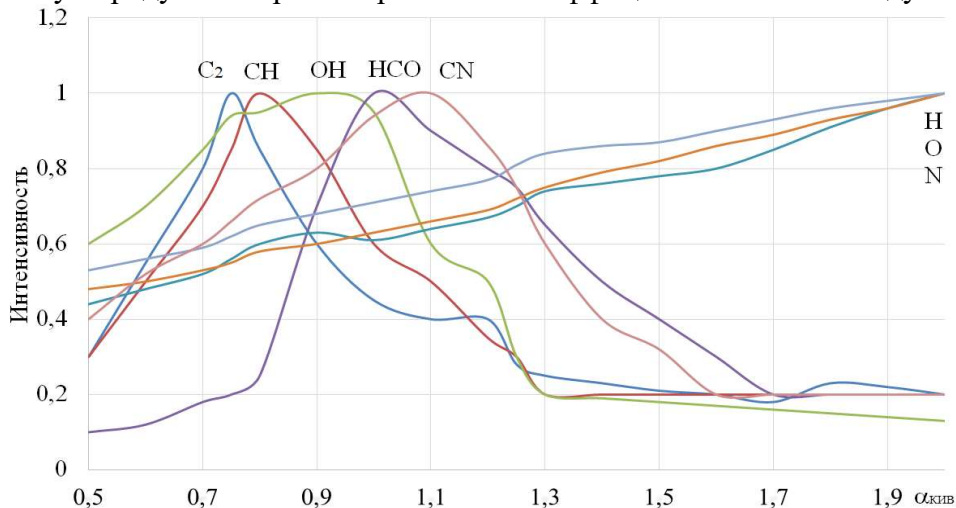
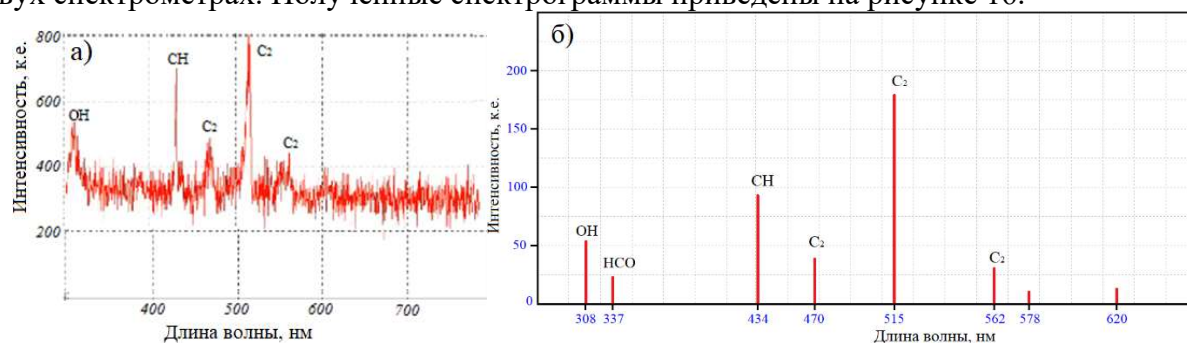


Рисунок 15 – Зависимость интенсивности излучения молекул от $\alpha_{\text{КИВ}}$

Кривые для эмиссионного метода имеют максимум интенсивности для C_2 при $\alpha_{\text{КИВ}} = 0,75$, для CH при $\alpha_{\text{КИВ}} = 0,8$, интенсивность полос OH имеет плоский максимум вблизи $\alpha_{\text{КИВ}} = 0,9$, а полосы HCO при $\alpha_{\text{КИВ}} \approx 1$, для ЛИЭС метода максимум интенсивности CN находится при $\alpha_{\text{КИВ}} = 1,1$, а интенсивности H, O и N линейно возрастают с увеличением соотношения газ-воздух.

С целью проверки возможности контроля горения пропана разработанными дифракционным прибором и многоканальным спектрометром были проведены соответствующие эксперименты. Был выполнен выбор оптических фильтров для

многоканального прибора со средними длинами волн, соответствующими спектральным полосам OH, HCO, CH и C₂. Эксперимент проводился при одновременном измерении на двух спектрометрах. Полученные спектрограммы приведены на рисунке 16.



а) – спектрограмма дифракционного прибора; б) – спектрограмма многоканального спектрометра

Рисунок 16 - Спектрограммы пламени пропана при $\alpha_{\text{КВВ}} \approx 1$

Полученные результаты доказывают возможность применения разработанных приборов для контроля горения газообразных углеводородов.

В работе приводится разработанная методика подготовки и проведения контроля процессов горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии:

1. На этапе подготовительных исследовательских работ (перед установкой системы контроля на реальный объект):

1.1 Определить спектроскопические информационные параметры, характеризующие протекание контролируемого ПГ:

1.1.1 определить количество и положение на оси длин волн СИП;

1.1.2 определить минимальное и максимальное значения каждого контролируемого спектроскопического параметра, соответствующие штатному протеканию процесса, путем измерения на эталонном спектральном приборе с высокими техническими характеристиками (предварительно выполнив калибровку эталонного прибора);

1.1.3 определить зависимость каждого выбранного контролируемого СИП от условий окружающей среды (температуры, влажности и т.д.). Выполняется при необходимости, если в течение работы контролируемого объекта существует вероятность изменения этих условий;

1.1.4 определить зависимость каждого контролируемого СИП от режимов горения, в том числе учитывая их взаимную связь;

1.1.5 выбрать оптимальное (минимально необходимое) количество параметров с учетом их иерархии, имеющих наибольшую зависимость от режимов горения.

1.2 Определить требования к проводимому спектроскопическому контролю:

1.2.1 установить допускаемую вероятность ошибки контроля 2-го рода, учитывая предполагаемый ущерб в результате ее появления;

1.2.2 на основе установленной вероятности ошибки контроля 2-го рода определить оптимальное значение допускаемой погрешности измерений для каждого параметра. На основании чего формируются требования к техническим характеристикам применяемого спектрального прибора контроля;

1.2.3 на основании принятого оптимального правила принятия решения при контроле рассчитать границы оптимальной области допускаемых значений результатов спектральных измерений (значения фототока или значения измеренной интенсивности) для каждого контролируемого СИП, обеспечивающих минимальную вероятность ошибки 1-го рода при ограничении сверху вероятности ошибки 2-го рода;

1.2.4 при неудовлетворительном значении вероятности ошибки 1-го рода пересмотреть п. 1.2.2, а именно требования к техническим характеристикам применяемого спектрального прибора контроля, и повторить п. 1.2.3;

1.3 Сформировать конечные требования к проектируемой спектроскопической системе контроля:

1.3.1 сформировать базу данных допускаемых значений результатов измерений для каждого спектроскопического параметра;

1.3.2 сформировать требования к техническим характеристикам применяемого спектрального прибора контроля с учетом расположения на объекте (от этого зависит длина ВОСП).

2. На этапе предэксплуатационных работ (данный этап относится уже к разработанной и созданной спектроскопической системе контроля, на этапе проектирования которой учтены все ее технические и конструктивные особенности, в том числе связанные с применением оптического волокна, согласно результатам, изложенным в 2, 3 и 4 главах данной работы):

2.1 Установить зависимость температуры объекта, на который будет установлена спектроскопическая система контроля, от режима его работы. Измерение выполняется эталонным средством измерения.

2.2 Численно, аналитически или экспериментально определить погрешности измерения спектроскопической системы контроля для каждого СИП.

2.3 Численно, аналитически или экспериментально определить зависимость погрешности измерения для каждого контролируемого параметра от условий окружающей среды, в частности температуры объекта.

2.4 Выполнить калибровку установленной системы контроля по эталонному источнику в соответствии с разработанной для нее методикой калибровки, учитывающей применяемую ВОСП и ее место монтажа на объект, место установки системы контроля, влияния окружающей среды.

2.5 Сформировать таблицу поправочных коэффициентов для каждого измеряемого спектроскопического параметра, записать в блок обработки спектроскопической информации поправочные коэффициенты.

2.6 Выполнить дополнительную калибровку системы контроля по каждому измеряемому спектроскопическому параметру с учетом сформированных поправочных коэффициентов, записанных в блок обработки спектроскопической информации.

2.7 Внести в блок обработки спектроскопической информации допускаемые значения для каждого контролируемого параметра, определенные на первом этапе.

2.8 Приступить к контролю.

В диссертации приводятся результаты экспериментальной отработки методики подготовки и проведения контроля на примере процесса горения пропана методами эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой спектрометрии, выполняемого спектрометрами серийного производства и разработанным многоканальным прибором. Отработка методики проводилась в три этапа: 1. Компьютерное моделирование допускаемых значений результатов измерений контролируемых СИП и минимальной вероятности ошибки контроля 1-го рода при заданной вероятности ошибки 2-го рода (на основе разработанного спектроскопического метода контроля, представленного в 3 главе). 2. Контроль процесса горения пропана спектрометрами серийного производства. 3. Контроль процесса горения пропана методом эмиссионной спектроскопии при применении многоканального спектрометра.

Было принято допущение, что процесс горения пропана протекает в штатном режиме при соотношении газ/воздух $\alpha_{\text{жив}}$ от 0,9 до 1,1. В качестве контролируемых спектроскопических параметров были выбраны для эмиссионной спектроскопии: ОН, НСО, СН, С₂; и для ЛИЭС-спектрометрии: CN, H, N и O.

Результаты экспериментальной обработки методики представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты экспериментальной обработки методики

Теоретические вероятности ошибок		Экспериментальные вероятности ошибок					
		OceanOptics USB2000 (эмиссионный метод)		AvaSpec-ULS4096 (ЛИЭС метод)		Многоканальный спектрометр (эмиссионный метод)	
$\beta_{доп},\%$	$\alpha_{\Sigma},\%$	$\beta_{доп},\%$	$\alpha_{\Sigma},\%$	$\beta_{доп},\%$	$\alpha_{\Sigma},\%$	$\beta_{доп},\%$	$\alpha_{\Sigma},\%$
3	19,0	5,2	24,1	4,5	23,2	4,7	22,3
4	18,4	6,1	22,8	5,2	21,3	5,1	20,9
5	17,9	7,3	20,1	6,7	19,1	6,2	19,4
6	17,3	8,1	19,7	7,4	18,5	6,8	18,1
7	16,7	8,9	18,6	8,1	17,7	7,9	17,0
8	15,9	9,8	17,9	9,2	16,6	8,8	16,8
9	15,3	10,5	17,1	10,2	16,1	9,7	15,9
10	14,5	11,8	16,3	11,1	15,1	10,9	15,2

Наибольшие вероятности ошибок возникали при контроле ПГ пропана методом эмиссионной спектроскопии, это можно объяснить тем, что в этом случае погрешность измерения с применением спектрометра USB2000 составляла 3% по сравнению с ЛИЭС методом – 2%, где применялся спектрометр ULS4096CL. Наименьшую вероятность возникновения ошибок контроля показал метод, при котором сочетаются эмиссионная и ЛИЭС-спектроскопии (результаты представлены в диссертации). При изменении соотношения газ-воздух от 1,0 до 0,84 наблюдалось увеличение интенсивности спектральных полос CH , C_2 , в то время как, интенсивность OH практически оставалась без изменения, а интенсивности полосы HCO , определяемой эмиссионным методом и спектроскопических параметров CN , H , N , O , определяемых методом ЛИЭС-спектроскопии, уменьшались. При изменении соотношения газ-воздух от 1,0 до 1,16 наблюдалось обратная динамика изменения интенсивностей СИП: интенсивности спектральных полос продуктов горения CH , C_2 и OH уменьшались, а интенсивности спектральных линий H , N , O , определяемых методом ЛИЭС-спектроскопии, увеличивались. Интенсивность полосы углеводородного пламени HCO , определяемая эмиссионным методом, также уменьшалась, а интенсивность полосы CN , определяемая методом ЛИЭС-спектроскопии, сначала увеличивалась, а после прохождения соотношения газ-воздух 1,1 – начала уменьшаться.

На основе полученных результатов эксперимента можно сделать вывод, что сочетание двух методов спектроскопии позволяет не только повысить достоверность проводимого контроля путем его проведения на основе измерения первичного параметра, характеризующего состояние процесса горения, – спектральной характеристики излучения, испускаемого непосредственно очагом горения, но и дает возможность спрогнозировать направление изменения соотношения газ-воздух по взаимному изменению интенсивностей контролируемых параметров относительно друг друга (см. рис. 15), что повышает оперативность проводимого контроля.

Результаты контроля многоканальным спектрометром показали меньшие значения вероятностей ошибок, чем спектрометр USB2000. Это можно объяснить тем, что прибор был откалиброван по эталонному источнику, также была выполнена корректировка искажений, вносимых волоконно-оптическим жгутом, что позволило уменьшить погрешность спектрального измерения. Особо стоит подчеркнуть, что для контроля процесса горения пропана в многоканальном приборе было задействовано всего 5 каналов на каждый измеряемый спектроскопический параметр и один опорный (для сравнения), что существенно уменьшает его стоимость по сравнению с USB2000. Если, для других

задач контроля будет требоваться большее количество контролируемых параметров, возможно увеличить количество каналов.

Научная новизна проведенных исследований заключается в установлении новых зависимостей спектроскопических параметров в спектре излучения процесса горения газообразных углеводородов от режимов горения при отдельном и комбинированном применении эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии, что **позволяет** с большей достоверностью и оперативностью проводить контроль процессов горения по сравнению с существующими методами контроля.

Практическая значимость установленных зависимостей состоит в том, что на их основе может быть организована процедура контроля методами эмиссионной спектроскопии или лазерно-искровой спектрометрии любых объектов, в технологических процессах которых применяется сжигание газообразных углеводородов.

Научная новизна и практическая значимость разработанной методики подготовки и проведения спектроскопического контроля заключаются в том, что она **позволяет** проводить контроль процессов горения с требуемой достоверностью при применении приборов с минимально необходимыми характеристиками.

С целью подтверждения возможности повышения достоверности проводимого контроля процесса горения газообразного углеводородного топлива методами оптической спектроскопии по сравнению с существующими методами контроля были проведены экспериментальные исследования по измерению спектральной характеристики пламени в топке вращающейся печи обжига, которая установлена в цеху производства дефторированного фосфата ООО «ПГ «Фосфорит», г. Кингисепп, Ленинградская область. Для сжигания природного газа внутри печи применяется горелка типа ВРГ-1.

Актуальность вопроса оптимизации процесса сжигания топлива в печи обжига объясняется не только необходимостью эффективного использования топлива и снижением вредных выбросов в атмосферу, но и главным образом важностью поддержания заданной температуры на постоянном уровне, поскольку это влияет на качество выпускаемого продукта. В настоящее время контроль процесса горения выполняется на основе измерений косвенных параметров: температуры, разряжения, расхода газа по расходомеру, состава уходящих газов и визуальной оценке оператора.

На рисунке 17 приведены фотография вращающейся печи обжига и расположенное рядом с ней измерительное оборудование и спектральные характеристики пламени для разных этапов розжига печи.

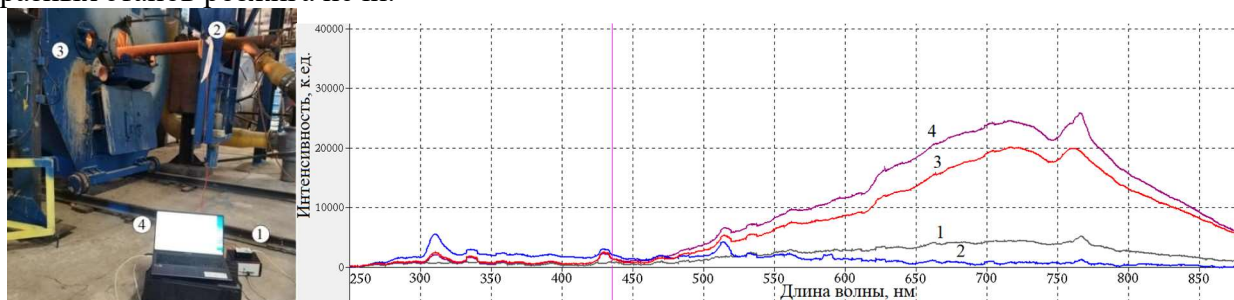


Рисунок 17 – Фотография печи обжига и измерительное оборудование

Эксперимент проводился в три этапа: 1. Измерение спектральной характеристики пламени во время розжига печи (рис 17). 2. Определение коэффициента избытка воздуха спектроскопическим методом контроля и штатным контрольно-измерительным оборудованием. 3. Измерение спектральной характеристики пламени во время обжига шихты (проводился дополнительно в исследовательских целях).

В качестве измерительного прибора применялся оптический спектрометр USB2000 (1) с волоконно-оптическим зондом. Оптическая ось формирующей оптики (2) была

направлена в смотровое окно в торце печи (3). Полученная спектрограмма отображалась на компьютере (4).

Кривая 1 соответствует первому этапу розжига, когда подача воздуха в топку печи была перекрыта, и горел один газ. Спектр пламени имел в основном сплошной характер, что обусловлено тепловым излучением угольных частиц. Кривая 2 соответствует приблизительно стехиометрическому горению $\alpha \approx 1.05$ (объем подаваемого газа - 1850 м³/ч, объем воздуха – 18490 м³/ч). В спектре пламени отчетливо наблюдались характерные спектроскопические параметры в виде спектральных полос на длинах волн: 308 нм – полоса ОН; 337,7 нм и 358,8 нм – полосы НСО и CN; 390 нм и 434 нм – полосы СН; 515 нм – полоса С₂. Кривая 3 соответствовала горению при соотношении газ-воздух $\alpha = 1,45$ (объем подаваемого газа - 1960 м³/ч, объем воздуха – 27056 м³/ч). В спектре также наблюдались спектральные полосы, характеризующие горение газа, но увеличилась интенсивность сплошного участка спектра от 500 до 800 нм, это можно объяснить тем, что в этом режиме увеличился факел горелки и в оптический телескоп попадала внешняя зона горения факела. Кривая 4 также соответствовала горению при соотношении газ-воздух $\alpha = 1,45$, но объем газа был увеличен до 2090 м³/ч.

На втором этапе эксперимента была выполнена процедура контроля процесса горения природного газа в печи одновременно двумя методами: разработанным спектроскопическим методом контроля с применением оптического спектрометра и традиционным, основанным на анализе состава уходящих газов с помощью штатного контрольно-измерительного оборудования. Контроль основывался на определении коэффициента избытка воздуха для трех соотношений газ-воздух, в результате которого расчетным методом определялся перерасход газа, возникающий из-за неправильного определения коэффициента избытка воздуха штатным оборудованием (результаты расчета приведены в диссертации). Как показал эксперимент, применение спектроскопического метода контроля позволяет результативнее оптимизировать сжигание природного газа в печи, путем более достоверного определения коэффициента избытка воздуха, что приводит к снижению его расходов до 3% и, тем самым, позволяет уменьшить затраты на производство. Кроме того, применение данного метода контроля позволяет исключить необходимость визуального наблюдения оператором процесса горения в печи.

Третий этап проводился в исследовательских целях. Был измерен спектр пламени горелки во время обжига шихты и установлены спектроскопические параметры, соответствующие химическим элементам, входящим в ее состав.

Полученные результаты показывают, что методы прикладной оптической спектроскопии могут быть успешно применены в задачах контроля процесса горения природного газа, применяемого в технологических процессах.

Практическая значимость разработанного метода состоит в том, что он позволяет проводить контроль процессов горения газообразных углеводородов с повышенной достоверностью по сравнению с существующими методами контроля, что приводит не только к сокращению расходов топлива, но и к снижению негативного воздействия работы теплоэнергетических установок на окружающую среду.

В заключении дана итоговая оценка научных результатов (положений), выносимых на защиту, обозначена их теоретическая и практическая значимость.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие **результаты**, имеющие **научную новизну** и **практическое значение**:

1. Предложено новое математическое описание спектрального прибора как информационной измерительной системы и разработаны математические модели дифракционного спектрального прибора и многоканального оптического спектрометра,

позволяющие определить связь вход-выход спектральных приборов для комплексных и энергетических спектров анализируемого оптического излучения.

Показано, что полная аппаратная функция спектрального прибора, являющаяся его исчерпывающей характеристикой, может быть представлена совокупностью аппаратных функций отдельных функциональных узлов спектрального прибора. В отличие от традиционного описания спектральных приборов, это позволило выполнить последовательный анализ прохождения анализируемого оптического сигнала через все функциональные узлы прибора (от его входа до результата регистрации спектра) и учесть влияние его конструктивных особенностей и внешних условий на результат спектрального анализа.

2. Разработан универсальный спектроскопический метод контроля процессов горения, основанный на регистрации, анализе и сопоставлении множества спектроскопических параметров, полученных как при раздельном, так и при комбинированном применении различных методов оптической спектроскопии, отличающийся тем, что описывает процедуру контроля, технические средства и спектроскопические параметры в рамках единого математического аппарата, и позволяет не только повысить достоверность проводимого контроля по сравнению с существующими методами контроля, но и сформировать требования к минимально необходимым характеристикам применяемых для спектроскопического контроля приборов, обеспечивающих заданную достоверность, а также разработать методику подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения.

Впервые введены информационные характеристики спектрального прибора контроля, которые могут служить критериями при сравнении спектральных приборов контроля разного типа по их результативности, позволяют выбрать соответствующий прибор при заданных допустимых вероятностях ошибок контроля и оценить согласованность отдельных приборов при совместном их применении для решения конкретной прикладной задачи контроля процесса горения.

Установлено, что для обеспечения достоверности контроля, выполняемого спектроскопическим методом, оптимальным правилом принятия решения будет являться то, которое позволит минимизировать вероятность ошибки 1-го рода при ограничении сверху ошибки 2-го рода. Было предложено ввести дополнительные ограничения заданных пределов, в которых должны находиться результаты измерений контролируемых параметров, и показано, что область таких допускаемых значений имеет форму n -мерного параллелепипеда и обеспечивает заданные требования к вероятностям ошибок контроля 1-го и 2-го рода, а, следовательно, и к достоверности проводимого спектроскопического контроля.

3. Предложена техническая реализация приборов контроля на базе разработанных оптических спектральных приборов с применением ВОСП анализируемых сигналов, отличающихся новизной и улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с известными прототипами.

В многоканальном оптическом спектрометре, благодаря особенностям его принципа действия, для передачи оптического излучения можно использовать не одно волокно, а жгут волокон, что повышает чувствительность прибора более чем на 15% относительно спектрометров других типов, а повышение его разрешающей способности может быть достигнуто путем применения спектрально-селективного элемента. Набор фильтров, количество которых определяется необходимым числом контролируемых параметров, позволяет сосредоточить спектрально-селективные элементы на определенном участке спектра, что дает возможность анализировать конкретный участок, а не весь диапазон. В дифракционном спектральном приборе повышение разрешающей способности достигается за счет применения дифракционной решетки нового типа, особая топология которой перераспределяет интенсивность дифрагированного света в высшие

порядки, что позволяет повысить разрешающую способность прибора более чем на 20% по сравнению с традиционной решеткой. Новизна применяемых технических решений подтверждена патентами РФ.

Исследованы энергетические потери и искажения анализируемых сигналов, возникающих при передаче их по оптическому волокну, в том числе из-за повышенных температур, и их влияние на результат спектроскопических измерений. Показано, что применение одномодового волокна приводит к ухудшению разрешающей способности прибора более чем на 30%, применение многомодового оптоволокна – более чем на 60%. Разработана методика коррекции потерь и искажений, возникающих при передаче излучения по оптоволокну. Учет и корректировка этих потерь и искажений при проектировании спектральных приборов контроля позволяют улучшить технические и эксплуатационные характеристики разрабатываемых спектральных приборов контроля в отличие от аналогов.

4. Установлены зависимости спектроскопических информационных параметров в спектре излучения контролируемого процесса горения газообразных углеводородов от режимов горения, т.е. соотношения газ-воздух, при отдельном и комбинированном применении эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии. Показано, что ПГ газообразного углеводородного топлива, может быть охарактеризован множеством параметров в количестве 22 шт., сформированных двумя методами оптической спектроскопии. Продемонстрирована возможность применения разработанных дифракционного спектрального прибора и многоканального оптического спектрометра для контроля процесса горения газообразных углеводородов.

5. Разработана методика подготовки и проведения спектроскопического контроля, позволяющая проводить контроль процессов горения газообразных углеводородов с требуемой достоверностью при применении технических средств с минимально необходимыми характеристиками.

Была выполнена проверка разработанного спектроскопического метода контроля процессов горения и экспериментальная отработка методики подготовки и проведения контроля на примере горения пропана методами эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии, выполняемого спектральными приборами серийного производства и разработанным многоканальным спектрометром. Определена достоверность проводимого контроля ПГ пропана этими приборами. Было установлено, что наибольшие вероятности ошибок возникали при контроле методом эмиссионной спектроскопии, а наименьшие – при одновременном применении эмиссионного и ЛИЭС методов спектроскопии. Показано, что одновременное применение двух методов спектроскопии (эмиссионной и ЛИЭС) для контроля одного и того же процесса, в частности процесса горения пропана, позволяет не только повысить достоверность проводимого контроля путем его проведения на основе измерения первичного параметра, характеризующего состояние процесса горения, – спектральной характеристики излучения пламени, но и дает возможность спрогнозировать направление изменения соотношения газ-воздух по взаимному изменению интенсивностей контролируемых СИП относительно друг друга, что повышает оперативность проводимого контроля.

Была продемонстрирована возможность применения метода эмиссионной оптической спектроскопии для решения задачи контроля процесса горения газообразного топлива на реальном промышленном объекте. Было показано, что применение спектроскопического метода контроля процесса горения позволяет оптимизировать сжигание природного газа в печи путем более достоверного определения коэффициента избытка воздуха и приводит к снижению его расходов до 3%, в результате чего расходы на производство могут быть существенно снижены.

По совокупности полученных в работе результатов можно сделать вывод о решении **важной проблемы**, имеющей как научное, так и практическое значение, –

оптимизации горения газообразного углеводородного топлива, в том числе за счет обеспечения полноты его сгорания, путем разработки и внедрения спектроскопического метода контроля, характеризующегося высокой достоверностью и позволяющего создавать и внедрять системы контроля процессов горения газообразных углеводородов с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

Результаты работы могут быть востребованы во всех отраслях промышленности, где возникает необходимость контроля и оптимизации режимов горения газообразных углеводородов, в том числе применяемых для выработки тепловой энергии.

IV. СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ В научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Ваганов, М.А. Спектроскопический контроль процесса горения газообразного углеводородного топлива / М.А. Ваганов // Датчики и системы. – 2022. – № 5. – С. 24-28.
2. Ваганов, М.А. Спектроскопическая система многопараметрического контроля процессов горения / М.А. Ваганов // Вестник ПГТУ. – 2021. – № 3. – С. 63–76. –doi: 10.25686/2306-2819.2021.3.63
3. Ваганов, М.А. Спектральная диагностика процесса горения газообразного углеводородного топлива / М.А. Ваганов // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 10. – С. 12–17.
4. Ваганов, М.А. Применение методов прикладной спектроскопии в задаче контроля технологического процесса производства дефторированного фосфата / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, В.Ф. Лебедев, А.Р. Бестугин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 10. – С. 15-24. – doi: 10.25791/pribor.10.2021.1296.
5. Ваганов, М.А. Диагностика процесса горения газообразного углеводородного топлива методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии / М.А. Ваганов // Датчики и системы. – 2021. – № 3. – С. 37-41. –doi: 10.25728/datsys.2021.3.4.
6. Ваганов, М.А. Многопараметрический контроль физико-химических и технологических процессов методами оптической спектрометрии / М.А. Ваганов // Вестник НЦБЖД. – 2021. – Т. 39, № 3. – С. 136-144.
7. Ваганов, М.А. Спектрально-селективный прибор диагностики горения газообразного углеводородного топлива / М.А. Ваганов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 1-7. – doi: 10.25791/pribor.5.2021.1256.
8. Ваганов, М.А. Методы оптической спектроскопии в задачах предотвращения аварийных ситуаций при выплавке тугоплавких металлов / М.А. Ваганов, В.И. Казаков [и др.] // Титан. – 2020. № 1 (67). С. 31-34.
9. Ваганов, М.А. Системный подход к решению задачи контроля процессов горения методами прикладной оптической спектроскопии / М.А. Ваганов // Датчики и системы. – 2020. – № 7. – С. 33-39.
10. Ваганов, М.А. Применение бесконтактной оптической спектроскопии в задачах многоальтернативного автоматического управления физическими и физико-химическими процессами / М.А. Ваганов, О.Д. Москалец // Датчики и системы. – 2019. – № 11. – С. 55-11. – doi: 10.25728/datsys.2019.11.1.
11. Ваганов, М.А. Методы оптической спектроскопии в системах автоматического управления процессами горения / М.А. Ваганов, О.Д. Москалец // Датчики и системы. – 2018. – № 12. – С. 32-37.
12. Ваганов, М.А. Математическая модель электромагнитного излучения пламени / М.А. Ваганов, С.В. Кулаков, О. Д. Москалец // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – № 7. – С. 25-29.
13. Ваганов, М.А. Многоканальный оптический спектрометр бесконтактного анализа для контроля процессов горения / М.А. Ваганов // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 10. – С. 39-43.
14. Ваганов, М.А. Методы теории случайных процессов в задачах спектральных измерений / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, С.В. Кулаков, О.Д. Москалец // Радиотехника. – 2017. – № 5. – С. 67-72.
15. Ваганов, М.А. Системный подход в теории оптических спектральных измерений / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, О.Д. Москалец // Датчики и системы. – 2016. – № 1. – С. 10-15.

Монография

16. Ваганов, М.А. Контроль физико-химических и технологических процессов методами оптической спектрометрии: монография / М.А. Ваганов. Санкт-Петербург: ГУАП.–2021.–149 с. ISBN 978-5-8088-1684-8

Статьи в рецензируемых журналах и изданиях, индексируемых реферативной базой Scopus и Web of Science

17. Vaganov, M.A. Applied spectroscopy methods application in the defluorinated phosphate production technological process control problem / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov V.F. Lebedev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2094. – P. 022042. – doi: 10.1088/1742-6596/2094/2/022042.
18. Vaganov, M.A. The gaseous hydrocarbon fuel combustion process diagnostics using laser-spark emission spectrometry / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2094. – P. 022055. – doi: 10.1088/1742-6596/2094/2/022055.

19. Vaganov, M.A. Experimental Study of the Influence of Ambient Temperature on the Transmission of the Analyzed Signal Through an Optical Fiber / M.A. Vaganov, S.V. Kulakov, V.I. Kazakov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2021. – P. 1-5. – doi: 10.1109/WECONF51603.2021.9470631.
20. Vaganov, M.A. Information Approach to Estimation of an Optical Spectral Device Efficiency / M.A. Vaganov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2021. – P. 1-5. – doi: 10.1109/WECONF51603.2021.9470578.
21. Vaganov, M.A. Application of Optical Spectroscopy Methods to Combustion Processes Diagnostics / M.A. Vaganov, T.S. Misnikova // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2021. – P. 1-4. – doi: 10.1109/WECONF51603.2021.9470663.
22. Vaganov, M.A. Diagnostics of the combustion process of gaseous hydrocarbon fuel by methods of applied optical spectroscopy / M.A. Vaganov, A.S. Paraskun, V.V. Kitaev // Proc. of SPIE Optical Sensors. – Bellingham, WA, 2021. – Vol. 11772. – P. 117721D. – <https://doi.org/10.1117/12.2588993>.
23. Vaganov, M.A. Diffraction losses investigation in a fiber-optic transmission line of analyzed signals for combustion processes control systems / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov // Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems. – Springer International Publishing, 2021. – P. 554-560. – doi: 10.1007/978-3-030-77448-6_54.
24. Vaganov, M.A. Monitoring systems of the combustion processes based on optical spectral devices / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov, O.D. Moskaletz // Journal of Physics Conference Series. – 2020. – Vol. 1679, № 2. – P. 022064. – doi: 10.1088/1742-6596/1679/2/022064.
25. Vaganov, M.A. Multichannel Optical Spectrometer as a Measuring Device in Multicriteria Automatic Control Systems / M.A. Vaganov // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Saint-Petersburg, Russia, 2020. – P. 1-4. – doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131501.
26. Vaganov, M.A. Narrow-band optical filter for a spectral-selective control device of physical and physicochemical processes / M.A. Vaganov, Y.A. Novikova // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862, № 2. – P. 022028. – doi: 10.1088/1757-899X/862/2/022028.
27. Vaganov, M.A. Spectrum analysis of optical signals using sequential heterodyning / M.A. Vaganov, O.D. Moskaletz, E.P. Suedov // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862, № 2. – P. 022033. – doi: 10.1088/1757-899X/862/2/022033.
28. Vaganov, M.A. Measurement of Optical Spectrum by a Spectral Device Based on an Acousto-Optic Tunable Filter with a Stepwise Tuning Frequency / M.A. Vaganov, O.D. Moskaletz, V.I. Kazakov, A.S. Khomutov // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – Moscow, Russia, 2020. – P. 1-7. – doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078586.
29. Vaganov, M.A. The multichannel optical spectrometer for combustion processes control / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov, Y.A. Novikova // Proc. of SPIE Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology. – Bellingham, WA, 2020. – Vol. 11352. – P. 1135218. – <https://doi.org/10.1117/12.2555078>.
30. Vaganov, M.A. Sequential heterodyne analysis of the spectrum of optical signals / M.A. Vaganov, O.D. Moskaletz, E.P. Suedov // Proc. of SPIE Optical Sensing and Detection VI. – Bellingham, WA, 2020. – Vol. 11354. – P. 113542Y. – <https://doi.org/10.1117/12.2564678>.
31. Vaganov, M.A. Measurement of optical spectrum by a spectral device based on an acousto-optic tunable filter with a stepwise tuning frequency / M.A. Vaganov, O.D. Moskaletz, V.I. Kazakov, A.S. Khomutov // Proc. of SPIE Optical Sensing and Detection VI. – Bellingham, WA, 2020. – Vol. 11354. – P. 113542Z. – <https://doi.org/10.1117/12.2564677>.
32. Vaganov, M.A. The Application of Contactless Optical Spectroscopy in Automatic Control Systems of Technological Processes / M.A. Vaganov, A.S. Paraskun, O.D. Moskaletz, V.I. Kazakov // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Saint-Petersburg, Russia, 2019. – P. 1-4. – doi: 10.1109/WECONF.2019.8840653.
33. Vaganov, M.A. High-Order Diffraction Grating for Optical Spectral Device / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Saint-Petersburg, Russia, 2019. – P. 1-4. – doi: 10.1109/WECONF.2019.8840121.
34. Vaganov, M.A. The Multichannel Optical Spectrometer for Diagnostics of the Liquid Propellant Rocket Engine / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov // Proc. of IEEE Xplore, 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Saint-Petersburg, Russia, 2019. – P. 1-5. – doi: 10.1109/WECONF.2019.8840114.
35. Vaganov, M.A. High-order transmissive diffraction grating for high-resolution spectral systems / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov, O.D. Moskaletz // Proc. of SPIE Modeling Aspects in Optical Metrology VII. – Bellingham, WA, 2019. – Vol. 11057. – P. 110571G. – <https://doi.org/10.1117/12.2526004>.
36. Vaganov, M.A. Contactless optical spectroscopy methods in the tasks of monitoring physical and technological processes in extreme conditions / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov, O.D. Moskaletz, A.S. Paraskun // Proc. of SPIE Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI. – Bellingham, WA, 2019. – Vol. 11056. – P. 110563W. – <https://doi.org/10.1117/12.2525795>.

37. Vaganov, M.A. Automatic control system of combustion processes based on the methods of contactless optical spectroscopy / M.A. Vaganov, O.D. Moskaletz, V.I. Kazakov // Proc. of SPIE Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI. – Bellingham, WA, 2019. – Vol. 11056. – P. 110563A. – <https://doi.org/10.1117/12.2525150>.
38. Vaganov, M.A. Reading, Processing and Correction of Spectroscopic Information in a Diffraction Grating Spectral Device / M.A. Vaganov, L.N. Preslnev, V.I. Kazakov, A.S. Paraskun // Proc. of IEEE Xplore, 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Saint-Petersburg, Russia, 2018. – P. 1-5. – doi: 10.1109/WECONF.2018.8604412.
39. Vaganov, M.A. A Model of Optical Signal Emitted by Combustion Sources / M.A. Vaganov // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2018. – P. 1-4. – doi: 10.1109/WECONF.2018.8604406.
40. Vaganov, M.A. Experimental Research of High-Temperature Burning Processes and Spectroscopic Measurements / M.A. Vaganov, A.S. Paraskun, V.I. Kazakov // Proc. of IEEE Xplore, 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – Saint-Petersburg, Russia, 2018. – P. 1-4. – doi: 10.1109/WECONF.2018.8604421.
41. Vaganov, M.A. Comparison of optical spectral devices in the framework of system approach / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov, O.D. Moskaletz // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1124, № 5. – P. 051019. – doi: 10.1088/1742-6596/1124/5/051019.
42. Vaganov, M.A. Transformation of a harmonized random process by spectral devices that perform instantaneous spectrum analysis / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov, D.O. Moskaletz, O.D. Moskaletz // Proc. of SPIE Optical Sensing and Detection V. – Bellingham, WA, 2018. – Vol. 10680. – P. 1068024. – <https://doi.org/10.1117/12.2305386>.
43. Vaganov, M.A. A system approach in the theory of optical spectral measurements / M.A. Vaganov, V.I. Kazakov, O.D. Moskaletz // Automation and Remote Control. – 2017. – Vol. 78, Iss. 6. – P. 1144-1150. – doi: 10.1134/S0005117917060145.
44. Vaganov, M.A. Photo detection process and power spectrum estimation of optical radiation by the multichannel resonant spectrum analyzer / M.A. Vaganov, O.D. Moskaletz // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 735, № 1. – P. 012060. – doi: 10.1088/1742-6596/735/1/012060.
45. Vaganov, M.A. Evaluation of the energy spectrum of optical radiation by multichannel resonant spectrometer / M.A. Vaganov, O.D. Moskaletz, A.S. Paraskun // Proc. of SPIE Optics and Photonics for Information Processing IX. – Bellingham, WA, 2015. – Vol. 9598. – P. 959818-1-920011-9. – <https://doi.org/10.1117/12.2187941>.

Патенты и свидетельства о государственной регистрации

46. Патент 188637 РФ, МПК G01J 3/26, МПК8 G01J 3/18. Селективный многоканальный оптический спектрометр: № 2018143314; заявл. 06.12.2018; опубл.: 18.04.2019 / Ваганов М.А., Бестугин А.Р.; заявитель и патентообладатель ГУАП. – Бюл. № 11. – 2 с.
47. Патент 100241 РФ, МПК8 G01J 3/26. Оптический анализатор спектра сигналов: № 2010127591/28; заявл. 02.07.2010; опубл.: 10.12.2010 / Ваганов М.А., Москалец О.Д., Пресленев Л.Н.; заявитель и патентообладатель ГУАП. – Бюл. № 34. – 2 с.
48. Патент № 86734 РФ, МПК8 G 01 J 3/26. Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона: № 2009116195/22; заявл. 28.04.2009; опубл. 10.09.2009 / Архипов И.Н., Ваганов М.А., Кулаков С.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель ГУАП. – Бюл. № 25. – 2 с.
49. Программа для расчета параметров штрихов амплитудной пропускающей дифракционной решетки: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668476 / В.И. Казаков, М.А. Ваганов. – № 2021668096; заявлен 17.11.2021; опубликован 22.11.2021. – 1 с.

Статьи и материалы конференций

50. Ваганов, М.А. Решение задачи контроля процессов горения методами прикладной оптической спектроскопии / М.А. Ваганов, Т.С. Мисникова // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXIV Международная научная конференция. Сборник статей. Санкт-Петербург: ГУАП, 2021. – С. 34-40.
51. Ваганов, М.А. Влияние температуры окружающей среды на передачу анализируемого сигнала по оптическому волокну / М.А. Ваганов, С.В. Кулаков А.В. Прохоров // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: XXIV Международной научной конференции. Сборник статей: В 3-х частях. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2021. – С. 41-46.
52. Ваганов, М.А. Высокопорядковая дифракционная решетка для оптического спектрального прибора / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, О.Д. Москалец // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : XXII Международной научной конференции. Сборник статей. Санкт-Петербург: ГУАП, 2019. – С. 104-109.
53. Ваганов, М.А. Многоканальный прибор бесконтактной спектральной диагностики жидкостного ракетного двигателя. Разработка и экспериментальное исследование / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, О.Д. Москалец // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : XXII Международная научная конференция. Сборник статей: В 2-х частях. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2019. – С. 53-59.

54. Ваганов, М.А. Считывание, обработка и коррекция спектроскопической информации в дифракционном решеточном спектральном приборе / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, А.С. Параскун // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах : XXI Международная молодежная конференция. Сборник трудов. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 172-178.
55. Ваганов, М.А. Экспериментальные исследования высокотемпературных процессов горения и их спектроскопические измерения / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, А.С. Параскун // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах: XXI Международная молодежная конференция. Сборник трудов. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 179-184.
56. Vaganov, M.A. The spectral-selective device of combustion processes control with transmitting analyzed signals by the fiber-optical bundle / M.A. Vaganov, A.S. Paraskun // Proc. of XX International Conference for Young Researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems. – St. Petersburg, 2017. – P. 185-190.
57. Ваганов, М.А. Решение задач контроля процессов горения методами оптической спектрометрии / М.А. Ваганов, М.В. Сальников // Сборник трудов XIX International Conference. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 92-94.

Научно-исследовательские работы

58. Ваганов, М.А. Методы и аппаратура бесконтактной оптической спектроскопии в задачах контроля физических и технологических процессов: отчет о НИР / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель М.А. Ваганов; Инв. № АААА-А19-119091290050-1. – Санкт-Петербург, 2021. – 93 с.
59. Ваганов, М.А. Разработка научно-технических основ формирования сигналов ошибки на базе методов бесконтактной оптической спектроскопии в системах многоальтернативного автоматического управления : отчет о НИР / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель М.А. Ваганов; Инв. № АААА-А19-119091290050-1. – Санкт-Петербург, 2020. – 76 с.
60. Ваганов, М.А. Сопоставление и оценка эффективности и качества спектральных приборов при решении спектроскопических задач в экстремальных условиях: отчет о НИР/ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель В.И. Казаков; Инв. № АААА-А17-117041010189-1. – Санкт-Петербург, 2017. – 34 с.
61. Ваганов, М.А. Теоретические и экспериментальные основы создания спектрально-селективной аппаратуры оптического диапазона для контроля объектов, находящихся в условиях повышенной температуры, влажности, агрессивной химической среды и повышенного уровня взрывоопасности : отчет о НИР / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель М.А. Ваганов; Инв. № АААА-Б17-217062020050-5. – Санкт-Петербург, 2017. – 37 с.
62. Ваганов, М.А. Разработка научно-технических основ создания приборов контроля процессов горения на базе методов бесконтактной оптической спектрометрии: отчет о НИР / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель М.А. Ваганов; Инв. № АААА-А17-117041110152-4. – Санкт-Петербург, 2017. – 37 с.
63. Ваганов, М.А. Акустооптические перестраиваемые фильтры для лазерных информационных и телекоммуникационных систем: отчет о НИР / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель О.Д. Москалец; Инв. № 115020310156. – Санкт-Петербург, 2016. – 29 с
64. Ваганов, М.А. Методы теории сигналов и теории линейных систем в задачах спектрально-корреляционной обработки сигналов оптического диапазона: отчет о НИР / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель О.Д. Москалец; Инв. № АААА-А16-116020960154-1. – Санкт-Петербург, 2016. – 29 с.