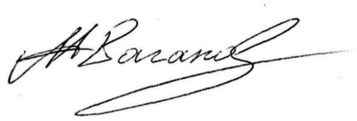
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

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)

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Бестугин Александр Роальдович

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений 7
ВВЕДЕНИЕ 9
1 Контроль процессов горения в теплоэнергетике, методы и технические средства контроля 26
1.1 Контроль процессов горения, применимых в технологических процессах выработки тепловой энергии 26
1.1.1. Общие данные о теплоэнергетике и применении тепловой энергии 26
1.1.2 Топливо, его состав и горение 28
1.1.3 Зависимость энергетических и экологических показателей теплоэнергетических установок от соотношения топливо-воздух 31
1.1.4 Методы контроля процесса горения топлива и технические средства, реализующие их 36
1.2 Методы анализа спектра в оптическом диапазоне и основные типы оптических спектральных приборов 58
1.2.1 Методы оптической спектроскопии 58
1.2.2 Типы оптических спектральных приборов 61
1.2.3 Методы проведения спектральных измерений 65
1.3 Постановка задач диссертационного исследования 70
1.4 Выводы по главе 1 74
2 Математическое описание оптического спектрального прибора как информационной измерительной системы 77
2.1 Модель анализируемого оптического сигнала и его вероятностные характеристики 78

2.2 Оптический спектральный прибор как информационная измерительная система 88
2.3 Математическая модель спектрального прибора оптического диапазона..... 93
2.3.1 Анализ комплексного спектра оптических сигналов 93
2.3.2 Анализ энергетического спектра оптических сигналов..... 100
2.3.3 Методы получения оценки энергетического спектра оптического сигнала 103
2.4 Выводы по главе 2..... 108
3 Спектроскопический метод контроля процессов горения..... 110
3.1 Постановка задачи разработки универсального спектроскопического метода контроля процессов горения 110
3.2 Процедура контроля процессов горения и вероятности ошибок контроля 113
3.2.1 Контроль как частный случай решения задачи проверки гипотезы 113
3.2.2 Вероятности ошибок в случае двустороннего контроля 116
3.2.3 Вероятности ошибок в случае одностороннего контроля 120
3.2.4 Критерии оптимального правила принятия решений 123
3.3 Погрешности спектральных измерений при контроле 125
3.4 Сопоставление результативности спектральных приборов контроля различных типов..... 135
3.5 Контроль процессов горения методами оптической спектроскопии 140
3.6 Вероятности ошибок при спектроскопическом методе контроля 146

3.7 Обеспечение требуемой достоверности спектроскопического контроля 156

3.8 Задача разработки результативной методики контроля 167

3.9 Выводы по главе 3 170

4 Техническая реализация приборов контроля в форме оптических спектральных приборов 174

4.1 Оптические спектральные приборы с передачей анализируемых сигналов по оптическому волокну 174

4.2 Применение оптического волокна в качестве линии передачи анализируемого излучения 188

4.2.1 Волоконно-оптическая система передачи анализируемых сигналов. Теоретический расчет блока ввода излучения в волокно 188

4.2.2 Исследование искажений аппаратной функции спектрального прибора, возникающих в результате применения оптического волокна 195

4.2.3 Исследование энергетических потерь в волоконно-оптической системе передачи 202

4.2.4 Экспериментальное исследование влияния температуры окружающей среды на передачу анализируемого сигнала по оптическому волокну 211

4.3 Выводы по главе 4 218

5 Спектроскопические параметры, характеризующие горение газообразных углеводородов, и методика подготовки и проведения спектроскопического контроля 220

5.1 Информационные параметры в спектре излучения контролируемого процесса горения газообразных углеводородов 220

5.2 Экспериментальное исследование спектроскопических параметров в спектре излучения, возникающего при горении пропана 224
5.2.1 Метод эмиссионной оптической спектроскопии 224
5.2.2 Метод лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии 232
5.2.3 Экспериментальное исследование спектроскопических информационных параметров горения пропана разработанными спектральными приборами 242
5.2.4 Спектроскопические информационные параметры, характеризующие процесс горения пропана 247
5.3 Методика подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения 249
5.4 Спектроскопический контроль процесса горения газообразных углеводородов 252
5.4.1 Постановка задачи экспериментальной отработки методики спектроскопического контроля 252
5.4.2 Описание экспериментальной отработки методики спектроскопического контроля 254
5.5 Экспериментальное исследование процесса горения в топке промышленной печи и его контроль спектроскопическим методом 264
5.5.1 Описание технологического процесса производства дефторированного фосфата 265
5.5.2 Экспериментальное исследование процесса горения в печи обжига с помощью метода эмиссионной оптической спектроскопии и применение спектроскопического метода контроля 269
5.6 Выводы по главе 5 277

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 281

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 286

Приложение А Акт внедрения от ООО «СЕВЗАПТЕХНИКА»..... 311

Приложение Б Акт внедрения от АО «КНАУФ ПЕТРОБОРД» 312

Приложение В Акт об использовании от ООО «Теплоэнергосервис ДКМ» 313

Приложение Г Акт внедрения от ООО «ПГ «Фосфорит» 314

Приложение Д Акт об использовании от АО «Научно-Исследовательский институт Точной Механики»..... 315

Приложение Е Акт об использовании от ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» 317

Приложение Ж Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ 319

Список сокращений

АОПФ – акустооптический перестраиваемый фильтр

АФ – аппаратная функция

БУФ – блок узкополосной фильтрации

ВАК – высшая аттестационная комиссия

ВОЖ – волоконно-оптический жгут

ВОСП – волоконно-оптическая система передачи

ГУ – газообразные углеводороды

ДР – дифракционная решетка

ДСП – дифракционный спектральный прибор

ИИС – информационная измерительная система

ИК – инфракрасный

КИВ – коэффициент избытка воздуха

КПД – коэффициент полезного действия

КЭС – конденсационная электростанция

ЛИЭС – лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия

МОС – многоканальный оптический спектрометр

НИР – научно-исследовательская работа

ОВ – оптическое волокно

ОИ – оптическое излучение

ОК – ошибка контроля

ОС – оптический сигнал

ПГ – процесс горения

ПЗС – прибор с зарядовой связью

ПОВ – полимерное оптическое волокно

СИ – спектроскопическая информация

СИП – спектроскопические информационные параметры

СП – спектральный прибор

СПК – спектральный прибор контроля

СХ – спектральная характеристика

ТЭС – тепловая электростанция

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль

УФ – ультрафиолетовый

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

ЭЧХ – энергочастотная характеристика

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Согласно энергетической стратегии России на период до 2035 года [1] одним из главных направлением 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 (ТЭС), на которых электрическая энергия вырабатывается путем преобразования тепловой энергии, полученной в результате сжигания органического топлива [2]. При этом на долю ТЭС приходится около 30 % всех отходов с выбросами стационарных промышленных установок, загрязняющих атмосферный воздух [3]. Снижения негативного воздействия работы теплоэнергетических установок на окружающую среду и увеличения коэффициента использования топлива можно добиться путем совершенствования его сжигания. Поэтому задачи контроля, диагностики и оптимизации процессов горения (ПГ), применяемых для выработки тепловой энергии, приобретают особую актуальность.

Одним из самых эффективных видов топлив, в первую очередь с позиции экологических и технико-экономических показателей теплоэнергетических объектов, является природный газ, что обусловлено низкой себестоимостью, легкостью его подготовки к сжиганию и транспортировки, а также высокой теплотой сгорания [2]. При этом в современных условиях безопасное и высокоэффективное сжигание газового топлива немыслимо без широкого применения средств контроля. Это продиктовано тем, что при избытке воздуха горение сопровождается выделением большого количества оксида азота NO, который в атмосфере окисляется до диоксида азота NO_2, а при его недостатке происходит

неполное сгорание топлива, что приводит к его перерасходу и образованию токсичных веществ: монооксида углерода CO, бенз(а)пирена и др [4].

Зачастую при определении коэффициента избытка воздуха (КИВ), т.е. соотношения газ/воздух, работа систем контроля горения газообразных углеводородов (ГУ) основывается на измерении косвенных параметров: температуры, расхода газа и воздуха, подаваемых в топку, давления в различных участках топки печи, цветовому изображению пламени, концентрации химических элементов, например, O_2, CO, и CO_2 в составе дымовых газов и т.п. [2, 5-7]. 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, когда контроль выполняется по составу уходящих газов в дымоходах.

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 процессов горения под достоверностью контроля подразумевается степень объективного соответствия результатов контроля действительному состоянию протекаемого процесса горения [8]. Таким образом, достоверность является показателем контроля процесса горения, 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 ГУ, 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 (СХ) оптического излучения (ОИ), испускаемого непосредственно очагом горения [9]. Методы оптической спектроскопии можно отнести к числу наиболее чувствительных и информативных [9], поэтому проведение на их основе контроля процесса горения газообразных углеводородов видится наиболее перспективным, в том числе с позиции повышения его достоверности. При этом, получаемая спектроскопическая информация (СИ) представляет собой множество спектроскопических информационных параметров (СИП) в виде интенсивностей отдельно стоящих спектральных линий или участков спектра ОИ, испускаемого пламенем. Выполняя контроль на основе анализа и сопоставления множества таких параметров, возможно повысить не только его достоверность, но и оперативность проводимого контроля.

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 процессов горения с повышенной достоверностью по сравнению с существующими методами контроля. Разработанный метод отличается тем, что описывает процедуру контроля, анализируемые оптические сигналы (ОС), несущие информацию о контролируемом процессе, и применяемые спектральные приборы контроля (СПК) на базе единого математического аппарата, и позволяет не только оценить и сопоставить результативность различных СПК, но и сформировать

требования к минимально необходимым характеристикам применяемых для контроля спектральных приборов (СП), позволяющих обеспечить требуемую достоверность проводимого контроля и разработать методику подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения.

Предлагаемые научные исследования являются развитием теории и практики оптической спектрометрии, 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 B.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 процесса горения 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 были 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 процессов горения рассматривался в рамках теории вероятностей [10, 11] и математической статистики [12, 13]. Теоретическое описание процесса анализа спектра ОС опирается на сформулированные в теории сигналов [15, 16] и теории спектрального анализа [14] понятия спектральных функций, их преобразований в рамках теории линейных систем [17-20] и теории информации [21, 22]. В силу специфики спектроскопического метода контроля к его теоретическому описанию были применены методы матричного исчисления [23], теории многомерных линейных систем [24] и вариационного исчисления [25]. Так как в спектральных приборах контроля для передачи анализируемого сигнала применяется оптическое волокно (ОВ), вопросы, связанные с возникающими потерями и искажениями передаваемых по нему сигналов, рассмотрены в рамках методов теории и техники волоконно-оптической связи и волновой оптики [26, 27]. Для установления зависимости спектроскопических информационных параметров, характеризующих протекание контролируемых процессов горения, от режимов горения применяются прикладные методы эмиссионной оптической спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии [28, 29]. Представление и обработка полученных математических зависимостей и результатов расчета потребовало применение методов компьютерного моделирования с применение 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 (ИИС) 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 (ДСП) и многоканального оптического спектрометра (МОС), 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 оптического 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 промышленностей.

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 спектроскопических параметров, 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 применение 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 отработка.

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» (предложено математическое описание спектрального прибора контроля как информационной измерительной системы; разработан универсальный спектроскопический метод контроля процессов горения газообразных углеводородов на основе регистрации, анализа и сопоставления множества спектроскопических информационных параметров, полученных как при раздельном, так и при комбинированном применении различных методов оптической спектроскопии);

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» (предложены технические реализации

приборов контроля на базе разработанных оптических спектральных приборов с передачей анализируемых излучений по оптическому волокну и технические решения, позволяющие улучшить их технические характеристики по сравнению с известными аналогами);

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» (установлены зависимости от режимов горения спектроскопических параметров в спектре излучения пламени газообразных углеводородов, полученные методами эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой спектрометрии; предложена методика подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения, позволяющая выбрать применяемый для контроля прибор, минимальные характеристики которого обеспечивают требуемую достоверность контроля);

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 (универсальный спектроскопический метод контроля на основе регистрации, анализа и сопоставления множества спектроскопических информационных параметров может быть применен при построении системы автоматического контроля на теплоэнергетических объектах).

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. НИР (РФФИ) № 115020310156 на тему «Акустооптические перестраиваемые фильтры для лазерных информационных и телекоммуникационных систем» (2015-2017 гг.), **соисполнитель**.

2. НИР (РФФИ) № АААА-Б17-217062020050-5 на тему «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» (2015-2016 гг.), **руководитель**.

3. НИР (РФФИ) № 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. НИР (РФФИ) № 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. НИР (РФФИ) № 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. НИР (Грант Президента РФ) № 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. НИР (РНФ) № АААА-А19-119091290050-1 на тему «Методы и аппаратура бесконтактной оптической спектроскопии в задачах контроля физических и технологических процессов» (2019 - 2022 гг.), **руководитель**.

8. НИР (РФФИ) № 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 и специалистов «Оптика – 2015» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.); XVIII, XIX, XX, XXI, XXII, XXIII и XXIV международных научных 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-th International School and Conference “Saint Petersburg OPEN 2018” on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); на четвертой 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.

1 Контроль процессов горения в теплоэнергетике, методы и технические средства контроля

1.1 Контроль процессов горения, применимых в технологических процессах выработки тепловой энергии

1.1.1. Общие данные о теплоэнергетике и применении тепловой энергии

Энергетика является областью национальной экономики, науки и техники и охватывает широкий круг вопросов, связанных с энергетическими ресурсами, производством, передачей, преобразованием, хранением, распределением и потреблением энергии различных видов. Одним из разделов энергетики является теплоэнергетика, занимающаяся производством, использованием и преобразованием тепла в энергию различных видов, главным образом в механическую и через нее в электрическую [30].

Тепловые электрические станции (ТЭС) представляют основу современной энергетики. На них электрическая энергия вырабатывается путем преобразования тепловой энергии, полученной в результате сжигания органического топлива. В свою очередь тепловые электростанции подразделяются на конденсационные электростанции (КЭС), предназначенные только для выработки электрической энергии, и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), одновременно вырабатывающие как электрическую энергию, так и тепловую, используемую для обеспечения централизованного снабжения теплотой в виде горячих воды и пара [2]. Производящие электроэнергию электрические станции, электрические и тепловые сети, а также потребители электрической и тепловой энергии в совокупности составляют электроэнергетическую систему [2].

Одновременная выработка двух видов энергии: электрической и тепловой, - дает возможность лучше использовать сжигаемое топливо и повысить мощность одного агрегата. Как правило, это реализуется на

паротурбинных электрических станциях, отличающихся относительно высокой экономичностью и наименьшими удельными капитальными затратами на сооружение по сравнению с другими электрическими станциями. При этом основными тепловыми агрегатами являются паровая турбина и паровой котел [2].

Из вышесказанного следует, что энергетика тесно связана с промышленностью и является одной из важных составляющей производственной базы страны. Поэтому задачи контроля и оптимизации ПГ, применяемых для выработки тепловой энергии, приобретают особую актуальность.

Помимо энергетики, тепловая энергия используется и в других отраслях промышленности, таких как химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, металлургической и т.п., где основными потребителями топлива являются печи и агрегаты, производящие тепловую энергию для применения в различных технологических процессах [31-33]. При этом с увеличением добычи нефти и полезных ископаемых, производства удобрений, выпуска товаров нефтепереработки и других сырьевых товаров возрастает и количество потребления тепловой энергии на собственные нужды предприятий промышленности. На этих предприятиях вопросы экологической безопасности и эффективного использования топлива являются не менее актуальными, чем в энергетике.

Агрегаты, сжигающие топливо, являются источником вредных выбросов в атмосферу, в основном, окислов азота и серы. Поэтому вследствие отрицательного воздействия токсичных выбросов продуктов сгорания топлива вопросы выработки тепловой энергии и экономии топлива неотделимы от вопросов охраны окружающей среды [4].

1.1.2 Топливо, его состав и горение

Процесс горения представляет собой сложный физико-химический процесс превращения компонентов горючей смеси в продукты сгорания с выделением теплового излучения, света и лучистой энергии [34].

Важнейшей характеристикой топлива, определяющей ряд показателей, на основе которых выполняется анализ процессов, происходящих в разных теплоэнергетических установках, является его состав [2]. При этом все топлива могут быть разделены на природные и искусственные. Органические топлива, содержащие углерод и его соединения, и непосредственно добываемые из недр земли относятся к природному виду топлива, например, уголь, торф, сланцы, нефть, природный газ. Искусственные топлива получаются в результате переработки на специализированных предприятиях (газовых, нефтеперерабатывающих, металлургических) природного вида топлива. К искусственными видам топлива можно отнести: газ пиролиза нефти, мазут, генераторный газ, кокс, полукокс, коксовый уголь, доменный уголь и т.п. [2].

Газовое топливо (природное или искусственное) представляет собой смесь горючих и негорючих газов. Состав газового топлива определяется содержанием соответствующих газов [35]:

- CO, H_2, ΣC_mH_n, H_2S — горючая часть газообразного топлива;
- CO_2, N_2, O_2 — негорючая часть газообразного топлива (балласт);
- $\Sigma C_mH_n = CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} + C_5H_{12}$ — суммарное содержание углеводородов: метана, этана, пропана, бутана, пентана соответственно.

Одним из самых эффективных видов топлив, в первую очередь с позиции экологических и технико-экономических показателей теплоэнергетических объектов, является природный газ, что обусловлено низкой себестоимостью, легкостью его подготовки к сжиганию и транспортировки, а также высокой теплотой сгорания [2]. Основную часть

природного газа составляет метан (CH_4) от 76 до 98 % [35]. Характерной особенностью состава этих газов является наличие в них, кроме метана (CH_4), также этана (C_2H_6), пропана (C_3H_8), бутанов (C_4H_{10}) и паров более тяжелых углеводородов; во многих попутных газах присутствуют сероводород (H_2S) и негорючие компоненты: азот (N_2), углекислый газ (CO_2), - а также редкие газы: гелий (He) и аргон (Ar).

Органические топлива твердого и жидкого вида представляют собой сложные химические соединения горючих и негорючих веществ. При этом стоит отметить, что структура таких видов топлива до настоящего времени изучена недостаточно [2]. Среди основных химических элементов, входящих в состав любого топлива твердого или жидкого вида, можно выделить углерод (C), кислород (O_2), водород (H), сера (S) и азот (N_2). Кроме того, топлива твердого или жидкого вида содержат влагу и негорючие минеральные вещества, образующие при сжигании золу. Золу и влагу называют внешним балластом топлива [2].

Входящая в состав органических топлив сера может находиться в трех видах: в виде органической серы $S_{ОРГ}$, колчеданной $S_К$ и сульфатной $S_С$. Колчеданная сера представляет собой сульфиды металлов, чаще всего железистый колчедан FeS_2, органическая сера входит в состав высокомолекулярных органических соединений топлива, сульфатная сера, входящая в минеральную часть топлива, представляет собой сульфаты $CaSO_4$, $MgSO_4$, $FeSO_4$ [2]. Органическая и колчеданная сера $S_{ОРГ+К}$ при горении топлива окисляется с выделением теплоты, а сульфатная сера не подвергается дальнейшему окислению и переходит в золу.

В жидком топливе сера содержится в виде сероорганических соединений, элементарной серы S и сероводорода H_2S.

Жидкое топливо, используемое в энергетике, получают из нефти методами ее термохимического разложения. Нефть – смесь жидких органических соединений состоит из углеводородов трех классов [36]:

а) метановые углеводороды CnH_2n+2: метан CH_4, этан C_2H_6, пропан C_3H_8, бутан C_4H_{10} и др.;

б) нафтеновые углеводороды: циклопентан C_5H_{10}, циклогексан C_6H_{12} и др.;

в) ароматические углеводороды: бензол C_6H_6, толуол C_7H_8.

В основе ПГ топлива лежат химические реакции окисления горючих компонентов топлива: углерода C, водорода H и серы S — для твердых и жидких топлив и углеводородов C_mH_n, монооксида углерода CO, водорода H_2 и сероводорода H_2S — для горючих газов [2].

При горении углерода при полном его окислении образуется CO_2. При горении водорода - H_2O. Горение серы происходит с образованием SO_2 [37].

В котельных агрегатах при сжигании топлива в качестве окислителя применяется воздух, состоящий из: кислорода — 21 %, азота — 78 %, углекислого газа, инертных газов и др. — 1 %.

При точном подборе нужного для окисления количества воздуха и полном сгорании топлива газообразные продукты не содержат кислород и состоят только из CO_2, SO_2, N_2 и H_2O.

В результате неполного сгорания топлива из-за его недостаточного перемешивания с окислителем в дымовых газах увеличивается концентрация монооксида углерода (CO) и углеводородов типа CH_4, C_2H_4 и бенз(а)пирена $C_{20}H_{12}$ [2].

Монооксид углерода является сильным отравляющим газом. Вдыхание в течение нескольких минут воздуха, содержащего от 0,4 до 0,5 % монооксида углерода, становится опасно для жизни. Образующийся в продуктах горения в результате неполного сгорания топлива бенз(а)пирен также является сильно токсичным веществом [2].

Содержащийся в воздухе и органическом топливе азот при сжигании топлива становится реакционноспособным, и, в результате его соединения с кислородом, образуются оксиды: NO, NO_2, N_2O. Более 95% оксидов азота приходится на монооксид азота NO. При этом можно выделить два

различных источника образования оксидов азота: в первом случае образование так называемых «термических» и «быстрых» оксидов азота происходит в результате окисления атмосферного азота, который содержится в воздухе, расходуемом при сжигании топлива, в качестве второго источника являются «топливные» оксиды азота, образующиеся при окислении азотсодержащих составляющих топлива. При избытке воздуха выделение оксида азота NO, который в атмосфере окисляется до NO_2, значительно увеличивается [2].

1.1.3 Зависимость энергетических и экологических показателей теплоэнергетических установок от соотношения топливо-воздух

Повысить эффективность выработки тепловой энергии и коэффициент использования топлива, а также снизить негативное воздействие работы теплоэнергетических установок на окружающую среду можно путем оптимизации процесса горения топлива в топках печей, котлов и теплоэнергетических установках.

Так как эффективность горения определяется в основном соотношением воздуха и топлива, то важнейшей характеристикой эффективности протекания процесса горения является коэффициент избытка воздуха (КИВ) $\alpha_{КИВ}$ [2]:

- При α=1, состав смеси топливо-окислитель называется стехиометрическим, при котором количество окислителя соответствует необходимому для полного сгорания топлива.
- При $\alpha_{КИВ}$ <1 – смесь называется богатой.
- Если $\alpha_{КИВ}$ >1 – смесь называется бедной.

На рисунке 1.1 приведен пример зависимости основных энергетических и экологических показателей сжигания топлива от КИВ $\alpha_{КИВ}$ [5].

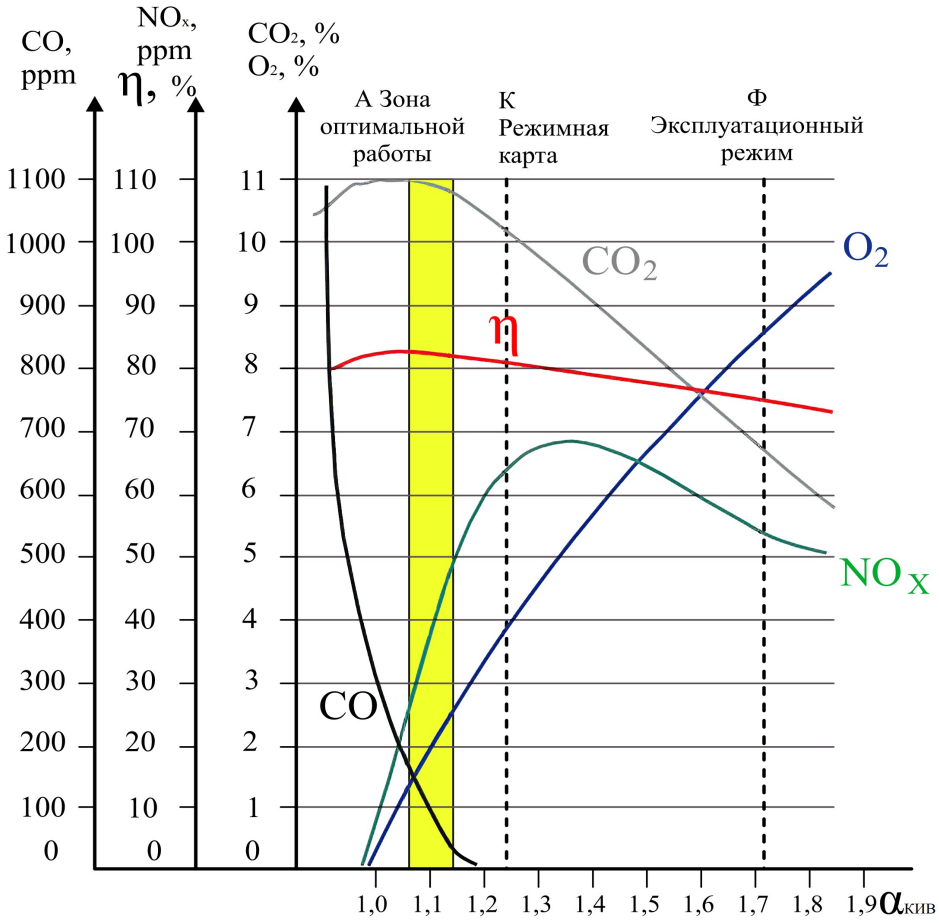


Рисунок 1.1 – Типичная зависимость энергетических и экологических показателей сжигания топлива от соотношения топливо-воздух [5]

За оптимальный коэффициент избытка воздуха принимается такой, при котором достигается максимальная эффективность сгорания, при этом сумма потерь теплоты сгорания с отходящими дымовыми газами и от так называемого химического недожога минимальны.

Зависимость потери теплоты от КИВ в топке имеет двойственную природу. С одной стороны, при недостаточном количестве воздуха, подаваемого на горение, происходит неполное сгорание топлива, и образуются продукты неполного сгорания (CO, H_2, CH_4, C_mH_n и др.), что приводит к появлению потерь от химического недожога. С другой стороны, при увеличении подачи воздуха потери теплоты от химического недожога снижаются, но увеличиваются тепловые потери из-за увеличения объема дымовых газов, снижения температуры в топке и замедления скорости

химических реакций горения. Кроме того, при определённом предельном количестве избыточного воздуха, факел слишком сильно охлаждается, и начинают образовываться CO и сажа.

В основном камеры сгорания спроектированы таким образом, чтобы обеспечить сгорание с заданным соотношением топливо-воздух при избытке воздуха около 10–20% относительно стехиометрического значения воздуха [38].

Согласно ГОСТ 21204-97 [39], для обеспечения полноты сжигания топлива и минимизации выбросов вредных веществ в атмосферу газовые горелки, применяемые в теплоэнергетических установках, должны обеспечивать КИВ $\alpha_{КИВ}$, не превышающий значений от 1,05 до 1,15. Зачастую на многих теплоэнергетических объектах, особенно там, где используются устаревшие установки, превышение количества воздуха оптимального значения может доходить до 50% в зависимости от типа горелки [40], что приводит к увеличению расхода топлива и вредных выбросов в атмосферу.

Приблизительные значения O_2 и CO_2 в дымовых газах при различных значениях избытка воздуха приведены в таблице 1.1 [38].

Таблица 1.1 – Содержания O_2 и CO_2 в дымовых газах при различных значениях избытка воздуха [38].

Избыток воздуха, %	CO_2,% об.					O_2,% об.
	Природный газ	Пропан, бутан	Жидкое топливо (нефть)	Уголь (битумный)	Уголь (антрацит)	все виды топлива
0	12	14	15,5	18	20	0
20	10,5	12	13,5	15,5	16,5	3
40	9	10	12	13,5	14	5
60	8	9	10	12	12,5	7,5
80	7	8	9	11	11,5	9
100	6	6	8	9,5	10	10

Состав и количество продуктов сжигания метана в зависимости от изменения КИВ приведены в таблице 1.2 [41].

Таблица 1.2. Зависимость состава и количества продуктов сжигания метана от КИВ

Показатель	КИВ, $\alpha_{КИВ}$				
	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
Объем воздуха, $м^3$	9,52	10,47	11,42	12,38	13,33
Состав продуктов сгорания, % об.					
H_2O	19,11	17,43	16,10	14,95	13,96
CO_2	11,8	10,8	9,8	8,8	7,8
O_2	-	1,74	3,22	4,49	5,58
N_2	71,38	72,11	72,63	73,08	73,48

Установлено, что при сжигании природного газа с коэффициентом избытка воздуха в топке 1,05 в продуктах сгорания бенз(а)пирена оказывается не больше, чем в воздухе атмосферы. Вместе с тем при неправильном ведении ПГ количество бенз(а)пирена может значительно увеличиться и до 10 раз [2].

При поддержании предельно низкого коэффициента избытка воздуха в диапазоне $\alpha_{КИВ}$ от 1,01 до 1,15 возможно снизить выбросы оксида азота на 25-30% по сравнению с режимом работы теплоэнергетической установки с $\alpha_{КИВ}$ от 1,15 до 1,20. При этом экономия топлива достигает 5-6% [42].

Потери теплоты в увеличенном объеме дымовых газов при избыточном количестве воздуха могут достигать 30% [43], и в результате общая эффективность сжигания топлива снижается. При этом уменьшение величины избытка воздуха на 15% (на 1,3 об.% O_2) повышает КПД котла на 1% [43].

В таблице 1.3 приведена зависимость КПД сжигания топлива, т.е. производительности котла от процентного содержания воздуха и кислорода в дымовых газах [44].

Таблица 1.3 - Зависимость КПД сжигания топлива от процентного содержания воздуха и кислорода в дымовых газах

Избыток, %		КПД сжигания топлива, %				
		Температура отработанного газа минус температура воздуха в камере сгорания, C^0				
Воздух	O_2	100	150	200	250	300
9,5	2,0	85,4	83,1	80,8	78,4	76,0
15,0	3,0	85,2	82,8	80,4	77,9	75,4
28,1	5,0	84,7	82,1	79,5	76,7	74,0
44,9	7,0	84,1	81,2	78,2	75,2	72,1
81,6	10,0	82,8	79,3	75,6	71,9	68,2

В работе [45] на примере технологического котла мощностью 25 тонн в час показано, что увеличение КПД сжигания природного газа на 1%, 2% и 3% приводит к ежегодной экономии расхода топлива на 178218,90 $м^3$, 352037,33 $м^3$ и 521616,29 $м^3$, соответственно, что эквивалентно экономии 1,07 млн. рублей, 2,11 млн. рублей, 3,13 млн. рублей в год соответственно.

В работе [40] приводятся результаты исследования экономической эффективности оптимизации режимов горения на примере котла ДКВР-20, работающего в котельной 2-й Красносельской ЮЗФ ТЭК (г. Санкт-Петербург). Показано, что при снижении КИВ $\alpha_{КИВ}$ с 1,9 до 1,42 экономия топлива составляет порядка 6%.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

1. При оптимальном горении количество вредных выбросов может быть снижено до 40%, а расход топлива - уменьшен до 5-6%, что приведет к

снижению себестоимости тепловой энергии и повышению экологической и техногенной безопасности теплоэнергетического объекта.

Кроме того, благодаря снижению количества расходуемого топлива также снижается количество выбросов CO_2.

2. Для того чтобы повысить эффективность выработки тепловой энергии и коэффициент использования топлива, а также снизить негативное воздействие работы теплоэнергетических установок на окружающую среду, количество избыточного воздуха должно быть очень точно отрегулировано.

1.1.4 Методы контроля процесса горения топлива и технические средства, реализующие их

1.1.4.1 Контроль процесса горения по косвенным параметрам

При выработке теплоты на тепловых электростанциях структура топливного баланса представлена следующим образом: доля природного газа составляет порядка 60%, угля и мазута 30% и 10% соответственно. При этом мазут используется только для растопки котлов и подсветки при сжигании низкореакционных углей [2]. Кроме того, в последнее время в рамках глобальной экологической повестки идет активный переход на более экологические виды топлива, к которым можно отнести природный газ. Поэтому в рамках данной работы основной акцент сделан на контроль, именно газообразных углеводородов.

В большинстве случаев режимы горения газообразного углеводородного топлива на промышленных объектах оптимизируются периодически. Составляются режимные карты, на основании которых поддерживается оптимальное соотношение топливо-воздух при номинальной нагрузке. Найденное таким образом соотношение поддерживается постоянным при любых нагрузках котла. Результатом является перерасход

топлива и существенное падение КПД котла, в частности на малых нагрузках [5]. Такой способ является недостаточно эффективным, он не позволяет вести учет изменения температуры и влажности топлива и воздуха, теплотворной способности и температуры газа, а также ряда других внешних факторов. Например, сезонное понижение температуры наружного воздуха на 22°С приводит к увеличению избытка воздуха в топке котла на 10% [43]. В связи с этим, при составлении режимных карт допускают наличие значительного избытка воздуха, чтобы ни при каких условиях не допустить возникновения химического недожога. В результате в некоторых режимах количество воздуха превышает оптимальное в 1,5-2 раза, что увеличивает расход энергии на его подачу и приводит к необходимости нагрева избыточно подаваемого воздуха, т.е. к дополнительному расходу топлива [40].

При этом принцип действия систем контроля процессов горения, применяемых для выработки тепловой энергии, базируется на определении коэффициента избытка воздуха путем измерения косвенных параметров, к которым можно отнести температуру, давление, расход, состав дымовых газов и т.п. Таким образом, это те параметры, которые характеризуют процесс горения по некоторым второстепенным признакам и не дают представления о состоянии и динамики процессов, происходящих непосредственно в пламени очага горения.

Для измерения температуры в основном применяются различные термометры и пирометры. Среди которых можно выделить [2]:

- термометры расширения, основанные на свойстве тел изменять объем в результате изменения температуры;
- термометры сопротивления, работа которых основана на изменении электрического сопротивления металлических проводников от температуры;
- термоэлектрические пирометры, действие которых заключается в том, что в разомкнутом контуре, состоящем из двух разнородных

проводников (термопары) непрерывно течет ток, если места спаев этих проводников имеют разную температуру;

- и другие.

Давление измеряется различными манометрами, например, пружинными, электроконтактными, электрическими, дифференциальными и другими манометрами [2].

Для измерения избыточного давления жидкости, газа или пара в котельных установках широкое распространение находят пружинные манометры. Принцип действия таких манометров основан на использовании специальных пружин и зависимости их упругой деформации от изменения давления. В электроконтактных манометрах в качестве упругого чувствительного элемента используется одновитковая трубчатая пружина [2].

Для измерения небольших разряжений и избыточных давлений продуктов сгорания, газа или воздуха применяются тягомеры и напоромеры, соответственно, широкое распространение среди которых находят жидкостные стеклянные и мембранные [2].

Одним из способов контроля и оптимизации процесса горения ГУ является анализ состава продуктов сгорания в отходящих дымовых газах. Информация о содержании этих газов может использоваться для определения коэффициента избытка воздуха с последующей его корректировкой.

В настоящее время существует несколько методов контроля процессов горения по составу продуктов сгорания в дымовых газах [5]:

- по концентрации остаточного кислорода (O_2) в продуктах сгорания;
- по концентрации продуктов химнедожога оксида углерода (CO);
- с использованием совместной информации о концентрации O_2 и продуктов неполного горения CO.

Многие автоматические системы оптимизации сжигания ГУ путем контроля соотношения топливо-воздух, основываются на определении

содержания кислорода в отходящих дымовых газах с помощью газоанализаторов.

Так, например, регулирование эффективности процесса горения в барабанных паровых котлах осуществляется на основе зависимости КПД и суммарных потерь от избытка воздуха, определяемой индивидуально для каждого агрегата путем поддержания коэффициента избытка воздуха, при котором КПД котла стремится к максимуму, а суммарные потери – к минимуму. При этом значение коэффициента избытка воздуха оценивается по содержанию свободного кислорода в дымовых газах, покидающих топочную камеру [3, 46]. Однако наличие CO в продуктах сгорания искажает результат измерения. К тому же при снижении нагрузки котла поддержание постоянной концентрации кислорода за котлом неизбежно приводит к химнедожогу [5].

Система контроля процесса горения газообразных углеводородов, основанная на измерении концентрации CO, обладает более высокой чувствительностью к отклонению режима горения от оптимального по сравнению с системой контроля на базе измерения только кислорода, однако 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 [5].

Более объективным способом контроля процесса горения является совместный непрерывный анализ содержания кислорода и угарного газа, который можно проводить, используя электрохимические, парамагнитные и оптические датчики.

Электрохимический метод основан на измерении параметров системы, состоящей из электролита, электродов и определяемого компонента газовой смеси или реакции его продуктов с электролитом, с помощью изменения электропроводности растворов при поглощении ими определяемого

компонента газовой смеси [41]. Как правило, анализируемый компонент диффундирует через мембрану к аноду, где происходит химическая реакция. В процессе непрерывной эксплуатации электрохимических датчиков в таких агрессивных и влагосодержащих средах, как дымовые газы котлов, наблюдается нестабильность характеристик и дрейф показаний. На точность измерения оказывает значительное влияние анализируемая среда: температура, влажность, состав газа [40]. Постоянные отложения из отходящих газов на мембране приводят к уменьшению ее чувствительности.

Применение парамагнитных датчиков также не является эффективным, поскольку они требуют системы забора пробы из области дымового потока, ее охлаждения и очистки.

Ко всему прочему, вышеперечисленные приборы определяют избыток воздуха в точке измерения и не дают объективной информации о полноте сгорания, имеют низкое быстродействие, сложны в эксплуатации и требуют постоянного контроля системы удаления конденсата и пыли.

Для регулирования режима горения на основе совместной обработки информации о концентрации кислорода (O_2) и оксида углерода (CO) могут применяться каталитические датчики, например, на основе керамических сенсоров, определяющих содержание CO и O_2 при температурах анализируемого газа до 1000 ^{0}C [40].

В качестве чувствительного элемента в таких датчиках может применяться, например оксид циркония, являющийся керамическим материалом и хорошим электроизолятором. На рисунке 1.2 приведено схематичное изображение типичного циркониевого датчика кислорода [47].

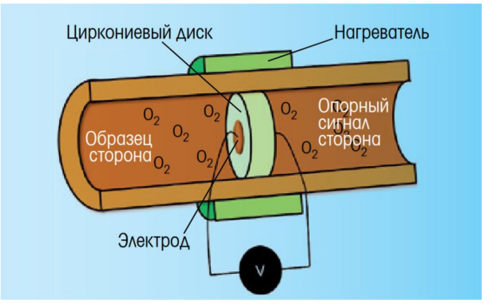


Рисунок 1.2 – Типичный циркониевый датчик кислорода [47]

Для того чтобы элемент работал, сначала необходимо снизить его исходное сопротивление электрическому току. Это достигается нагреванием циркония до высокой температуры. Для создания электрической цепи к поверхности приклеивают два электрода, по одному - с каждой стороны, чтобы к элементу можно было подключить выходные провода.

Датчики такого типа характеризуются низкой прочностью, обусловленной необходимостью нагревания до высоких температур конструкции электрода и постоянным воздействием агрессивной химической среды, например едких газов, таких как соединения серы. Кроме того, используемые катализаторы легко поддаются ингибированию, вследствие чего снижается чувствительность датчика. В результате срок службы керамического датчика, как правило, не превышает трех лет.

В настоящее время для решения задач контроля процессов горения ГУ все более широкое применение в практике находят оптические методы, на которые и будет сделан акцент в данной главе. К таковым следует отнести методы измерения температуры, определения контраста цветовых компонентов пламени, спектроскопические методы и т.п.

Измерение температуры на базе оптического метода заключается в дистанционном анализе температурных полей в заданных областях топки. При этом измеряется некая эффективная яркостная, цветовая температура, отличие которой от истинной главным образом определяется испускательной способностью среды [9].

Стоит отметить, что в большинстве случаев при измерении температуры оптическим методом требуется выделение и измерение узких спектральных участков, в результате чего выходной сигнал, регистрируемый чувствительным элементом, имеет достаточно малую величину. Это требует применения электронных усилителей, обладающих значительным коэффициентом усиления, что в свою очередь приводит к увеличению собственных шумов таких приборов и увеличению погрешности измерений,

что особенно проявляется при измерении быстропеременных температур в широком диапазоне [9].

Метод контроля ПГ газовоздушной смеси в топке котельного агрегата основанный на определении контраста цветовых компонентов пламени рассматривается в работах [41, 48]. В основе данного метода лежит взаимосвязь коэффициента избытка воздуха с параметрами цветного изображения пламени, получаемого с помощью видеокамеры SAMSUNG HMX-Q10BP.

Изменение R-,G-,B- сигналов в цветном изображении пламени в зависимости от изменения КИВ неоднозначно отражает этот коэффициент, что ставит под сомнение эффективность данного метода для определения состояния качества горения газовоздушной смеси в топке котельного агрегата. К тому же определение качества горения выполняется по косвенному параметру – цвет пламени, без количественного и качественного определения продуктов горения. Данный метод целесообразно использовать только на начальном этапе возникновения горения – в режиме растопки котла, когда отсутствует сильное фоновое излучение из объема топки, а также для контроля общей визуализации температурных полей на регистрирующем устройстве или индикаторе.

Метод контроля процесса горения на основе обработки цветовых изображений пламени представлен в ряде работ и зарубежных авторов [49 - 51]. В этих работах представлены и обсуждены различные подходы к диагностике состояния систем сжигания, основанные на захвате и обработке изображений пламени и создания базы данных изображений пламени для последующего анализа. В работе [51] рассмотрены методы идентификации пламени на основе всего изображения, один из которых использует самоорганизующиеся карты объектов и выдает в качестве выходных данных наиболее вероятный режим горения среди ранее охарактеризованных. Другой - является адаптацией метода распознавания речи и информирует о

вероятности неизвестного состояния, соответствующего различным режимам горения.

В работе [52] для контроля процесса сжигании топлива в котельных установках рассматривается применение оптоволоконной системы диагностики пламени на основе ПЗС камеры, позволяющей измерять изменение яркости пламени горелки. Функциональная схема такой оптоволоконной системы приведена на рисунке 1.3.

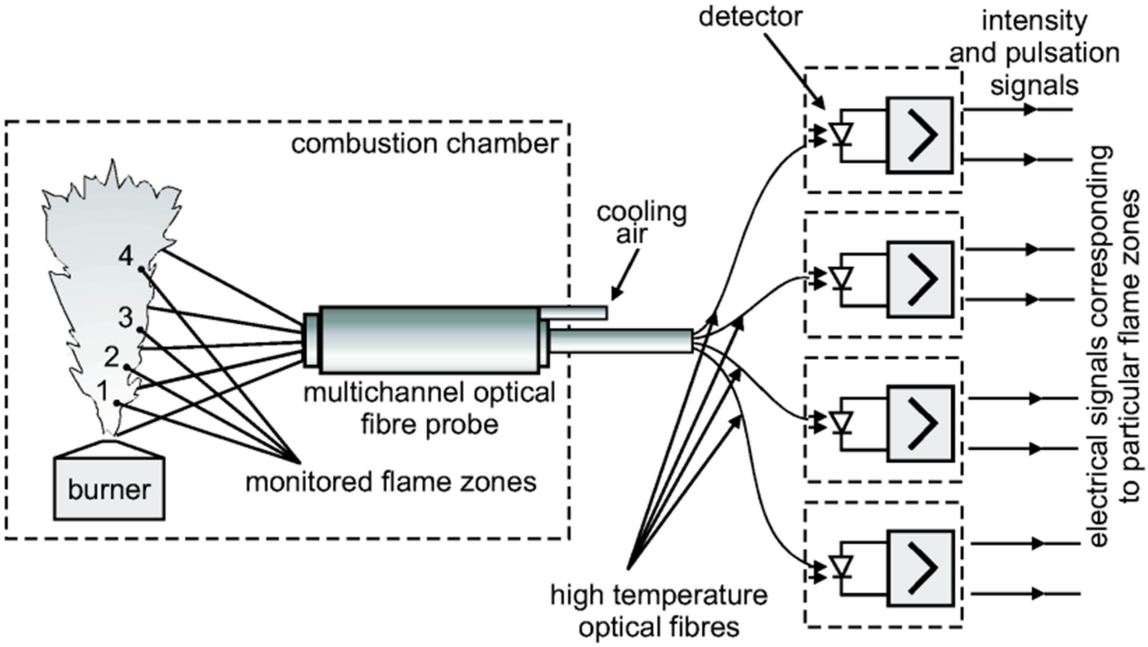


Рисунок 1.3 – Функциональная схема оптоволоконной системы диагностики пламени на основе ПЗС камеры [52]

Предложенное оптоволоконное решение позволяет одновременно анализировать несколько зон пламени, а также обеспечивает гальваническую и термическую изоляцию электронных схем преобразования. Оптоволоконный зонд устанавливается внутри камеры сгорания, в результате чего подвергается воздействию экстремальных условий, таких как температура выше 450 ° C, запыленность и вибрация.

К оптическим методам контроля процессов горения также можно отнести методы контроля на основе установления концентрации уходящих газов, основанные на просвечивании дымового потока.

В работах [53, 54] рассматривается применение светодиодных и лазерных газоанализаторов для непрерывного контроля содержания кислорода (O_2) и монооксида углерода (CO) в дымовых газах котлов. Принцип действия их основан на просвечивании дымового потока и определении величины поглощения излучения молекулами O_2 и CO, содержащимися в дымовом газе, на длинах волн в области 0,76 и 1,56 мкм.

Компания Yokogawa для оптимального управления процессом горения предлагает использовать перестраиваемый диодный лазерный газоанализатор TDLS200, который предназначен для измерения концентрации компонентов дымового газа (O_2 и CO), также с помощью метода абсорбционной спектроскопии. Схема измерения концентрации дымового газа с помощью TDLS200 [34] представлена на рисунке 1.4.

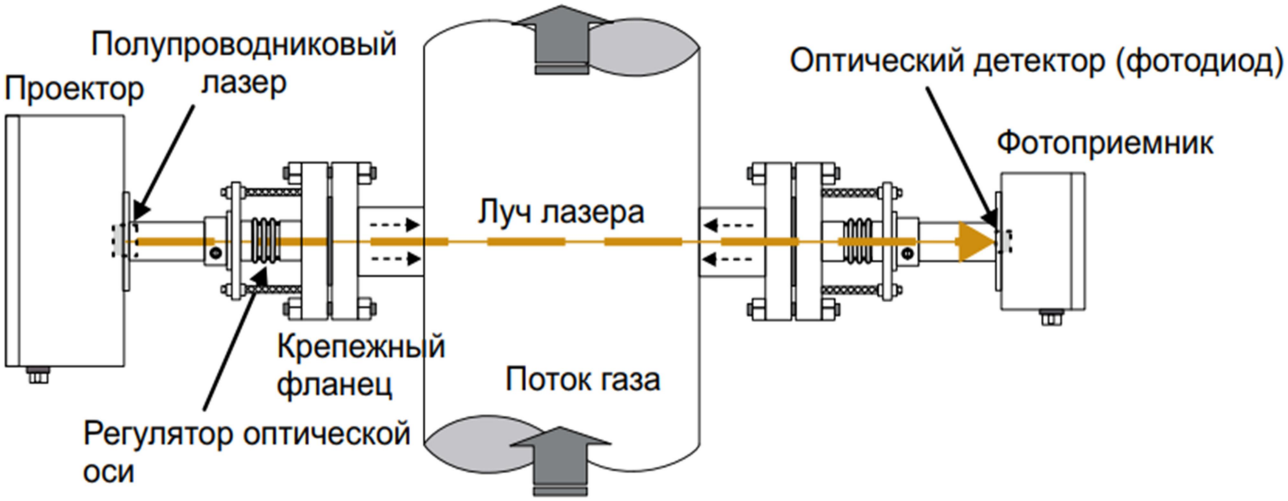


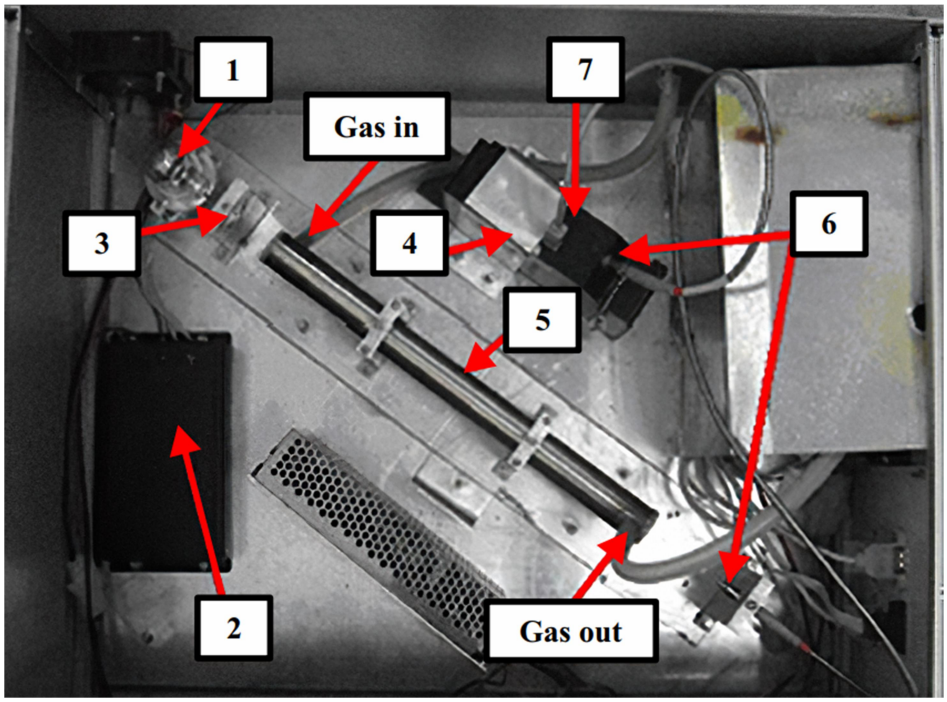
Рисунок 1.4 – Схема измерения концентрации дымового газа с помощью TDLS200 [34]

Для измерения различных типов веществ используются полупроводниковые лазеры, выпускаемые фирмой Yokogawa, с конкретной длиной волны, соответствующей спектру поглощения целевого измеряемого компонента [34, 55].

Материалы работы [56] основаны на экспериментах, проведенных на тепловой электростанции в Шаньдуне – одной из самых тяжело загрязнённых

провинций Китая. В работе рассматривался газоаналитическая система мониторинга концентрации SO_2 и NO в составе уходящих газов методом абсорбционной оптической спектроскопии. Пробы газа периодически извлекались непосредственно из дымового канала с помощью специального пробоотборника, который был закреплен на горизонтальном дымоходе.

На рисунке 1.5 показана фотография подсистемы анализа концентрации SO_2 и NO газоаналитической системы мониторинга [56].



1 – дейтериевая лампа; 2 – источник питания; 3 – объектив; 4 – спектрометр; 5 – газовая ячейка; 6 – ОВ; 7 – USB-кабель.

Рисунок 1.5 — Фотография подсистемы анализа SO_2 и NO [56]

Дейтериевая лампа высокого давления была использована в качестве широкополосного источника УФ-излучения. Луч ультрафиолетового света коллимируется кварцевой линзой и пропускается через ячейку образца длиной 30 см с кварцевыми окнами (Ocean Optics OLFV-200-1100) и фокусируется во входной торец многомодового ОВ, после чего попадает на вход дифракционного спектрометра высокого разрешения (Ocean Optics HR2000+), рабочий спектральный диапазон которого от 209 нм до 313 нм, а

спектральное разрешение – 0,1 нм. Полученная спектроскопическая информация передается на персональный компьютер через USB-кабель, сбор и анализ данных осуществляются автоматически с использованием специально разработанной программы в Visual Basic.

В работе [57] для определения концентраций NO_2 в газовой среде применяется метод абсорбционной оптической спектроскопии. В качестве источника опорного излучения используется светодиод с рабочим диапазоном длин волн от 435 нм до 470 нм.

На рисунке 1.6 показана функциональная схема экспериментальной установки определения концентраций NO_2 в газовой среде.

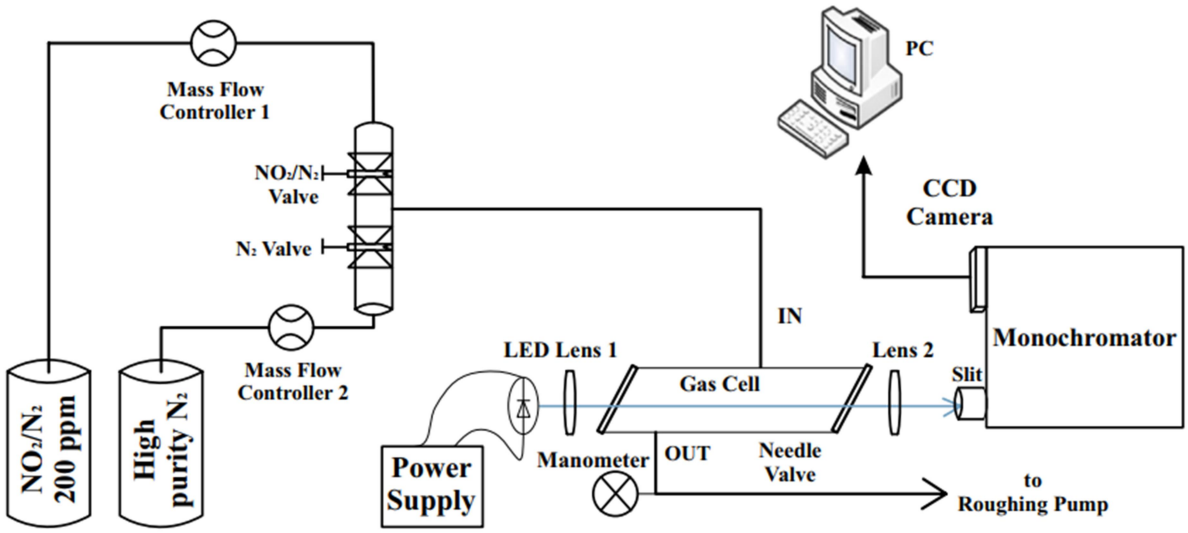


Рисунок 1.6 – Функциональная схема экспериментальной установки определения концентраций NO_2 в газовой среде [57]

Оптическое излучение светодиода проходит через газовую ячейку и поступает на вход монохроматора, спектральное разрешение которого достигает 0,035 нм, и детектируется линейной ПЗС-камерой. Полученный спектр после фотодетектирования передается на персональный компьютер.

Предел обнаружения около 0,2 ppm (0,4 мг/м^3) достигается с помощью ячейки длиной 15 см путем усреднения 100 сканирований, каждое со временем интегрирования 50 мс, и общим временем анализа 5 мс. По утверждению авторов, достигнутый предел обнаружения позволяет

применять разработанную установку для мониторинга выбросов NO_2 на промышленных объектах.

Применение методов лазерной и оптической абсорбционной спектроскопии для контроля процессов горения по концентрации различных молекул в составе уходящих дымовых газов также рассмотрено в ряде работ зарубежных авторов [58 - 61] и др.

Одним из недостатков применения методов лазерной и оптической абсорбционной спектроскопии при контроле дымовых газов в топках теплоэнергетических агрегатов и создания на их основе систем контроля является недостаточное отношение сигнал/шум при регистрации прошедшего через дымовую среду опорного ОИ, что, в конечном итоге, оказывает сильное влияние на пороговую чувствительность систем контроля. Это обусловлено наличием аэрозолей и завихрений в анализируемой газовой среде, приводящим к заметным флуктуациям опорного оптического излучения, на измерении которого основан проводимый контроль.

Кроме того, загрязнения оптических поверхностей системы контроля, возникающие в процессе эксплуатации, а также постоянные изменения оптической плотности просвечиваемого дымового потока требуют применения специализированных методов обработки анализируемого сигнала, позволяющих снизить погрешности измерений путем их учета и корректировки.

1.1.4.2 Результаты сравнительного анализа методов и приборов, выполняющих контроль процесса горения по косвенным параметрам

Традиционные способы контроля ПГ газообразных углеводородов, основанные на контроле косвенных параметров: температуры, давления, разряжения, состава уходящих дымовых газов и т.п. - несовершенны.

Общими недостатками этих способов являются: высокая трудоемкость, необходимость создания сложных измерительных систем, получение информации о процессе горения по косвенным параметрам,

характеризующим состояние контролируемого процесса горения по второстепенным признакам, и отсутствие возможности оперативно реагировать на случайные изменения состава сжигаемого топлива.

К общим недостаткам методов контроля по второстепенным признакам можно отнести и то, что они позволяют учитывать лишь интегральные характеристики, особенно, когда контроль выполняется по составу уходящих газов с помощью газоанализаторов, установленных в дымоходах. Такие методы не позволяют осуществлять оптимизацию процесса сжигания топлива в каждом горелочном устройстве тех промышленных печей, в топках которых применяется несколько одновременно работающих горелок.

Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Результаты сравнительного анализа традиционных способов

<table>
<tr><td>№</td><td>Контролируемый параметр</td><td>Приборы и методы контроля</td><td colspan="3">Недостатки методов</td></tr>
<tr><td>1</td><td>Температура</td><td>Термометры и пирометры</td><td colspan="3" rowspan="3">• выполняют локальное измерение;
• не дают представление о динамике процесса горения;
• обладают высокой инерционностью;
• не дают точной информации о КИВ.</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Давление</td><td>Манометры</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Разряжение</td><td>Тягомеры и напоромеры</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="5">Контроль состава отходящих газов с помощью газоанализаторов</td></tr>
<tr><td>№</td><td>Контролируемый параметр</td><td>Методы контроля</td><td>Недостатки методов</td><td colspan="2">Общие недостатки способа контроля</td></tr>
<tr><td>4.1</td><td>Содержание O_2</td><td>Электрохимический метод</td><td>• нестабильность характеристик и дрейф показаний;
• значительное влияние окружающей среды (температура, влажность, состав газа);
• низкое быстродействие;
• сложны в эксплуатации и требуют постоянного контроля системы</td><td colspan="2">• определяет концентрацию кислорода 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</td></tr>
</table>

Продолжение таблицы 1.4

			удаления загрязнений.	поддержание постоянной концентрации кислорода за котлом неизбежно приводит к химнедожогу, особенно при использовании топлива с переменным составом.
		Каталитический метод	• низкая прочность; • используемые катализаторы поддаются ингибированию, вследствие чего снижается чувствительность датчика; • короткий срок службы (не более 3 лет).	
		Метод лазерной абсорбционной спектроскопии	• в большинстве случаев требуется дополнительный забор пробы; • недостаточное отношение сигнал/шум при регистрации прошедшего через дымовую среду опорного оптического излучения; • наличие в среде аэрозолей и завихрений приводит к заметным	
4.2	Содержание CO			• 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)

Продолжение таблицы 1.4

			флуктуациям принимаемого опорного излучения, что снижает чувствительность; • требуют постоянного контроля и удаления загрязнений оптических поверхностей.	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 и др.			• не дает точной информации о КИВ, только определяется содержание вредных веществ.

1.1.4.3 Контроль процесса горения по спектральной характеристике пламени

Протекание процессов горения характеризуется целым рядом информационных параметров, в том числе спектроскопических. Оптический спектр излучения пламени несет в себе большое количество информации, которая характеризует физико-химические процессы, происходящие непосредственно в очаге горения. Поэтому применение методов оптической спектроскопии, основной задачей которой является определение распределения энергии излучения по длинам волн (частотам) [62], в частности – положения и интенсивности спектральных линий атомов и молекул, - видится наиболее перспективным при решении задачи контроля процессов горения ГУ, в том числе с позиции повышения его достоверности.

Преимущества спектроскопических методов состоят в следующем [9]:

- характеризуются высокой информативностью;
- обладают высокой чувствительностью;
- не вызывают изменения свойств исследуемой среды;
- обладают малой инерционностью;
- способны проводить дистанционные измерения в режиме реального времени.

Особую значимость спектроскопические методы приобретают при исследовании сложных и быстропротекающих процессов, в результате протекания которых возникают и исчезают разнообразные промежуточные вещества. В первую очередь к таким процессам можно отнести горение. Так как промежуточные вещества характеризуются незначительной продолжительностью жизни, обычный химический анализ оказывается непригодным для их идентификации, при этом методы оптической спектроскопии позволяют не только определить отдельные промежуточные вещества, но и измерить их концентрацию.

При этом сигналы, несущие спектроскопическую информацию о состоянии контролируемого процесса горения, измеряются спектральным прибором.

СП позволяют:

а) разложить анализируемый оптический сигнал в спектр и зарегистрировать положение отдельных спектральных линий или отдельных спектральных интервалов (участков);

б) измерить интенсивность спектральной линии или спектрального участка.

Протекание процесса горения сопровождается выделением тепла и испусканием оптического излучения, при этом внешний вид пламени, а значит и его спектр, меняются в зависимости режима горения, т.е. от соотношения топливо-воздух. Отсюда можно сделать вывод, что, зная спектральный состав испускаемого оптического излучения, а также зависимость спектра пламени от режимов горения, возможно в режиме реального времени с высокой достоверностью и оперативностью выполнять контроль этого процесса.

Стоит отметить, что попытки применения методов оптической спектроскопии для контроля ПГ по измерению спектра испускаемого оптического излучения ведутся уже давно. Так, например, исследование процессов горения газообразных углеводородов на основе метода эмиссионной оптической спектроскопии выполнено в ряде работ [63 - 67]. В работе [65] применяемый прибор создан на базе спектрометра «Колибри» по оптической схеме Черни-Тернера, с использованием в качестве диспергирующего элемента плоской дифракционной решётки (ДР) и в качестве приемника излучения - линейки фотодиодов. Оптическая схема и конструкция спектрометра «Колибри-2» оптимизированы для получения спектра в любой из областей, лежащих в спектральном интервале 190-1100 нм, путём смены и поворота плоских ДР. Излучение вводится в спектрометр с помощью кварцевого конденсора или волоконно-оптического

кабеля. Показано, что созданный спектрометр может быть эффективно использован при анализе спектров излучения органического газообразного топлива [63 - 65].

В работе [68] рассматривается применение метода эмиссионной оптической спектроскопии для оценки качества топливных газов с неопределенным составом, в качестве которых использовались смеси эталонного углеводородного газа и различных количеств низкокалорийного газа. Для проведения исследований использовалась дутьевая горелка, которая представляет собой модифицированную версию горелки Бунзена.

На рисунке 1.7 приведена схема установки пламенно-эмиссионной спектроскопии с горелкой.

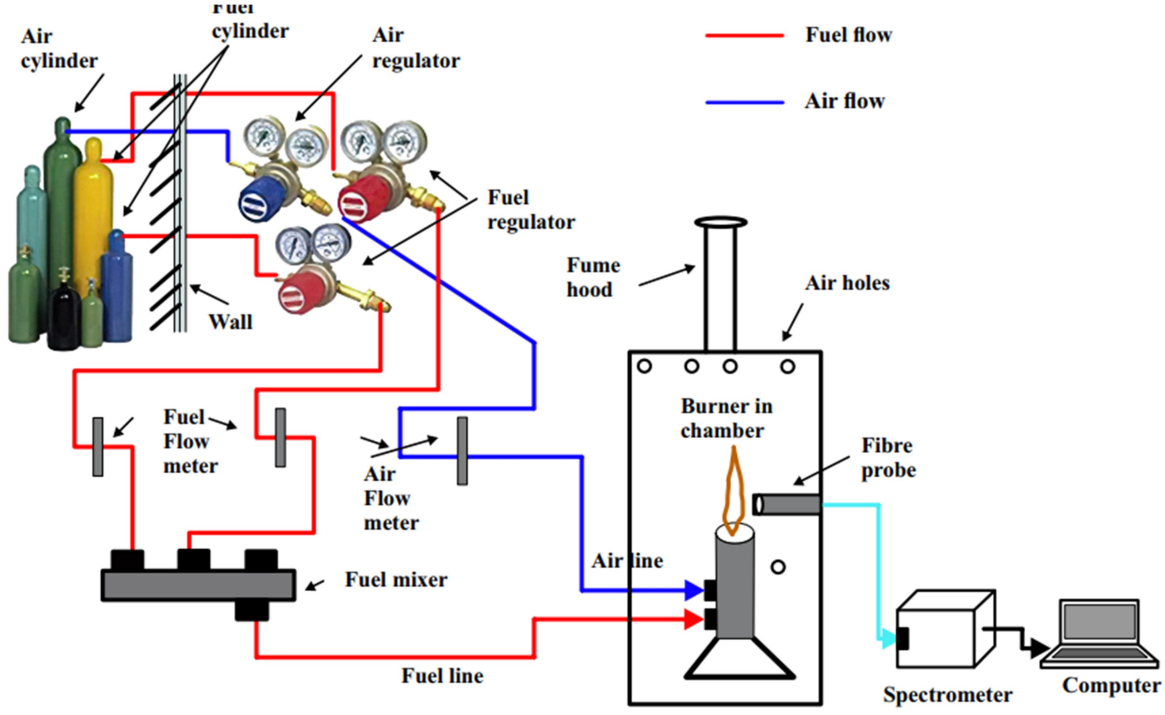


Рисунок 1.7 – Схема экспериментальной установки пламенно-эмиссионной спектроскопии с горелкой [68]

Полученные спектральные характеристики метана, этилена, этана и пропана приведены на рисунке 1.8 [68].

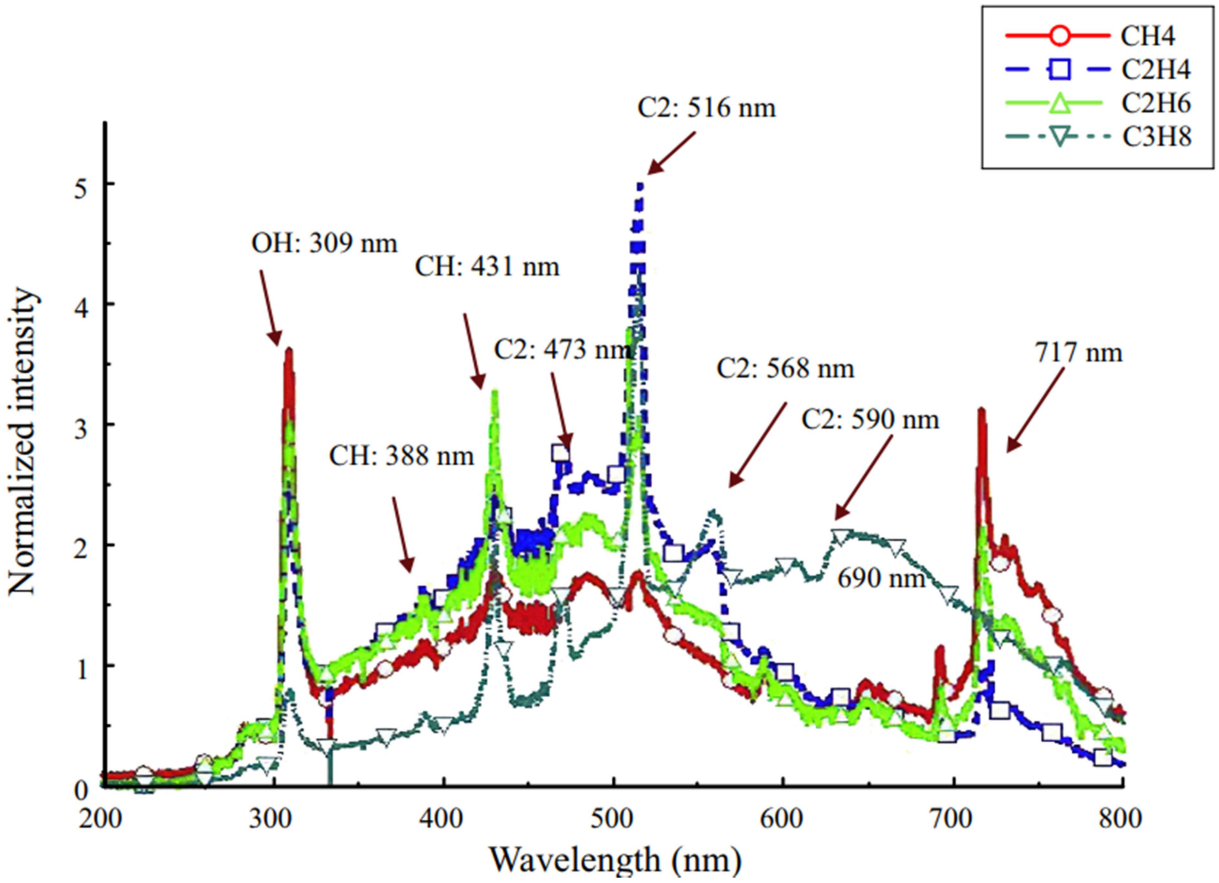


Рисунок 1.8 – СХ метана, этилена, этана и пропана [68]

В работе [69] представлены результаты измерения соотношения газ-воздух горючей смеси метана и воздуха методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии. Метан (чистота 99,99%) и воздух (21% кислорода) из баллонов высокого давления подавались в камеру сжигания с использованием системы с точными регуляторами расхода газа. Для возбуждения плазмы использовался Nd:YAG лазер на длине волны 1064 нм с длительностью импульса 5,5 нс. Энергия лазера составляла 24 мДж. Излучения плазмы регистрировались с помощью многоканальной системы обнаружения Instaspec IV CCD, состоящей из детекторной головки с ПЗС-матрицей формата 1024 x 128 пикселей и спектрографа для формирования изображений. Спектрограф был снабжен тремя решетками, перекрывающими диапазон длин волн 250-900 нм.

Спектральная характеристика плазмы, созданной лазерным излучением в стехиометрической смеси CH4-воздух, представлена на рисунке 1.9.

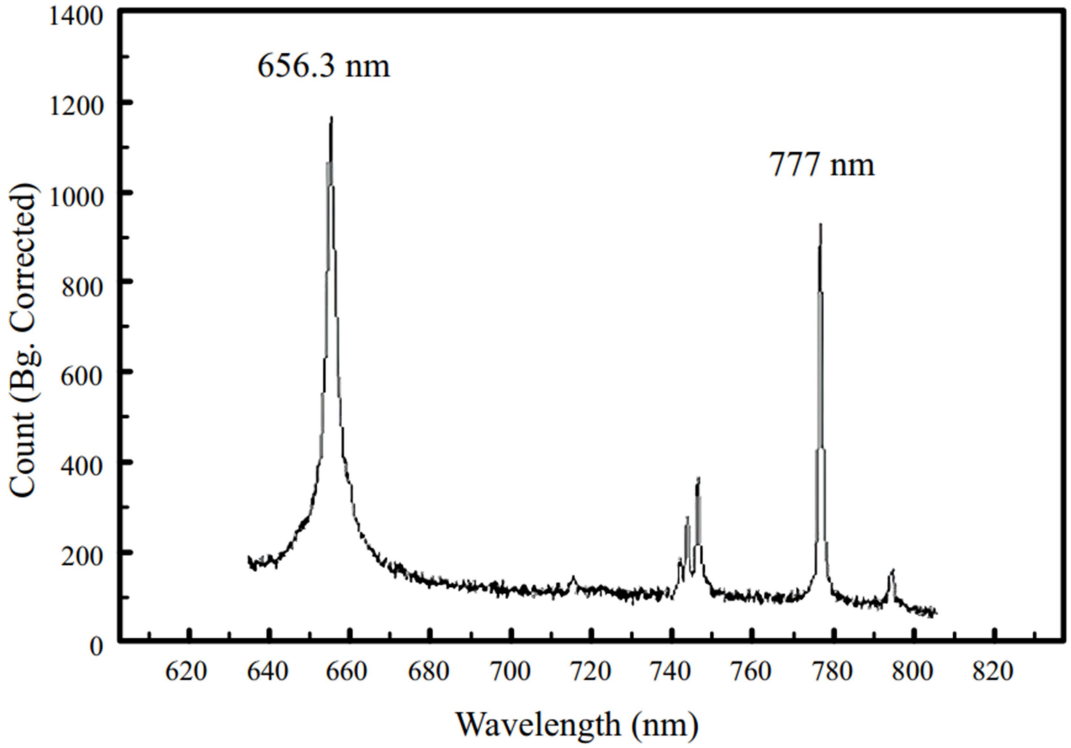


Рисунок 1.9 – СХ плазмы, созданной лазерным излучением в стехиометрической смеси CH4-воздух [69]

Результаты этого исследования показывают, что отношение интенсивностей линий спектров водорода H (656,3 нм) и кислорода O (777 нм) линейно увеличивается с увеличением соотношения газ-воздух.

В работах [70, 71] соотношение газ-воздух было измерено в ламинарном предварительно перемешанном пламени Бунзена метан-воздух путем определения общей интенсивности излучения линий спектров водорода H (656,3 нм) и кислорода O (777 нм). Для возбуждения плазмы также использовался Nd:YAG лазер на длине волны 1064 нм.

Применение ЛИЭС-спектрометрии для небольшой турбулентной горелки с предварительно приготовленной смесью и камеры сгорания с обедненной смесью было рассмотрено в работе [72], где показано, что H-возбуждение лазерно-индуцированной плазмы является основным фактором при правильном измерении соотношения газ-воздух. Лабораторная установка представлена на рисунке 1.10.

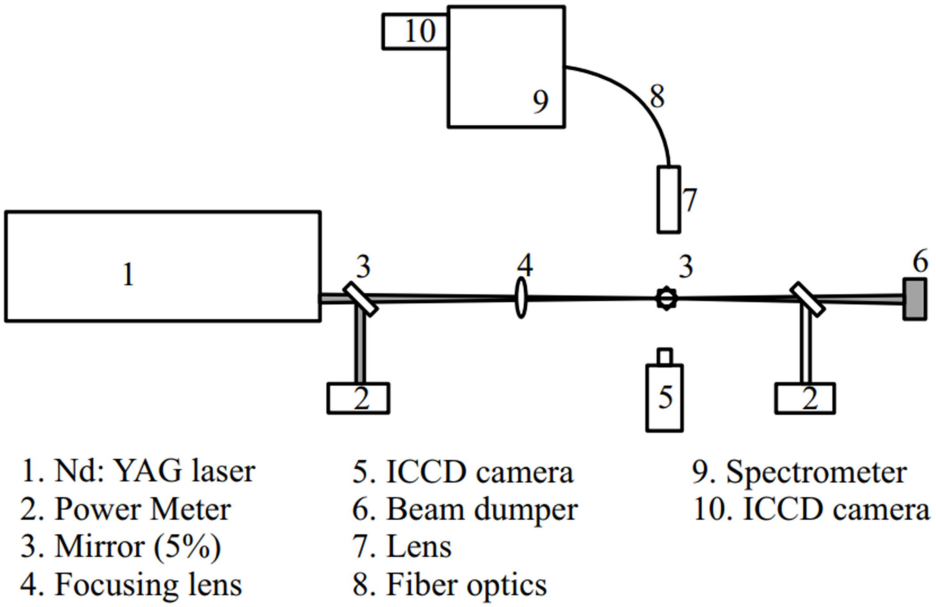


Рисунок 1.10 – Лабораторная установка из работы [72]

Для возбуждения локальной плазмы в пламени использовалась вторая гармоника Nd:YAG-лазера, соединенного с линзой (NADL-30-200PY2 Sigma Koki) с фокусным расстоянием 200 мм. Энергия лазера составляла 20 мДж.

Результаты аналогичных экспериментов представлены в работах [73 - 76], где показано, что отношения интенсивностей следующих линий спектров: H (656,3 нм)/O (777 нм) и C (833,5 нм)/O (844,6 нм); H (486 нм)/O (777 нм) и H(656 нм)/N (744 нм), - полученные в смесях метана, этилена, пропана водорода с воздухом, имеют очень сильную корреляцию с соотношением газ-воздух.

Сведений об исследованиях по применению методов лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии для контроля процессов горения, в том числе и ГУ, проводимых отечественными учеными или научными коллективами, в открытых источниках не обнаружены.

В небольшом количестве статей, посвященных применению методов оптической спектроскопии для контроля процесса горения газообразного углеводородного топлива, и в основном опубликованных зарубежными авторами, оценка соотношения газ-воздух выполняется только на основании измерений наиболее интенсивных спектральных полос OH, CH и C_2 (для

эмиссионной оптической спектроскопии), и спектральных линий H, O и N (для ЛИЭС-спектрометрии), и не рассматриваются зависимости соотношения газ-воздух от менее интенсивных полос.

Кроме того, не представлены исследования характерных спектральных полосов в ультрафиолетовом диапазоне, например, углеводородных полос HCO и CN, интенсивность которых также имеет зависимость от соотношения газ-воздух, и она более ярко выражена как раз в диапазоне оптимального горения при коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{КИВ}$ от 1 до 1.1. Также не рассмотрена возможность применения нескольких методов спектроскопии одновременно, что дает дополнительную информацию о протекаемом процессе горения газообразных углеводородов. Эти вопросы рассмотрены в пятой главе данной работы.

В основном имеющиеся публикации имеют узкоспециализированный прикладной характер и не рассматривают процедуру контроля процессов горения в целом, в том числе обработку результатов измерений, правильную их интерпретацию, разработку методики контроля, выбор применяемого метода и прибора контроля.

Решение задачи контроля процессов горения на основе методов оптической спектроскопии рассмотрено в ряде работ [77 - 93], результаты которых частично послужили основой при написании данной диссертационной работы.

1.2 Методы анализа спектра в оптическом диапазоне и основные типы оптических спектральных приборов

1.2.1 Методы оптической спектроскопии

Среди основных спектроскопических методов можно выделить следующие [28, 94]:

1. Эмиссионный метод основан на измерении спектра испускаемого излучения. В данном случае процесс излучения протекает либо

самостоятельно, например, излучение пламени или любого другого естественного источника ОИ, либо необходимо выполнить предварительное возбуждение оптического излучения с целью последующего его спектрального анализа, например, в результате нагрева, пропускания электрического тока, путем воздействия лазерным или другим излучением и т.д. Частным случаем эмиссионного метода является метод лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии.

2. Абсорбционный. Метод, при котором исследуются спектры поглощения, в основном молекул и их составных компонентов, при пропускании через исследуемую среду опорного ОИ.

3. Рамановский метод основан на получении рамановских спектров твердых, жидких и газообразных образцов, которые возбуждаются монохроматическим излучением, как правило, излучением определенных линий ртутной лампы или лазера.

4. Люминесцентный. Метод, при котором измеряется спектр люминесценции субстанции, возбуждаемой преимущественно ультрафиолетовым излучением.

5. Рентгеновский метод для изучения структуры исследуемой материи использует: (а) рентгеновские спектры атомов, полученные в результате внутренних электронных переходов атомов, или (б) дифракцию рентгеновских лучей при их проникновении через объект.

6. Радиоспектроскопический основан на исследовании спектров поглощения молекул в микроволновой области спектра на длинах волн более 1 мм.

В основном эти методы спектроскопии реализуются в лабораторных условиях, что сильно ограничивает, а иногда и вовсе делает невозможным, их применение на промышленных объектах. Так, например, при применении метода абсорбционной спектроскопии требуется наличие дополнительного опорного источника излучения. Кроме того, данный метод обладает некоторыми ограничениями, связанными с разрешением спектров

поглощения с тонкой вращательной структурой [95], что накладывает определенные трудности в его технической реализации. В случае исследования излучения пламени, возникающего при горении ГУ, из-за высоких требований, предъявляемых к разрешающей силе применяемых приборов достаточно затруднительно наблюдать спектры поглощения некоторых молекул, например, OH, CN и C_2 [95].

Наиболее перспективными методами оптической спектроскопии для контроля процессов горения газообразных углеводородов, особенно протекающих в условиях высокой температуры и агрессивной химической среды, являются методы традиционной эмиссионной оптической спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии. Это обусловлено тем, что на их основе становится возможным реализовать в режиме реального времени дистанционный анализ излучения от объектов, находящихся в вышеобозначенных условиях.

Эмиссионный метод предполагает, что выполняется измерение спектра, испускаемого непосредственно контролируемым объектом – процессом горения. При методе ЛИЭС-спектрометрии измеряется спектр вторичного излучения, образующегося в процессе формирования и эволюции плазмы при воздействии на образец (в случае процесса горения - пламя) сфокусированного импульсного лазерного излучения [29].

Метод ЛИЭС-спектрометрии является одним из самых современных и перспективных методов оптической спектроскопии и по сравнению с традиционными спектральными методами обладает рядом преимуществ [29]:

- высокой чувствительностью;
- возможностью одновременного анализа многоэлементного химического состава образцов, находящихся в различных агрегатных состояниях (твердом, газообразном, жидком или в виде пульпы);
- малого размера области воздействия лазерного излучения (геометрические размер области оптического пробоя).

Вследствие указанных преимуществ метод ЛИЭС-спектрометрии позволяет проводить локальный анализ элементного состава и определять профиль распределения элементов по поверхности и глубине образца; из-за небольшого объема испаряемого вещества для анализа требуются весьма малые количества образца; в большинстве случаев не требуется предварительная подготовка пробы; образцы могут быть любой формы; состояние поверхности не имеет значения; позволяет проводить дистанционный анализ в режиме реального времени [29]. Для получения плазмы в результате лазерного пробоя обычно применяются твердотельные лазеры с высокой энергией и малой длительностью импульса, что позволяет избежать значительной теплопередачи по всему объему образца (только локальный нагрев в области фокусировки лазерного луча) и при необходимости экранирования лазерного излучения плазмой [29].

1.2.2 Типы оптических спектральных приборов

Исходя из принципа действия СП, можно выделить следующие методы анализа спектра сигналов в оптическом диапазоне:

- Дифракционный метод.
- Интерференционный метод.
- Резонансный метод.

В прикладной оптической спектроскопии наиболее широкое применение находят спектральные приборы, которые выполняют анализ спектра ОС дифракционным методом. В СП такого типа в качестве диспергирующего элемента, выполняющего пространственное разложение ОИ в спектр по длинам волн путем разделения излучения различных длин волн по направлению, применяются ДР или преломляющая призма. В первом случае такие приборы называются решеточными СП, во втором – призменные [96]. Также к приборам дифракционного типа можно отнести СП, у которых применяется акустооптический перестраиваемый фильтр

(АОПФ) в качестве диспергирующего элемента, и их принцип работы заключается в том, что ОИ дифрагирует на решеткоподобной структуре, формируемой акустической волной непосредственно в кристалле акустооптического модулятора [97].

Наиболее распространены в практике оптической спектроскопии решеточные ДСП. Одними из основных их преимуществ являются высокая разрешающая способность и простота конструкции. К их недостаткам можно отнести наличие в выходной плоскости ДР многопорядковой дифракционной картины. Для устранения влияния соседних дифракционных порядков на результат спектрального измерения требуется предварительное применение монохроматора или оптического фильтра, что приводит к ухудшению их чувствительности и сужению анализируемой полосы длин волн.

Спектральные приборы на базе АОПФ характеризуются большим быстродействием по сравнению с решеточными СП, но, несмотря на это, они также имеют ряд недостатков: рабочая полоса частот и разрешающая способность определяется акустооптическим модулятором, который является технически и технологически сложным устройством и характеризуется высокой ценой. Наличие в составе спектрального прибора акустооптического модулятора приводит к ухудшению массогабаритных показателей спектрального прибора и увеличивает его стоимость.

Стоит отметить и общий существенный недостаток, присущий ДСП, заключающийся в том, что их разрешающая способность непосредственно зависит от геометрических размеров входной апертуры, в частности щели. Поэтому в таких приборах особо остро встает вопрос выбора оптимальной ширины щели для обеспечения нужного разрешения при достаточном отношении сигнал/шум [98]. Уменьшение ширины щели улучшает разрешающую способность ДСП, при этом приводит к ухудшению его чувствительности, за счет снижения доли энергии анализируемого излучения, попадающего на входную апертуру СП.

Спектральные приборы, принцип действия которых основан на анализе спектра интерференционным методом, т.е. на модуляции светового потока, можно отнести к другому классу оптических СП. Такие приборы строятся на основе интерферометра Майкельсона, и к ним относятся [96]:

- Фурье-спектрометры. Достоинством фурье-спектрометра является высокая разрешающая способность и возможность одновременной регистрации во всем спектральном диапазоне. Недостатки фурье-спектрометра – необходимость дальнейшей спектральной обработки полученных временных корреляционных функций ОИ в виде интерферограмм и плохие массогабаритные показатели прибора.
- Спектрометры с интерференционной селективной амплитудной модуляцией (СИСАМ). Основным преимуществом СИСАМ по сравнению с другими СП является их высокая светосила. К недостаткам можно отнести увеличение шумов фотоприемного устройства из-за большой величины постоянного светового потока с частотами, лежащими по соседству с выделяемым спектральным диапазоном, и плохие массогабаритные показатели прибора.

Спектральные приборы, принцип действия которых основан на методе резонанса, построены на базе интерферометра Фабри-Перо, конструктивно выполненном в виде параллельно расположенных на некотором расстоянии друг от друга двух пластин (стеклянных или кварцевых). Получаемая в фокальной плоскости выходного объектива пространственная интерференционная картина в форме концентрических колец с интенсивными максимумами и минимумами, положение которых зависит от длины волны, подлежит дальнейшей обработке для получения спектра анализируемого излучения [96].

Высокая разрешающая способность является основным достоинствам СП, построенным на базе интерферометра Фабри-Перо. При этом к недостаткам таких приборов относится [96]:

- необходимость предварительного выделения достаточно узкого спектрального участка, что может быть реализовано путем применения дополнительного монохроматора или узкополосного оптического фильтра;
- ограниченный рабочий диапазон длин волн;
- неудовлетворительные массогабаритные показатели прибора, что является следствием наличия сложной прецизионной механической системы перестройки.

Среди основных технических характеристик оптических СП можно выделить следующие [96, 99]:

1. Разрешающая способность.
2. Рабочий диапазон длин волн.
3. Светосила прибора.
4. Динамический диапазон.
5. Быстродействие прибора.
6. Угловая апертура устройства.
7. Массогабаритные показатели.
8. Стабильность параметров при воздействии температуры и вибраций.

Кроме вышеперечисленных характеристик СП, следует отдельно выделить еще одну характеристику реального спектрального прибора - его аппаратную функцию (АФ).

Аппаратная функция описывает наблюдаемое спектральное распределение энергии оптического излучения по оси длин волн на выходе спектрального прибора, при подаче на его вход монохроматического излучения и определяет разрешающую способность СП и степень аппаратурных искажений [96, 98, 99].

1.2.3 Методы проведения спектральных измерений

В практике оптической спектроскопии применяется два метода проведения спектральных измерений, т.е. получения спектроскопической информации от контролируемого объекта [93]. Первый метод можно назвать локальным, при котором СПК находится в непосредственной близости от анализируемого источника, и его излучение падает непосредственно на вход спектрального прибора.

На рисунке 1.11 показан локальный метод измерения спектра ОС.

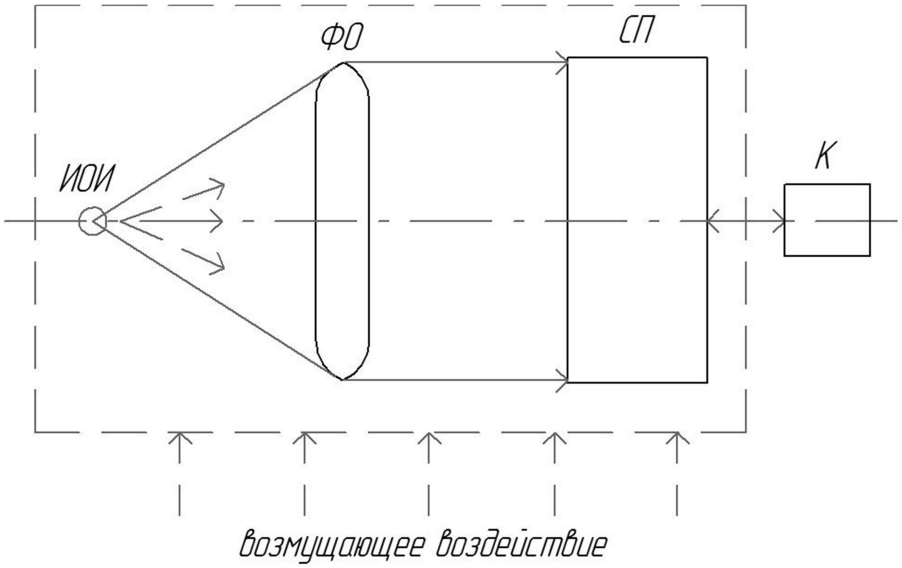


Рисунок 1.11 – Локальный метод измерения спектра ОИ

В данном случае каналом передачи СИ является слой свободного пространства, в связи с чем возникают некоторые сложности и ограничения при проведении спектральных измерений в целях контроля объектов, находящихся в условиях повышенной температуры, влажности, агрессивной химической среды, повышенного уровня взрывоопасности, - такие условия можно назвать экстремальными [93].

Второй метод можно назвать дистанционным, при котором СПК находится на заданном расстоянии от контролируемого объекта, и анализируемый сигнал передается на вход прибора путем применения ОВ [93].

На рисунке 1.12 показан дистанционный метод проведения спектральных измерений при применении ВОСП.

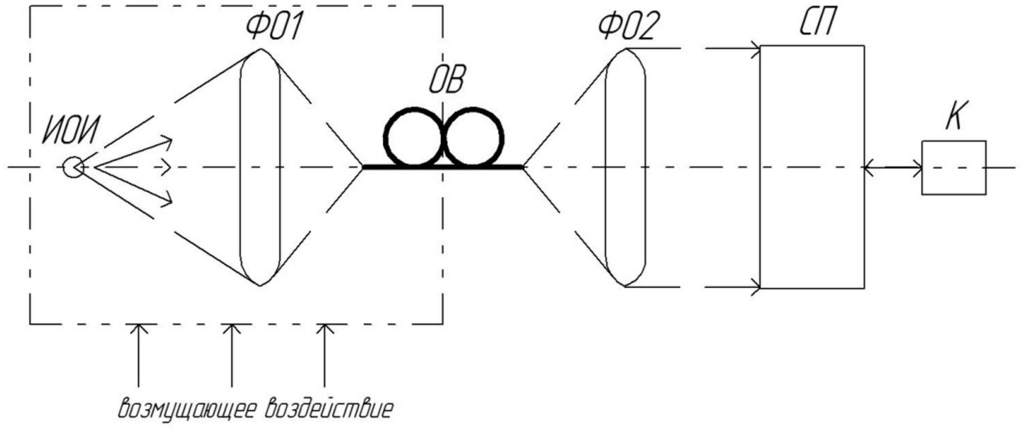


Рисунок 1.12 – Дистанционный метод измерения спектра ОИ

При дистанционном методе проведения спектральных измерений каналом передачи спектроскопической информации является слой свободного пространства и волоконно-оптическая линия передачи, состоящая из формирующей оптики, оптического волокна и оптической системы вывода излучения из ОВ.

Несмотря на явные преимущества дистанционного метода проведения спектральных измерений, возникает и ряд сложностей, связанных с применением оптического волокна, при разработке и эксплуатации таких спектральных приборов контроля [100]. За счет многомодового распространения излучения в многомодовом оптическом волокне, его применение существенно искажает волновой фронт передаваемого оптического излучения, что приводит к ухудшению разрешающей способности прибора и существенным погрешностям спектральных измерений [100]. Применение одномодовых волокон приводит к значительным энергетическим потерям анализируемого оптического излучения при его вводе в ОВ [100], в результате чего ухудшается чувствительность спектрального прибора контроля.

В настоящее время существует ряд оптических спектрометров, в которых применяется оптическое волокно для передачи анализируемого

оптического излучения. Эти спектрометры в основном являются дифракционными спектральными приборами и выпускаются зарубежными фирмами, например, HR2000+ES (ф. OceanInsight Inc.), FieldSpec 4 (ф. ASD Inc.), AvaSpec-ULS4096CL-EVO (ф. Avantes), SM642 (SP Spectral Products) [101 - 104] и др.

Спектрометр USB2000+ оснащен ПЗС-линейкой Sony с 2048 элементами, имеющей увеличенное отношение сигнал/шум, и усовершенствованной электроникой, которая управляет спектрометром.

Внешний вид спектрометра приведен на рисунке 1.13.

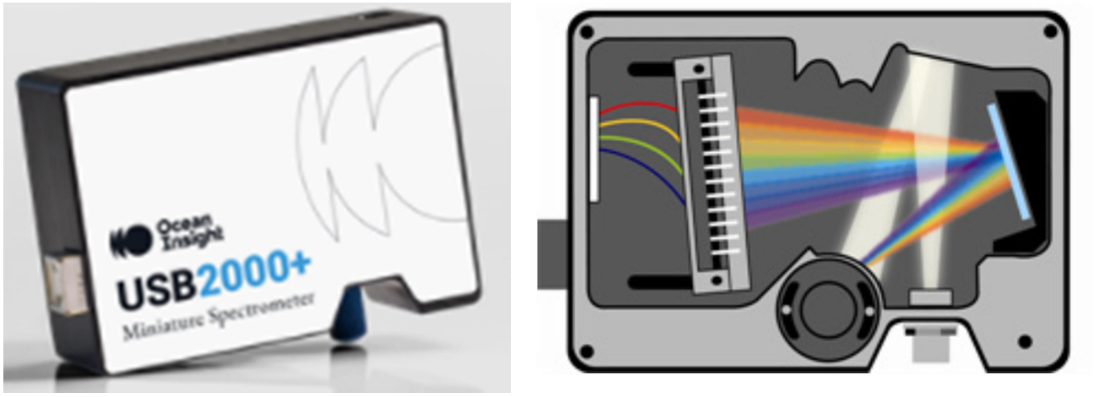


Рисунок 1.13 – Спектрометр USB2000+

Спектрометр AvaSpec-ULS4096CL-EVO оснащен активно-пиксельными КМОП детекторами, и по основным критериям оценок функциональности стоит значимо выше всех диодно-матричных спектрометров стандартной комплектации на основе ПЗС детекторов.

Внешний вид спектрометра приведен на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Спектрометр AvaSpec-ULS4096CL-EVO

В таблице 1.5 приведены некоторые технические характеристики приборов, использующих оптическое волокно для передачи анализируемых оптических сигналов и выпускаемых фирмами-производителями OceanInsight Inc., ASD Inc., Avantes [101 - 103].

В основном спектрометры такого типа являются дифракционными спектральными приборами, и в качестве диспергирующего элемента используются дифракционные решетки либо диспергирующая система, состоящая из нескольких ДР.

Тщательный анализ рекламных данных производителей и научных статей, посвященных таким приборам, показал, что данные оптические спектрометры имеют недостаточно высокие технические характеристики, в том числе и из-за применения оптического волокна.

Кроме того, производитель к спектрометру предлагает набор дифракционных решеток и щелей с целью получения требуемого разрешения в конкретном анализируемом диапазоне. Каждая решетка характеризуется числом штрихов на миллиметр, например 600, 1200 или 2400 штрихов/мм, что определяет разрешение, и рабочим спектральным диапазоном, в котором обеспечивается наибольшая эффективность, например, 200 – 635 нм; 250 – 575 нм; 320 – 720 нм; 530 – 1100 нм; 650 – 1100 нм и т.д. Причем замена этих элементов осуществляется только производителем, что существенно снижает функциональность этих приборов.

Таблица 1.5 - Технические характеристики СП с волоконно-оптическим зондом

Параметр	Спектрометр HR2000+ES (OceanInsight Inc)	Спектрометр FieldSpec 4 (ASD Inc)	Спектрометр AvaSpec-ULS4096CL (Avantes)
Спектральный диапазон, нм	200-1100 нм Зависит от типа установленной ДР (14 различных вариантов, от УФ до ближней ИК-области)	350-2500 нм	200 – 1100 нм
Разрешение, нм	От 1.33 до 6.8 нм (зависит от типа ДР, размера вх. щели, анализируемого диапазона)	3 (в видимом диапазоне) 6 (1400 - 2100 нм)	От 0.53 до 20 нм (зависит от типа ДР, размера вх. щели, анализируемого диапазона)
Тип детектора	линейная ПЗС (Sony ILX511B)	512 элементный кремниевый фотодиод	CMOS линейная матрица, 1024 элемента
Вес, г	570 г	5440 г	1155 г
Длина ОВ, м	~2	~1-5	~2

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что эти спектральные приборы не способны обеспечить требуемого быстродействия и высокой разрешающей способности по всему диапазону анализируемых длин волн от УФ до ближнего ИК (в этом диапазоне сосредоточены основные спектроскопические параметры, характеризующие горения ГУ), что существенно ограничивает их применение для задач контроля ПГ.

Более того, длина ОВ, используемого в приведенных спектрометрах в качестве линии передачи оптического сигнала, сравнительно небольшая - около 2-3 метров. На основании чего можно сделать вывод, что наличие волоконно-оптического зонда в основном обусловлено удобством эксплуатации этих приборов во внелабораторных условиях. Однако применение оптического волокна для передачи анализируемого оптического излучения значительно искажает его волновой фронт за счет многомодового распространения, и как следствие приводит к существенным погрешностям спектральных измерений, что продемонстрировано в четвертой главе данной работы. При этом увеличение длины волоконно-оптического зонда неизбежно приведет к ухудшению технических характеристик спектрометра. Следовательно, эти приборы не способны решить задачу контроля процессов горения, особенно находящихся в неблагоприятных условиях окружающей среды.

Из вышесказанного становится очевидной потребность разработки приборов, позволяющих оперативно и эффективно решать задачи контроля процессов горения газообразных углеводородов, применяемых для выработки тепловой энергии на промышленных объектах.

1.3 Постановка задач диссертационного исследования

Проведенный обзор показал, что задача контроля и оптимизации процессов горения, в том числе газообразных углеводородов, на теплоэнергетических объектах является одной из актуальных при решении вопросов экологической и техногенной безопасности и эффективного

использования топлива. В большинстве случаев режимы горения оптимизируются периодически, а коэффициент избытка воздуха определяется на основе измерения косвенных параметров: температуры, давления, концентрация химических элементов в составе уходящих газов и т.п. Такие методы контроля являются несовершенными и характеризуются большой инерционностью и низкой достоверностью и учитывают лишь интегральные характеристики ПГ, что не позволяет осуществлять его оптимизацию на достаточном высоком уровне, особенно в случае многогорелочного теплового агрегата.

Таким образом, возникает 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.

Проведенный обзор показал, что спектроскопический метод является наиболее чувствительным и информативным и может быть успешно применен для разрешения этого противоречия, поскольку проведение контроля на основе методов оптической спектроскопии позволяет существенно повысить его достоверность за счет того, что решение о состоянии процесса горения принимается на основе измерения первичного параметра – спектральной характеристики излучения, испускаемого непосредственно очагом горения.

Несмотря на то, что к настоящему моменту существует незначительное количество работ, где рассматривается применение методов оптической спектроскопии для диагностики процессов горения, автором данной работы не обнаружено сведений о существовании единого универсального спектроскопического метода контроля процессов горения и тем более сведений, рассматривающих применение методов оптической спектроскопии именно с позиции контроля. А это имеет чрезвычайное важно значение,

поскольку под процедурой контроля понимается не только измерение контролируемого параметра, но и обработка результатов измерений, правильная их интерпретация, разработка методики контроля, выбор применяемого метода и прибора контроля.

Такой универсальный метод должен рассматривать задачу контроля процессов горения, как с теоретической, так и с прикладной точки зрения в комплексе для любых методов оптической спектроскопии. Поэтому он должен позволять описывать процедуру контроля, контролируемые параметры и применяемые технические средства на базе единого математического аппарата, а разработанная на его основе методика подготовки и проведения контроля должна позволять выбрать применяемые метод спектроскопии и прибор контроля, минимальные характеристики которого обеспечат требуемую достоверность проводимого контроля в рамках конкретной прикладной задачи. Таким образом, одной из задач данного диссертационного исследования является разработка именно такого универсального спектроскопического метода контроля процессов горения, который рассматривается в третьей главе.

Применение методов оптической спектроскопии и спектральных приборов для решения задачи контроля процессов горения газообразных углеводородов, как правило, подразумевает нахождение технических средств в неблагоприятных для них условиях окружающей среды: повышенная температура, влажность и т.п. Поэтому прибор контроля в форме спектрального прибора должен включать в себя не только разрешающую систему, но и дополнительную оптическую систему в виде специализированных линз, в том числе жаропрочных, оптического волокна и т.п. Применяемая оптическая система не только позволит минимизировать влияние этих условий на результаты спектрального анализа, но в то же время будет вносить свои потери и искажения в передаваемый анализируемый сигнал. Это значит, что чрезвычайно важно как на этапе разработки и проектирования спектрального прибора контроля, так и во время его

эксплуатации учитывать эти потери и искажения сигнала для каждого его функционального узла в отдельности и всего прибора в целом.

Тщательный анализ рекламных данных производителей, выпускающих спектрометры с волоконно-оптическим зондом, и опыт работы с такими спектрометрами показывает, что применяемый зонд предназначен для удобства эксплуатации прибора. При этом наличие оптического волокна ухудшает технические характеристики данных приборов, несмотря на то, что его длина относительно небольшая, около 2-3 метров. В тоже время задачи контроля ПГ на теплоэнергетических объектах требуют применения длинных оптических волокон, что непременно будет приводить к значительным искажениям анализируемых сигналов, и, как следствие, к погрешностям спектральных измерений. В открытых источниках автором не обнаружено постановки и решения таких научно-технических проблем, особенно с позиций задач контроля. Поэтому в четвертой главе данной работы предлагается техническая реализация спектральных приборов контроля с применением ВОСП, отличающихся улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с известными аналогами. Также в этой главе рассматриваются вопросы, связанные с возникающими энергетическими потерями и искажениями анализируемых сигналов при передаче их по ОВ, в том числе из-за повышенных температур, и их влиянием на результат спектрального анализа.

В существующих к настоящему моменту работах по диагностике горения углеводородного топлива оценка соотношения газ-воздух выполняется только на основании измерений наиболее интенсивных спектральных полос OH, CH и C_2 (для эмиссионной оптической спектроскопии) и линий H, O и N (для ЛИЭС), и не рассматриваются зависимости соотношения газ-воздух от менее интенсивных полос, которые также присутствуют в спектре излучения пламени или плазмы. Кроме того, не приводятся исследования характерных спектральных полос в ультрафиолетовом диапазоне, например, углеводородных полос HCO и CN,

интенсивность которых также имеет зависимость от соотношения газ-воздух, и она более ярко выражена именно в диапазоне оптимального горения при коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{КИВ}$ от 1 до 1.1. Кроме того, работ, где бы рассматривалось одновременное применение методов эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии для контроля процессов горения газообразных углеводородов, не обнаружено. В то же время, как показано в пятой главе, применение разных методов спектроскопии (эмиссионной и ЛИЭС) для контроля одного и того же процесса горения газообразного углеводородного топлива дает дополнительную информацию о контролируемом процессе горения, что позволяет не только повысить достоверность контроля, но и дает возможность спрогнозировать направление изменения соотношения газ-воздух по взаимному изменению интенсивностей контролируемых параметров относительно друг друга, что увеличивает оперативность проводимого контроля.

Вышесказанное подчеркивает актуальность выбранной темы исследования и потребность в повышении достоверности контроля процессов горения газообразных углеводородов за счет разработки универсального спектроскопического метода контроля, позволяющего создавать и внедрять системы контроля с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками.

1.4 Выводы по главе 1

1. Выполнен обзор методов контроля процессов горения на теплоэнергетических объектах и технических средств, их реализующих. Отмечено, что в большинстве случаев режимы горения оптимизируются периодически, при этом коэффициент избытка воздуха определяется на основе измерения косвенных параметров: температуры, давления, разряжения, концентрации химических элементов в составе уходящих газов и т.п. Такие методы контроля являются несовершенными и характеризуются

высокой трудоемкостью, низкой достоверностью и необходимостью создания сложных измерительных систем, в состав которых входят различные датчики, газоанализаторы и т.п.

2. Таким образом, возникает 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.

3. На основании проведенного обзора методов контроля процесса горения, в том числе и газообразных углеводородов, был сделан вывод, что спектроскопический метод является наиболее информативным и приобретает особенное значение при изучении сложных химических реакций, в ходе которых в реагирующей системе возникают и исчезают разнообразные промежуточные вещества. При этом повышение достоверности проводимого контроля может быть достигнуто 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.

4. Анализ существующего к настоящему времени небольшого количества в основном зарубежных работ, посвященных применению спектроскопических методов для диагностики процессов горения, показал, что эти работы имеют узкоспециализированный прикладной характер, рассматривают только некоторые вопросы, связанные с измерением отдельных и наиболее интенсивных спектральных линий или полос, и не рассматривают процедуру контроля этих процессов в целом. Поскольку под процедурой контроля понимается не только измерение контролируемого параметра, но и обработка результатов измерений, правильная их интерпретация, разработка методики контроля, выбор применяемого метода

и прибора контроля, - отсюда вытекает потребность в разработке универсального спектроскопического метода контроля процессов горения.

5. Специфика протекания процессов горения – высокая температура и агрессивная окружающая среда - требует применения спектральных приборов контроля с волоконно-оптическим зондом для передачи анализируемого излучения на заданное расстояние. Тщательный анализ рекламных данных производителей, серийно выпускающих такие спектрометры, анализ научных статей, посвященных таким приборам, и опыт работы с ними показал, что данные оптические спектрометры имеют недостаточно высокие технические характеристики, в том числе и из-за применения ОВ.

6. Выдвинуто, что специфика задач контроля процессов горения, требует применения длинных оптических волокон, что непременно приведет к увеличению искажений анализируемых сигналов, и, как следствие, погрешностям спектральных измерений. Отсюда вытекает актуальность создания спектральных приборов контроля с волоконно-оптической системой передачи, отличающихся улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с известными аналогами, в том числе за счет учета и коррекции потерь и искажений анализируемого сигнала при передаче по оптическому волокну.

7. На основе проведенного обзора задач контроля процессов горения газообразных углеводородов, применяемых для выработки тепловой энергии, технических средств контроля и его критического анализа сформулированы задачи диссертационного исследования, результаты решения которых представлены в последующих главах данной диссертационной работы.

2 Математическое описание оптического спектрального прибора как информационной измерительной системы

Автором данной работы индивидуально и в составе научного коллектива кафедры конструирования и технологии электронных и лазерных средств ФГАОУ ВО «Санкт - Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения» (ГУАП) выполнен целый ряд научных исследований по применению методов оптической спектроскопии для решения задач контроля процессов горения и разработке спектральной аппаратуры, реализующей эти методы.

Результаты этих исследований частично послужили основой при написании данной работы и были опубликованы в ряде изданий, входящих как в перечень ВАК [81, 87, 89 - 91, 105 - 112], так и в изданиях, индексируемых в международных системах научного цитирования Scopus и Web of Science [82 - 86, 92, 113 - 133], в патентах РФ [134 - 137], в монографии [93], а также в отчетах по успешно выполненным НИР [138 - 144], в том числе под руководством автора данной работы [139, 141, 143, 144].

В рамках этих работ были выполнены теоретические исследования и разработка таких спектральных приборов, как многоканального оптического спектрометра с передачей анализируемых сигналов по волоконно-оптическому жгуту (ВОЖ) [79, 84, 87, 130, 145] и СП на базе дифракционной решетки [116, 119, 121, 123, 146, 147]. Были исследованы вопросы улучшения технических характеристик разрабатываемых спектральных приборов, в частности их чувствительности и разрешающей способности. Также были исследованы вопросы, связанные с передачей анализируемых излучений по ОВ, исследованы возникающие при этом потери и искажения передаваемого сигнала и их влияние на результат спектроскопических измерений, были разработаны методы коррекций этих потерь и искажений при обработке результатов спектроскопических измерений [119, 120, 131, 133, 148].

2.1 Модель анализируемого оптического сигнала и его вероятностные характеристики

Основной целью спектрального анализа является определение химического состава вещества. При этом объектом исследования являются энергетические уровни излучающих частиц, по положению которых можно сделать вывод о принадлежности их тому или иному атому, а по их интенсивности излучения – о процентном составе исследуемой пробы [96]. Стоит отметить, что вследствие конечной ширины спектральных линий излучения, поступающего на вход спектрального прибора, положение энергетических уровней не может быть определено сколь угодно точно.

В рамках классического подхода [96] описание истинного распределения энергии по спектру сводится либо к интерполяции его некоторым стандартным распределением, либо к разложению на сумму стандартных распределений. Таким образом, истинное распределение по спектру, представляется в виде интегралов Фурье и в качестве стандартного распределения принимается монохроматическое излучение [98].

При этом в случае решения задачи контроля процессов горения газообразных углеводородов путем применения методов спектроскопии, первостепенный интерес представляет не распределение энергии по всему диапазону, а расположенные на заранее известных длинах волн спектральные линии и спектральные участки и их интенсивности.

Традиционно оптические спектры представляются совокупностью сплошного и линейчатых спектров. При этом сплошная компонента спектрального распределения является широкополосным излучением и может быть описана с помощью формулы Планка [149].

Что касается спектральных «линий», они таковыми не являются, а представляют собой узкополосные модулируемые колебания, имеющие как амплитудную, так и угловую модуляции, а их адекватное описание может быть выполнено в рамках узкополосных стационарных случайных процессов.

Случайные поля, сформированные естественными источниками ОИ, к которым можно отнести пламя, также адекватно описываются в рамках теории стационарных случайных процессов. При этом, чтобы описать основные свойства отдельных реализаций стационарных случайных процессов, можно применить статистические характеристики, такие как средние значения и квадраты, плотности вероятности, ковариационные функции, функции спектральной плотности и их оценки [150].

Среднее значение μ_x и дисперсия σ_x стационарной реализации случайного процесса характеризуют соответственно центр рассеяния и величину рассеяния данных [150]. Средний квадрат ψ^2 является мерой того и другого одновременно и дает элементарное представление об интенсивности процесса. Плотность вероятности $p(x)$ стационарной реализации задает скорость изменения вероятности в зависимости от значения реализации [150]. Ковариационная функция $C_{xx}(\tau)$ стационарного случайного процесса задает меру зависимости значений процесса, сдвинутых относительно друг друга на определенный интервал времени [150]. Спектральная плотность мощности (иначе, энергетический спектр) $G_{xx}(f)$ позволяет судить о частотных свойствах случайного процесса и характеризует его интенсивность при различных частотах, т.е. среднюю мощность, приходящуюся на единицу полосы частот [151].

При спектральном анализе случайных процессов особое значение имеет спектральная плотность мощности (энергетический спектр) и ее оценка. В соответствии с теоремой Винера-Хинчина энергетический спектр и корреляционная функция связаны между собой преобразованием Фурье.

Исходя из этого в работах [107, 112, 118] был предложен подход к описанию ОИ, испускаемого очагом горения, в рамках теории случайных процессов и полей, где анализируемые спектральные линии, которые не являются линиями как таковыми, представляют собой узкополосное

излучение, а модель анализируемого ОС представлена в форме случайного процесса $X_{\Delta\Omega}(t)$ с финитным спектром.

Излучение, являющееся случайным полем, можно охарактеризовать пространственными и временными характеристиками. Тогда, аналогично определению случайного процесса, сформулированного в [152, 153], случайным полем называется случайная функция $\zeta(\alpha,\beta,\gamma,...)$ нескольких переменных $\alpha,\beta,\gamma,....$ Стоит отметить, что поля $\zeta(t,\mathbf{r}) \equiv \zeta(\mathbf{r},t)$, являющиеся функциями координат пространства **r** и времени *t,* представляют наибольший интерес в случае спектральных измерений в оптическом диапазоне. Для прямоугольной системы координат такие поля можно записать в виде $\zeta(\mathbf{r},t) = \zeta(x,y,z,t)$, где *x,y,z* – пространственные координаты [152, 153].

Совокупность переменных *x,y,z,t* можно представить как координаты некоторого вектора *M(x,y,z,t)* в четырехмерном пространстве. Тогда, случайное поле можно задать как функцию $\zeta(M)$, которая для каждого фиксированного значения аргумента *M*, $\zeta(M)$ является случайной величиной и называется сечением поля [152].

Отсюда следует, что случайное поле $\zeta(M)$ можно считать заданным, если при произвольном выборе точек M_i, i=1,2…,n, для семейства случайных величин $\zeta(M_i)$ определена совместная функция распределения [152]:

$$F_n\left(\zeta_1,\zeta_2,\ldots,\zeta_n;M_1,M_2,\ldots,M_n\right)=P\left\{\zeta(M_1)\le\zeta_1,\zeta(M_2)\le\zeta_2,\ldots,\zeta(M_n)\le\zeta_n\right\}, \quad (2.1)$$

где $P\{...\}$ - вероятность события $\zeta(M_l)\le\zeta$,
или совместная плотность вероятности

$$p_n\left(\zeta_1,\zeta_2,\ldots,\zeta_n;M_1,M_2,\ldots,M_n\right)=\frac{\partial^n F_n\left(\zeta_1,\zeta_2,\ldots,\zeta_n;M_1,M_2,\ldots,M_n\right)}{\partial\zeta_1\partial\zeta_2\ldots\partial\zeta_n} \quad (2.2)$$

При этом корреляционная функция $R_\zeta(M_1,M_2)$ случайного поля $\zeta(M)$ дается выражением:

$$R_\zeta\left(M_1,M_2\right)=\overline{\left(\zeta(M_1)-\mu_{\zeta_1}\right)\left(\zeta(M_2)-\mu_{\zeta 2}\right)}=$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\zeta_1-\mu_{\zeta_1}\right]\left[\zeta_2-\mu_{\zeta_2}\right]p_2\left(\zeta_1,\zeta_2;M_1,M_2\right)d\zeta_1 d\zeta_2, \qquad (2.3)$$

где $\mu_\zeta=\overline{\zeta(M)}=\int_{-\infty}^{\infty}\zeta\, p_1\left(\zeta;M\right)d\zeta$ - математическое ожидание случайного поля, а $p_1(...)$ и $p_2(...)$ – одномерная и двумерная плотности вероятности, соответственно.

Для однородных по пространству и постоянных во времени случайных полей $\zeta(M)=\zeta(\mathbf{r},t)$ математическое ожидание μ_ζ не зависит от выбранных координат сечения поля и момента времени [152]. Корреляционная функция стационарного и однородного поля зависит лишь от разницы координат точек пространства $\Delta\mathbf{r}=\mathbf{r}_2-\mathbf{r}_1$ и от разности моментов времени $\tau=t_2-t_1$.

Спектральное разложение пространственно-временного векторного случайного поля, зависящего от точки пространства $r=(x, y, z)$ и времени t, определяется следующим выражением [149]:

$$\overline{\zeta}(\mathbf{r},\tau)=\iint\zeta(\omega,\mathbf{k})\cdot e^{i(\mathbf{k}r-\omega t)}d\omega d^3\mathbf{k}, \qquad (2.4)$$

где ω – временная угловая частота, $\mathbf{k}$ – волновой вектор, $d^3k=dk_x dk_y dk_z$, величины $\zeta(\omega,\ \mathbf{k})$ – спектральные амплитуды пространственно-временного случайного поля.

Тогда, корреляционная функция $R_\zeta(\Delta\mathbf{r},\ \tau)\equiv R_\zeta(\mathbf{r},\ \tau)$ стационарного и однородного случайного поля $\zeta(\mathbf{r},\ \tau)$ связана со спектральной плотностью

пространственно-временного случайного поля $S_\zeta(\omega,\mathbf{k})$ преобразованием Фурье [149]:

$$R_\zeta(\mathbf{r},\tau)=\int\int_{-\infty}^{\infty} G_\zeta(\omega,\mathbf{k})\cdot e^{i(\mathbf{kr}-\omega\tau)}d\omega d^3\mathbf{k}, \qquad (2.5)$$

где функция $S_\zeta(\omega, \mathbf{k})$ дается обратным преобразованием Фурье:

$$S_\zeta(\omega,\mathbf{k})=\frac{1}{(2\pi)^4}\int\int_{-\infty}^{\infty} R_\zeta(\mathbf{r},\tau)\cdot e^{-i(\mathbf{kr}-\omega\tau)}d\tau d^3\mathbf{r}. \qquad (2.6)$$

Представленные выражения (2.4-2.6) описывают переменное (зависящее от времени) случайное поле в трехмерном пространстве *(x, y, z)*. Поэтому пространственно-временное случайное поле характеризуется четырьмя корреляционными функциями - тремя пространственными и одной временной.

В случае анализа спектра оптического излучения, испускаемого при протекании контролируемого процесса горения, излучение, падающее на апертуру СП, является переменным (зависящим от времени) случайным полем в двумерном пространстве *(x, y)*. Поэтому пространственно-временное случайное поле на апертуре спектрального прибора может быть охарактеризовано тремя корреляционными функциями - двумя пространственными и одной временной.

При решении предполагаемых спектроскопических задач общее выражение (2.4) целесообразно представить в форме степенного ряда, с помощью которого можно оценивать влияние неравномерности распределения поля на входной апертуре спектрального прибора на результаты спектроскопических измерений:

$$\zeta(\mathbf{r},\tau) = \zeta(\mathbf{r}_0,\tau) + \left.\frac{\partial\zeta(\mathbf{r}_0,\tau)}{\partial x}\right|_{\mathbf{r}_0} dx + \left.\frac{\partial\zeta(\mathbf{r}_0,\tau)}{\partial y}\right|_{\mathbf{r}_0} dy + \ldots, \qquad (2.7)$$

где $\mathbf{r}_0$ – координаты геометрического центра входной апертуры спектрального прибора.

Гармонизуемый случайный процесс, представляемый в форме интеграла Фурье-Стилтьеса согласно [154], может быть принят в качестве общей модели случайного процесса:

$$X(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t)dF(\omega), \qquad (2.8)$$

где $F(\omega)$ –монотонно неубывающая функция аргумента ω.

В условиях реального физического эксперимента гармонизуемому случайному процессу (2.8) соответствует стохастическая скалярная волна с однородным плоским фронтом, ограниченная по пространственным координатам x и y:

$$X(t,z) = D_{xy} \cdot X(t - \frac{z}{c}), \qquad (2.9)$$

где D_{xy} – размер апертуры, выполняющей ограничение по пространству однородной плоской волны в плоскости, нормальной ее распространению; z– направление распространения волны; c – скорость распространения волны.

Стохастическая однородная плоская скалярная волна (2.9) содержит СИ, характеризующую состояние и динамику контролируемого процесса горения. Формализация оптического сигнала, являющегося носителем спектроскопической информации, в виде стохастической однородной скалярной волны (2.9), полностью соответствует общим принципам оптической спектроскопии [96, 98, 155 - 158].

Колебания большинства оптических источников хорошо описываются в рамках теории стационарных случайных процессов [159]. Так как в реальных условиях контролируемый ПГ взаимодействует со СПК в течение ограниченного времени T, то анализируемый оптический сигнал в форме стационарного случайного процесса $X_T(t)$ должен рассматриваться как результат ограничения во времени некоторого другого случайного процесса $Y(t)$ большей длительности:

$$X_T(t) = Y(t) \cdot \chi(t) = \begin{cases} X(t), & t \in [t_1, t_2] \\ 0, & t \notin [t_1, t_2] \end{cases}, \tag{2.10}$$

где $\chi(t)$ - характеристическая функция интервала временного ограничения $[t_1,t_2]$, т.е. $T=t_2-t_1$, определяемая как:

$$\chi(t) = \begin{cases} 1, & t \in [t_1, t_2] \\ 0, & t \notin [t_1, t_2] \end{cases}, \tag{2.11}$$

В таком случае, финитный стационарный случайный процесс $X_T(t)$ также является гармонизуемым, и его можно представить в форме интеграла Фурье-Стилтьеса [154]:

$$X_T(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t) dZ(\omega), \tag{2.12}$$

где $Z(\omega)$ – случайная спектральная функция.

Случайная спектральная функция $Z(\omega)$ является дифференцируемой почти наверное, т.е. на всем множестве реализаций с вероятностью единица существует комплексная случайная спектральная функция [154]:

$$\mathrm{S}(\omega) = \frac{dZ(\omega)}{d\omega}. \tag{2.13}$$

В условиях реальных измерений одна из реализаций ${}^{k}S(\omega)$ ансамбля (2.13), представляет собой математический спектр, который необходимо связать со спектром, получаемым с помощью СПК, т.е. физическим, что будет рассмотрено далее.

В случае измерения отдельных линий спектральной реализации ${}^{k}S(\omega)$ соответствует реализация ${}^{k}x(t)$ случайного процесса (2.12):

$$ {}^{k}x(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} {}^{k}S(\omega_j)\exp(i\omega_j t)d\omega_j , \qquad (2.14) $$

где ${}^{k}S(\omega_j)$ – реализация комплексной спектральной функции из ансамбля (2.13); ω_j – средняя частота узкополосного случайного процесса (спектральной линии), являющегося СИП, подлежащим контролю.

Тогда, реализацию комплексной спектральной функции можно определить как:

$$ {}^{k}S(\omega_j) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} {}^{k}x(t)\exp(-i\omega_j t)dt \qquad (2.15) $$

Функция (2.15) является преобразованием Фурье реализации случайного процесса ${}^{k}x(t)$ и содержит спектроскопическую информацию о контролируемом процессе горения.

При этом реализацию случайного процесса ${}^{k}x(t)$ можно считать заданной, если при произвольно выбранной последовательности моментов времени t_i, i=1,2,…,n, для совокупности случайных величин ${}^{k}x(t_1)$, ${}^{k}x(t_2)$,…, ${}^{k}x(t_n)$ определена совместная функция распределения [153]:

$$ F_n\left({}^{k}x_1, {}^{k}x_2, \ldots, {}^{k}x_n; t_1, t_2, \ldots, t_n\right) = P\left\{{}^{k}x(t_1) \le {}^{k}x_1, {}^{k}x(t_2) \le {}^{k}x_2, \ldots, {}^{k}x(t_n) \le {}^{k}x_n\right\} \qquad (2.16) $$

или совместная плотность вероятности

$$p_n\left({}^k x_1, {}^k x_2, \ldots, {}^k x_n; t_1, t_2, \ldots, t_n\right) = \frac{\partial^n F_n\left({}^k x_1, {}^k x_2, \ldots, {}^k x_n; t_1, t_2, \ldots, t_n\right)}{\partial {}^k x_1 \partial {}^k x_2 \ldots \partial {}^k x_n}. \qquad (2.17)$$

Стоит отметить, что из всего многообразия существующих моделей сигналов наиболее важными для оптической спектроскопии в первую очередь являются гауссовские случайные процессы [152]. Поэтому вероятностные характеристики реализации случайного процесса ${}^k x(t)$ из соотношения (2.14) следует рассматривать как связанные с гауссовским процессом. По определению случайный процесс называется гауссовским, если все совместные распределения для любой конечной совокупности случайных величин $x(t_1)$, $x(t_2)$,…, $x(t_n)$ при произвольных n и произвольно выбранной в области изменения аргумента $t \in T$ последовательности t_i, i=1,2,…,n, являются нормальными [153].

При постановке вопроса спектральных измерений в оптическом диапазоне, следует исходить из того, что все сигналы, являющиеся носителями спектроскопической информации, существуют исключительно в виде излучений. Тогда в качестве модели анализируемого ОС может быть представлена реализация случайного процесса ${}^k x(t)$ в форме усеченной волны с однородным плоским фронтом. Такая модель с учетом соотношения (2.9) запишется как:

$$\hat{V}\left[{}^k x(t)\right] = D_{xy} \cdot {}^k x\left(t - \frac{z}{c}\right). \qquad (2.18)$$

В соотношении (2.18) $\hat{V}$ является линейным ограниченным оператором перехода от колебательного процесса к волне и может быть введен следующим образом [105]:

$$\hat{V}\left[{}^{k}x(t)\right] = D_{xy} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} {}^{k}x(t') \cdot \delta(t - \frac{z}{c} - t')dt = D_{xy} \cdot {}^{k}x(t - \frac{z}{c}), \qquad (2.19)$$

Реализация случайного процесса ${}^{k}x(t')$ является колебанием электрической компоненты оптического излучения. При этом волновой пучок (2.18), являющийся носителем СИ о контролируемом процессе горения, падает на входную апертуру спектрального прибора размером D_{xy}. Спектроскопическая информация извлекается непосредственно из волны (2.18) и проявляется на выходе фотодетектора в форме фототока, значение которого пропорционально измеряемому спектроскопическому параметру – интенсивности спектральной линии или спектрального участка [108].

При этом значение фототока в некоторый фиксированный момент времени измерения спектральным прибором $t=t_1$ представляет собой некоторую случайную величину i_1.

Так как для случайных величин, находящихся в случайном процессе, наиболее адекватным описанием их распределения является распределение, описывающееся нормальным законом [160], то распределение значений фототока, каждое из которых соответствует соответствующему контролируемому спектроскопическому параметру, также описывается нормальным законом. Поэтому при обработке результатов спектроскопического контроля с целью определения его достоверности могут быть использованы их вероятностные характеристики: средние значения и средние квадраты, плотности вероятности и т.п. [150, 153].

Более подробно это рассматривается в 3 главе данной работы.

2.2 Оптический спектральный прибор как информационная измерительная система

Спектрометрия, занимающаяся разработкой методов и теории измерения спектров, объединяет разделы метрологии, прикладной спектроскопии и теории линейных систем [161].

Определение связи между математическим спектром и спектром, получаемым с помощью СП в ходе физического эксперимента, представляет собой содержание одной из важнейших теорем теории колебаний и волн [162]. Поэтому эта связь является базой в спектрометрии, независимо от принципов действия СП и диапазона анализируемых длин волн.

Истинный спектр представляет собой спектр в математическом смысле, т.е. теоретический, и в случае решения задачи контроля процессов горения отражает истинное состояние контролируемого процесса горения. Под спектром, получаемым с помощью СПК, понимается физический спектр [162], называемый аппаратурным и дающий спектроскопическую информацию получателю о контролируемом процессе горения.

Существующие в настоящее время оптические спектральные приборы можно разделить на три класса. К первому относятся приборы, где спектральное разложение осуществляется путем линейной обработки анализируемого оптического излучения. Это дифракционные спектральные приборы (решеточные, призменные [96, 158] и построенные на базе акустооптического перестраиваемого фильтра [97]).

Ко второму классу следует отнести спектральные приборы, в которых осуществляется предварительная нелинейная обработка анализируемого ОС. К числу таких приборов относится Фурье-спектрометр, в котором результат измерения спектра выдается в форме преобразования Фурье временной корреляционной функции оптического поля.

В третий класс спектральных приборов можно выделить прибор, в котором спектральное разложение основано на явлении резонанса в n параллельных каналах, каждый из которых содержит блок узкополосной

оптической фильтрации [79, 84, 100, 130, 134, 145]. Впервые такой прибор был рассмотрен в работе [100].

Стоит отметить, что для практического применения при решении задач контроля процессов горения, в том числе, применяющихся для выработки тепловой энергии, предпочтительнее будут приборы первого и третьего классов, ввиду простоты эксплуатации, большей распространённости и невысокой цены относительно приборов второго класса.

В рамках классического подхода теории оптических спектральных измерений обратные задачи прикладной оптической спектроскопии, где восстановление исходных характеристик анализируемого излучения выполняется на основе экспериментальных данных, часто формулируются при помощи линейного интегрального уравнения вида [155]:

$$\int_a^b K(x,y)\varphi(y) = f(x) \tag{2.20}$$

где $\varphi(y)$ – искомая функция, $K(x, y)$ – ядро, иногда заданное в явной аналитической форме, но чаще известное с той или иной погрешностью, $f(x)$ – функция исходных данных, всегда отягощенная ошибкой.

Выражение (2.20) нашло широкое применение в различных областях науки и техники и является одним из основных соотношением в спектрометрии, введенное в [98] как:

$$f(x') = \int_{-\infty}^{\infty} a(x'-x)\varphi(x)dx, \tag{2.21}$$

где $f(\cdot)$ – функция, описывающая распределение энергии по спектру, полученное экспериментально с помощью реального СП; $a(\cdot)$ – полная аппаратная функция СП (его характеристика, являющаяся реакцией на монохроматическое излучение); $\varphi(\cdot)$ – истинное распределение энергии по

спектру, x и x' – длина волны, частота или координаты в плоскости спектра, либо координаты на записи спектра.

С помощью соотношения (2.21) в рамках классического подхода описывается действие всех известных спектральных приборов оптического диапазона [96, 99, 155 - 158].

Существующая теория оптических спектральных приборов первого класса, с одной стороны, опирается на принципы геометрической оптики, с помощью которой объясняется спектральное разложение, а с другой стороны, связь вход-выход спектрального прибора дается соотношением (2.21), никак не связанным с прохождением анализируемого оптического излучения через все функциональные узлы прибора.

Поэтому принципиальным недостатком теории, основанной на решении соотношения (2.21), является то, что в ней отсутствует последовательный анализ преобразования оптического излучения от входа спектрального прибора до результата регистрации спектра. Это не позволяет учесть влияние конструктивных особенностей СП и внешних условий на результат спектральных измерений.

Очевидные недостатки существующей теории оптических спектральных приборов и фундаментальный характер соотношения (2.21) потребовал его тщательного критического анализа, результаты которого изложены в работах [105, 107, 113].

В работах [105, 107, 113] был предложен новый подход к описанию действия спектральных приборов, отнесенных к первому и третьему классам, через определение связи между математическим и физическим спектрами.

Математическое понятие истинного спектра может быть адекватно установлено в рамках теории рядов и интегралов Фурье [14], где частоты являются аргументами спектральных функций. В таком случае, математические спектры могут быть рассмотрены как комплексные и энергетические спектральные функции, принятые в теории сигналов [15, 16].

Эти спектры определяются как функции не длины волны, как принято в оптике, а как функции частоты.

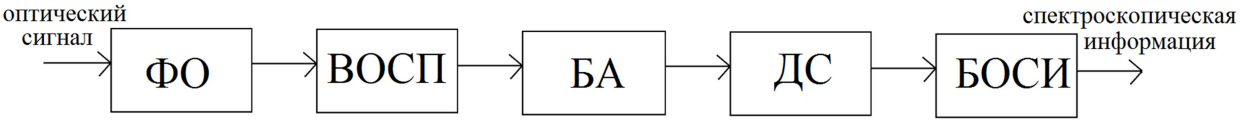
Математическая теория спектрального анализа рассматривается в классе линейных преобразований [14]. Поэтому естественным подходом к описанию действия оптического спектрального прибора через определение связи между математическим спектром и физическим, получаемым с помощью спектрального прибора контроля и характеризующим контролируемый ПГ, является применение методов теории линейных систем [17 - 20] и теории сигналов [15, 16] к теории спектральных измерений.

Применение такого подхода к процессу описания спектральных измерений требует рассматривать аппаратурные комплексные спектры как первичные, а энергетические, получаемые в результате дальнейшей обработки комплексных спектров, как вторичные.

При этом спектральный прибор контроля представляется в виде ряда последовательно расположенных подсистем, выполняющих различные преобразования и обработку анализируемых сигналов, несущих спектроскопическую информацию о контролируемом процессе горения. А его исчерпывающей характеристикой является аппаратная функция, которая содержит в себе информацию и о погрешностях, присущих данному прибору.

Задача каждого измерительного прибора, в том числе и спектрального, – получение максимальной информации об исследуемом объекте. Поэтому в данной работе под оптическим спектральным прибором, который является прибором контроля, понимается информационная измерительная система (ИИС) [163, 164].

Функциональная схема такой ИИС приведена на рисунке 2.1.



ФО –формирующая оптика; ВОСП – волоконно-оптическая система передачи; БА – блок анализа; ДС – детектирующая система; БОСИ – блок обработки спектроскопической информации

Рисунок 2.1 – Функциональная схема оптического СП как ИИС

Формирующая оптика – это входной оптический каскад спектрального прибора, выполняющий роль формирователя волнового оптического пучка с необходимыми свойствами.

Волоконно-оптическая система передачи применяется для передачи анализируемого ОС на заданное расстояние от объекта контроля. Это особенно актуально в случаях применения спектральных приборов в задачах контроля процессов горения, протекание которых происходит в неблагоприятных условиях окружающей среды.

В блоке анализа выполняется спектральное разложение анализируемого оптического излучения. В зависимости от типа спектрального прибора он может представлять собой диспергирующую систему, фильтрующую систему и т.п.

В качестве детектирующей системы могут быть применены: ПЗС-линейка, ФЭУ, набор фотоприемников и т.п., - в зависимости от типа оптического спектрального прибора.

На рисунке 2.1 формирующая оптика, ВОСП и блок анализа образуют линейную подсистему, а детектирующая система и блок обработки СИ представляют собой нелинейную подсистему.

Поскольку формирующая оптика, волоконно-оптическая система передачи и блок анализа выполняют линейное преобразование оптического излучения, следовательно, их можно описать с позиций системного анализа при помощи соответствующих аппаратных функций. Необходимо отметить,

что системы формирующей оптики и волоконно-оптической системы передачи могут отличаться для различных спектральных приборов. Однако любую такую оптическую систему можно составить при помощи каскадов, состоящих из линз, слоев свободного пространства, апертур, ограничивающих волновые пучки по пространству, и оптического волокна или группы оптических волокон.

В таком случае теоретическое описание процесса анализа спектра оптических сигналов спектральным прибором выполняется в два этапа [105, 107, 113]:

1. Вычисляется комплексный спектр анализируемого ОС с помощью линейной подсистемы оптического спектрального прибора.

2. Вычисляется энергетический спектр, который является результатом спектрального измерения в оптическом диапазоне и отражает состояние контролируемого ПГ, путем дальнейшей обработки комплексного спектра детектирующей системой СП.

Применение такого подхода к математическому описанию спектрального прибора позволяет выполнить последовательный анализ прохождения анализируемого оптического сигнала через все его функциональные узлы (от входа спектрального прибора до результата регистрации спектра) и позволяет учесть влияние конструктивных особенностей прибора и внешних условий на аппаратную функцию прибора, а, следовательно, и на результат спектральных измерений.

2.3 Математическая модель спектрального прибора оптического диапазона

2.3.1 Анализ комплексного спектра оптических сигналов

Передача сигнала является основной задачей теории линейных систем. В связи с этим можно сформулировать основную проблему теории линейных систем – нахождение такой полной характеристики системы, которая

наиболее точно позволяла бы определить связь между ее входом и выходом [17].

Решение этой проблемы было определено в виде линейного интегрального оператора [165]:

$$y(\xi) = \hat{\mathrm{L}}x(\xi) = \int_{\Xi} A(\xi, \xi') \cdot x(\xi')\mathrm{d}\xi', \tag{2.22}$$

где $x(\xi)$ и $y(\xi)$ – вход и выход линейной системы, соответственно; $\hat{\mathrm{L}}$ – линейный оператор, описывающий преобразование входа линейной системы $x(\xi)$ в ее выход $y(\xi)$; (ξ, ξ') – независимые переменные в n-мерном пространстве, которые могут быть пространственными, временными и частотными переменными; $A(\xi, \xi')$ – аппаратная функция, т.е. ее исчерпывающая характеристика.

АФ может быть выражена как действие линейного оператора $\hat{L}$ на δ-воздействие [166]:

$$A(\xi, \xi') = \hat{\mathrm{L}}\delta(\xi - \xi'), \tag{2.23}$$

Физически это означает, что АФ рассматривается как реакция линейной системы на соответствующее δ – воздействие, и является исчерпывающей характеристикой этой системы, что полностью соответствует решению основной проблемы теории линейных систем [17 - 20].

В настоящей работе под δ-воздействием понимается точечный источник монохроматического излучения на входной поверхности формирующей оптики [105]:

$$x(\xi) = \delta(x - x', y - y'; \omega - \omega'), \tag{2.24}$$

где $x, x'; y, y'$ – координаты на входной поверхности формирующей оптики, ω, ω' – временные спектральные частоты.

Поскольку аппаратная функция спектрального прибора является его исчерпывающей характеристикой и должна описывать прохождение ОС через все функциональные узлы прибора, при определении соотношения вход-выход СП необходимо учесть не только его конструктивные особенности, но и температурную зависимость, которой обладает оптическое волокно, если оно применяется в приборе для передачи анализируемых излучений [148]. С изменением температуры меняется энергетическая частотная характеристика оптического волокна, что экспериментально продемонстрировано в четвертой главе.

Тогда общее соотношение вход-выход линейной части спектрального прибора для комплексного спектра дается в следующем виде [105]:

$$S_a(\omega, t, x, y, T) = \int_{\Omega}\int_{X}\int_{Y}\int_{T} A(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T', t) S_0(\omega') \mathrm{d}\omega' \mathrm{d}x' \mathrm{d}y' \mathrm{d}T', \quad (2.25)$$

где $S_a(\cdot)$ –комплексный аппаратурный спектр, т.е. спектр, полученный экспериментально с помощью спектрального прибора; $A(\cdot)$ – полная комплексная АФ; Ω – полоса анализируемых частот; X, Y – пределы интегрирования, определяемые конструкцией формирующей оптики; T – диапазон рабочих температур (значительной температурной зависимостью обладает волоконная оптика [148]), $S_0(\cdot)$ – комплексный спектр анализируемого оптического излучения.

Входящие в соотношение (2.25) пространственные переменные позволяют учесть влияние несовершенства оптических элементов спектрального прибора, т.е. его конструктивных особенностей, на технические характеристики прибора, а температурная переменная учитывает температурную зависимость энергетической частотной характеристики ОВ, входящего в состав ВОСП.

АФ в выражении (2.25) характеризует измерение комплексного спектра колебательного процесса и является реакцией прибора на δ – воздействие, что соответствует теории линейных систем [17].

При этом полная АФ определяется как:

$$A(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T',t) = \\ = \int_X \int_Y \int_T A_{ФО}(x,x',y,y') A_{ВОС}(T,T',\omega,\omega') A_{БА}(\omega,\omega',t) \mathrm{d}x' \mathrm{d}y' \mathrm{d}T' \quad , \quad (2.26)$$

$A_{ФО}(x,x',y,y')$ - аппаратная функция формирующей оптики; $A_{ВОС}(T,T',\omega,\omega')$ - аппаратная функция оптического волокна; $A_{БА}(\omega,\omega',t)$ - аппаратная функция блока анализа (согласно рисунку 2.1).

Свойство δ-функции многих переменных [167]

$$\delta(x-x', y-y', T-T', \omega-\omega') = \delta(x-x')\cdot\delta(y-y')\cdot\delta(T-T')\cdot\delta(\omega-\omega') \quad (2.27)$$

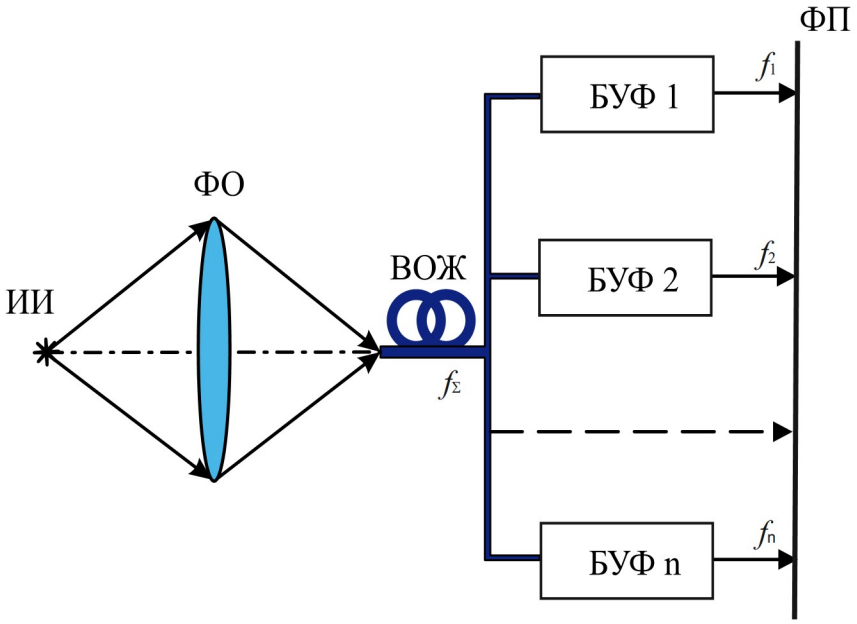
позволяет конкретизировать влияние различных переменных на свойства суммарной аппаратной функции спектрального прибора, в частности, учесть влияние конечной ширины щели ДСП на его аппаратную функцию или апертуру выходного торца оптического волокна, если щель или волоконно-оптическая система передачи включаются в состав спектрального прибора, а также температурную зависимость оптического волокна при применении его в неблагоприятных условиях окружающей среды.

Указанное в выражении (2.27) разделение переменных на пространственные, температурные и частотные позволяет отдельно рассмотреть аппаратную функцию системы формирующей оптики, которая зависит только от пространственных переменных, аппаратную функцию оптического волокна, которая зависит от температуры и частоты,

аппаратурную функцию блока анализа, которая имеет зависимость от частотной переменной [105].

Детальное математическое описание определения соотношений вход-выход оптических спектральных приборов разных типов через установление их аппаратных функций приведено в работах [108, 116, 117].

Оптическая схема МОС с передачей анализируемых ОС по волоконно-оптическому жгуту представлена на рисунке 2.2.



ИИ – источник излучения; ФО – формирующая оптика; ВОЖ – волоконно-оптический жгут; f_Σ, f_1, f_2, f_n – анализируемые оптические частоты; БУФ – блок узкополосной фильтрации; ФП – фотоприемная плоскость

Рисунок 2.2 – Оптическая схема МОС

Принцип действия такого спектрального прибора основан на том, что спектральное разложение анализируемого ОИ в нем выполняется в n параллельных каналах, каждый из которых содержит блок узкополосной фильтрации. Принцип построения такого прибора впервые был предложен в патенте РФ [134].

Соотношение, определяющее связь между входом и выходом такого спектрального прибора для комплексного аппаратурного спектра, дается следующим выражением:

$$\begin{bmatrix} S_{a1}(\omega_1,t,x,y,T) \\ S_{a2}(\omega_2,t,x,y,T) \\ \vdots \\ S_{ak}(\omega_k,t,x,y,T) \\ \vdots \\ S_{an}(\omega_n,t,x,y,T) \end{bmatrix} = \int_{\Omega}\int_{X}\int_{Y}\int_{T} \begin{bmatrix} A_{11}(\cdot) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{22}(\cdot) & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{kk}(\cdot) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & A_{nn}(\cdot) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S(\omega') \\ S(\omega') \\ \vdots \\ S(\omega') \\ \vdots \\ S(\omega') \end{bmatrix} d\omega' \mathrm{d}x' \mathrm{d}y' \mathrm{d}T', \quad (2.28)$$

где $||S_{ak}(\omega_k,t,x,y,T)||$ – матрица-столбец, описывающая отсчетные значения комплексного спектра анализируемого излучения; $||S(\omega')||$ - матрица-столбец, описывающая комплексный спектр анализируемого излучения на входе прибора; $A_{kk}(\cdot)= A_{kk}(\omega_k,\omega',x,x',y,y',T,T',t)$ – полная комплексная «парциальная» аппаратная функция для *k*-го канала разрешающей системы многоканального спектрометра.

Полную комплексную «парциальную» аппаратную функцию для *k*-го канала разрешающей системы многоканального спектрометра можно представить совокупностью аппаратных функций формирующей оптики $A_{ФО}$ и канала разрешающей системы $A_{КРС}$, состоящего из оптического волокна и узкополосного оптического фильтра.

Тогда, аппаратная функция формирующей оптики может быть определена как [105]:

$$A_{ФО}(x,x',y,y')=T(x,y)\cdot\delta\big((x-x'),(y-y')\big)= \\ = \exp\left(-i\frac{k}{2f}(x^2+y^2)\right)\cdot\delta\big((x-x'),(y-y')\big), \quad (2.29)$$

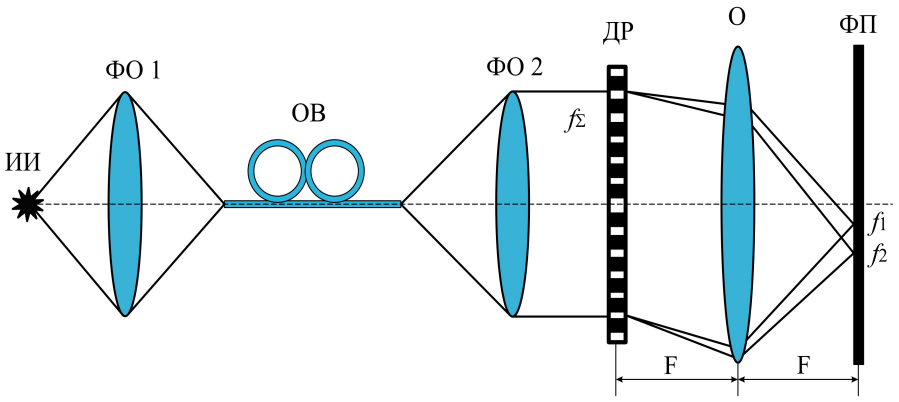
где $T(x,y)=\exp\left(-i\frac{k}{2f}(x^2+y^2)\right)$ – функция прозрачности линзы, $k=\frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, f – фокусное расстояние линзы.

А аппаратная функция канала разрешающей системы может быть определена как:

$$A_{KPC}(\omega_k,\omega',T,T',t)=K_{kk}(\omega_k,\omega')\cdot B_{kk}(T,T',\omega,\omega')\cdot e^{j\omega' t}, \qquad (2.30)$$

где $B_{kk}(T,T',\omega,\omega')$ – передаточная функция отрезка оптического волокна, $K_{kk}(\omega_k,\omega')$ – передаточная функция k-го блока узкополосной фильтрации.

Оптическая схема дифракционного спектрального прибора с передачей сигналов по ОВ представлена на рисунке 2.3.



ИИ – источник излучения; ФО 1 и 2 – входная и выходная формирующие оптики соответственно; ОВ – оптическое волокно; f_Σ, f_1, f_2 – анализируемые оптические частоты; ДР – дифракционная решетка; О – камерный объектив; ФП – фотоприемная плоскость

Рисунок 2.3 – Оптическая схема ДСП

Связь вход-выход дифракционного спектрального прибора для комплексного аппаратурного спектра в +1 дифракционном порядке дается как [117]:

$$S_a(\omega_x,t,x,y,T) = M\int\limits_{\Omega}\int\limits_{X}\int\limits_{Y}\int\limits_{T} A_{ФО}(x,x',y,y')A_{ВОС}(T,T',\omega,\omega')S(\omega')\exp(i\omega' t)\cdot$$

$$\cdot\frac{\sin[(\omega(x)-\omega')\frac{t_a}{2}]}{(\omega(x)-\omega')\frac{t_a}{2}}d\omega' dx' dy' dT' \quad , \qquad (2.31)$$

где Ω – диапазон анализируемых частот, *S(ω')* – комплексный спектр анализируемого излучения; *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 (2.28) и (2.31) представляют собой математические модели многоканального оптического спектрометра и дифракционного спектрального прибора для комплексных спектров анализируемого излучения, получаемых на выходе линейной подсистемы оптического спектрального прибора (в зависимости от типа), т.е. на чувствительной поверхности фотодетектора, который является входом нелинейной подсистемы.

Поскольку в оптическом диапазоне результатом спектрального измерения является энергетический спектр ОИ, получаемый комплексный спектр требует дальнейшей обработки, которая выполняется детектирующей системой и блоком обработки спектроскопической информации спектрального прибора.

2.3.2 Анализ энергетического спектра оптических сигналов

Сила тока любого фотоприемника пропорциональна мощности падающего на его чувствительную поверхность излучения, поэтому все фотодетекторы являются квадратичными. Таким образом, сила тока фотоприемника определяется как:

$$i = \alpha P = \alpha \iint_{\Delta S} \vec{\Pi} d\vec{s}, \qquad (2.32)$$

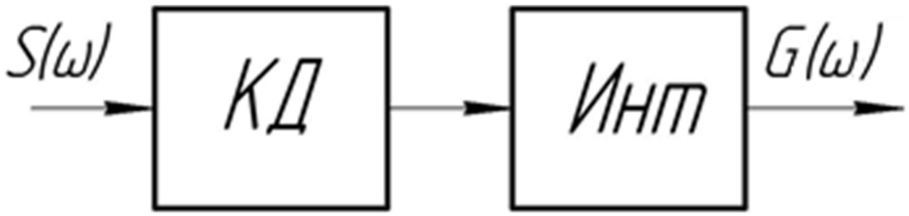
где α – коэффициент пропорциональности; P – мощность падающего излучения; $\vec{\Pi}$ – вектор Пойнтинга падающего излучения; ΔS – площадь чувствительной поверхности фотоприемника.

Тогда в работах [81, 114, 115] было показано, что фототок (2.32) дается выражением:

$$i = \alpha \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \iint_{\Delta S} E^2(0,0) ds = \alpha \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \mathrm{E}^2(0,0) \Delta \mathrm{S}. \qquad (2.33)$$

где c – скорость света; ε – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; E – напряженность электрического поля световой волны.

Процедура фотодетектирования может быть представлена эквивалентной схемой – безынерционным квадратичным детектированием с последующим временным интегрированием полученного фототока [149], поскольку фотоприемник обладает значительной инерционностью по отношению к периоду оптических колебаний. Эквивалентная схема обработки фототока одним фотоприемником (фотодиод, ФЭУ, элемент ПЗС-линейки и т.п. в зависимости от типа прибора) представлена на рисунке 2.4 [115].



КД – квадратичный детектор, Инт – интегратор, *S(ω)* – комплексный спектр сигнала на выходе линейной части спектрального прибора, *G (ω)* – энергетический спектр анализируемого ОС на выходе СП

Рисунок 2.4 – Эквивалентная схема процесса фотодетектирования

Учитывая, что спектр пропорционален напряженности электрической компоненты ОИ, эквивалентную схему, представленную на рисунке 2.4, в математической форме можно записать как [117]:

$$G_a(\omega,x,y,T)=\int_{-\frac{t_R}{2}}^{\frac{t_R}{2}} i(t)dt = P(\omega)\int_{-\frac{t_R}{2}}^{\frac{t_R}{2}} \left|S_a(\omega,t,x,y,T)\right|^2 dt, \qquad (2.34)$$

где *i(t)* – ток с выхода фотоприемника*; P(ω)* – коэффициент, учитывающий спектральную чувствительность фотоприемника; t_R – время интегрирования; $t_0 = -\frac{t_R}{2}$.

Выполнив определенные математические выкладки [116, 117] с применением теории вытянутых волновых сфероидальных функций [168, 169], соотношение, определяющее распределение энергии оптического излучения по частотам в результате дальнейшей обработки в нелинейной подсистеме, определяется как:

$$G_a(\omega,x,y,T)=\int_{-\infty}^{\infty}\left|A(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')\right|^2 G_0(\omega')d\omega'\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\mathrm{d}T'$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty} W(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')G_0(\omega')d\omega'\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\mathrm{d}T' \qquad (2.35)$$

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

Детальный математический анализ вышеприведенных соотношений представлен в работах [105, 113, 116, 117].

Аппаратные функции $A(\cdot)$ и $W(\cdot)$ могут выражаться в виде непрерывных функций либо в виде дискретных функций. Дискретные функции характерны для многоканального спектрального прибора, где результат обработки представляется в виде набора полученных значений фототока с выхода каждого канала, которые в свою очередь являются отчетными значениями аппаратурного спектра. Также дискретные функции характерны для задач контроля, где необходимо измерять множество спектральных линий или участков спектра, что будет рассмотрено в 3 и 5 главах данной работы.

Соотношение (2.35) отражает результат однократного анализа на промежутке времени t энергетического спектра, в котором отдельные спектральные линии или спектральные интервалы соответствуют контролируемым спектроскопическим параметрам. После однократного измерения результаты сбрасываются, и начинается следующий цикл измерения.

Роль аппаратной функции имеет исключительное значение как в теории линейных систем, так и в теории оптических спектральных приборов в частности. Аппаратная функция позволяет определить характеристику спектрального прибора, имеющую ключевое значение при организации контроля с его применением – его погрешность.

2.3.3 Методы получения оценки энергетического спектра оптического сигнала

В результате спектрального измерения с выхода СП получают не истинное значение энергетического спектра анализируемого излучения, а некоторую его оценку, зависящую, в том числе, и от погрешности спектральных измерений. Оценка энергетического спектра принадлежит к числу важнейших статистических измерений. Под оценкой энергетического

спектра понимается результат обработки единственной спектральной реализации (2.15) ${}^{k}S(\omega)=S_0(\omega)$ случайного процесса $X_T(t)$.

Получить оценку энергетического спектра можно несколькими эквивалентными способами [150, 153, 170 - 172]:

1. На основе предварительно определенной оценки корреляционной функции.

2. На основе обработки мгновенного спектра анализируемого излучения.

3. На основе метода узкополосной фильтрации.

Первый способ определения оценки энергетического спектра выполняется на основе теоремы Бохнера. При этом необходимо учесть, что при реальных измерениях обрабатывается единственная реализация, и время анализа спектра ограничено.

Тогда, оценка энергетического спектра конечной реализации определятся следующим соотношением:

$$\bar{G}_a(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{R}(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau, \qquad (2.36)$$

где $\bar{R}(\tau)$ – оценка корреляционной функции.

В оптическом диапазоне данный способ характерен для СИСАМ и Фурье-спектрометра, где принцип измерения спектра основан на теореме Бохнера. Фурье-спектрометр включает в себя интерферометр Майкельсона, формирующий временную корреляционную функцию ОИ [149], и гармонический анализатор, вычисляющий преобразование Фурье этой функции.

Второй способ получения оценки энергетического спектра в случае оптических измерений спектра характерен для ДСП, где комплексный спектр, зависящий от времени, рассматривается в условиях «протягивания» анализируемой реализации $s_R(t)$ вдоль окна $r(t)$ [107].

Тогда соотношение (2.31), описывающее действие ДСП, можно переписать как [116]:

$$\mathrm{S}_a(\omega,t,x,y,T)=\alpha\int\limits_{\omega_0-\Delta\omega_0}^{\omega_0+\Delta\omega_0}\int\limits_{x-\Delta x}^{x+\Delta x}\int\limits_{y+\Delta y}^{y_0+\Delta y}\int\limits_{T+\Delta T}^{T+\Delta T}A_{\Phi O}(x,x',y,y')A_{BOC}(T,T',\omega,\omega')\cdot$$

$$\cdot\exp(-i\omega' t)\frac{\sin[(\omega-\omega')t_r/2]}{(\omega-\omega')t_r/2}S_0(\omega')d\omega'\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\mathrm{d}T' \quad , \qquad (2.37)$$

где Δx и Δy – протяженность на входной поверхности формирующей оптики для пространственных координат x и y, соответственно, ΔT диапазон изменения температуры окружающей среды T, влияющей на оптическое волокно, $\Delta\omega$ и ω_0 – ширина и средняя частота полосы анализируемых оптических частот соответственно.

Измерение энергетического спектра $\bar{G}(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')$ представляет собой операцию вычисления функции $|S_a(\omega_k,t,x,y,T)|^2$ с последующим ее временным усреднением на интервале $[-t_R,\ t_R]$, t_R – время обработки реализации случайного процесса (время интегрирования), т.е.:

$$\bar{G}_a(\omega,x,y,T)=\int\limits_{-t_R}^{t_R}S_a(\omega,t,x,y,T)S_a^*(\omega,t,x,y,T)dt. \qquad (2.38)$$

Как показано в работах [107, 116], соотношение (2.38) приводится к форме:

$$\bar{G}_a(\omega,x,y,T)=C_R\int\limits_{\omega_0-\Delta\omega_0}^{\omega_0+\Delta\omega_0}\int\limits_{x-\Delta x}^{x+\Delta x}\int\limits_{y+\Delta y}^{y_0+\Delta y}\int\limits_{T+\Delta T}^{T+\Delta T}\left|A_{\Phi O}(x,x',y,y')\right|^2\left|A_{BOC}(T,T',\omega,\omega')\right|\cdot$$

$$\cdot\frac{\sin^2[(\omega-\omega')t_r/2]}{[(\omega-\omega')t_r/2]^2}G_0(\omega')d\omega'\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\mathrm{d}T'= \qquad , \qquad (2.39)$$

$$=C_R\int\limits_{\omega_0-\Delta\omega_0}^{\omega_0+\Delta\omega_0}\int\limits_{x-\Delta x}^{x+\Delta x}\int\limits_{y+\Delta y}^{y_0+\Delta y}\int\limits_{T+\Delta T}^{T+\Delta T}W(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')G_0(\omega')d\omega'\mathrm{d}x'\mathrm{d}y'\mathrm{d}T'$$

где $G_0(\omega)=\left|S_0(\omega)\right|^2$ - энергетический спектр анализируемого сигнала за время усреднения t_R, - т.е. выборочный энергетический спектр; C_R – постоянная величина.

Выражение (2.39) представляет оценку энергетического спектра оптического излучения, полученную ДСП оптического диапазона.

Для третьего способа получения (методом узкополосной фильтрации) оценки энергетического спектра реализации стационарного случайного процесса функциональную схему устройства можно представить схемой, приведенной на рисунке 2.5 [150, 153].

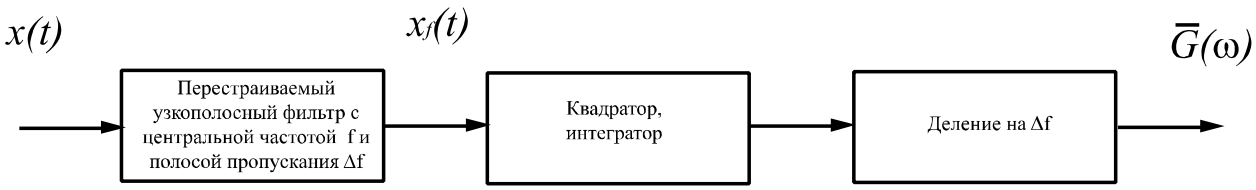


Рисунок 2.5 – Функциональная схема устройства получения оценки энергетического спектра

Реализация *x(t)* случайного стационарного процесса с нулевым математическим ожиданием поступает на вход перестраиваемого узкополосного фильтра с постоянной полосой пропускания *Δf* отличной от нуля и с центральной частотой *f*, которая меняется в заданном диапазоне анализируемых частот. После узкополосной фильтрации реализация $x_f(t)$

подвергается квадратичному детектированию и интегрированию. При этом усреднение выполняется на отрезке t_R, равном длительности обработки реализации.

Стоит отметить, что при фильтрации выполняется усреднение в пределах некоторой полосы частот, что позволяет получить состоятельную оценку энергетического спектра $\bar{G}(\omega)$. Поэтому для получения окончательной оценки $\bar{G}(\omega)$ необходимо усредненную величину $x^2(t)$, содержащую в себе составляющие в полосе частот $[f-0,5\Delta f; f+0,5\Delta f]$, разделить на ширину полосы Δf.

Способ получения оценки энергетического спектра методом узкополосной фильтрации характерен для многоканального оптического спектрометра, состоящего из набора БУФ, в котором установлен настроенный на определенную частоту узкополосный оптический фильтр, что эквивалентно перестраиваемому фильтру.

Тогда оценку энергетического спектра оптического излучения, получаемую МОС, можно определить следующим выражением:

$$\begin{bmatrix} \bar{G}_{a1}(\omega_1,x,y,T) \\ \bar{G}_{a2}(\omega_2,x,y,T) \\ \vdots \\ \bar{G}_{ak}(\omega_k,x,y,T) \\ \vdots \\ \bar{G}_{an}(\omega_n,x,y,T) \end{bmatrix} = \int\limits_{\Omega}\int\limits_{X}\int\limits_{Y}\int\limits_{T} \begin{bmatrix} W_{11}(\cdot) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_{22}(\cdot) & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_{kk}(\cdot) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & W_{nn}(\cdot) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G(\omega') \\ G(\omega') \\ \vdots \\ G(\omega') \\ \vdots \\ G(\omega') \end{bmatrix} d\omega' \mathrm{d}x' \mathrm{d}y' \mathrm{d}T' , \quad (2.40)$$

где $||\bar{G}_{ak}(\omega_k,x,y,T)||$ – матрица-столбец, описывающая отсчетные значения оценки энергетического спектра анализируемого излучения; $||G(\omega')||$ - матрица-столбец, описывающая энергетический спектр анализируемого 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 «парциальная» АФ для k-го канала МОС.

Соотношения (2.39) и (2.40) представляют собой математические модели ДСП и МОС для энергетических спектров анализируемого ОИ и отражают результат его однократного анализа на промежутке t, после чего результаты сбрасываются, и начинается следующий цикл измерения.

Применение такого подхода к математическому описанию процесса анализа спектра оптических сигналов и разработанные на его основе математические модели спектральных приборов позволяют выполнить последовательный анализ прохождения анализируемого сигнала через все функциональные узлы прибора от входа спектрального прибора до результата регистрации спектра, учитывая их влияние на результат спектроскопического измерения.

Полученное математическое описание оптического спектрального прибора как информационной измерительной системы послужило основой при разработке универсального спектроскопического метода контроля.

2.4 Выводы по главе 2

1. В рамках предложенного подхода к описанию оптического излучения, испускаемого очагом горения, с позиции теории случайных процессов и полей, спектральные линии, измерение интенсивности которых представляет особый интерес при контроле процессов горения, описываются как узкополосные стационарные случайные процессы. При этом в качестве адекватной модели анализируемого ОС, несущего спектроскопическую информацию о состоянии контролируемого процесса горения, был принят гармонизуемый случайный процесс.

2. Математическое описание спектрального прибора как ИИС было предложено выполнять в два этапа: сначала описывается линейная подсистема спектрального прибора, вычисляющая комплексный спектр анализируемого сигнала, затем описывается процесс получения энергетического спектра как результат дальнейшей обработки комплексного

спектра детектирующей системой спектрального прибора. Применение такого подхода позволяет выполнить последовательный анализ прохождения анализируемого ОС через все функциональные узлы спектрального прибора от его входа до результата регистрации спектра.

3. Показано, что полная аппаратная функция спектрального прибора может быть представлена совокупностью аппаратных функций отдельных функциональных узлов прибора. Это позволяет отдельно учитывать влияние конструктивных особенностей спектрального прибора и внешних условий на его аппаратную функцию, а, следовательно, и на результат спектрального анализа.

4. Разработаны математические модели дифракционного спектрального прибора и многоканального оптического спектрометра, позволяющие определить связь вход-выход СП для комплексных и энергетических спектров анализируемого оптического излучения.

5. Были получены соотношения, определяющие оценку энергетического спектра анализируемого оптического излучения для дифракционного спектрального прибора и многоканального оптического спектрометра. Полученная оценка энергетического спектра является результатом спектрального анализа, и на ее основе должно приниматься решение о результате проводимого контроля процесса горения.

6. Полученное математическое описание оптического спектрального прибора как информационной измерительной системы послужило основой при разработке универсального спектроскопического метода контроля.

7. Основные результаты данной главы опубликованы в работах [79, 81, 84, 105, 107, 108, 112 - 118, 130, 134, 145].

3 Спектроскопический метод контроля процессов горения

3.1 Постановка задачи разработки универсального спектроскопического метода контроля процессов горения

Контроль — процесс определения соответствия между состоянием объекта/процесса контроля и заданной нормой, определяющей качественно различные области его состояния. В результате контроля выдается суждение о состоянии контролируемого объекта/процесса [163, 164].

Задачу контроля процессов горения в рамках данной работы предлагается решать методами оптической спектроскопии, применение которых позволяет повысить достоверность проводимого контроля за счет того, что в отличии от традиционных методов они выполняет контроль на основе измерения первичного параметра, характеризующего состояние процесса, – спектральной характеристики излучения, испускаемого непосредственно очагом горения. Кроме того, применение методов спектроскопии позволяет проводить контроль по нескольким или множеству заранее определенных спектроскопических информационных параметров, характеризующих контролируемый процесс горения, – интенсивностям отдельно стоящих спектральных линий и/или спектральных участков (интервалов). В качестве дополнительного параметра может быть использована температура, также определяемая спектральным методом.

Под процедурой контроля понимается не только измерение контролируемого параметра, но и обработка результатов измерений, правильная их интерпретация, разработка методики контроля, а также выбор применяемого метода и прибора контроля. Поэтому применяемый метод спектроскопического контроля должен обладать свойством универсальности, позволяющим рассматривать задачу контроля процессов горения как с теоретической, так и с прикладной точки зрения в комплексе для любых методов оптической спектроскопии. Это представляется возможным при условии того, что в рамках такого метода процедура контроля,

контролируемые параметры и применяемые технические средства могут быть описаны на базе единого математического аппарата, а разработанная на его основе методика подготовки и проведения контроля позволит выбирать применяемые метод спектроскопии и прибор, обеспечивающие требуемую достоверность проводимого контроля в рамках конкретной прикладной задач и для любого метода спектроскопии.

Исходя из вышесказанного, задачу контроля процессов горения в рамках данной работы предлагается решать разработанным универсальным спектроскопическим методом контроля, который основывается на регистрации, анализе и сопоставлении множества спектроскопических информационных параметров, полученных как при раздельном, так и при комбинированном применении различных методов оптической спектроскопии, и отличающийся тем, что описывает процедуру контроля, технические средства и спектроскопические параметры в рамках единого математического аппарата. Данный метод 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 требуемую достоверность, а также разработать методику подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения.

При разработке универсального спектроскопического метода контроля вопрос теоретического описания самой процедуры контроля процессов горения, предлагается рассматривать в рамках теории вероятностей и математической статистики, широко применяемых для описания процедуры допускового контроля в метрологии и области управления качеством продукции [163, 164, 173]. Необходимость использования вероятностно-статистических методов обусловлена сущностью контролируемых процессов горения и применяемых для контроля спектральных приборов. Измеряемые оптические сигналы являются случайными процессами (подход к описанию оптического излучения в рамках теории случайных процессов и полей был

рассмотрен во второй главе данной работы), а погрешности измерения случайным образом изменяются от измерения к измерению, следствием чего является наличие случайных ОК. В силу этого аппарат теории вероятностей оказывается наиболее адекватным сути задач контроля процессов горения.

Для систем контроля достоверность принимаемых решений характеризуется вероятностями ошибок контроля, которые бывают 1-го и 2-го рода [164]. Поскольку спектральный прибор, являющийся прибором контроля, представляет собой информационную измерительную систему, что было рассмотрено во второй главе, свойство такой системы может быть охарактеризовано количеством выдаваемой информации [174]. А основным показателем качества информационной измерительной системы как средства измерения, отражающим ее назначение и специфику конкретного применения, является показатель достоверности выдаваемой информации [163]. Для измерительных систем показателем достоверности, как и для всех средств измерений, является погрешность измерений.

Поэтому в рамках разработанного универсального спектроскопического метода контроля должна быть математически обоснована связь вероятностей ошибок контроля, характеризующих его достоверность, с погрешностями спектральных измерений и определен критерий, по которому можно сравнить результативность спектральных приборов контроля. Под результативностью спектрального прибора понимается то, что применяемый прибор должен обладать такими минимально допустимыми характеристиками, при которых обеспечивается требуемая достоверность проводимого контроля. А критерием, определяющим результативность, может служить количество спектроскопической информации, регистрируемое прибором. Это в конечном счете позволит выбрать спектральный прибор для решения конкретной практической задачи контроля процессов горения.

Существование такого метода приобретает особую практическую значимость для экспериментатора не только при выборе применяемых

метода спектроскопии и прибора для решения определенной практической задачи контроля, но и при интерпретации полученных результатов на конкретном спектральном приборе контроля и разработке методики подготовки и проведения спектроскопического контроля.

3.2 Процедура контроля процессов горения и вероятности ошибок контроля

3.2.1 Контроль как частный случай решения задачи проверки гипотезы

При контроле процессов горения методами оптической спектроскопии контролируемыми СИП являются интенсивности и расположение на оси длин волн заранее определенных спектральных линий и спектральных участков, которые характеризуют состояние этих процессов.

В таком случае решение задачи контроля процессов горения сводится к удовлетворению следующих условий [106]:

1. Контролируемый процесс горения протекает в штатном режиме при условии, что СИП φ находится в двусторонних пределах:

$$\Phi_H \le \varphi \le \Phi_B, \qquad (3.1)$$

где φ – истинное значение спектроскопического контролируемого параметра, например, интенсивность спектральной линии или спектрального участка, $\Phi_н$ и $\Phi_в$ – допускаемые нижнее и верхнее значения контролируемого параметра.

2. Контролируемый процесс горения протекает в штатном режиме при условии, что СИП φ удовлетворяет одностороннему условию:

$$\Phi_H \le \varphi \quad \text{или} \quad \varphi \le \Phi_B. \qquad (3.2)$$

Как было показано во второй главе, результатом спектрального анализа является не истинное значение энергетического спектра анализируемого

излучения, а его оценка. Поэтому с допускаемыми значениями $\Phi_н$ и $\Phi_в$ сравнивается не истинное значение φ контролируемого СИП (поскольку оно неизвестно), а его оценка $\hat{\varphi}$, полученная на выходе спектрального прибора контроля в результате измерения. Отличие значения $\hat{\varphi}$ от φ определяется погрешностью измерения. Исходя из этого, контролируемый параметр в уравнениях (3.1) и (3.2) должен быть представлен как:

$$\hat{\varphi} = \varphi + \Delta, \tag{3.3}$$

где $\hat{\varphi}$ - оценка истинного значения СИП φ, полученная в результате измерения, Δ – погрешность измерения, в основном определяемая погрешностью спектрального прибора контроля и случайными ошибками, φ и Δ являются случайными величинами.

Тогда уравнения (3.1) и (3.2) должны быть представлены к следующему виду:

$$\Phi_H \le \hat{\varphi} \le \Phi_B \tag{3.4}$$

и

$$\Phi_H \le \hat{\varphi} \quad \text{или} \quad \hat{\varphi} \le \Phi_B. \tag{3.5}$$

Таким образом, процесс контроля основан на решении задачи проверки гипотезы, где по результатам спектрального измерения необходимо принять решение об истинности или ложности некоторой гипотезы [150, 153, 164, 175]. При этом проверяемой гипотезой является предположение о том, что контролируемые СИП удовлетворяют условию (3.4) или (3.5), а результат измерения представляет собой единственное число, если контроль

проводится по одному параметру, или множество чисел, если контроль проводится по множеству параметров.

В таком случае решение задачи контроля будет основываться на разработке оптимального (наилучшего) правила принятия решения о выборе между двумя гипотезами: $\varphi \in [\Phi_H; \Phi_B]$ или $\varphi \notin [\Phi_H; \Phi_B]$, при условии, что результатом измерения спектрального прибора является оценка $\hat{\varphi}$ истинного значения спектроскопического параметра φ, полученная в результате измерения с некоторой погрешностью, в основном определяющейся аппаратной функцией спектрального прибора.

Поскольку измеряемые параметры и погрешности измерений имеют случайный характер, принятие решений может сопровождаться ошибками. Тогда итогом решения может быть только один из следующих четырех возможных результатов контроля [106]:

А. Принято решение «штатное протекание процесса горения», когда значение контролируемого параметра находится в допускаемых пределах, т.е. имели место события $\Phi_H < \varphi < \Phi_B$ и $\Phi_H < \hat{\varphi} < \Phi_B$.

Б. Принято решение «нештатное протекание процесса горения», когда значение контролируемого параметра находится в допускаемых пределах, т.е. имели место события $\hat{\varphi} < \Phi_H$ или $\Phi_B < \hat{\varphi}$ и $\Phi_H < \varphi < \Phi_B$.

В. Принято решение «штатное протекание процесса горения», когда значение параметра находится вне допускаемых пределах, т.е. имели место события $\varphi < \Phi_H$ или $\Phi_B < \varphi$ и $\Phi_H < \hat{\varphi} < \Phi_B$.

Г. Принято решение «нештатное протекание процесса горения», когда значение контролируемого параметра находится вне допускаемых пределах, т.е. имели место события $\varphi < \Phi_H$ или $\Phi_B < \varphi$ и $\hat{\varphi} < \Phi_H$ или $\Phi_B < \hat{\varphi}$.

Результаты контроля А и Г соответствуют правильным решениям контроля, а результаты Б и В являются специфическими ошибками [153, 175] контроля, характеризующими достоверность контроля [173]:

- ошибка первого рода (ложная тревога) α – ошибочное отклонение правильного результата контроля;

- ошибка второго рода (пропуск перехода) β – ошибочное признание неправильного результата контроля.

Вероятность результата контроля Б, т.е. возникновения ошибки первого рода α, в математической статистике называют уровнем значимости критерия, а вероятность результата контроля Г (1-β) – мощностью критерия, где β – вероятность возникновения ошибки второго рода, т.е. вероятность результата контроля В [153, 175].

Очевидно, что появление ОК обусловлено погрешностью применяемых для контроля приборов и случайными ошибками измерений.

Отсюда следует, что достоверность результатов контроля определяется погрешностями измерений и характеризуется вероятностями ошибок контроля. Ошибки контроля являются также случайными событиями.

В таком случае при организации процедуры контроля в целом [164] и на базе методов оптической спектроскопии в частности для оценки достоверности контроля особый интерес представляют вероятности ошибок 1-го и 2-го рода.

3.2.2 Вероятности ошибок в случае двустороннего контроля

Для случая двустороннего контроля, соответствующему соотношению (3.4), вероятность ошибки первого рода можно определить, как [173]:

$$\alpha = P\left(\hat{\varphi} \notin [\Phi_H;\Phi_B] \middle| \varphi \in [\Phi_H;\Phi_B]\right) = 1 - P\left(\hat{\varphi} \in [\Phi_H;\Phi_B] \middle| \varphi \in [\Phi_H;\Phi_B]\right). \quad (3.6)$$

Тогда, в соответствии с формулой для условной вероятности:

$$P\left[\Phi_H \le \hat{\varphi} \le \Phi_B \middle| \Phi_H \le \varphi \le \Phi_B\right] = \frac{P\left[\Phi_H \le \hat{\varphi} \le \Phi_B; \Phi_H \le \varphi \le \Phi_B\right]}{P\left[\Phi_H \le \varphi \le \Phi_B\right]} =$$

$$= \frac{\int_{\Phi_H}^{\Phi_B}\int_{\Phi_H}^{\Phi_B} p_{\hat{\varphi}\varphi}(\hat{\varphi};\varphi)d\hat{\varphi}d\varphi}{\int_{\Phi_H}^{\Phi_B} p_{\varphi}(\varphi)d\varphi}, \qquad (3.7)$$

где $p_{\varphi}(\varphi)$ – безусловная плотность распределения контролируемого спектроскопического параметра φ; $p_{\hat{\varphi}\varphi}(\hat{\varphi};\varphi)$ – совместная плотность вероятности значения оценки спектроскопического параметра $\hat{\varphi}$ и истинного значения φ, определяемая как:

$$p_{\hat{\varphi}\varphi}(\hat{\varphi};\varphi) = p_{\varphi}(\varphi)\, p_{\Delta}(\hat{\varphi}-\varphi), \qquad (3.8)$$

где $p_{\Delta}(\hat{\varphi}-\varphi)$ – плотность вероятности погрешности измерения.

Тогда вероятность ошибки 1-го рода:

$$\alpha = 1 - \frac{\int_{\Phi_H}^{\Phi_B}\int_{\Phi_H}^{\Phi_B} p_{\varphi}(\varphi)\, p_{\Delta}(\hat{\varphi}-\varphi)d\hat{\varphi}d\varphi}{\int_{\Phi_H}^{\Phi_B} p_{\varphi}(\varphi)d\varphi}. \qquad (3.9)$$

Аналогичным образом определяем вероятность ошибки 2-го рода:

$$\beta = 1 - \frac{\int_{\Phi_H}^{\Phi_B}\int_{\Phi_H}^{\Phi_B} p_{\varphi}(\varphi)\, p_{\Delta}(\hat{\varphi}-\varphi)d\hat{\varphi}d\varphi}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{\Phi_H}^{\Phi_B} p_{\varphi}(\varphi)\, p_{\Delta}(\hat{\varphi}-\varphi)d\hat{\varphi}d\varphi}. \qquad (3.10)$$

Из полученных выражений следует, что ошибки 1-го и 2-го рода зависят от распределений контролируемого спектроскопического параметра и погрешности измерения, т.е. от точности измерения.

Поскольку при спектральном анализе измеряемые параметры являются случайными величинами, находящимися в случайном процессе, распределение таких величин описывается нормальным законом [160]:

$$p_{\varphi}(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(\varphi-\mu_{\varphi})^2}{2\sigma^2}}, \qquad (3.11)$$

где σ - среднеквадратическое отклонение величины φ; μ_{φ} – математическое ожидание.

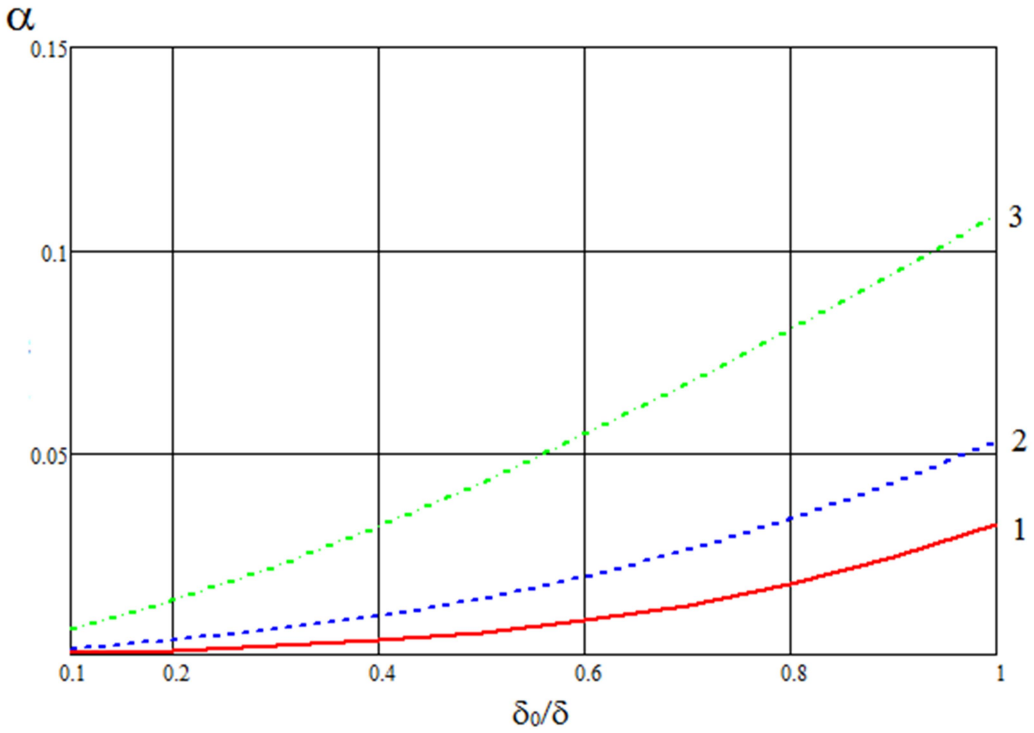
В большинстве случаев распределение погрешности измерения также наиболее часто предполагается нормальным с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением σ_0:

$$p_{\Delta}(\bar{\varphi}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \cdot e^{-\frac{\bar{\varphi}^2}{2\sigma_0^2}}. \qquad (3.12)$$

Для установления зависимости вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода от погрешностей измерений было выполнено компьютерное моделирование для нормальных распределений погрешности измерений и контролируемого параметра.

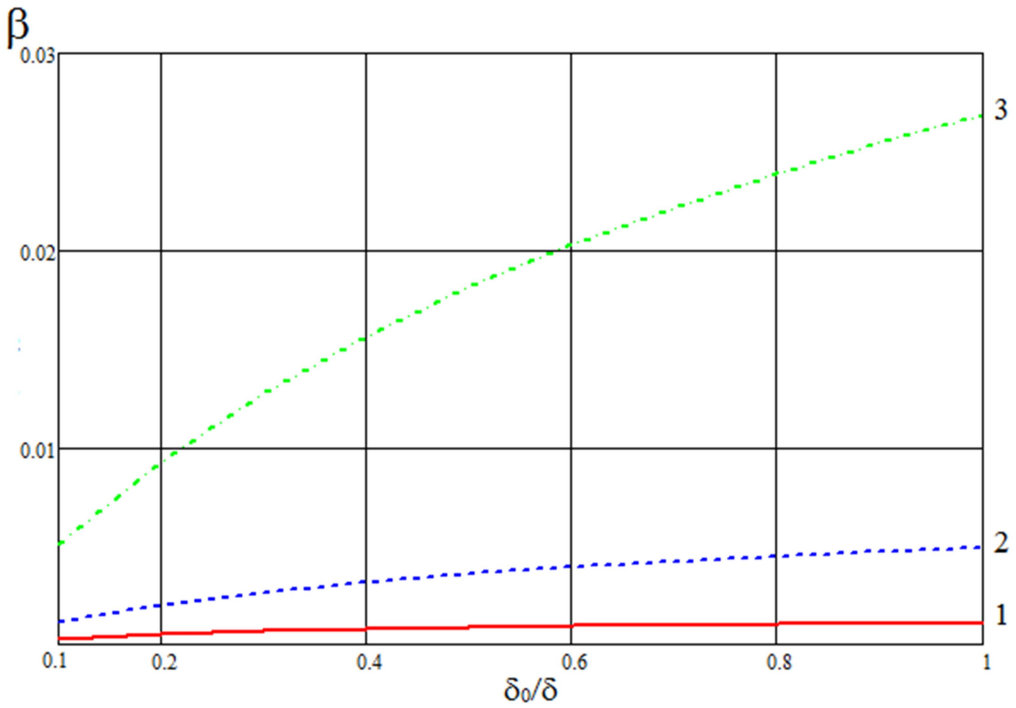
Результаты моделирования приведены на рисунках 3.1 и 3.2 соответственно при трех различных значениях математического ожидания μ_{φ}: $\frac{|\mu_{\varphi}|}{\delta}=0$, $\frac{|\mu_{\varphi}|}{\delta}=0{,}5$, $\frac{|\mu_{\varphi}|}{\delta}=0{,}25$, где δ - половина интервала допускаемых значений, $\delta = |\Phi_н| = |\Phi_в|$.

Аргументом кривых является соотношение δ_0/δ, где $\delta_0=3\sigma_0$ - погрешность измерения.



1 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}$=0; 2 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}$=0,5; 3 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}$=0,25.

Рисунок 3.1 – Вероятность ошибки 1-го рода



1 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}$=0; 2 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}$=0,5; 3 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}$=0,25.

Рисунок 3.2 – Вероятность ошибки 2-го рода

Из графиков видно, что с увеличением погрешности измерения δ_0, среднеквадратического отклонения σ величины φ, а также ее математического ожидания μ_φ, вероятность возникновения ошибок как 1-го, так и 2-го рода возрастает. При этом вероятность ошибки 2-го рода оказывается меньше вероятности возникновения ошибок 1-го рода, причем с увеличением погрешности измерения вероятность возникновения ошибок 1-го рода растет быстрее, чем 2-го.

3.2.3 Вероятности ошибок в случае одностороннего контроля

Для получения соотношений, определяющих вероятности ошибок 1-го и 2-го рода для случая одностороннего контроля, соответствующему соотношению (3.5), необходимо выполнить те же математические выкладки, что и в случае соотношений (3.9) и (3.10), только при применении других пределов интегрирования.

Тогда вероятность ошибки 1-го рода можно определить, как [173]:

$$\alpha = P\left[\Phi_H < \hat{\varphi} \middle| \varphi \le \Phi_H\right] = 1 - \frac{\int_0^{\Phi_H}\int_{-\infty}^{\Phi_H} p_\varphi(\varphi)\, p_\Delta(\hat{\varphi}-\varphi)\, d\hat{\varphi}\, d\varphi}{\int_0^{\Phi_H} p_\varphi(\varphi)\, d\varphi}. \qquad (3.13)$$

А вероятность ошибки 2-го рода:

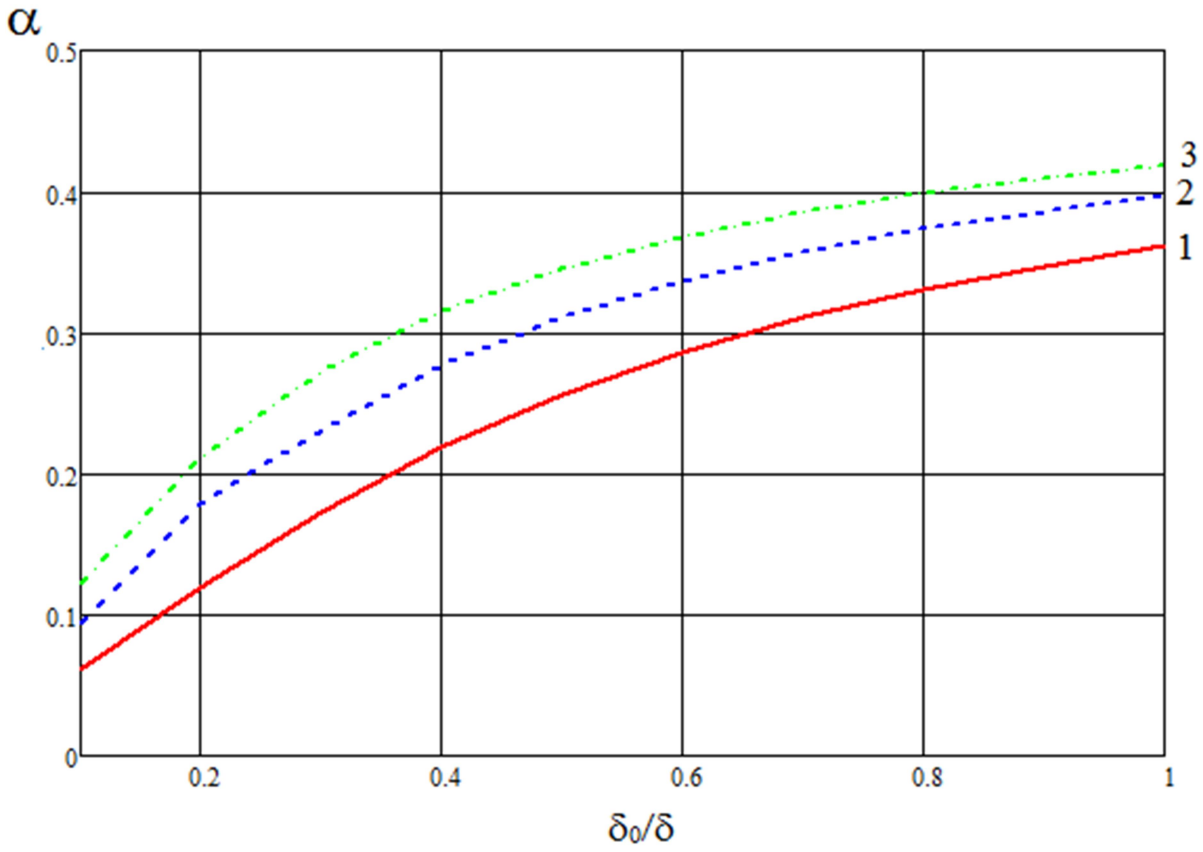
$$\beta = P\left[\Phi_H < \varphi \middle| \hat{\varphi} \le \Phi_H\right] = 1 - \frac{\int_0^{\Phi_H}\int_{-\infty}^{\Phi_H} p_\varphi(\varphi)\, p_\Delta(\hat{\varphi}-\varphi)\, d\hat{\varphi}\, d\varphi}{\int_0^{\infty}\int_{-\infty}^{\Phi_H} p_\varphi(\varphi)\, p_\Delta(\hat{\varphi}-\varphi)\, d\hat{\varphi}\, d\varphi}. \qquad (3.14)$$

Для случая ограничения сверху $\hat{\varphi} \le \Phi_B$ будут аналогичные соотношения только с другими интервалами интегрирования.

Из полученных выражений так же, как и в случае двустороннего контроля, следует, что ошибки 1-го и 2-го родов зависят от распределений контролируемого спектроскопического параметра и погрешности измерения.

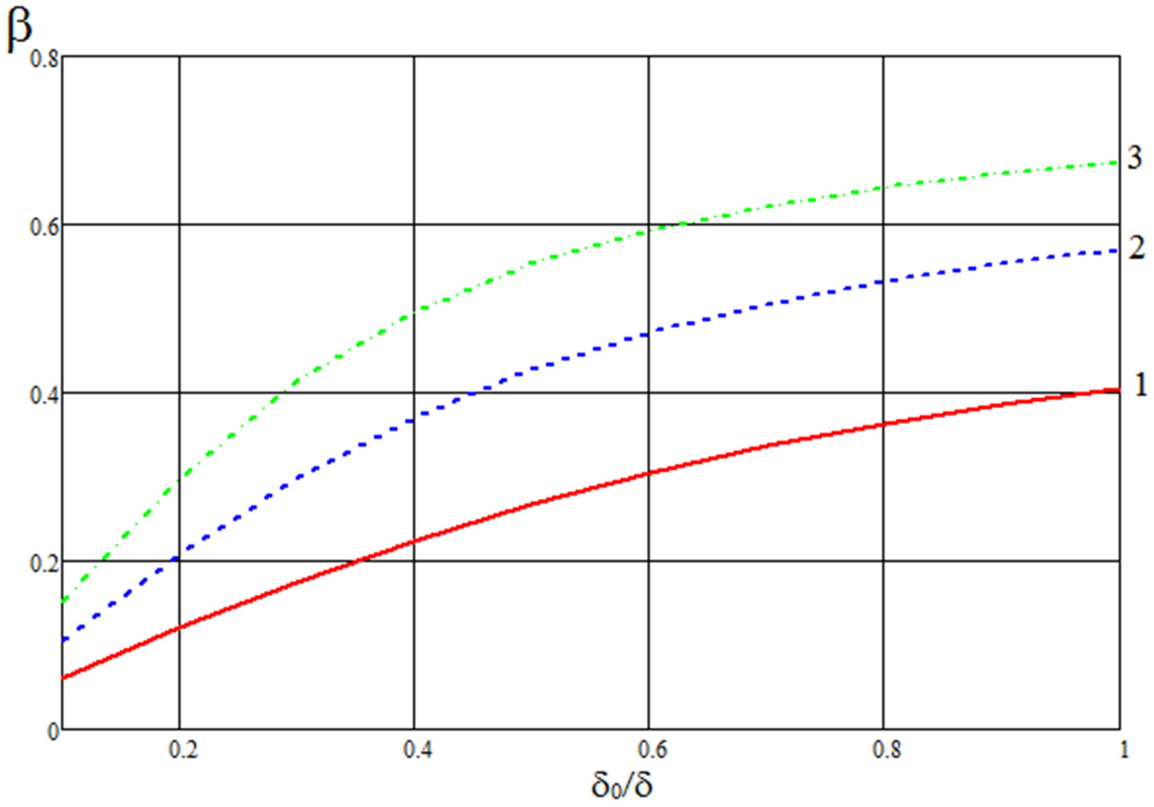
Результаты компьютерного моделирования ошибок 1-го и 2-го рода для нормальных распределений погрешности измерений и контролируемого параметра приведены на рисунках 3.3 и 3.4 соответственно при трех различных значениях математического ожидания μ_φ: $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}=0$, $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}=0{,}5$, $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}=0{,}25$, где δ - половина интервала допускаемых значений, $\delta = \Phi_н$.

Аргументом кривых является соотношение δ_0/δ, где $\delta_0=3\sigma_0$ - погрешность измерения.



1 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}=0$; 2 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}=0{,}5$; 3 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}=0{,}25$.

Рисунок 3.3 – Вероятность ошибки 1-го рода



1 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}$=0; 2 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}$=0,5; 3 - $\frac{|\mu_\varphi|}{\delta}$=0,25.

Рисунок 3.4 – Вероятность ошибки 2-го рода

Из графиков видно, что, как и в случае с двусторонним контролем, с увеличением погрешности измерения δ_0 вероятность возникновения ошибок как 1-го, так и 2-го рода возрастает. Однако, при одностороннем контроле вероятность ошибки 2-го рода оказывается больше вероятности возникновения ошибок 1-го рода.

При выполнении контроля процессов горения на теплоэнергетических объектах возникновение ошибок контроля может привести к неверному определению химического недожога или пережога, что повлечет за собой чрезмерное вмешательство в протекающий ПГ, и, как следствие, приведет к снижению КПД теплоэнергетической установки или дополнительному расходу топливных ресурсов и увеличению выбросов вредных выбросов в атмосферу.

На основе полученных результатов можно осуществить выбор спектральных приборов контроля, погрешности измерений которых обеспечили бы допускаемые значения вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода спектроскопического контроля при заданных верхнем и нижнем значениях контролируемого спектроскопического параметра.

Следовательно, для рационального выбора технических характеристик СПК в каждом конкретном случае должны быть заданы допускаемые значения вероятностей ошибок α и β, при этом их предельно допускаемые значения задаются с учетом приносимого ими ущерба при выполнении контроля. Проведение анализа ущерба при возникновении ошибок спектроскопического контроля в каждом конкретном случае позволяет экономически обосновать необходимую точность средств контроля, сопоставив затраты по обеспечению определенной точности измерения и ущерб из-за выхода контролируемого параметра за заданные пределы.

3.2.4 Критерии оптимального правила принятия решений

Поскольку достоверность контроля характеризуется двумя показателями, это не позволяет однозначно решить задачу о разработке оптимального (наилучшего) правила принятия решения, поэтому при проверке гипотез применяют различные критерии качества, например, критерий Байеса, критерий Неймана-Пирсона, критерий минимакса и т.п. [153, 175].

Выбор критерия качества зависит от двух факторов:

1) одинаковы или различны по значимости ОК 1-го и 2-го рода;

2) наличие априорных данных.

Согласно критерию Байеса (критерию среднего риска) оптимальное правило принятия решения должно быть таким, при котором средние потери в результате ошибок контроля должны быть минимальны, т.е. данный критерий должен обеспечивать минимальное значение среднего риска. В

этом случае вероятности ошибок контроля 1-го и 2-го родов имеют одинаковую значимость, и заранее должны быть известны все априорные данные – функции потерь, априорные распределения параметров, априорные вероятности событий (гипотез) и т.п. [153, 175].

При применении критерия минимакса принятие решения является оптимальным, если при его использовании минимизируется максимальный из условных рисков. Принятие решения по критерию минимакса совпадает с Байесовским для наименее благоприятного априорного распределения гипотез [175].

В случае, когда известны не все априорные данные, а также не удается задать значения функций потерь или вероятности ошибок контроля имеют разную значимость, для формирования оптимального правила принятия решений применяют критерий Неймана-Пирсона.

Данный критерий при ограниченности вероятности ошибки одного вида, например α, обеспечивает минимум вероятности ошибки другого рода, т.е. вероятности ошибки β [150, 153, 173, 175]:

$$\alpha \le \alpha_{доп} = const$$

и (3.15)

$$\beta = \min$$

При построении оптимального правила принятия решения по критерию Неймана-Пирсона объем априорной информации существенно меньше, чем при использовании критериев Байеса или минимакса [153, 175].

Применение методов оптической спектроскопии к задачам контроля процессов горения подразумевает контроль по нескольким или множеству заранее определенным спектроскопическим информационным параметрам (формируемых в различных участках анализируемого спектра), к которым

можно отнести интенсивности отдельно стоящих спектральных линий и/или спектральных интервалов, а также по их совокупности и взаимной связи. Также в качестве еще одного параметра может быть использована температура, определяемая спектральным методом. Особенности контроля по множеству параметров накладывают определенные требования на выбор применяемых критериев при разработке правила принятия решения, что будет рассмотрено в пп. 3.6 и 3.7 данной главы.

3.3 Погрешности спектральных измерений при контроле

При решении задач контроля, в том числе процессов горения, важнейшей проблемой является выбор оптимальной точности измерения [176] и определение допустимой погрешности. Точность измерения характеризует степень приближения результатов измерения к некоторому действительному значению и используется для качественного сравнения измерительных операций [176]. Понятие «погрешность» или «ошибка измерений» используется для количественной оценки.

Увеличение допускаемых погрешностей измерения позволяет применять прибор контроля с заниженными техническими характеристиками, при этом увеличиваются вероятности ошибок контроля, что в конечном итоге может привести к чрезмерным потерям от проводимого контроля. Занижение допускаемых погрешностей измерений, требует применения приборов с высокими техническими характеристиками, при этом вероятность ошибок контроля уменьшается, но повышается стоимость контрольно-измерительной аппаратуры. Отсюда вытекает необходимость правильного выбора спектрального прибора контроля для результативного решения конкретной задачи контроля, при котором будет обеспечиваться требуемая достоверность [164].

В зависимости от характера рассматриваемых вопросов в метрологии используются различные методы классификации погрешностей. Помимо

разделения погрешностей на методические и инструментальные, можно выделить следующие основные виды погрешностей: систематические, случайные, грубые; статические и динамические; абсолютные и относительные; погрешности отсчета, интерполяции и т.п. [177].

В данной работе классификация погрешностей спектральных измерений базируется на оценке искажений, вносимых спектральными приборами, которые по происхождению и характеру проявления можно разделить на систематические и случайные.

Систематические ошибки определяются различными причинами: дифракцией на диафрагмах оптической системы спектрального прибора, ее аберрациями, конечностью ширин щелей, инерционностью фотоприемного устройства и т.п. [98]. Эти ошибки характеризуются аппаратной функцией прибора, которая, как было показано во второй главе, является его исчерпывающей характеристикой и содержит в себе информацию о систематических погрешностях, присущих данному прибору.

Случайные ошибки связаны с изменением параметров спектрального прибора во время анализа, флуктуационными явлениями в фотоприемнике и т.п. Также на случайные ошибки могут оказывать влияние внешние факторы, в том числе изменения яркости источника оптического излучения и флуктуации светового потока, а также условия проведения эксперимента [98].

Несмотря на то, что случайные и систематические погрешности имеют различную природу происхождения, возможности спектрального прибора контроля ограничиваются влиянием обоих типов погрешностей, и при рассмотрении технических характеристик СПК, таких как разрешение, точность измерения и т.п., - необходимо принимать во внимание их совместное влияние на прибор [98] .

В данной работе описание погрешностей спектрального прибора выполняется на базе уравнений (2.25) и (2.35), устанавливающих связь вход-выход спектрального прибора.

При количественном описании погрешностей (ошибок) измерения обычно используют среднеарифметическую или среднеквадратическую ошибки, а в ряде случаев требуются более детальные характеристики – корреляционная функция или спектральная плотность ошибки [178].

Введем понятие ошибки регистрации спектра по аналогии с ошибкой воспроизведения при описании прохождения случайного процесса через динамическую систему в [178]:

$$\varepsilon(t) = f_{И}(t) - f(t), \tag{3.16}$$

где $f_{И}(t)$ –сигнал на выходе идеального спектрального прибора контроля (без погрешностей) при воздействии на его вход реализации стационарного случайного процесса из соотношения (2.14) $x(t)$.

Если выходные сигналы $f_{И}(t)$ и $f(t)$ являются случайными функциями, то ошибка регистрации спектра при контроле также является случайной функцией. Поэтому в этих условиях речь может идти об определении не мгновенных, а лишь некоторых средних значений этой величины. Таким средним значением обычно служит среднеквадратическое значение ошибки $\overline{\varepsilon}^2$, которым пользуются как критерием, определяющим точность измерения прибором при воздействии на него стационарных случайных процессов [178].

Если ошибка регистрации спектра $\varepsilon(t)$ является стационарной случайной функцией, то среднеквадратическая ошибка может быть определена как [178]:

$$\overline{\varepsilon}^2 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} G_{\varepsilon}(\omega)\, d\omega, \tag{3.17}$$

где $G_{\varepsilon}(\omega)$ – спектральная плотность ошибки.

На самом деле при воздействии на произвольный спектральный прибор контроля реализации стационарного случайного процесса *x(t)* на прибор действует не первоначальный сигнал, описывающий истинное распределение по спектру исследуемого процесса, а предварительно искаженный (зашумленный) вариант *u(t)*, т.е. некоторый случайный процесс, как-то связанный с *x(t)*. При этом:

$$u(t) = x(t) + m(t), \tag{3.18}$$

где *m(t)* – случайное искажение полезного сигнала, обусловленное флуктуационными процессами в оптическом источнике, низкочастотными колебаниями интенсивности и т.п.

Получателю спектроскопической информации о контролируемом процессе с выхода СПК поступает также не само измеренное распределение, а некий искаженный сигнал *f(t)*, который определяется как:

$$f(t) = v(t) + n(t), \tag{3.19}$$

где *v(t)* – сигнал на выходе спектрального прибора контроля, *n(t)* - случайная ошибка.

Таким образом, выходной сигнал *f(t)* всегда отягощен случайной ошибкой *n(t)*, вносимой, в том числе регистрирующей частью прибора.

Тогда процесс измерения спектра можно представить функциональной схемой, показанной на рисунке 3.5, где *W(ω)* является энергетической аппаратной функцией спектрального прибора, т.е. его исчерпывающей характеристикой (см. уравнения (2.25) и (2.35)).

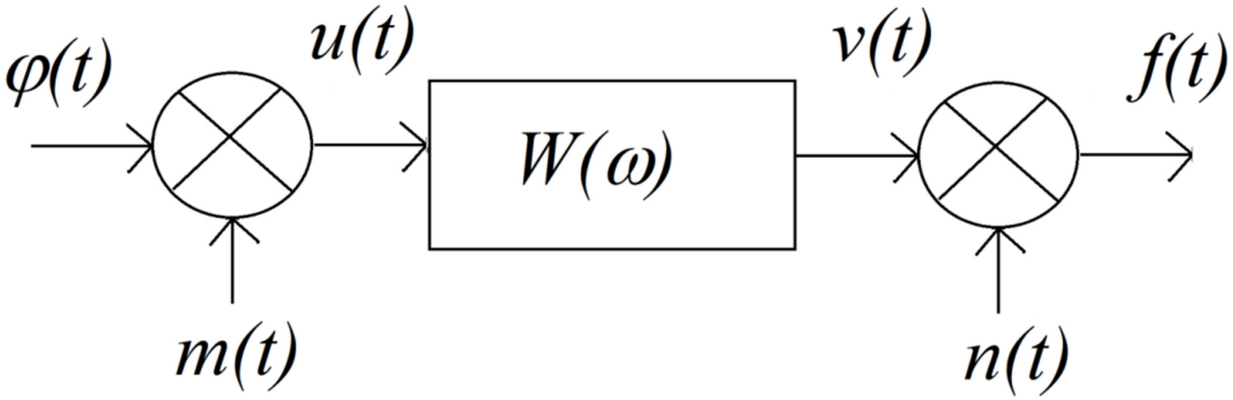


Рисунок 3.5 – Функциональная схема процесса измерения спектра

Предположим, что искаженная реализация случайного процесса *u(t)*, реализация *x(t),* соответствующая истинному спектральному распределению анализируемого сигнала, сигнал на выходе спектрального прибора контроля *v(t)* и выходной сигнал *f(t)*, регистрируемый получателем спектроскопической информации, являются стационарными случайными процессами и имеют спектральные плотности $G_u(\omega)$, $G_x(\omega)$, $G_v(\omega)$ и $G_f(\omega)$, соответственно. Помехи некоррелированы между собой и полезными сигналами и являются также стационарными случайными процессами, которые обычно характеризуются нулевым средним.

Согласно [150] и соотношению (2.35) спектральную плотность ошибки $G_\varepsilon(\omega)$ можно определить как:

$$G_\varepsilon(\omega) = \left|W(0) - W(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T')\right|^2 G_x(\omega) + \left|W_m(\omega, \omega', x, x', y, y', T, T')\right|^2 G_m(\omega) + G_n(\omega), \quad (3.20)$$

где *W(0)* – энергетическая аппаратная функция из соотношения для идеального спектрального прибора; $W_m(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')$ – энергетическая аппаратная функция спектрального прибора контроля по отношению к

помехе $m(t)$, $G_m(\omega)$ и $G_n(\omega)$ – спектральные плотности случайных помех и ошибок, вносимых прибором.

В таком случае среднеквадратическую ошибку измерения можно определить как:

$$\overline{\varepsilon}^2 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left|W(0)-W(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')\right|^2 G_x(\omega)d\omega + \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left[\left|W_m(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')\right|^2 G_m(\omega)+G_n(\omega)\right]d\omega \quad . \qquad (3.21)$$

Первый интеграл в правой части (3.21) определяет систематическую погрешность спектрального прибора контроля, которая всегда имеет одну и ту же абсолютную величину. Второй интеграл определяет случайную погрешность.

В качестве примера рассмотрим зависимость среднеквадратической ошибки измерения дифракционного прибора от его параметров при измерении одиночной спектральной линии.

Полученное выражение (3.21) можно представить в виде суммы среднеквадратических ошибок, появляющихся в результате систематических и случайных погрешностей - первый и второй интеграл соотношения (3.21):

$$\overline{\varepsilon}_{\Sigma}^{\,2} = \overline{\varepsilon}_{СИСТ}^{\,2} + \overline{\varepsilon}_{СЛУЧ}^{\,2}. \qquad (3.22)$$

Поскольку нас интересует только взаимная связь, для упрощения расчета предположим, что редукция к идеальному прибору не проводится, т.е. $A(\omega)=1$, (под редукцией понимается отыскание истинного распределения по заданному наблюдаемому распределению и этому вопросу посвящено большое количество работ [98]), и аппаратная функция прибора определяется только разрешающей способностью спектрометра s.

Предположим, что анализируемая спектральная линия описывается гауссовой формой и имеет ширину β. Детектирование оптического сигнала выполняется фотоприемником, инерционность которого оценивается постоянной времени $\tau_{ФП}$, характеризующей быстродействие спектрометра. Время регистрации спектра определяется величиной $T_{РЕГ}$. Постоянная времени и время регистрации определяют, как инерционные искажения, относящиеся к систематическим погрешностям, так и величину регистрируемых шумов, т.е. величину случайной ошибки измерения. Также величина случайной ошибки определяется величиной Q, зависящей от светосилы спектрометра по потоку, яркости источника и чувствительности приемника (т.е. от его шумов).

Согласно вышеизложенному, опираясь на работу [98], выражение (3.22) можно представить в виде:

$$\bar{\varepsilon}_{\Sigma}^{\,2} = \left(\bar{\varepsilon}_{\alpha}^{\,2} + \bar{\varepsilon}_{T}^{\,2}\right)_{СИСТ} + \left(\bar{\varepsilon}_{ш}^{\,2}\right)_{СЛУЧ} = \frac{s^2}{2\beta^2} + 4\ln 2 \cdot \left(T_{РЕГ}\tau_{ФП}\right)^2 + \frac{1}{Q \cdot s \cdot T_{РЕГ}\sqrt{\tau_{ФП}}}, \qquad (3.23)$$

где первых два слагаемых определяют систематическую погрешность спектрометра, включающую в себя аппаратурную ошибку оптической части спектрометра и ошибку приёмно-регистрирующей части соответственно, и третье слагаемое определяет случайную погрешность.

Для расчета в качестве исходных данных были взяты параметры спектрометра OceanOptics USB2000 со спектральным разрешением от 0,3 нм до 3 нм (зависит от применяемой ДР) и спектральной линии натрия Na с шириной 0,6 нм. В качестве фотоприемного устройства в данном спектрометре применяется ПЗС-линейка Sony ILX511B. Время регистрации было выбрано произвольно от 0,25 до 2,5 с.

На рисунке 3.6 приведены схематически результаты расчета зависимости среднеквадратических погрешностей от разрешающей способности s и времени регистрации $T_{РЕГ}$ спектрального прибора.

Поскольку нас интересует только характер зависимости кривых, для удобства отображения была выполнены нормировка полученных результатов.

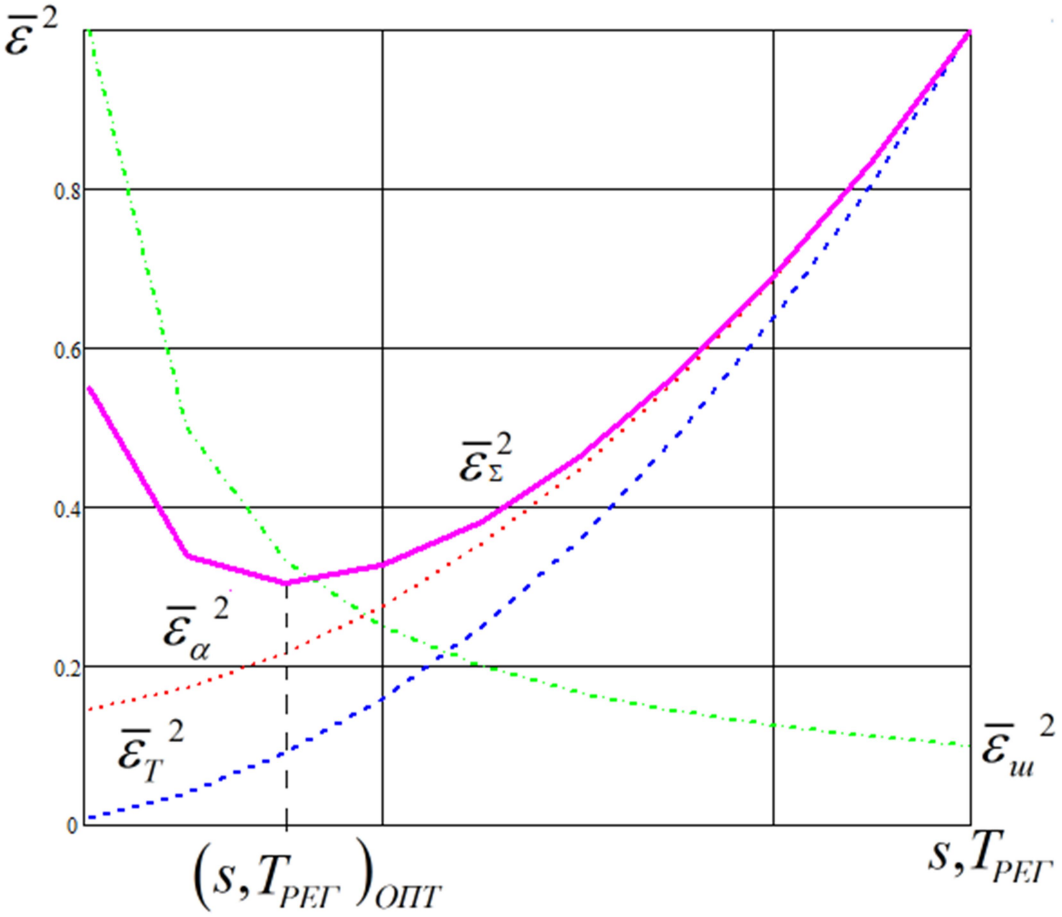


Рисунок 3.6 – Зависимость среднеквадратической погрешности от параметров СП

Как видно из рисунка 3.6, систематические и случайные погрешности связаны между собой. Уменьшая случайные погрешности за счет увеличения времени регистрации, систематические погрешности увеличиваются и наоборот.

Причем различные составляющие среднеквадратической погрешности вносят разный вклад в суммарную погрешность, поэтому при выборе спектрометра рационально определять оптимальные параметры $(s, T_{РЕГ})_{ОПТ}$, соответствующие минимуму суммарной среднеквадратической погрешности.

С целью анализа влияния каждой составляющей среднеквадратической погрешности спектрометра на ОК было выполнено компьютерное моделирование зависимости ошибок 1-го и 2-го рода от полученных значений погрешностей. В данном случае значения погрешностей были взяты в абсолютных значениях, распределение контролируемого параметра соответствовало нормальному закону.

Результаты компьютерного моделирования ошибок 1-го и 2-го рода приведены на рисунках 3.7 и 3.8 соответственно для трех составляющих суммарной среднеквадратической погрешности: $\overline{\varepsilon}_{\alpha}^{\,2}$, $\overline{\varepsilon}_{T}^{\,2}$ и $\overline{\varepsilon}_{ш}^{\,2}$.

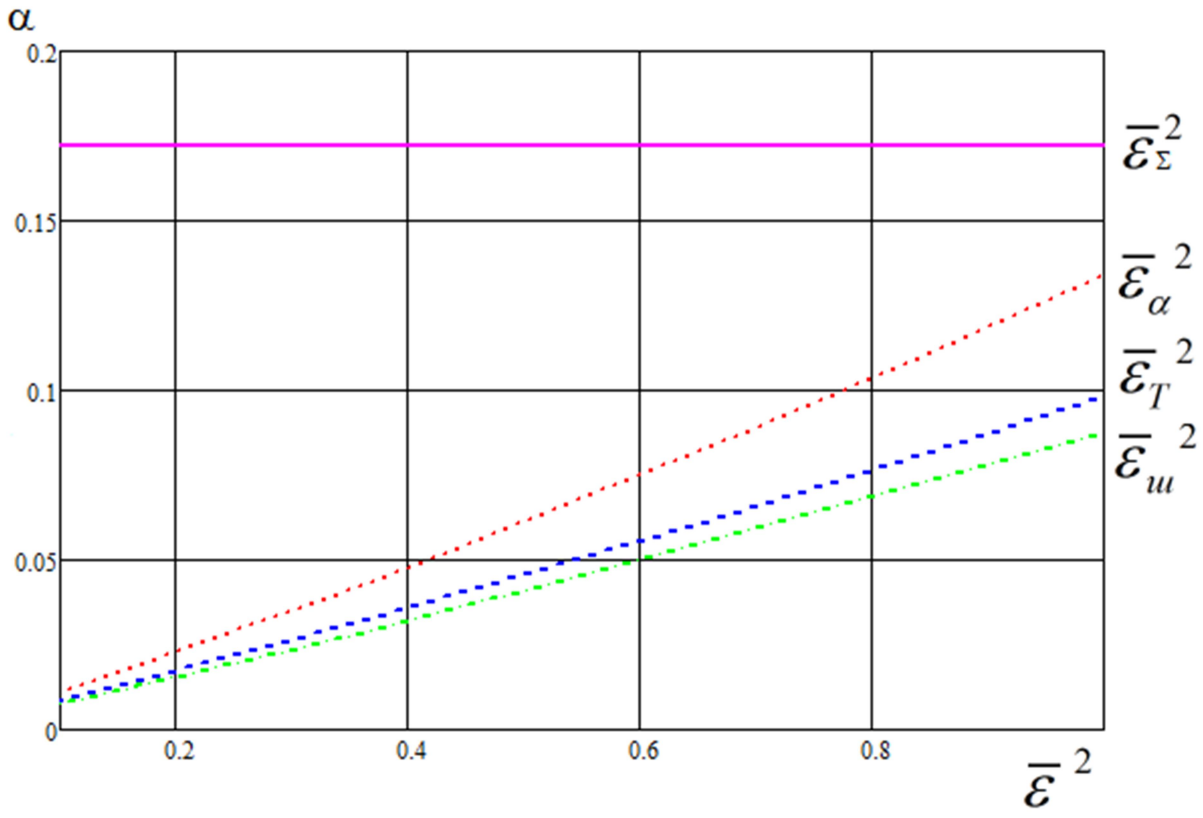


Рисунок 3.7 –Зависимость вероятности ошибки 1-го рода от среднеквадратической погрешности

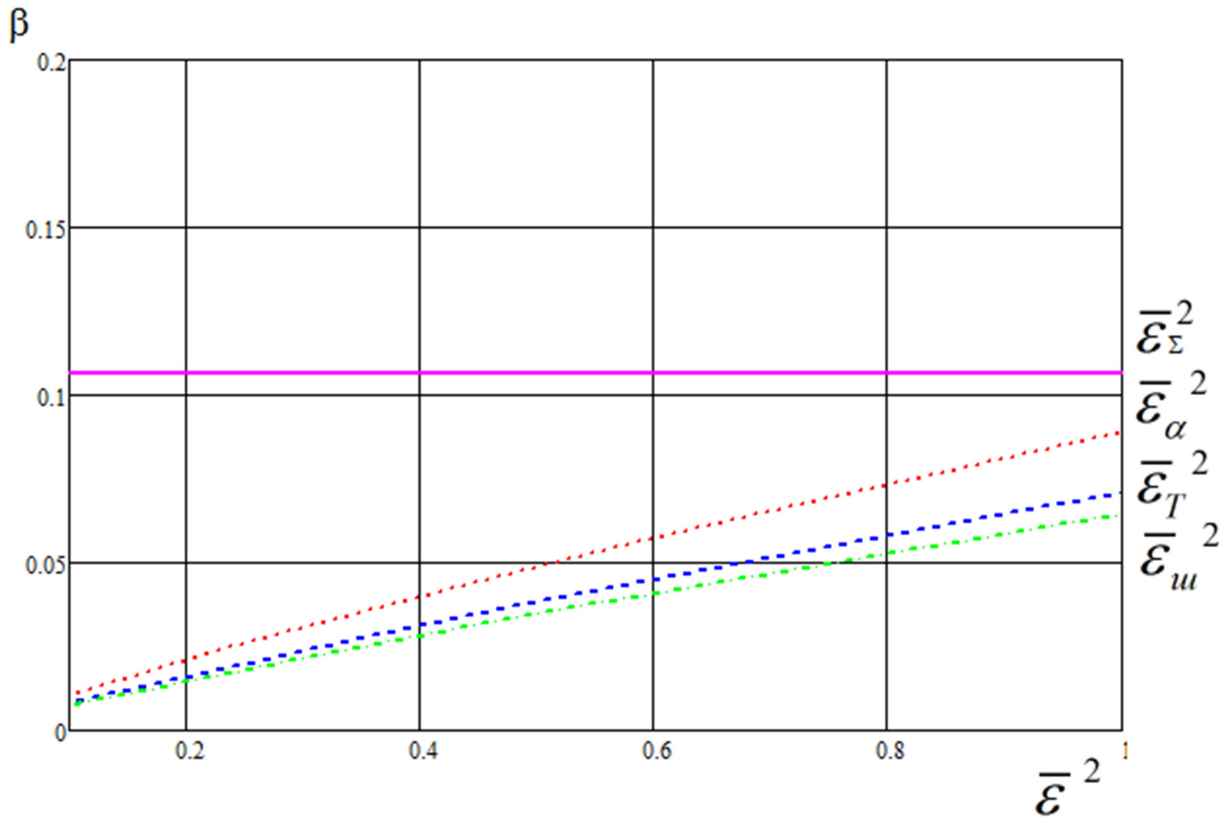


Рисунок 3.8 – Зависимость вероятности ошибки 2-го рода от среднеквадратической погрешности

На рисунках 3.7 и 3.8 сплошной линией указаны вероятности ошибок 1-го и 2-го рода, соответствующие минимальному значению суммарной среднеквадратической погрешности, приведенной на рисунке 3.6 в оптимальной точке. В этом случае значения вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода равны 17 % и 11% соответственно.

Из графиков видно, что с увеличением погрешностей измерений $\overline{\varepsilon}_{\alpha}^{\,2}$, $\overline{\varepsilon}_{T}^{\,2}$ и $\overline{\varepsilon}_{ш}^{\,2}$, ошибки контроля возрастают, что вполне логично. При прочих равных условиях, вероятность ошибки 2-го рода оказывается меньше вероятности возникновения ошибок 1-го рода. Причем с увеличением погрешности измерения вероятность возникновения ошибок 1-го рода растет быстрее, чем 2-го, что подтверждают результаты теоретического расчета, приведенные в п.3.2 данной главы.

Кроме того, наибольшие значения вероятностей ошибок контроля как 1-го, так и 2-го рода, соответствуют систематической погрешности $\overline{\varepsilon}_{\alpha}^{\,2}$, возникающей из-за аппаратурной ошибки оптической части спектрометра. Наименьшие значения вероятностей ошибок контроля 1-го и 2-го рода соответствуют случайным погрешностям $\overline{\varepsilon}_{ш}^{\,2}$. Отличие значений вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода при максимальных значениях среднеквадратических погрешности $\overline{\varepsilon}_{\alpha}^{\,2}$ и $\overline{\varepsilon}_{ш}^{\,2}$ составляет 4,6 % и 2,4 % соответственно.

Полученные результаты показывают, что систематические погрешности оказывают большее влияние на результат контроля, чем случайные. Поэтому с целью минимизации этого влияния, необходимо тщательно подходить к вопросу калибровки СПК, чтобы исключить влияние систематической погрешности на результат измерения.

3.4 Сопоставление результативности спектральных приборов контроля различных типов

При решении задачи контроля особо актуален вопрос выбора спектрального прибора для конкретного случая контроля. Этот выбор можно выполнить на основе сравнения спектральных приборов по их результативности, т.е. применяемый СП должен обладать такими минимально допустимыми характеристиками, при которых обеспечивается заданная достоверность контроля.

Результативность СПК является объемным и в конечном итоге наиболее общим показателем, отражающим его экспериментальные возможности. Различным аспектам оценки результативности спектральных приборов посвящена обширная литература [96, 99, 155], но тем не менее на сегодняшний день нет единого подхода, который позволит выполнить сопоставление результативности всех типов спектральных приборов по заданным критериям. Это может быть объяснено тем, что многообразие,

нестабильность и некоторая несопоставимость требований к приборам приводит к тому, что результативность их не может быть оценена посредством одного соотношения или одного критерия.

Поскольку в данной работе под оптическим спектральным прибором понимается информационная измерительная система, то свойства такой системы могут быть описаны в рамках теории информации. Основополагающей концепцией такого подхода к оценке средств измерения является то, что показателем результативности спектрального прибора контроля служит значение количества регистрируемой спектроскопической информации в единицу времени, обеспечивающее заданную достоверность проводимого контроля.

Традиционно оценка количества информации, получаемого с помощью спектрального прибора, сводится к оценке его количества, содержащегося в получаемой спектрограмме [179]. Другой подход к оценке спектральных приборов основан на представлении приборов как информационных каналов связи [180]. Количество информации в бит, приходящееся на один дифракционный элемент, которое непосредственно связано со скоростью получения информации, соответствует пропускной способности такого «канала» и может быть описано в рамках теории информации. В работе [96] предлагается определить количество информации, получаемое за одно измерение во всем рабочем спектральном диапазоне λ_2- λ_1 при его одновременном анализе.

Предлагаемые критерии не дают четкого понимания об эксплуатационных характеристиках спектрального прибора контроля, в том числе его погрешностях, и представляют собой скорее всего общие критерии, на основе которых невозможно сопоставить спектральные приборы различных типов.

В рамках предлагаемого спектроскопического метода контроля динамика процесса измерения оценивается на основе критерия количества информации, приходящегося на одно измерение, которое в свою очередь

должно быть связано со среднеквадратической ошибкой регистрации спектра, т.е. погрешностью спектрального измерения.

Предполагается, что как входным, так и выходным процессом спектрального прибора контроля является стационарный случайный процесс, при этом анализирующая часть прибора рассматривается как линейная система, что было показано во второй главе данной работы.

Тогда основной информационной характеристикой прибора является количество информации *I(u,f)*, содержащееся в выходном сигнале *f(t)* относительно воздействующего на прибор случайного процесса *u(t)*, как показано на рисунке 3.5.

Согласно [174], количество информации определяется соотношением:

$$I(u,f)=\frac{1}{4\pi}\int_0^{\infty}\ln\frac{G_u(\omega)G_f(\omega)}{G_u(\omega)G_f(\omega)-\left|G_{uf}(\omega)\right|^2}d\omega, \qquad (3.24)$$

где $G_{uf}(\omega)$ – взаимная спектральная плотность процессов *u(t)* и *f(t)*.

На основе результатов, полученных в п.3.3 данной главы, спектральную плотность $G_f(\omega)$ выходного сигнала *f(t)* и взаимную спектральную плотность $G_{uf}(\omega)$ можно определить как:

$$G_f(\omega)=\left|W(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')\right|^2 G_x(\omega)+$$
$$+\left|W_m(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')\right|^2 G_m(\omega)+G_n(\omega) \qquad (3.25)$$

где $W_m(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')$ – энергетическая аппаратная функция спектрального прибора по отношению к помехе *m(t)*, и

$$\left|G_{uf}(\omega)\right|^2=\left|G_{xf}(\omega)\right|^2=\left|W(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')\right|^2 G_u^2(\omega). \qquad (3.26)$$

Определим количество информации *I(x,f)*, содержащееся в выходном сигнале *f(t)* относительно входной реализации исследуемого случайного процесса *x(t),* соответствующей истинному спектральному распределению анализируемого сигнала. Подставляя выражение (3.26) и (3.25) в (3.24), после некоторых математических преобразований получим:

$$I(x,f)=\frac{1}{4\pi}\int_0^{\infty}\ln\left(\frac{\left|W(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')\right|^2 G_x(\omega)+\left|W_m(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')\right|^2 G_m(\omega)}{G_n(\omega)}+1\right)d\omega\,. \quad (3.27)$$

Из выражения видно, что получаемое от спектрального прибора контроля количество информации зависит от свойств прибора, определяющихся его энергетической аппаратной функцией $W(\omega,\omega',x,x',y,y',T,T')$, от измеряемого процесса $G_x(\omega)$, а также от случайных помех $G_m(\omega)$ и ошибок $G_n(\omega)$, вносимых прибором.

Для установления связи между регистрируемым количеством информации и достоверностью проводимого контроля, через определение точности спектрального прибора контроля, введем понятие ε-энтропии, т.е. того минимального количества информации, которое необходимо в единицу времени для того, чтобы с заданной погрешностью ε воспроизвести данный случайный процесс [174].

В рассматриваемом случае применим понятие ε -энтропии для случайного процесса, регистрируемого идеальным спектральным прибором с аппаратной функцией *W(0)*, и найдем соответствующую ε-энтропию (минимальное количество информации), которое при измерении идеальным спектральным прибором контроля со среднеквадратической погрешностью $\overline{\varepsilon}^2$, определенной в (3.21), обеспечивает безошибочный контроль.

Согласно [174], определим минимальное количество информации, которое необходимо для выполнения идеальным спектральным прибором

безошибочного контроля, т.е. когда вероятности ошибок контроля равны нулю:

$$H_{\varepsilon}(x)=\frac{1}{4\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\ln\max\left\{\frac{W(0)^2 G_x(\omega)}{h},1\right\}d\omega, \qquad (3.28)$$

где h – положительная постоянная величина, определяемая из равенства [174]:

$$\bar{\varepsilon}^2=\int_{-\infty}^{\infty}\min\left\{h,\left|W(0)\right|^2 G_x(\omega)\right\}d\omega. \qquad (3.29)$$

Аналогично анализу методами теории информации измерительных приборов случайных величин введем понятие информационного КПД спектрального прибора контроля как [132]:

$$\eta_{И}=\frac{H_{\varepsilon}(x)}{I(x,f)}. \qquad (3.30)$$

Малые значения информационного КПД спектрального прибора контроля $\eta_{И}$ указывают на целесообразность дальнейшей обработки выходного сигнала прибора с целью снижения вероятностей ошибок контроля или замену применяемого прибора на спектральный прибор контроля с лучшими техническими характеристиками.

Так как минимальное количество информации $H_{\varepsilon}(x)$, которое необходимо для выполнения контроля с требуемой достоверностью, зависит только от свойств сигнала, а получаемое от спектрального прибора количество информации $I(x,f)$ зависит, кроме того, и от погрешностей прибора и измерения, то информационный КПД спектрального прибора

контроля $\eta_И$ характеризует согласованность свойств прибора и контролируемого процесса.

Информационные характеристики – количество информации и информационный КПД спектрального прибора контроля могут оказаться полезными при разработке и эксплуатации спектральных приборов контроля и их функциональных узлов. Они могут служить критериями при сравнении спектральных приборов контроля разного типа по их результативности, позволяют выбрать соответствующий прибор при заданных допустимых вероятностях ОК и оценить согласованность отдельных приборов при совместном их применении для решения конкретной прикладной задачи контроля процесса горения.

3.5 Контроль процессов горения методами оптической спектроскопии

Как уже было обозначено выше, применение методов оптической спектроскопии позволяет выполнять контроль процессов горения по множеству заранее определенных спектроскопических информационных параметров, формируемых в различных участках анализируемого спектра, а также по их совокупности и взаимной связи.

Получаемая таким образом спектроскопическая информация позволяет судить не только о динамике и состоянии процесса в целом, но и проанализировать различные частные составляющие протекающего процесса горения, например, определять качественный и количественный состав компонентов, участвующих в горении, определять температуру спектральным методом и т.п.

Принцип формирования множества спектроскопических параметров при контроле процессов горения открывает возможность создавать качественно новые системы автоматического контроля на

теплоэнергетических объектах, отличающиеся высокой достоверностью проводимого контроля.

При этом множество спектроскопических параметров, характеризующих один и тот же контролируемый процесс, может формироваться различными методами оптической спектроскопии. Так, например, в пятой главе данной работы, будет показано, что процесс горения газообразных углеводородов может быть охарактеризован множеством параметров (22 шт.), сформированным двумя методами оптической спектроскопии: методом эмиссионной оптической спектроскопии и методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии.

Как было показано во второй главе, результатом спектроскопического измерения анализируемого излучения, характеризующего контролируемый процесс, является оценка аппаратурного энергетического спектра анализируемого излучения $\overline{G}_a(\omega)$, описываемая соотношением (2.35).

В работах [81, 114, 115, 117] показано, что на выходе спектрального прибора формируется значение фототока, пропорциональное оценке аппаратурного энергетического спектра анализируемого излучения на каждой анализируемой частоте ω_k из всего рабочего диапазона частот.

Усредненное значение фототока, соответствующее оценке аппаратурного энергетического спектра анализируемого излучения на *n*-ой частоте, дается следующим выражением [114, 115]:

$$\overline{i}_n = \mathrm{M} \int_{\omega_n - \Delta\omega_n}^{\omega_n + \Delta\omega_n} \frac{\sin^2[(\omega - \omega')t_R / 2]}{[(\omega - \omega')t_R / 2]^2} \cdot G_0(\omega') d\omega' , \qquad (3.31)$$

где M - размерный коэффициент; $2\Delta\omega_n$ - полоса частот, определяется разрешающей способностью спектрометра; t_R - время усреднения фототока; $G_0(\omega')$ - энергетический спектр оптического излучения на входе спектрометра.

Значение фототока, полученное в соотношении (3.31), соответствует одному измеряемому СИП, отражающему состояние контролируемого процесса горения. При измерении множества параметров, на выходе прибора контроля получается совокупность таких значений фототока, описываемая дискретной математической структурой. В таком случае результаты спектроскопических измерений могут рассматриваться как система отсчетных значений энергетического спектра, получаемого СП.

Тогда в случае контроля процессов горения спектроскопическим методом по множеству параметров на основании соотношений (3.31) и (2.35), и результатов, полученных в работах [81, 115, 117], усредненные значения фототока, соответствующие каждому измеряемому спектроскопическому параметру, можно представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} i_1(\omega_1) \\ i_2(\omega_2) \\ \vdots \\ i_n(\omega_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{M}_1 \int\limits_{\omega_1-\Delta\omega_1}^{\omega_1+\Delta\omega_1} W_{11}(\omega_1,\omega_1',x,x',y,y',T,T')\cdot G_0(\omega_1')d\omega_1' \\ \mathrm{M}_2 \int\limits_{\omega_2-\Delta\omega_2}^{\omega_2+\Delta\omega_2} W_{22}(\omega_2,\omega_2',x,x',y,y',T,T')\cdot G_0(\omega_2')d\omega_2' \\ \vdots \\ \mathrm{M}_n \int\limits_{\omega_n-\Delta\omega_n}^{\omega_n+\Delta\omega_n} W_{nn}(\omega_n,\omega_n',x,x',y,y',T,T')\cdot G_0(\omega_n')d\omega_n' \end{bmatrix}, \qquad (3.32)$$

где $W_n(\omega_{nn},\omega',x,x',y,y',T,T')$ – энергетическая аппаратная функция спектрометра для n-го параметра [115, 117].

Соотношение (3.32) 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 аппаратурного энергетического спектра, полученных за время усреднения.

Таким образом, каждое отсчетное значение фототока из соотношения (3.32) пропорционально соответствует одному из множества истинных значений контролируемых спектроскопических параметров $\varphi(\omega_k)$ на определенной частоте, т.е. множества значений интенсивности спектральных линий или участков спектра:

$$i_k \propto G_a(\omega_k, \omega') \propto \varphi(\omega_k) = k_\omega \cdot \varphi(\omega_k), \qquad (3.33)$$

где k_λ – коэффициент пропорциональности, который зависит от погрешности спектральных измерений для каждого параметра.

В общем виде спектроскопическая система контроля процессов горения представлена на рисунке 3.9, где объект (контролируемый процесс горения); f – возмущающее воздействие среды; φ – истинные значения контролируемых СИП; $G(\omega)$ – отсчетные значения энергетического спектра; i – отсчетные значения фототока, соответствующие каждому измеряемому спектроскопическому параметру; ВОСП – волоконно-оптическая система передач; СП – спектральный прибор; БОСИ – блок обработки спектроскопической информации.

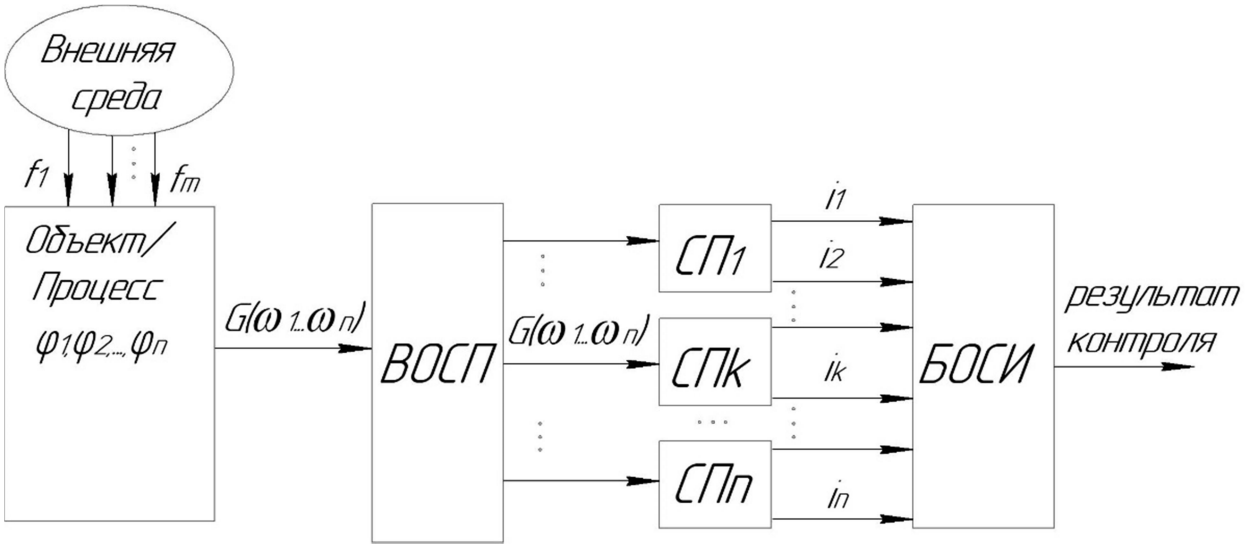


Рисунок 3.9 – Функциональная схема спектроскопической системы контроля процессов горения

В зависимости от задачи и типа контроля, а также от количества спектроскопических информационных параметров спектроскопическая система контроля может содержать один или несколько спектральных приборов контроля, работающих либо в разных диапазонах анализируемых частот, либо применяя разные методы оптической спектроскопии.

Как будет показано в пятой главе на примере решения задачи контроля газообразного углеводородного топлива, спектроскопическая система контроля может состоять из одного спектрометра, работающего на основе метода эмиссионной спектроскопии или метода лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии, или из двух спектрометров, если для повышения достоверности контроля процесс контролируется одновременно двумя методами.

Таким образом, контролируемые параметры (переменные состояния) объединяются в вектор входа СПК (матрица-столбец):

$$\varphi = \{\varphi_k\} = \begin{vmatrix} \varphi_1(\omega_1) \\ \varphi_2(\omega_2) \\ \vdots \\ \varphi_n(\omega_n) \end{vmatrix}, \tag{3.34}$$

а переменные результата измерения контролируемых параметров объединяются в вектор выхода спектрального прибора контроля:

$$i = \{i_k\} = \begin{vmatrix} i_1(\omega_1) \\ i_2(\omega_2) \\ \vdots \\ i_n(\omega_n) \end{vmatrix}. \tag{3.35}$$

Спектроскопический контроль также может быть двусторонним и односторонним в зависимости от конкретной практической задачи, поэтому выражения (3.4) и (3.5) должны быть представлены в матричной форме.

Тогда процесс, протекание которого соответствует штатному режиму, при условии, что все n значений фототока, соответствующих контролируемым параметрам, находятся в заданных двусторонних пределах, можно охарактеризовать следующим неравенством:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{H1} \\ \vdots \\ \Phi_{Hk} \\ \vdots \\ \Phi_{Hn} \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_k \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} \Phi_{B1} \\ \vdots \\ \Phi_{Bk} \\ \vdots \\ \Phi_{Bn} \end{bmatrix}, \qquad (3.36)$$

где i_k – значение фототока, полученного с выхода фотоприемного устройства спектрального прибора контроля, соответствующее истинному значению φ k-ого контролируемого спектроскопического параметра (интенсивности спектральной линии или спектрального участка), $\Phi_{нk}$ и $\Phi_{вk}$ – допускаемые верхнее и нижнее значения для k-го контролируемого параметра.

Процесс, протекание которого соответствует штатному режиму, при условии, что все n контролируемых параметров φ_n находятся в заданных односторонних пределах, можно охарактеризовать следующими неравенствами:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{H1} \\ \vdots \\ \Phi_{Hk} \\ \vdots \\ \Phi_{Hn} \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_k \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \text{ или } \qquad \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_k \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \le \begin{bmatrix} \Phi_{B1} \\ \vdots \\ \Phi_{Bk} \\ \vdots \\ \Phi_{Bn} \end{bmatrix}. \qquad (3.37)$$

После однократного измерения результаты запоминаются, и начинается следующий цикл измерения.

Как было обозначено выше, процесс контроля, в том числе и выполняемый по множеству спектроскопических параметров, основан на

решении задачи проверки гипотезы, где по результатам эксперимента необходимо принять решение об истинности проверяемой гипотезы [150, 153, 164, 175]. При этом гипотезой является предположение о том, что контролируемые параметры удовлетворяют условию (3.36) или (3.37), результаты эксперимента представляют собой множество чисел, а достоверность спектроскопического контроля характеризуется вероятностями ошибок 1-го и 2-го рода, которые будут зависеть от вероятностных характеристик измеряемых параметров и их взаимной связи.

3.6 Вероятности ошибок при спектроскопическом методе контроля

Результатом спектроскопического измерения оптического излучения, испускаемого в процессе протекания контролируемого процесса горения, является значения интенсивностей спектральных линий и/или спектральных участков, представленные в виде значений фототока на выходе спектрального прибора контроля. Эти спектральные линии и/или спектральные интервалы характеризуют контролируемый процесс и должны быть установлены заранее на этапе исследовательских измерений контролируемого процесса горения и предэксплуатационных работ по установке прибора контроля на конкретном объекте. Правильность их определения и выбора влияет на достоверность проводимого контроля протекающего процесса горения.

Поскольку измеряемые значения интенсивностей спектральных линий и спектральных участков являются случайными величинами, то при обработке результатов спектроскопического измерения с целью определения достоверности выполняемого контроля могут быть использованы их вероятностные характеристики: средние значения и средние квадраты, плотности вероятности и т.п [150, 153].

Предположим, что контролируемый процесс горения характеризуется спектроскопическими информационными параметрами $\varphi_1, \ldots, \varphi_k, \ldots, \varphi_n$,

которые представляют собой интенсивности спектральных линий и/или спектральных интервалов, определенных заранее.

В результате измерения с выхода спектрального прибора контроля спектроскопическая информация поступает в виде значений фототока $i_1,\ldots,i_k,\ldots,i_n$, пропорциональных оценке отсчетных значений аппаратурного энергетического спектра $G_a(\omega_1),\ldots, G_a(\omega_k),\ldots, G_a(\omega_n)$ для каждого контролируемого параметра $\varphi_1,\ldots, \varphi_k,\ldots,\varphi_n$. Получаемые значения фототока (результаты спектральных измерений) также являются гауссовскими случайными величинами, распределения которых соответствуют нормальному закону.

Процесс протекает в штатном режиме, если контролируемые параметры удовлетворяют условию (3.36) или (3.37). Поскольку достоверность контроля определяется ошибками контроля, для случая спектроскопического контроля необходимо установить вероятности ошибок 1-го и 2-го рода.

Аналогично соотношениям (3.9) и (3.10) после некоторых математических преобразований вероятности ошибок 1-го рода и 2-го рода для случая двустороннего спектроскопического контроля можно представить следующими соотношениями [173]:

$$\alpha = 1 - \frac{\int\limits_{\Phi_{H1}}^{\Phi_{B1}} \cdots \int\limits_{\Phi_{Hk}}^{\Phi_{Bk}} \cdots \int\limits_{\Phi_{Hn}}^{\Phi_{Bn}} \int\limits_{\Phi_{H1}}^{\Phi_{B1}} \cdots \int\limits_{\Phi_{Hk}}^{\Phi_{Bk}} \cdots \int\limits_{\Phi_{Hn}}^{\Phi_{Bn}} p_{\varphi}(\cdot)\, p_{\Delta}(\cdot)\, di_1 \ldots di_k \ldots di_n d\varphi_1 \ldots d\varphi_k \ldots d\varphi_n}{\int\limits_{\Phi_{H1}}^{\Phi_{B1}} \cdots \int\limits_{\Phi_{Hk}}^{\Phi_{Bk}} \cdots \int\limits_{\Phi_{Hn}}^{\Phi_{Bn}} p_{\varphi}(\cdot)\, d\varphi_1 \ldots d\varphi_k \ldots d\varphi_n} \qquad (3.38)$$

и

$$\beta = 1 - \frac{\int_{\Phi_{H1}}^{\Phi_{B1}} \cdots \int_{\Phi_{Hk}}^{\Phi_{Bk}} \cdots \int_{\Phi_{Hn}}^{\Phi_{Bn}} \int_{\Phi_{H1}}^{\Phi_{B1}} \cdots \int_{\Phi_{Hk}}^{\Phi_{Bk}} \cdots \int_{\Phi_{Hn}}^{\Phi_{Bn}} p_{\varphi}(\cdot)\, p_{\Delta}(\cdot)\, di_1 \ldots di_k \ldots di_n d\varphi_1 \ldots d\varphi_k \ldots d\varphi_n}{\int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\Phi_{H1}}^{\Phi_{B1}} \cdots \int_{\Phi_{Hk}}^{\Phi_{Bk}} \cdots \int_{\Phi_{Hn}}^{\Phi_{Bn}} p_{\varphi}(\cdot)\, p_{\Delta}(\cdot)\, di_1 \ldots di_k \ldots di_n d\varphi_1 \ldots d\varphi_k \ldots d\varphi_n}, \quad (3.39)$$

где $p_{\varphi}(\cdot) = p_{\varphi}(\varphi_1;\ldots;\varphi_k;\ldots;\varphi_n)$ и $p_{\Delta}(\cdot) = p_{\Delta}(i_1-\varphi_1;\ldots;i_k-\varphi_k;\ldots;i_n-\varphi_n)$ - n-мерные плотности вероятности контролируемых спектроскопических параметров и вероятности погрешностей спектрального измерения соответственно.

Как следует из полученных соотношений для определения ошибок 1-го и 2-го рода необходимо располагать исчерпывающим описанием совместных распределений контролируемых спектроскопических параметров и погрешностей спектральных измерений, которые определяются как условиями эксперимента, так и погрешностью применяемого прибора контроля.

Поэтому можно выделить четыре случая определения вероятностей ошибок при спектроскопическом контроле:

1. Контролируемые спектроскопические параметры и погрешности спектральных измерений статистически независимы.

2. Контролируемые спектроскопические параметры статистически зависимы, а погрешности спектральных измерений статистически независимы.

3. Контролируемые спектроскопические параметры статистически независимы, а погрешности спектральных измерений статистически зависимы.

4. Контролируемые спектроскопические параметры и погрешности спектральных измерений статистически зависимы.

Для первого случая, когда контролируемые спектроскопические параметры и погрешности спектральных измерений статистически независимы их распределения будут являться одномерными, и безошибочное

решение о контролируемом процессе будет определяться произведением вероятностей ошибок контроля по каждому параметру:

$$P_1 = 1 - \prod_{x=1}^{n} (1 - P_{1x})$$

и (3.40)

$$P_2 = 1 - \prod_{x=1}^{n} (1 - P_{2x}) .$$

Данный случай характерен при контроле каждого параметра разными спектральными приборами контроля или разными методами, например, методами эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрией, когда погрешности спектральных измерений независимы. Задачи контроля такого типа встречаются крайне редко, чаще один прибор применяется для контроля нескольких или множества спектроскопических параметров даже при одновременном проведении спектральных измерений несколькими методами.

В большинстве случаев при спектроскопическом контроле процессов горения имеет место статистическая зависимость спектроскопических параметров или погрешностей спектральных измерений.

В случае статистической зависимости контролируемые спектроскопические параметры $\varphi_1, \ldots, \varphi_k, \ldots, \varphi_n$ являются совместно гауссовскими случайными величинами и имеют n-мерную совместную плотность вероятности, определяемую соотношением [150]:

$$p(\varphi_1; \varphi_2; \ldots; \varphi_n) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \sqrt{|\mathbf{C}|}} \cdot e \left\{ -\frac{1}{2|\mathbf{C}|} \cdot \sum_{k,l=1}^{n} |\mathbf{C}_{kl}| (\varphi_k - \mu_k)(\varphi_l - \mu_l) \right\}, \qquad (3.41)$$

где μ_k и μ_l –средние значения случайных величин $\varphi_1, \ldots, \varphi_k, \ldots, \varphi_n$; **C** – ковариационная матрица, |**C**| - определитель **C**, C_{kl} - элементы матрицы, а |$\mathbf{C}_{kl}$| - алгебраическое дополнение C_{kl} [150], где элементы ковариационной матрицы определяются как:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix}, \qquad (3.42)$$

а $C_{kl} = \overline{(\varphi_k - \mu_k)(\varphi_l - \mu_l)}$ - ковариация случайных величин φ_k, и φ_l, характеризующая связь между случайными величинами φ_k, и φ_l, $C_{kk} = \overline{(\varphi_k - \mu_k)^2} = \sigma_k^2$ - дисперсия случайной величины φ_k.

Аналогичным соотношением аппроксимируются распределения значений фототока, получаемых с выхода СПК, если существует статистическая зависимость погрешностей спектральных измерений.

В качестве примера рассмотрим влияние статистической зависимости контролируемых параметров и статистической зависимости погрешности спектральных измерений на вероятности ОК 1-го и 2-го рода для случая контроля по двум спектроскопическим параметрам φ_1 и φ_2, т.е. когда n=2.

Тогда совместную двумерную плотность вероятности значений фототока i_1 и i_2 с выхода спектрального прибора контроля можно представить следующим выражением:

$$p(i_1, i_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho_{12}^2}} \cdot e\left\{ -\frac{1}{2\left(1-\rho_{12}^2\right)} \cdot \left(\frac{(i_1-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho_{12}(i_1-\mu_1)(i_2-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(i_2-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right) \right\}, \qquad (3.43)$$

где $\rho_{12} = \frac{C_{12}}{\sigma_1\sigma_2}$ - коэффициент корреляции случайных величин i_1 и i_2.

С целью выполнения оценки влияния зависимости значений контролируемых СИП на достоверность проводимого контроля при условии

независимости погрешностей спектральных измерений было выполнено компьютерное моделирование ошибок контроля на основе полученных соотношений (3.38) и (3.39). Моделирование выполнялось для двумерных нормальных распределений значений фототока с выхода спектрального прибора контроля и контролируемых параметров [109] для семи случаев:

1 – вероятности ОК определяются по одному контролируемому параметру (для сравнения);

2 – вероятности ОК определяются по двум статистически независимым контролируемым параметрам, коэффициент корреляции ρ_{12}=0;

3 – вероятности ОК определяются по двум статистически зависимым контролируемым параметрам, коэффициент корреляции ρ_{12}=0,5;

4 – вероятности ОК определяются по двум статистически зависимым контролируемым параметрам, коэффициент корреляции ρ_{12}=0,75;

5 – вероятности ОК определяются по двум статистически зависимым контролируемым параметрам, коэффициент корреляции ρ_{12}=0,9;

6 – вероятности ОК определяются по двум статистически зависимым контролируемым параметрам, коэффициент корреляции ρ_{12}=0,95;

7 – вероятности ОК определяются по двум статистически зависимым контролируемым параметрам, коэффициент корреляции $\rho_{12}\approx$0,99.

На рисунках 3.10 и 3.11 показаны зависимости вероятностей ОК 1-го и 2-го рода от погрешности измерений при разных значениях коэффициента корреляции контролируемых СИП в предположении статистической независимости погрешностей измерений [109].

Аргументом кривых является соотношение δ_0/δ, где δ_0 – погрешность измерения, δ – половина интервала допускаемых значений, $\delta = -\Phi_н = \Phi_в$.

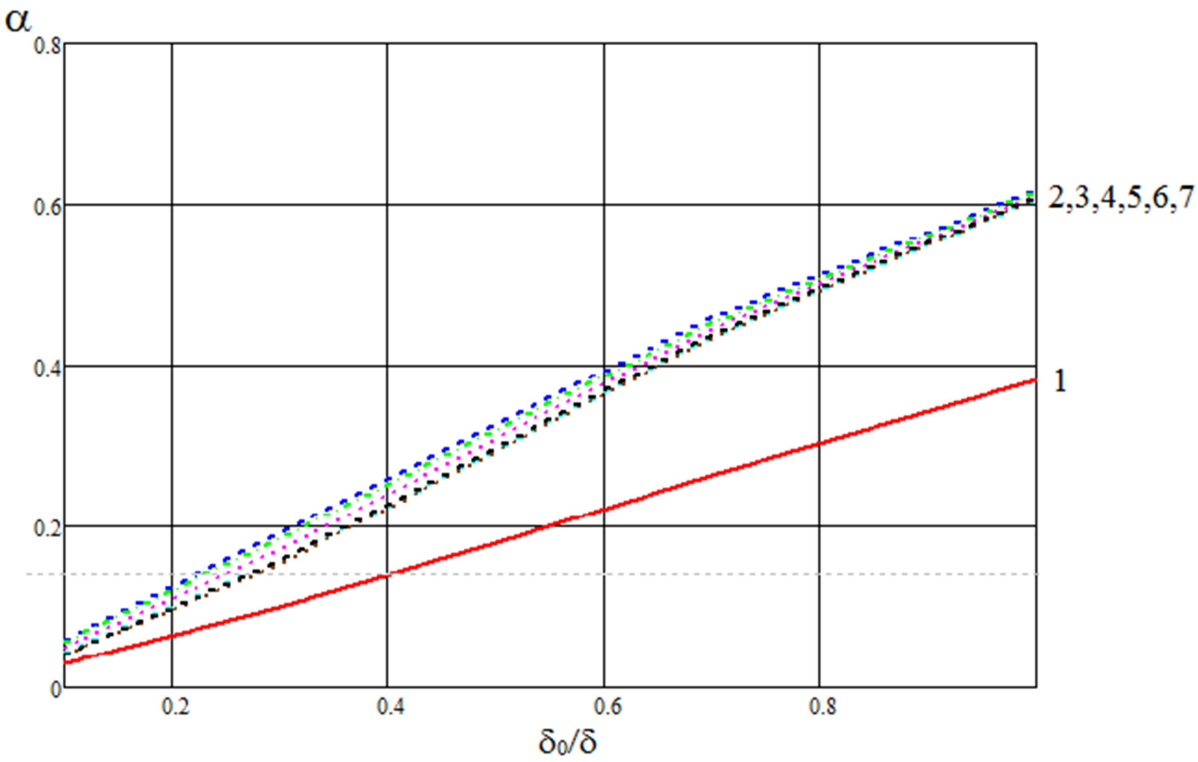


Рисунок 3.10 – Вероятность ошибки 1-го рода

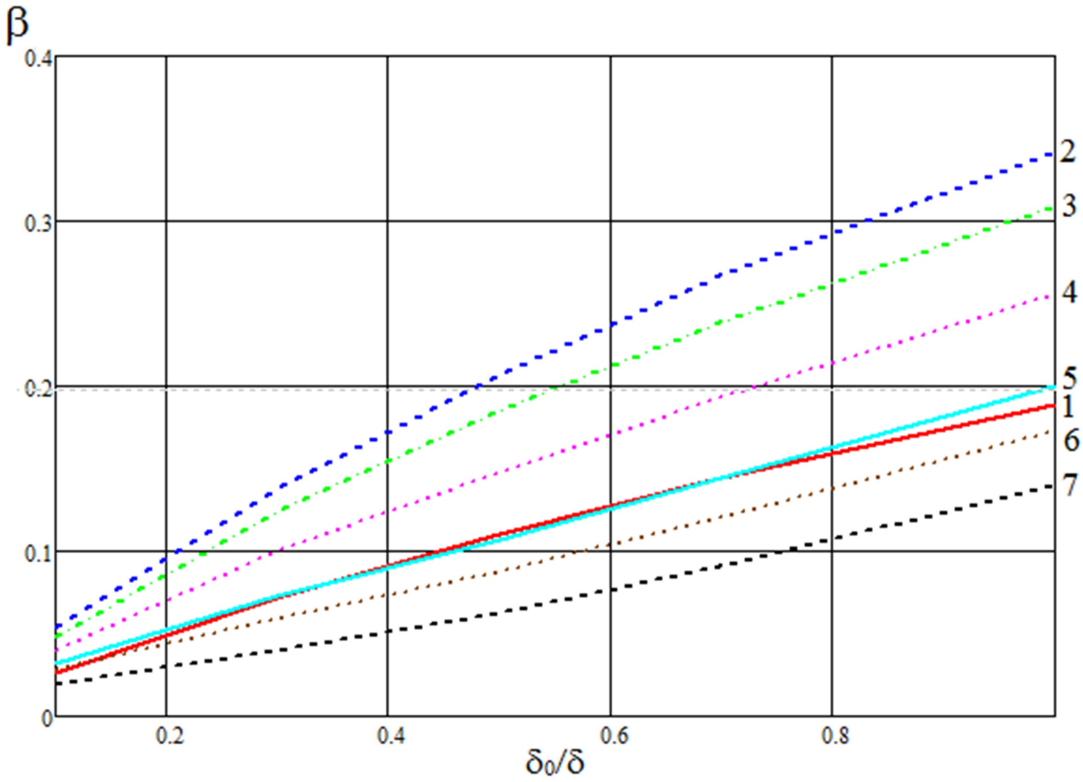


Рисунок 3.11 – Вероятность ошибки 2-го рода

По результатам моделирования установлено, что при контроле двух параметров вероятности ошибок контроля выше, чем вероятности ошибок при контроле по одному параметру, что является логичным, поскольку ошибка при контроле в целом может быть вызвана как ошибкой по первому параметру или по второму, так и по двум параметрам сразу. При этом если значения отдельных контролируемых параметров статистически независимы, то и ошибки контроля будут также независимы.

Установлено, что в случае статистической зависимости параметров увеличение коэффициента корреляции приводит к уменьшению вероятности ошибок контроля. При этом стоит отметить, что статистическая зависимость параметров слабо влияет на вероятность появления ошибки контроля 1-го рода и в большей степени оказывает влияние на вероятность возникновения ошибок контроля 2-го рода. Увеличение коэффициента корреляции приводит к уменьшению ошибок 2-го рода и при $\rho_{12}=1$ составляет меньшее значение, чем вероятность ошибки контроля 2-го рода, определяемой по одному контролируемому параметру. Это можно объяснить тем, что контроль по двум параметрам при их коэффициенте корреляции $\rho_{12}\approx 1$ эквивалентен двукратному контролю по одному параметру, что повышает достоверность контроля.

Аналогичное компьютерное моделирование было выполнено для случая статистической зависимости погрешностей спектральных измерений при допущении независимости контролируемых спектроскопических параметров [109].

Полученные результаты моделирования зависимости вероятностей ошибок контроля 1-го и 2-го рода от погрешности спектральных измерений при разных значениях коэффициента корреляции представлены на рисунках 3.12 и 3.13 соответственно. Аргументом кривых также является соотношение δ_0/δ, где δ_0 – погрешность измерения, δ – половина интервала допускаемых значений, $\delta = -\Phi_н = \Phi_в$.

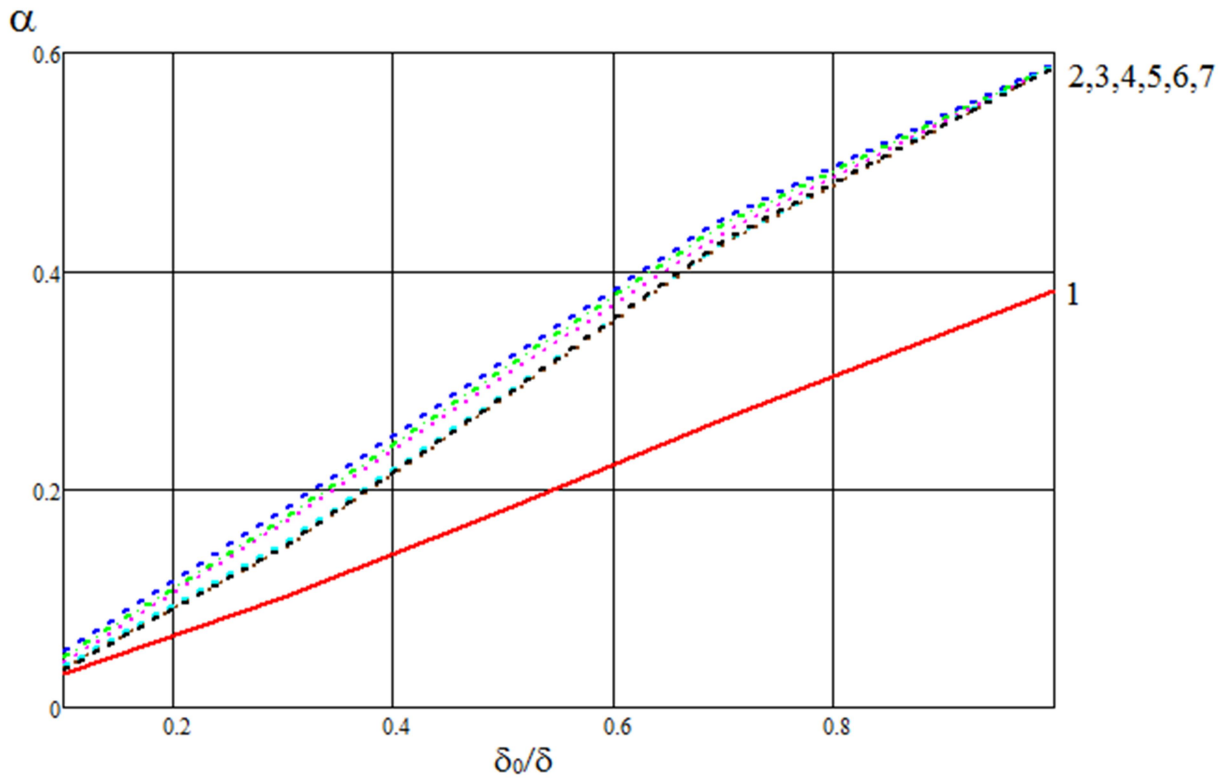


Рисунок 3.12 – Вероятность ошибки 1-го рода

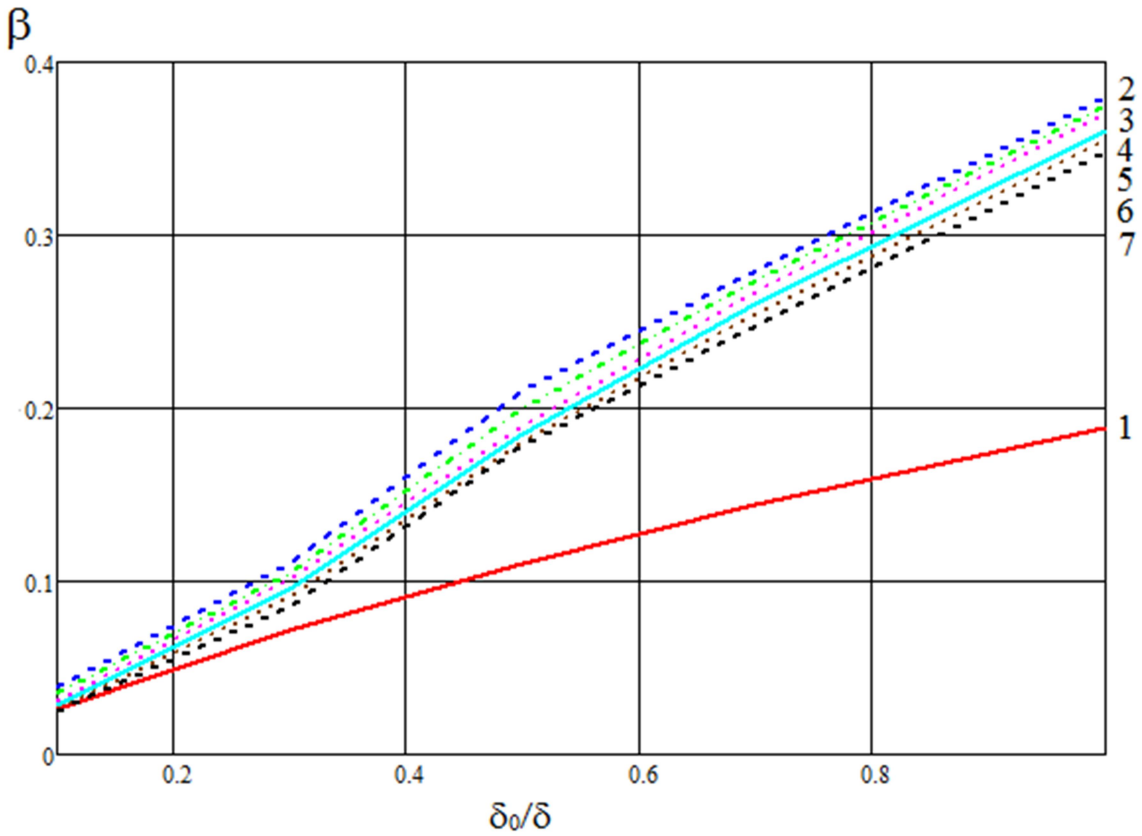


Рисунок 3.13 – Вероятность ошибки 2-го рода

Из графиков видно, что при статистической зависимости погрешностей спектральных измерений вероятности ошибок 1-го и 2-го рода, а, следовательно, и достоверность контроля, слабо зависят от коэффициента корреляции.

На основе полученных результатов компьютерного моделирования можно сделать вывод:

Поскольку при спектроскопическом контроле по множеству параметров статистическая зависимость контролируемых спектроскопических параметров оказывает влияние на вероятность ошибки 2-го рода и практически не влияет на вероятность ошибки 1-го рода, а статистическая зависимость погрешности спектральных измерений имеет слабое влияние на достоверность контроля, оптимальным правилом принятия решения при спектроскопическом контроле 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.

Используя приведенные в данной главе формулы и располагая информацией о распределении погрешности измерения и контролируемых спектроскопических параметров, можно решить следующие задачи:

1. Определить погрешность спектрального прибора контроля, обеспечивающую не превышение допускаемого значения вероятности ошибки контроля 1-го рода.

Эта задача возникает в тех случаях, когда необходимо выбрать процедуру контроля процесса горения при заданных средствах контроля и заданном значении вероятности ошибки, а также оценить целесообразность применения имеющихся средств контроля.

2. Определить зависимость между точностью измерения и вероятностью возникновения ошибки контроля 1-го рода при условии, что в

процессе контроля не превышается допускаемое значение вероятности ошибки 2-го рода, что позволяет обосновать необходимую точность измерения.

3. Установить взаимосвязь между вероятностями ошибок контроля при ограниченной точности измерения. Знание этой зависимости может быть полезным при технико-экономическом обосновании требований, предъявляемых к результатам контроля процессов горения.

3.7 Обеспечение требуемой достоверности спектроскопического контроля

При допусковом контроле качества одним из способов обеспечения достоверности результатов контроля является сужение контрольных допусков и введение дополнительных требований, например, ограничение средних рисков потребителя и изготовителя или минимизация одного из рисков при ограничении другого [173]. В радиотехнике при построении оптимального правила принятия решения также применяют различные критерии, накладывающие ограничения или минимизирующие вероятности ошибок 1-го и 2-го рода, например, критерий Байеса, критерий Неймана-Пирсона, критерий минимакса, критерий Вальда и т.п. [153, 175].

Аналогичный подход можно применить и при разработке оптимального правила принятия решения задачи контроля процессов горения на основе спектроскопического метода [91].

Для случая двустороннего спектроскопического контроля при штатном протекании процесса, чему соответствуют неравенство (3.36), каждый СИП должен находиться в заранее заданных пределах. Поскольку при контроле спектроскопическим методом распределение контролируемых СИП описывается *n*-мерным распределением, множество допускаемых значений этих параметров образуют некоторую область значений.

Для примера на рисунке 3.14 представлено двумерное распределение, вписанное в параллелепипед, являющийся областью допускаемых значений двух контролируемых спектроскопических параметров, где $\Phi_н$ и $\Phi_в$ – допускаемые нижние и верхние значения контролируемых параметров.

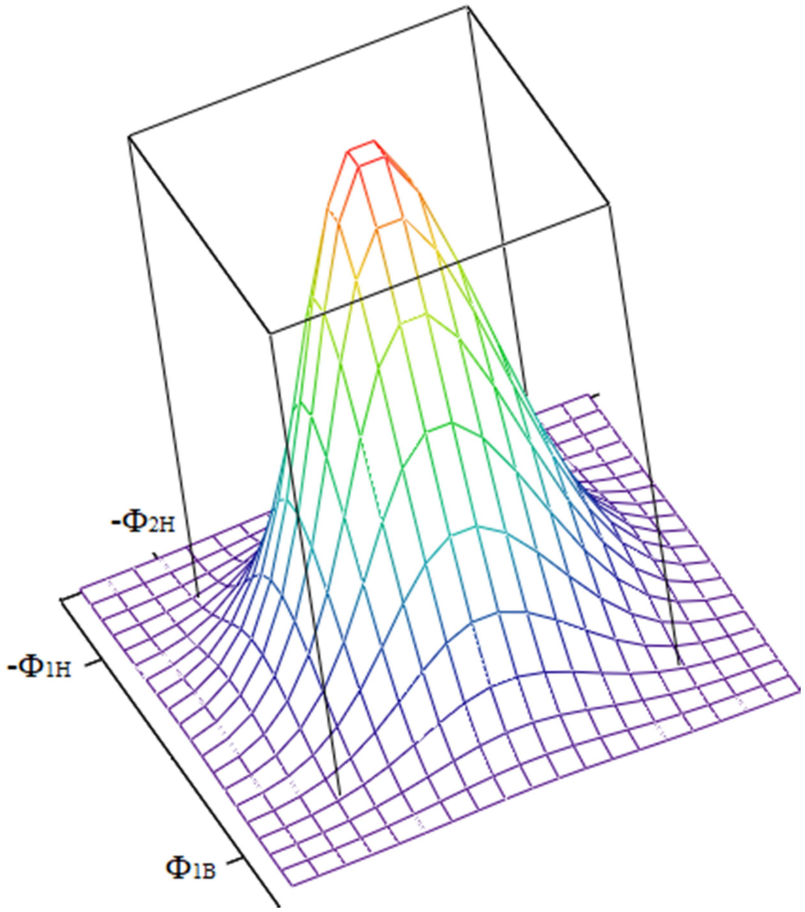


Рисунок 3.14 – Область допустимых значений двух контролируемых спектроскопических параметров

Таким образом, область допускаемых значений *n*-контролируемых спектроскопических параметров будет иметь форму n-мерного параллелепипеда.

На основании этого можно сделать вывод, что при разработке оптимального правила принятия решения в случае контроля спектроскопическим методом требуется определить границы такой оптимальной области допускаемых погрешностей спектральных измерений с учетом области допускаемых значений контролируемых СИП, при которой

будут обеспечены заданные требования к вероятностям ошибок контроля а, следовательно, и его достоверность.

Тогда соотношения (3.38) и (3.39), определяющие вероятности ошибок спектроскопического контроля 1-го и 2-го рода, можно переписать следующим образом [173]:

$$\alpha = 1 - \frac{\int\limits_A \ldots \int \int\limits_B \ldots \int p_\varphi(\cdot)\, p_\Delta(\cdot)\, di_1 \ldots di_n d\varphi_1 \ldots d\varphi_n}{\int\limits_A \ldots \int p_\varphi(\cdot)\, d\varphi_1 \ldots d\varphi_n} \tag{3.44}$$

и

$$\beta = 1 - \frac{\int\limits_A \ldots \int \int\limits_B \ldots \int p_\varphi(\cdot)\, p_\Delta(\cdot)\, di_1 \ldots di_n d\varphi_1 \ldots d\varphi_n}{\int\limits_{-\infty}^{\infty} \int \int\limits_B \ldots \int p_\varphi(\cdot)\, p_\Delta(\cdot)\, di_1 \ldots di_n d\varphi_1 \ldots d\varphi_n}, \tag{3.45}$$

где A и B – области допускаемых значений контролируемых спектроскопических параметров $\varphi_1, \ldots, \varphi_n$ и допускаемых значений фототока с выхода спектрального прибора $i_1, \ldots, i_n$, пропорциональных оценке отсчетных значений аппаратурного энергетического спектра $G_a(\omega_1), \ldots, G_a(\omega_n)$ для каждого контролируемого параметра, соответственно.

Как было обозначено выше при разработке оптимального (наилучшего) правила принятия решения задачи контроля применяют различные критерии [153, 175]. Так как результаты, полученные в п. 3.6 данной главы демонстрируют, что статистическая зависимость контролируемых спектроскопических параметров оказывает влияние на вероятность ошибки 2-го рода и практически не влияет на вероятность ошибки 1-го рода, а статистическая зависимость погрешности спектральных измерений имеет слабое влияние на достоверность контроля, оптимальным правилом принятия решения при спектроскопическом контроле будет являться то, которое

позволит минимизировать вероятность ошибки 1-го рода при ограничении сверху вероятности ошибки 2-го рода. При этом определение минимального допустимого значения вероятности ошибки 2-го рода необходимо проводить с учетом правильного выбора контролируемых параметров.

Тогда при отсутствии полных априорных данных и значений функций потерь при построении правила принятия решения в качестве оптимального критерия следует выбрать критерий Неймана-Пирсона [153, 175].

Согласно этому критерию, можно задать следующие условия [153, 175]:

$$\beta \le \beta_{доп} = const$$

и (3.46)

$$\alpha = \min .$$

Данный критерий обеспечивает минимум вероятности ошибки 1-го рода, при ограничении сверху вероятности ошибки 2-го рода.

Задача синтеза оптимального правила принятия решения по критерию Неймана-Пирсона состоит в определении минимума функционала [175, 181]:

$$F \equiv \alpha + c\beta, \quad (3.47)$$

где с – неопределенный множитель Лагранжа.

Отсюда следует, что границы оптимальной области допускаемых значений фототока с выхода спектрального прибора, которые соответствуют контролируемым СИП и содержат в себе информацию о погрешностях спектральных измерений, должны обеспечить минимум этого функционала.

Задачи, в которых требуется исследовать функционал на максимум или минимум, называются вариационными задачами [25]. Применим

вариационное исчисление при определении границы оптимальной области допускаемых значений результатов спектроскопических измерений.

Из соотношения (3.44) следует, что требование минимума вероятности ошибки 1-го рода, соответствует требованию максимума интеграла, стоящего в числителе соотношения (3.44). Тогда с учетом этого требования и выбранных условий оптимального критерия введем граничные условия для области *B,* изменив порядок интегрирования в соотношениях (3.44) и (3.45).

С учетом этих обозначений, преобразований и выбранных условий оптимального критерия область *B* должна удовлетворять следующим условиям [91]:

$$\Phi_1(B) = \int\limits_B \ldots \int \int\limits_A \ldots \int p_\varphi(\cdot)\, p_\Delta(\cdot)\, d\varphi_1 \ldots d\varphi_n di_1 \ldots di_n = \min \qquad (3.48)$$

и

$$\Phi_2(B) = \frac{\int\limits_B \ldots \int \int\limits_A \ldots \int p_\varphi(\cdot)\, p_\Delta(\cdot)\, d\varphi_1 \ldots d\varphi_n di_1 \ldots di_n}{\int\limits_B \ldots \int \int\limits_{-\infty}^{\infty} \ldots \int p_\varphi(\cdot)\, p_\Delta(\cdot)\, d\varphi_1 \ldots d\varphi_n di_1 \ldots di_n} = 1 - \beta_{доп}. \qquad (3.49)$$

Подставляя полученные соотношения (3.49) и (3.48) в соотношение (3.47), получаем функционал, минимум которого должна обеспечить граница *B*:

$$\Phi(B) \equiv \Phi_1(B) + c\Phi_2(B). \qquad (3.50)$$

Согласно теореме для функционалов, необходимое условие экстремума функционала Φ заключается в обращении в ноль его вариации $\delta\Phi$ [25]. Отсюда можно сделать вывод, что, если для любых приращений области δB,

вариация функционала обращается в ноль, область B обеспечивает минимум функционала (3.50).

Тогда, на основании решения уравнения Эйлера [25] и необходимого условия экстремума функционала соотношение (3.50) можно представить, как:

$$\delta\Phi = \int\limits_{\delta B}\dots\int\int\limits_{A}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n +$$

$$+c\left[\frac{\int\limits_{\delta B}\dots\int\int\limits_{A}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n}{\int\limits_{B}\dots\int\int\limits_{-\infty}^{\infty}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n}-\right. \qquad .(3.51)$$

$$\left.-\frac{\int\limits_{B}\dots\int\int\limits_{A}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n\cdot\int\limits_{\delta B}\dots\int\int\limits_{-\infty}^{\infty}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n}{\left(\int\limits_{B}\dots\int\int\limits_{-\infty}^{\infty}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n\right)^2}\right]=0$$

Учитывая граничное условие (3.48), полученное соотношение преобразуется к следующему виду:

$$\delta\Phi = \int\limits_{\delta B}\dots\int\int\limits_{A}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n +$$

$$c\left[\frac{\int\limits_{\delta B}\dots\int\int\limits_{A}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n}{\int\limits_{B}\dots\int\int\limits_{-\infty}^{\infty}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n}-\right. \qquad . \qquad (3.52)$$

$$\left.-\frac{(1-\beta_{\partial on})\int\limits_{\delta B}\dots\int\int\limits_{-\infty}^{\infty}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n}{\int\limits_{B}\dots\int\int\limits_{-\infty}^{\infty}\dots\int p_{\varphi}(\cdot)\,p_{\Delta}(\cdot)\,d\varphi_1\dots d\varphi_n di_1\dots di_n}\right]=0$$

Введем числовой множитель μ, который равен:

$$\mu = (1-\beta_{доп})\frac{c}{c+\int_B\ldots\int\int_{-\infty}^{\infty}\int p_\varphi(\cdot)\,p_\Delta(\cdot)\,d\varphi_1\ldots d\varphi_n di_1\ldots di_n}. \qquad (3.53)$$

Тогда соотношение (3.52) преобразуется к следующей форме:

$$\begin{aligned}&\int_{\delta B}\ldots\int\int_A\ldots\int p_\varphi(\cdot)\,p_\Delta(\cdot)\,d\varphi_1\ldots d\varphi_n di_1\ldots di_n = \\ &= \mu\int_B\ldots\int\int_{-\infty}^{\infty}\int p_\varphi(\cdot)\,p_\Delta(\cdot)\,d\varphi_1\ldots d\varphi_n di_1\ldots di_n.\end{aligned} \qquad (3.54)$$

Множитель Лагранжа c определяется по заранее заданной вероятности ошибки 2-го рода $\beta_{доп}$.

Если для всех **i**, лежащих на границе области B, выполняется условие:

$$\begin{aligned}&\int_A\ldots\int p_\varphi(\cdot)\,p_\Delta(\cdot)\,d\varphi_1\ldots d\varphi_n di_1\ldots di_n = \\ &= \mu\int_{-\infty}^{\infty}\int p_\varphi(\cdot)\,p_\Delta(\cdot)\,d\varphi_1\ldots d\varphi_n di_1\ldots di_n,\end{aligned} \qquad (3.55)$$

то соотношение (3.54) должно выполняться для любых приращений области δB.

Таким образом, получаем граничное условие, задающее область B [91]:

$$\frac{\int_A\ldots\int p_\varphi(\cdot)\,p_\Delta(\cdot)\,d\varphi_1\ldots d\varphi_n di_1\ldots di_n}{\int_{-\infty}^{\infty}\int p_\varphi(\cdot)\,p_\Delta(\cdot)\,d\varphi_1\ldots d\varphi_n di_1\ldots di_n} \geq \mu, \qquad (3.56)$$

где числовой множитель μ определяется по заранее заданной вероятности ошибки 2-го рода $\beta_{доп,}$, как и множитель Лагранжа c.

На основе полученного граничного условия (3.56), задающего область допускаемых значений результатов измерений контролируемых спектроскопических параметров, исходя из заданных допустимых вероятностей ошибок контроля, можно выбрать применяемый спектральный прибор, минимальные характеристики которого обеспечат требуемую достоверность проводимого контроля.

В качестве примера определим форму оптимальной области *B* при контроле двух статистически независимых спектроскопических параметров, распределение которых аппроксимируется нормальным законом.

Тогда распределения значений фототока с выхода спектрального прибора контроля также аппроксимируются нормальным законом. Математические ожидания полученных значений фототоков равны нулю, а средние квадратические отклонения равны σ_1 и σ_2, погрешности спектральных измерений этих параметров также статистически независимы, описываются нормальным законом и имеют средние квадратические отклонения σ_{01} и σ_{02}.

Поскольку контролируемые параметры и погрешности спектральных измерений статистически независимы, функции, определяющие распределения полученных значений фототока в данном случае можно представить в виде:

$$\iint\limits_{A} p_{\varphi}(i_1,i_2)\, p_{\Delta}(i_1-\varphi_1,i_2-\varphi_2)\, d\varphi_1 d\varphi_2 = u(i_1,i_2) = u(i_1)u(i_2)$$

и (3.57)

$$\int\limits_{-\infty}^{\infty} p_{\varphi}(i_1,i_2)\, p_{\Delta}(i_1-\varphi_1,i_2-\varphi_2)\, d\varphi_1 d\varphi_2 = v(i_1,i_2) = v(i_1)v(i_2),$$

где

$$u(i)=\frac{e^{\left\{-\frac{i^2}{2\left(\sigma^2+\sigma_0^2\right)}\right\}}}{\sqrt{2\pi\left(\sigma^2+\sigma_0^2\right)}}\left[F\left(\frac{1-\frac{\sigma^2 i}{\sigma^2+\sigma_0^2}}{\frac{\sigma\sigma_0}{\sqrt{\sigma^2+\sigma_0^2}}}\right)-F\left(\frac{-1-\frac{\sigma^2 i}{\sigma^2+\sigma_0^2}}{\frac{\sigma\sigma_0}{\sqrt{\sigma^2+\sigma_0^2}}}\right)\right]$$

и (3.58)

$$v(i)=\frac{e^{\left\{-\frac{i^2}{2\left(\sigma^2+\sigma_0^2\right)}\right\}}}{\sqrt{2\pi\left(\sigma^2+\sigma_0^2\right)}},$$

где F(·) – интеграл вероятности [153].

Для простоты расчета введем допущение, что погрешность спектрального измерения мала, следовательно, распределение погрешности измерения существенно меньше распределения контролируемых параметров, так что выполняется неравенство $\sigma_0 \le 0{,}1\sigma$.

Тогда, соотношения в (3.58) преобразуются к виду:

$$u(i)=\frac{e^{\left\{-\frac{i^2}{2\sigma^2}\right\}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\left[F\left(\frac{1-i}{\sigma_0}\right)-F\left(\frac{-1-i}{\sigma_0}\right)\right]$$

и (3.59)

$$v(i)=\frac{e^{\left\{-\frac{i^2}{2\sigma^2}\right\}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}.$$

Подставляя полученные соотношения в граничное условие (3.56), задающее область *B*, получим:

$$\left[F\left(\frac{1-i_1}{\sigma_{01}}\right)-F\left(\frac{-1-i_1}{\sigma_{01}}\right)\right]\left[F\left(\frac{1-i_2}{\sigma_{02}}\right)-F\left(\frac{-1-i_2}{\sigma_{02}}\right)\right]\geq\mu\,. \qquad (3.60)$$

При допущении малости погрешности спектральных измерений, т.е. $1/\sigma_{01}>1$ и $1/\sigma_{02}>1$, выражение (3.60) будет иметь вид:

$$\left[F\left(\frac{1-i_1}{\sigma_{01}}\right)\right]\left[F\left(\frac{1-i_2}{\sigma_{02}}\right)\right]\geq\mu\,. \qquad (3.61)$$

В этом случае границы области *B* имеют форму прямоугольника со сторонами b_1 и b_2, описывающего область допускаемых значений фототока с выхода спектрального прибора контроля, как показано на рисунке 3.15, где a_1 и a_2 – стороны прямоугольника, описывающего область допускаемых значений контролируемых параметров; $\Phi_н$ и $\Phi_в$ – допускаемые нижние и верхние значения контролируемых параметров; $I_н$ и $I_в$ – допускаемые нижние и верхние значения фототоков с выхода прибора, соответствующих контролируемым параметрам.

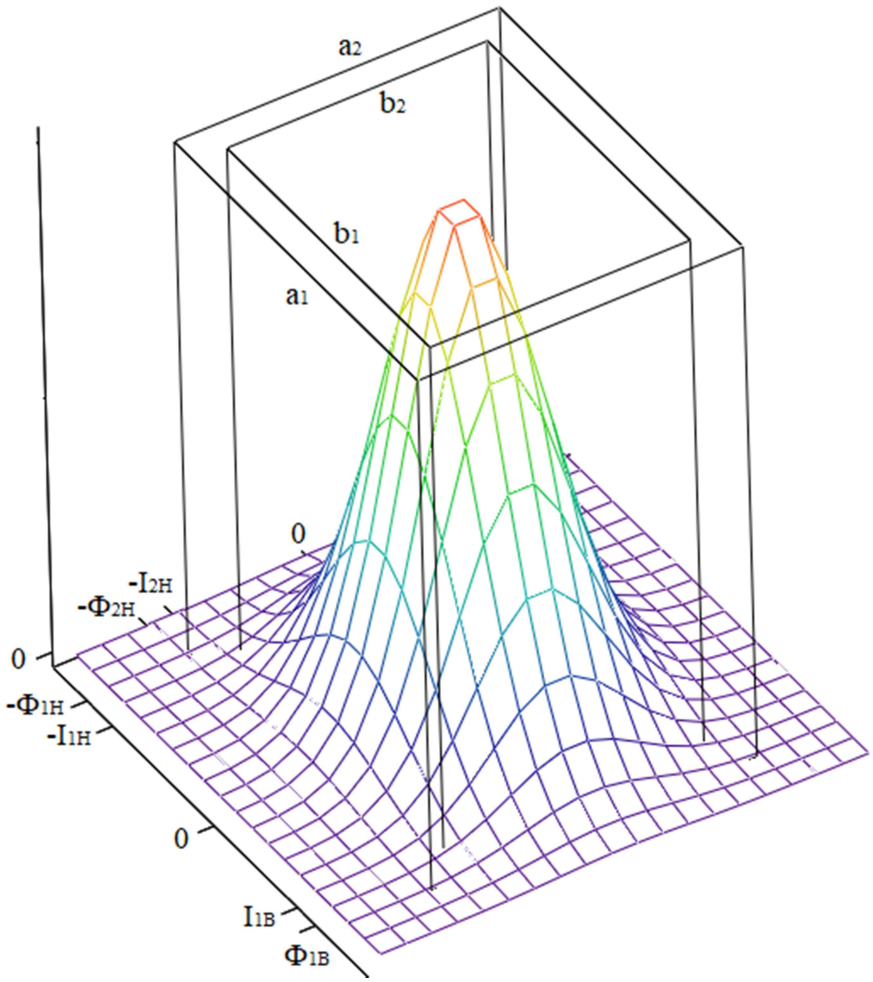


Рисунок 3.15 – Область допускаемых значений фототока с выхода спектрального прибора контроля

При этом уровень ограничения вероятности ошибки 2-го рода $\beta_{доп}$ из соотношения (3.46) будет определяться суммой уровней ограничения вероятности ошибки 2-го рода для первого и второго параметра $\beta_{1доп}$ и $\beta_{2доп}$, соответственно:

$$\beta_{1доп} + \beta_{1доп} = \beta_{доп}\,. \qquad (3.62)$$

На основании полученных соотношений было выполнено компьютерное моделирование, по результатам которого получены оптимальные стороны прямоугольника, описывающего область допускаемых значений фототока, и вероятности ошибок 1-го рода.

Моделирование выполнялось при следующих исходных данных: $\beta_{доп}$ = 0,01, $\frac{\sigma_{01}}{\sigma_1} = 0,1$, $\frac{\sigma_{02}}{\sigma_2} = 0,08$. Результаты расчета приведены в таблице 3.1, где α_1 и α_2 - вероятности ошибок 1-го рода для первого и второго параметров, соответственно, α_Σ - общая вероятность ошибки 1-го рода.

Таблица 3.1 – Результаты компьютерного моделирования

№	$\beta_{доп}$	$\beta_{1доп}$	$\beta_{2доп}$	$b_1\backslash a_1$	$b_2\backslash a_2$	α_1	α_2	α_Σ
1	0,01	0,009	0,001	0,94	0,79	0,058	0,103	0,161
2	0,01	0,008	0,002	0,92	0,82	0,061	0,082	0,143
3	0,01	0,007	0,003	0,91	0,85	0,067	0,069	0,137
4	0,01	0,006	0,004	0,89	0,87	0,072	0,062	0,134
5	0,01	0,005	0,005	0,88	0,88	0,073	0,061	0,134
6	0,01	0,004	0,006	0,85	0,90	0,088	0,059	0,147
7	0,01	0,003	0,007	0,83	0,92	0,097	0,054	0,151
8	0,01	0,002	0,008	0,81	0,95	0,112	0,046	0,158
9	0,01	0,001	0,009	0,78	0,98	0,127	0,038	0,165

Как показали результаты компьютерного моделирования, для выбранного случая и исходных данных при применении оптимального правила принятия решения на базе критерия Неймана-Пирсона минимальный суммарный уровень значимости α_Σ, т.е. вероятность ошибки 1-го рода, соответствующий 0,134, достигается при границах оптимальной области допускаемых значений фототока со сторонами прямоугольника: $(b_1\backslash a_1)\backslash(b_2\backslash a_2)$ равными (0,89)/(0,87) и (0,88)/(0,88).

3.8 Задача разработки результативной методики контроля

Из вышеизложенного следует, что достоверность проводимого контроля процесса горения спектроскопическим методом зависит от

правильного выбора контролируемых спектроскопических информационных параметров и погрешностей спектральных измерений. При этом актуальной проблемой является разработка результативной методики измерений и контроля, обеспечивающие требуемую достоверность спектроскопического контроля процессов горения.

Между измерением и контролем существует одно принципиальное отличие. Результатом измерения всегда является число или совокупность чисел, дающие значение измеряемой величины, следовательно, в результате множества измерений получают множество чисел из некоторого интервала возможных значений. Результатом контроля является всегда одно из двух решений: «контролируемый параметр соответствует заданному диапазону» или «контролируемый параметр не соответствует заданному диапазону», т.е. множество результатов контроля состоит из двух элементов [173]. При этом измерение может являться составной частью контроля, и по результатам этого измерения принимается решение задачи контроля.

Под методикой измерений в соответствии с ГОСТ Р 8.563-2009 понимается «совокупность конкретно описанных операций, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленными показателями точности, в качестве которых могут быть использованы характеристики погрешности измерений» [182].

Так как измерение является составной частью контроля, то по аналогии можно сделать вывод, что контроль должен выполняться с заданной достоверностью, которая характеризуется вероятностями ошибок первого и второго рода [173]. При этом применяемые методики измерений и контроля должны быть результативными, т.е. обеспечивать решение поставленных задач с заданной достоверностью применяемыми приборами с минимальными допустимыми характеристиками.

Стоит отметить, что для повышения достоверности проводимого контроля также необходимо учитывать априорную информацию о свойствах контролируемого процесса горения и используемых приборов контроля. Эта

информация, как было показано, наиболее полно может быть задана в виде распределений значений контролируемого параметра и погрешностей измерений.

Таким образом, решение задачи разработки методики спектроскопического контроля процессов горения позволит обеспечить требуемую достоверность контроля.

В таком случае разработка результативной методики контроля процессов горения методами оптической спектроскопии предполагает выполнение следующих операций:

1. Правильного выбора контролируемых спектроскопических информационных параметров, т.е. тех спектральных линий или спектральных участков (интервалов), по интенсивности которых однозначно можно судить о состоянии и динамике контролируемого процесса горения. Определение их взаимного соотношения и оптимального количества (минимально необходимого) контролируемых параметров для обеспечения требуемой достоверности конкретной практической задачи контроля.

2. Определения допускаемых вероятностей ошибок контроля, учитывая предполагаемый ущерб в результате их появления, и критериев правила принятия решений при проводимом контроле.

3. Определения применяемых при контроле оптимальных допускаемых значений для каждого контролируемого параметра.

4. Определения оптимального значения допускаемой погрешности измерений для каждого параметра, что определяет выбор применяемых для контроля спектральных приборов.

5. Определения оптимальной процедуры контроля каждого параметра и их совокупности (с учетом иерархии), что оказывает влияние на оперативность проводимого контроля.

На основе сформулированных вышеперечисленных операций была разработана методика подготовки и проведения контроля методами

оптической спектроскопии и успешно использована при решении задачи контроля горения газообразных углеводородов.

Результаты разработки методики подготовки и проведения контроля спектроскопическим методом, а также результаты ее экспериментальной отработки приведены в пятой главе.

3.9 Выводы по главе 3

1. Разработан универсальный спектроскопический метод контроля процессов горения, основанный на регистрации, анализе и сопоставлении множества спектроскопических информационных параметров, которые могут быть получены как при раздельном, так и при комбинированном применении различных методов оптической спектроскопии, и отличающийся тем, что описывает процедуру контроля, технические средства и спектроскопические параметры в рамках единого математического аппарата.

2. Показано, что при описании погрешностей спектральных измерений критерием, определяющим точность измерения спектральным прибором контроля при наличии стационарных случайных воздействий на его входе, является среднеквадратическая погрешность. Среднеквадратическая погрешность включает в себя как систематическую составляющую погрешности спектрального прибора, так и случайную, и может быть определена через его аппаратную функцию.

3. Приведены результаты компьютерного моделирования, демонстрирующие зависимость ошибок контроля 1-го и 2-го рода от составляющих среднеквадратической погрешности. Показано, что систематические погрешности оказывают большее влияние на результат контроля, чем случайные, поэтому необходимо тщательно подходит к вопросу калибровки спектральных приборов контроля перед измерениями, чтобы исключить влияние систематической погрешности на результат контроля.

4. Введены информационные характеристики спектрального прибора контроля, которые могут служить критериями при сравнении спектральных приборов контроля разного типа по их результативности и 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.

5. Показано, что результатом спектроскопического измерения являются значения фототока, пропорциональные оценке аппаратурного энергетического спектра анализируемого излучения на каждой анализируемой частоте ω_k из всего рабочего диапазона. Значения фототока соответствуют истинным значениям спектроскопических информационных параметров $\varphi(\omega_k)$, отражающих протекание и состояние контролируемого процесса, и подлежат дальнейшей обработке с целью решения контроля.

6. Показано, что в случае спектроскопического контроля, выполняемого по множеству параметров, для определения ошибок 1-го и 2-го рода необходимо располагать исчерпывающим описанием совместных распределений контролируемых спектроскопических параметров и погрешностей спектральных измерений, которые определяются в основном погрешностью применяемого прибора.

7. Показано, что при статистической зависимости контролируемых спектроскопических параметров в предположении статистической независимости погрешностей измерений, вероятность ошибки контроля 2-го рода уменьшается с увеличением коэффициента корреляции параметров, а вероятность ошибок контроля 1-го рода практически остается без изменений. При этом статистическая зависимость погрешности измерений имеет слабое влияние на вероятности ошибок контроля.

8. 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. Кроме того, минимизировать вероятность ошибки 2-го рода возможно путем правильного выбора контролируемых параметров, имеющих статистическую зависимость, что определяется на этапе подготовки к контролю.

9. Было предложено для обеспечения требуемой достоверности контроля с учетом выбранного правила принятия решения ввести дополнительные ограничения заданных пределов, в которых должны находиться результаты измерений контролируемых спектроскопических параметров.

10. Получено граничное условие, задающее область допускаемых значений результатов измерений контролируемых спектроскопических параметров, на основании которого, исходя из заданных допустимых вероятностей ошибок контроля, можно выбрать применяемый спектральный прибор, минимальные характеристики которого обеспечат требуемую достоверность проводимого контроля.

11. Сформулированы основные операции, которые должна включать в себя методика подготовки и проведения спектроскопического контроля, позволяющая обеспечить требуемую достоверность контроля. Результаты разработки методики и ее успешной экспериментальной отработки при решении задачи контроля горения газообразного углеводородного топлива методами оптической спектроскопии приведены в пятой главе.

12. Разработан спектроскопический метод контроля, который позволяет:

- Проводить контроль процессов горения газообразных углеводородов с повышенной достоверностью по сравнению с существующими методами контроля путем как раздельного, так и комбинированного применения различных методов оптической спектроскопии. Повышение достоверности достигается тем, что в отличие от традиционных методов контроля спектроскопический выполняет контроль на основе измерения первичного параметра, характеризующего состояние

процесса горения, – спектральной характеристики излучения, испускаемого непосредственно очагом горения.

- Сформировать требования к минимально необходимым характеристикам приборов, обеспечивающих требуемую достоверность контроля, исходя из заданных допустимых вероятностей ошибок 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.
- Разработать результативную методику подготовки и проведения контроля процессов горения, обеспечивающую требуемую достоверность контроля при применении технических средств с минимально необходимыми характеристиками.

13. Основные результаты данной главы опубликованы в работах [81, 91, 106, 109, 114, 115, 117, 132].

4 Техническая реализация приборов контроля в форме оптических спектральных приборов

В рамках проведения научных исследований были исследованы и разработаны такие спектральные приборы с передачей анализируемых сигналов по оптическому волокну, как многоканальный оптический спектрометр [79, 84, 87, 130, 145] и дифракционный спектральный прибор на базе решетки [116, 119, 121, 123, 146, 147]. Были исследованы вопросы улучшения технических характеристик разрабатываемых спектральных приборов контроля, в частности их чувствительности и разрешающей способности. Также были исследованы вопросы, связанные с передачей анализируемых излучений по ОВ, исследованы возникающие при этом потери и искажения передаваемого сигнала и их влияние на результат спектроскопических измерений, были разработаны методы коррекций этих искажений при обработке результатов спектрального измерения [119, 120, 131, 133, 148].

4.1 Оптические спектральные приборы с передачей анализируемых сигналов по оптическому волокну

В патентах РФ [134, 135] и работах [78, 79, 84, 87, 130, 145] был предложен принцип построения многоканального оптического спектрометра, в котором спектральное разложение оптического излучения осуществляется путем применения набора узкополосных интерференционных оптических фильтров.

Оптическая схема МОС приведена на рисунке 4.1, где ОК – объект контроля (контролируемый процесс), ФО – формирующая оптика, ВОЖ – волоконно-оптический жгут, Л1 - первая коллимирующая линза, ОФ – оптический фильтр, Л2 – вторая коллимирующая линза, БУФ – блок узкополосной фильтрации, Ф – фотоприемники, БПЦО – блок последетекторной цифровой обработки; К –компьютер.

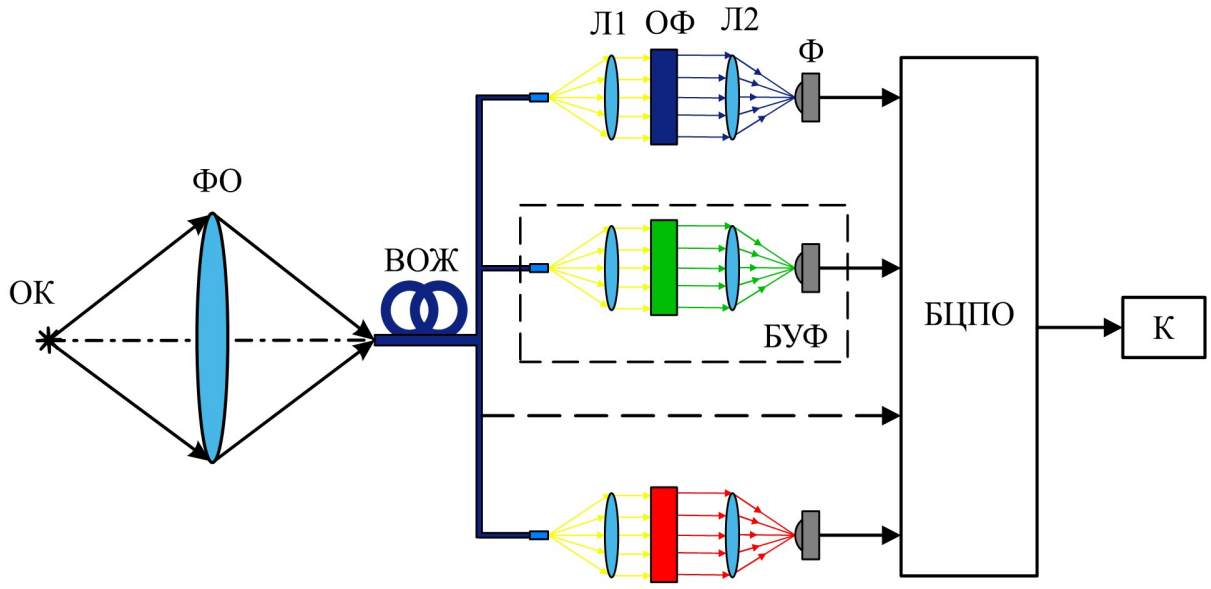


Рисунок 4.1 – Оптическая схема МОС

Применение ВОЖ обусловлено не только необходимостью переноса спектрального прибор контроля на заданное расстояние от контролируемого объекта, что позволяет исключить воздействие на прибор неблагоприятных условий окружающей среды, но и обеспечением ввода оптического излучения в БУФ, каждый из которых содержит узкополосный оптический фильтр, настроенный на определенную длину волны.

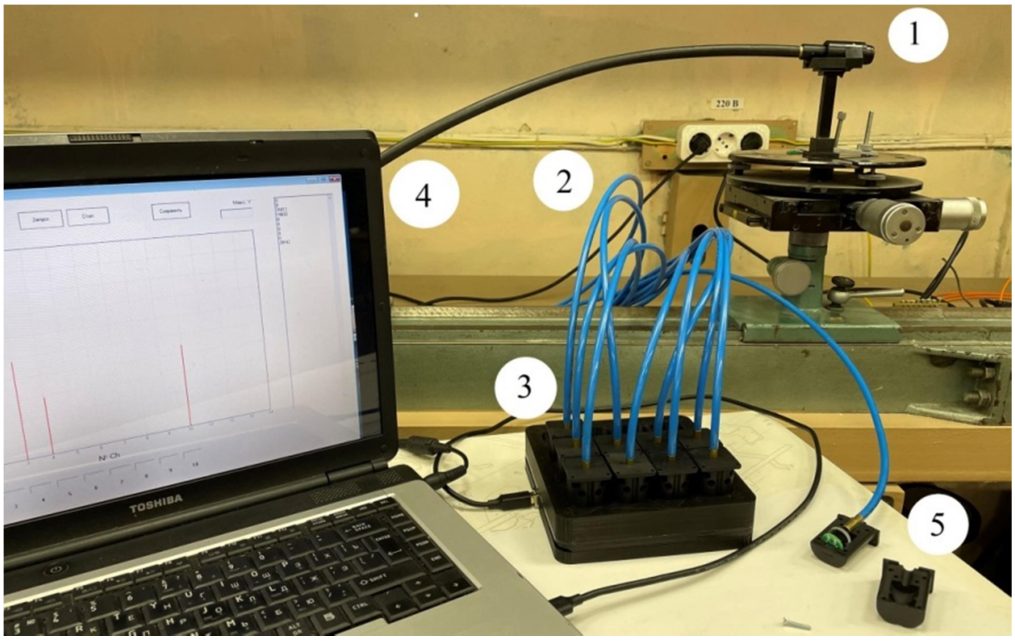
В многоканальном спектрометре полоса пропускания узкополосного фильтра определяет его разрешающую способность, поэтому свойства падающего волнового фронта ОИ, а именно его неоднородность, не оказывают на нее влияния. Эта особенность разработанного спектрометра позволяет применить для передачи анализируемого излучения не одно ОВ, а жгут волокон, что значительно повышает его чувствительность.

Набор блоков узкополосной фильтрации, количество которых определяется необходимым числом контролируемых параметров (анализируемых длин волн), позволяет сосредоточить спектрально-селективные элементы на определенном участке спектра, что дает

возможность анализировать конкретные спектральные участки, а не весь диапазон, как в случае дифракционных спектральных приборов.

Функциональное назначение БПЦО заключается в регистрации уровней сигналов с фотоприемника каждого канала прибора после их фотодетектирования и последующей их обработке, после чего спектроскопическая информация о контролируемом процессе горения передается на компьютер для отображения в воспринимаемом виде.

Было разработано несколько модификаций макетов МОС и проведены их экспериментальные исследования. Полученные результаты отражены в ряде работ [78, 79, 84, 87, 130, 145] и отчетов по НИР [139, 141, 143, 144]. Фотография одной из модификаций макета МОС приведена на рисунке 4.2.



1 – формирующая оптика, 2 – ВОЖ, 3 – блоки узкополосной оптической фильтрации с блоком последетекторной цифровой обработки в едином конструктивном исполнении, 4 – компьютер, 5 – блок узкополосной оптической фильтрации в разобранном виде

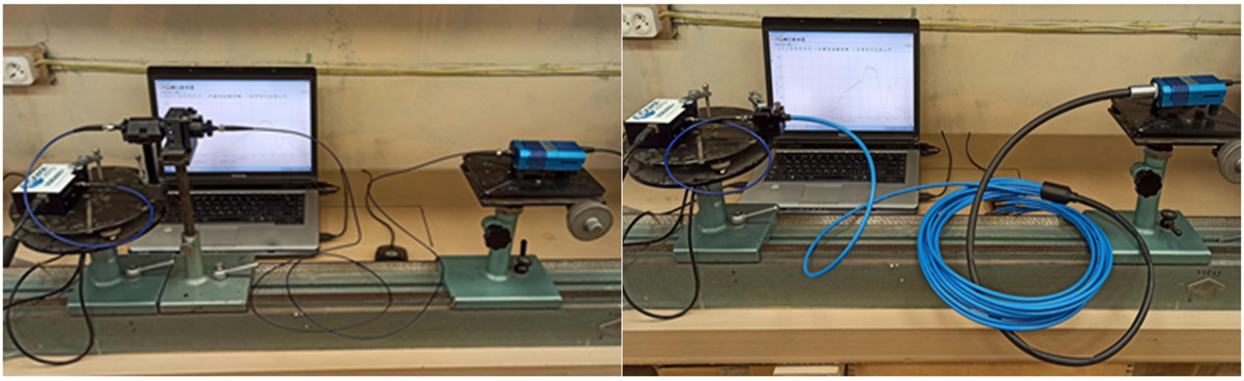
Рисунок 4.2 – Макет многоканального оптического спектрометра

В данном макете реализовано 10 каналов (при желании 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.

Было разработано программное обеспечение, позволяющее отображать на компьютере полученную спектроскопическую информацию, поступающую с каждого канала, в удобном для оператора виде. Информация отображается в виде линейчатого спектра, уровень вертикальной линии (т.е. значение по оси Y) соответствует интенсивности анализируемого оптического излучения.

Зависимость чувствительности спектрального прибора от применяемого типа ВОСП была установлена экспериментально [143, 144] через определение уровня энергетических потерь, возникающих при передаче анализируемого сигнала по одному многомодовому волокну и по волоконно-оптическому жгуту, состоящего из 100 шт. волокон с одним общим входом и десятью выходами по 10 шт. волокон каждый. На рисунке 4.3 представлены фотографии экспериментального стенда ВОСП на основе одного многомодового ОВ и ВОСП на основе ВОЖ.



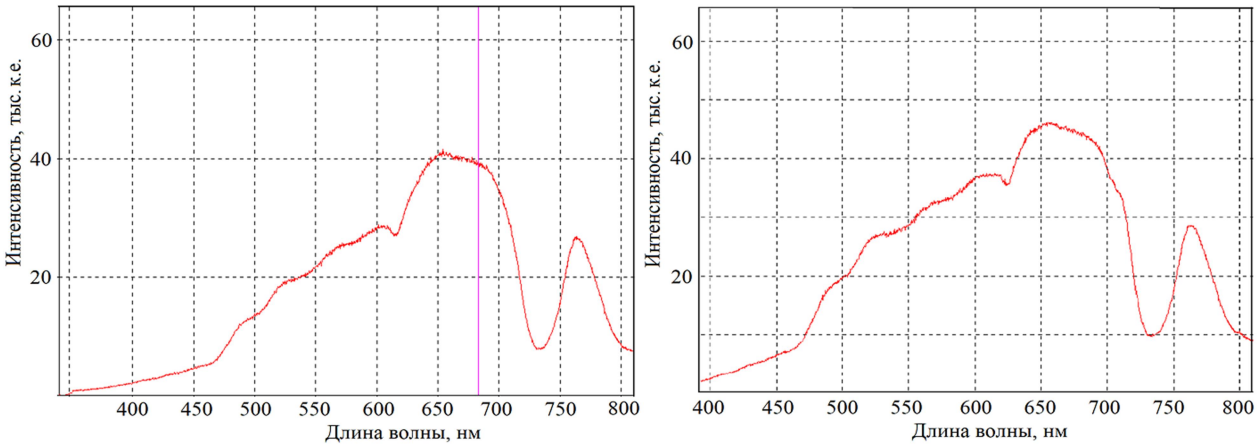
а) б)

а) ВОСП на основе многомодового ОВ; б) ВОСП на основе ВОЖ

Рисунок 4.3 – Фотографии экспериментального стенда ВОСП для исследования энергетических потерь

Были специально разработаны блоки ввода ОИ, обеспечивающие его максимально эффективный ввод в волокно и ВОЖ.

Энергетические потери были определены путем измерения эталонным спектрометром USB2000+ спектра широкополосного излучения эталонного источника LS-1 при его передаче по ВОСП разного типа. Результаты регистрации спектра широкополосного ОИ приведены на рисунке 4.4



а) б)

а) после многомодового ОВ; б) после ВОЖ

Рисунок 4.4 – Спектра широкополосного излучения после прохождения ВОСП разного типа

В результате эксперимента установлено, что энергетические потери ОИ при применении ВОСП на основе одного многомодового ОВ выше на 15,8 % по отношению ВОСП на основе ВОЖ.

На основании полученных результатов можно сделать вывод:

Учитывая, что разрешающая способность многоканального оптического спектрометра определяется только полосой пропускания оптического фильтра [129], и на нее не влияют искажения сигнала, возникающие при его передаче по оптическому волокну, применение волоконно-оптического жгута позволяет увеличить чувствительность прибора более чем на 15 %.

Был предложен способ повышения разрешающей способности МОС путем применения спектрально-селективного элемента в форме узкополосного оптического фильтра, на одной стороне которого нанесены штрихи в виде чередующихся прозрачных и непрозрачных полос,

параллельных друг другу. На данное решение получен патент РФ [136]. Изображение такого элемента представлено на рисунке 4.5.

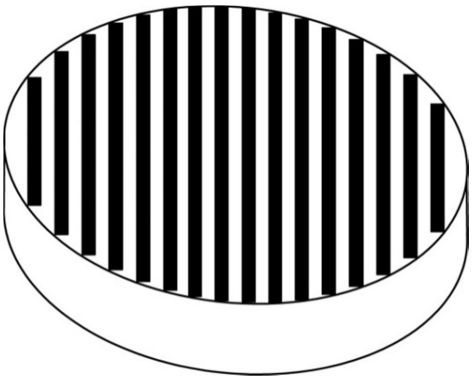


Рисунок 4.5 – Спектрально-селективный элемент

Спектрально-селективный элемент позволяет проводить анализ спектра оптических сигналов в заранее определенных участках, перекрывающих весь интересующий диапазон анализа с высокой разрешающей способностью, которая в конечном счете определяется плотностью нанесенных штрихов. Выбор заранее определенных участков обусловлен конкретной решаемой практической задачей и задается полосами пропускания узкополосных оптических фильтров.

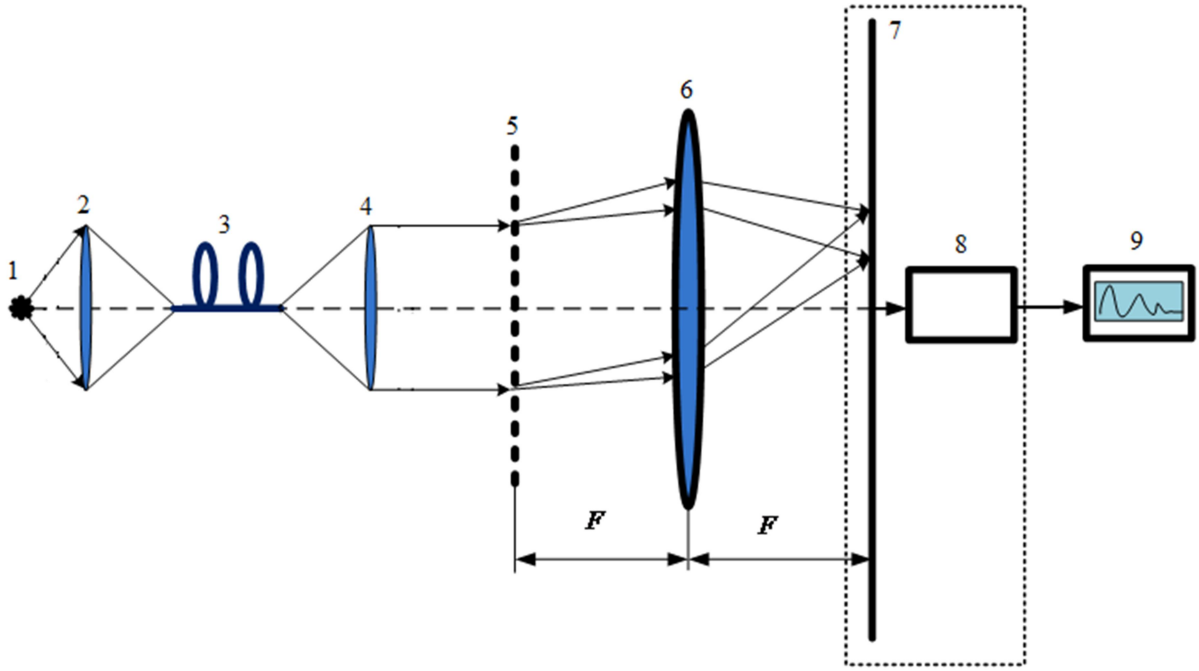
Таким образом, при применении в блоке узкополосной фильтрации такого элемента в многоканальном спектрометре имеет место двойное спектральное разложение анализируемого широкополосного оптического излучения. Первичное спектральное разложение осуществляется по принципу узкополосной фильтрации в N параллельных каналах, каждый из которых содержит спектрально-селективный элемент, настроенный на определенную длину волны. После узкополосной фильтрации выполняется вторичное спектральное разложение - анализируемое оптическое излучение дифрагирует на решеткоподобной структуре (аналог - дифракционная решетка), нанесенной на одну из сторон оптического фильтра, и спектральные составляющие разделяются по направлению. Двойное спектральное разложение позволяет получить высокое разрешение в заданном участке спектра.

Для фотодетектирования оптического сигнала, прошедшего спектральную обработку, должна быть применена ПЗС-структура.

Штрихи могут быть нанесены путем напыления металла (например, хрома) или другого оптически непрозрачного материала в соответствии с заданной топологией на одну из сторон оптического фильтра. Метод напыления накладывает ограничения на минимально возможный период нанесенных штрихов, связанные с технологическими особенностями метода. Для получения штриховой структуры с более мелким периодом, что приведет к увеличению разрешающей способности, возможно изготовление в обратной последовательности: на основании фильтра, изготовленного, например, из оптического стекла, сначала формируют штрихи по технологии с применением алмазного резца, после этого идет процесс напыления тонких пленок, образующих структуру узкополосного интерференционного оптического фильтра и обеспечивающих необходимые фильтрующие свойства фильтра.

В рамках выполнения научных исследований по тематике применения оптической спектроскопии в задачах контроля процессов горения ряд исследований был посвящен разработке оптического спектрального прибора на базе дифракционной решетки [116, 119, 121, 123, 141, 143, 146, 147].

Оптическая схема дифракционного спектрального прибора приведена на рисунке 4.6.



1 – объект контроля - источник оптического излучения; 2 – блок ввода оптического излучения; 3 – оптическое волокно; 4 - блок вывода; 5 – диспергирующий элемент; 6 – камерный объектив; 7 – ПЗС-детектор; 8 – блок последетекторной цифровой обработки; 9 – компьютер

Рисунок 4.6 - Оптическая схема ДСП

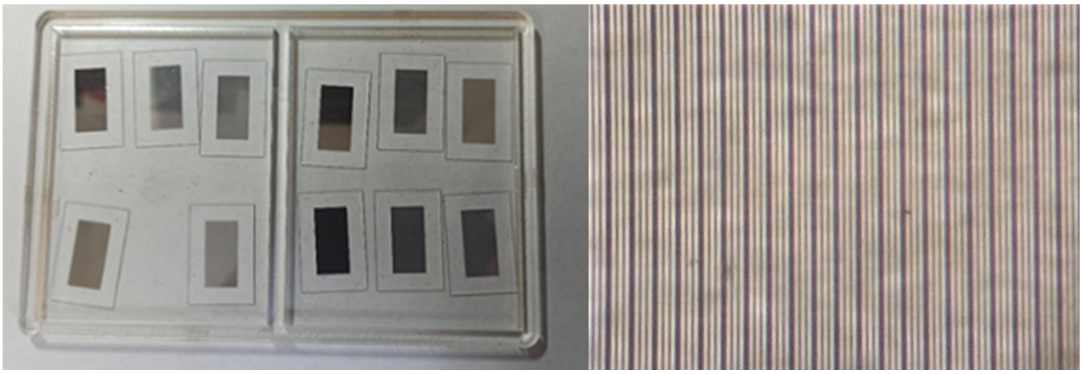
Дифракционный спектральный прибор содержит последовательно расположенные и оптически связанные волоконно-оптическую систему передачи анализируемых сигналов, состоящую из блока ввода оптического излучения в волокно, оптического волокна и блока вывода, диспергирующий элемент - дифракционную решетку, камерный объектив, ПЗС-детектор и блок последетекторной цифровой обработки.

Спектральный прибор с ДР является одним из наиболее распространённых приборов. Несмотря на широкое применение и многолетнюю историю развития и совершенствования, в приборе такого типа имеется существенный недостаток – спектральный анализ ведется в низших порядках (обычно в первом или в лучшем случае – во втором).

Вместе с тем известно, что в более высоких порядках следует ожидать улучшения разрешающей способности. В этом аспекте был выполнен ряд

работ по исследованию, разработке и внедрению новых типов дифракционных решеток, позволяющих выполнять спектроскопические измерения в высших порядках, и построению на их основе спектрального прибора с передачей анализируемого излучения по оптическому волокну [116, 119, 121, 123, 146, 147]. Перераспределение в высшие порядки интенсивности дифрагированного оптического излучения осуществляется за счет изменения топологии решетки, т.е. путем изменения закона расположения ее штрихов.

На рисунке 4.7 приведены фотографии изготовленных экспериментальных образов дифракционных решеток, позволяющих работать в высших порядках, и структуры решетки под микроскопом. Минимальная ширина штрихов решетки составляет 3 мкм. На программу для расчета параметров штрихов было получено свидетельство о государственной регистрации № 2021668476 [137].



а) б)

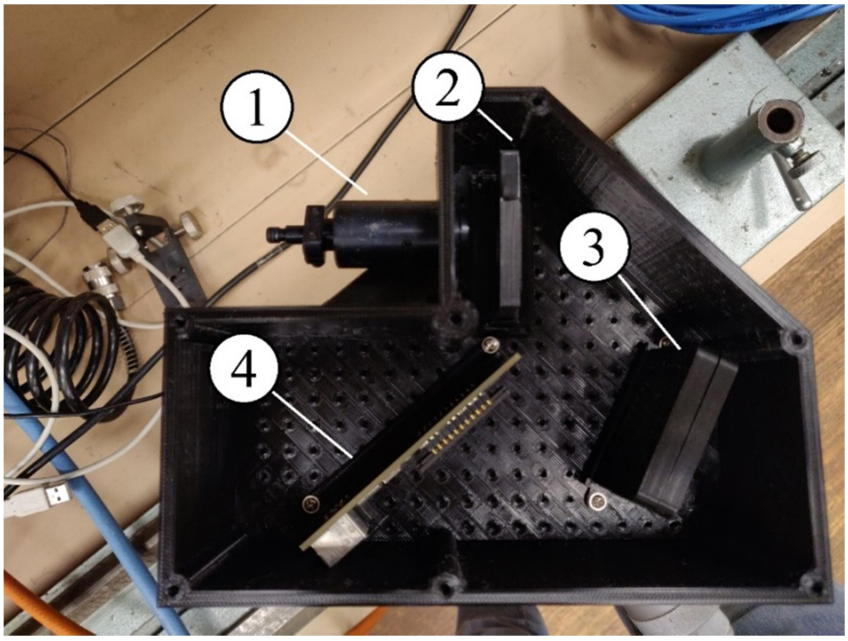
а) фотография экспериментальных образцов ДР; б) структура ДР под микроскопом

Рисунок 4.7 – Экспериментальные образцы ДР, позволяющих работать в высших порядках

Топология дифракционной решетки, позволяющей работать в высших порядках, представляет собой совокупность чередующихся прозрачных и непрозрачных полос разной ширины. Особенностью такой решетки является

то, что каждый третий непрозрачный штрих должен быть шире, чем все остальные штрихи.

Фотография макетного образца дифракционного спектрального прибора с установленной решеткой, позволяющей работать в высших порядках, приведена на рисунке 4.8.



1 – конденсор (блок вывода оптического излучения из ОВ), 2 – дифракционная решетка, 3 – сферическое зеркало, 4 – устройство считывания спектроскопической информации на базе ПЗС-линейки

Рисунок 4.8 – Фотография макетного образца дифракционного спектрального прибора

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

Результат измерения спектра лазерного излучения с длиной волны 532 нм спектральным прибором с ДР, позволяющей работать в высших порядках, приведен на рисунке 4.9.

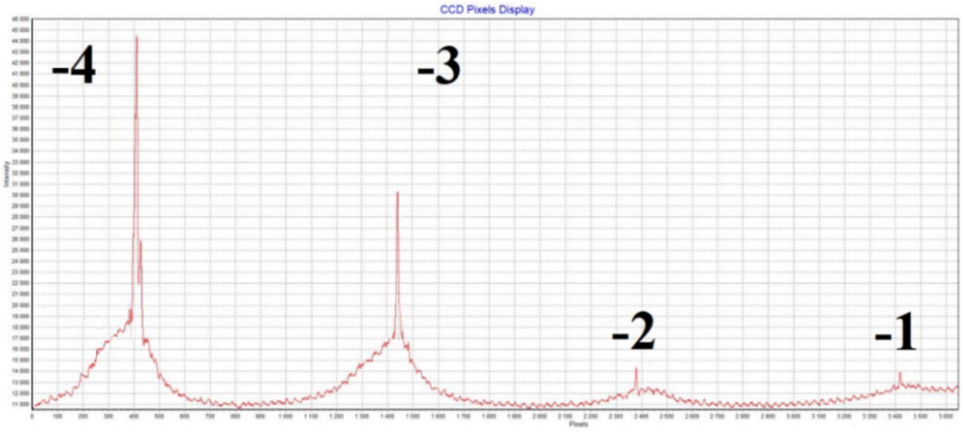


Рисунок 4.9 – Результат измерения спектра лазера спектральным прибором с дифракционной решеткой, позволяющей работать в высших порядках

Фотография дифракционной картины, полученной при прохождении лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 532$ нм через такую решетку, приведена на рисунке 4.10.

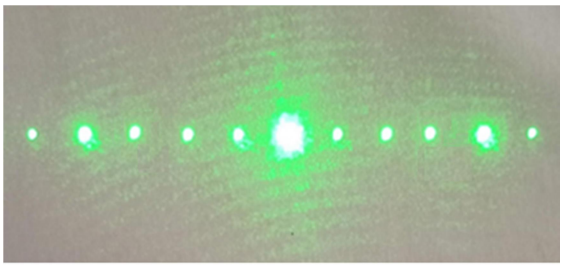


Рисунок 4.10 – Дифракционная картина

Разработанная топология такой ДР позволяет повысить разрешающую способность спектрального прибора более чем на 20%, в том числе при применении оптического волокна в качестве линии передачи, за счет проведения спектрального анализа в ±4 дифракционном порядке [121]. Считывание спектрометрической информации в приборе осуществляется многоэлементным фотоприемником – ПЗС-линейкой.

Разработанные и исследованные спектральные приборы с передачей анализируемых сигналов по оптическому волокну обладают улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с существующими аналогами.

Многоканальный оптический спектрометр:

1. Разрешающая способность прибора определяется полосой пропускания оптического фильтра, поэтому свойства падающего волнового фронта оптического излучения не оказывают на нее влияния.

Это позволяет применить для передачи ОИ на заданное расстояние жгут волокон, что повышает чувствительность прибора более чем на 15% по сравнению со спектрометрами других типов [143, 144].

2. Повышение разрешающей способности в этом приборе возможно за счет применения в качестве спектрально-селективного элемента оптического фильтра с решеткоподобной структурой.

3. Набор БУФ, 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.

Дифракционный спектральный прибор:

1. Предложенная топология ДР нового типа перераспределяет интенсивность дифрагированного света в высшие порядки, позволяет использовать +4 дифракционный порядок и тем самым повышает разрешающую способность прибора более чем на 20% по сравнению с традиционной решеткой, в том числе при применении ОВ.

В таблице 4.1 приведены некоторые технические характеристики оптических спектрометров, в которых применяется ОВ для передачи анализируемых сигналов, выпускаемые фирмами OceanInsight Inc., ASD Inc., Avantes [101 - 103] и спектральных приборов, разработанных в ГУАП.

Таблица 4.1 - Технические характеристики спектральных приборов с передачей анализируемых сигналов по оптическому волокну

Параметр	МОС (разработка ГУАП)	ДСП с ДР нового типа (разработка ГУАП)	Спектрометр HR2000+ES (OceanInsight Inc)	Спектрометр FieldSpec 4 (ASD Inc)	Спектрометр AvaSpec-ULS4096CL (Avantes)
Спектральный диапазон, нм	250 - 2500 нм (но анализируются только определенные длины волн или участки спектра заранее выбранные)	200-1100 нм (возможен индивидуальный выбор диапазона)	200-1100 нм Зависит от типа ДР (14 различных вариантов, от УФ до ближней ИК-области)	350-2500 нм Зависит от типа ДР (20 различных вариантов, от УФ до ближней ИК-области)	200 – 1100 нм Зависит от типа ДР (10 различных вариантов, от УФ до ближней ИК-области)
Разрешение, нм	от 0,5 до 10 нм (зависит от фильтра и диапазона)	От 0,5 до 3 нм (за счет применения ДР особой топологии)	От 1.33 до 6.8 нм (зависит от типа ДР, размера вх. щели, анализируемого диапазона)	3 (в видимом диапазоне) 6 (1400 - 2100 нм)	От 1 до 20 нм (зависит от типа ДР, размера вх. щели, анализируемого диапазона)

Продолжение таблицы 4.1

Тип детектора	Набор фотоприемников (количество зависит от количества каналов)	линейная ПЗС (Toshiba TCD1304AP)	линейная ПЗС (Sony ILX511B)	512 элементный кремниевый фотодиод	CMOS линейная матрица, 1024 элемента
Вес, г	от 250 г (зависит от количества каналов)	~500 г	570 г	5440 г	1155 г
Программное обеспечение	Поставляется в комплекте к спектрометру	Поставляется в комплекте к спектрометру	Лицензионное ПО (платное)	Лицензионное ПО (платное)	Лицензионное ПО (платное)
Программная коррекция спектра при использовании различных типов ОВ	Встроено в ПО	Встроено в ПО	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Длина оптического волокна, м	Подбирается индивидуально для конкретной задачи	Подбирается индивидуально для конкретной задачи	~2	~1-5	~2

4.2 Применение оптического волокна в качестве линии передачи анализируемого излучения

4.2.1 Волоконно-оптическая система передачи анализируемых сигналов. Теоретический расчет блока ввода излучения в волокно

Поскольку основным функциональным узлом ВОСП, оказывающим влияние на передачу анализируемого излучения и подвергающимся наибольшему внешнему воздействию окружающей среды, является оптическое волокно, при разработке спектральных приборов контроля такого типа особое внимание должно быть уделено вопросам прохождения оптического излучения по волокну.

В работах [119, 120, 131, 141 – 144, 148] был выполнен ряд исследований, связанных с вопросом передачи анализируемых излучений по волоконно-оптической системе передачи. На рисунке 4.11 представлена оптическая схема волоконно-оптической системы передачи, где ИИ – контролируемый источник оптического излучения, ОВ – оптическое волокно.

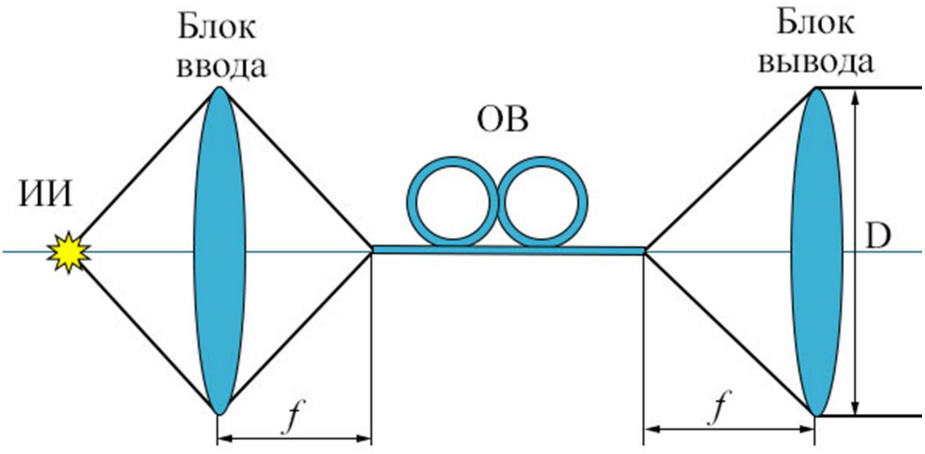


Рисунок 4.11 – Оптическая схема ВОСП, применяемой для передачи анализируемого ОИ на заданное расстояние

Волоконно-оптическая система передачи анализируемого излучения на заданное расстояние включает в себя: блок ввода излучения в ОВ, представляющий собой линзу, с двух сторон окруженную слоями свободного пространства, оптическое волокно и блок вывода излучения, также представляющий собой линзу, с двух сторон окруженную слоями свободного пространства.

Отдельно следует рассмотреть блок ввода оптического излучения и эффективность его работы.

Была предложена модель расчета эффективности ввода излучения в оптическое волокно в зависимости от параметров линзы и волокна.

На рисунке 4.12 представлена структурная схема блока ввода излучения в ОВ, где D - полный диаметр линзы блока ввода; $D_{эф}$ - эффективный диаметр линзы; a и θ - углы падения, под которыми оптическое излучение вводится в торец оптоволокна относительно края линзы и края эффективного диаметра соответственно; ρ - ширина распределения оптического поля в фокальной плоскости линзы; d – диаметр торца сердцевины оптоволокна; F - фокусное расстояние линзы блока ввода; L- расстояние от торца ОВ до центра линзы; x, x_1, z - декартовы координаты.

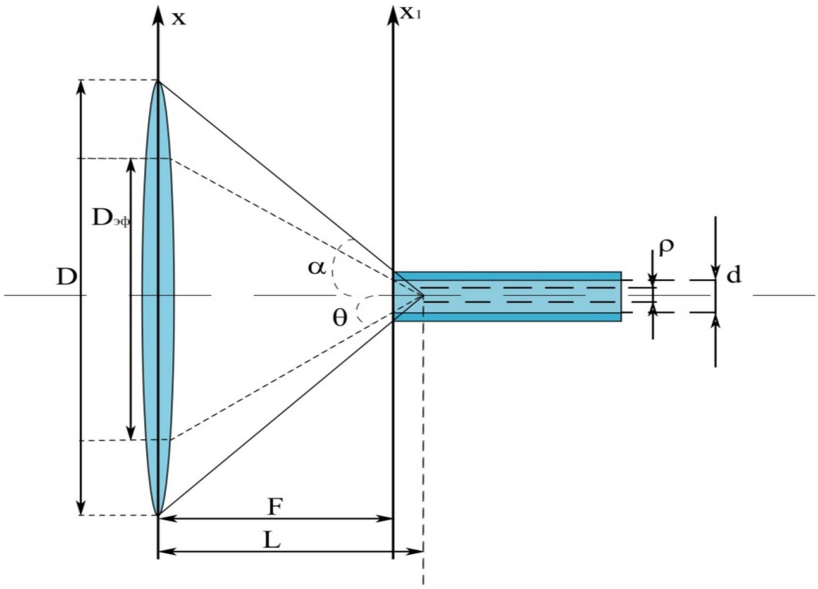


Рисунок 4.12 – Структурная схема блока ввода излучения в ОВ

Угол θ, под которым оптическое излучение вводится в торец оптоволокна относительно края эффективного диаметра, определяет числовую апертуру оптоволокна в форме [183]:

$$NA = \sin\theta . \tag{4.1}$$

Линза блока ввода и слой свободного пространства формируют фокальное пятно входного оптического излучения частоты ω_0 в плоскости оси x_1. Диаметр фокального пятна $\rho(\omega_0)$ определяется как [97]:

$$\rho(\omega_0) = \frac{4\pi cF}{\omega_0 D} . \tag{4.2}$$

Одной из основных характеристик блока ввода оптического излучения в оптоволокно является его энергочастотная характеристика (ЭЧХ), которая определяет коэффициент преломления материала линзы, зависящий от частоты оптического излучения, проходящего через этот материал.

Так как при решении задач контроля процессов горения зачастую формирующая оптика находится в неблагоприятных условиях окружающей среды, в частности в условиях повышенных температур, в качестве материала линзы должны применяться материалы, отвечающие требованиям высокой жаропрочности и стойкости к агрессивным воздействиям. К таким материалам можно отнести сапфировое стекло.

Аппроксимация зависимости коэффициента преломления $n(\lambda)$ сапфирового стекла определяется следующим соотношением [143]:

$$n_{app}(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{K_1\lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2\lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3\lambda^2}{\lambda^2 - L_3}} , \tag{4.3}$$

где $K_1, K_2, K_3\ L_1, L_2, L_3$ - дисперсионные коэффициенты: $K_1 = 1.0237, K_2 = 1.05826, K_3 = 5.2808$.

В частотном пространстве соотношение (4.3) примет вид:

$$n_{app}(\omega) = \sqrt{1 + \frac{K_1\omega^2}{\omega^2 - L_1} + \frac{K_2\omega^2}{\omega^2 - L_2} + \frac{K_3\omega^2}{\omega^2 - L_3}}. \qquad (4.4)$$

На рисунке 4.13 представлена аппроксимированная зависимость коэффициента преломления сапфирового стекла от частоты [143].

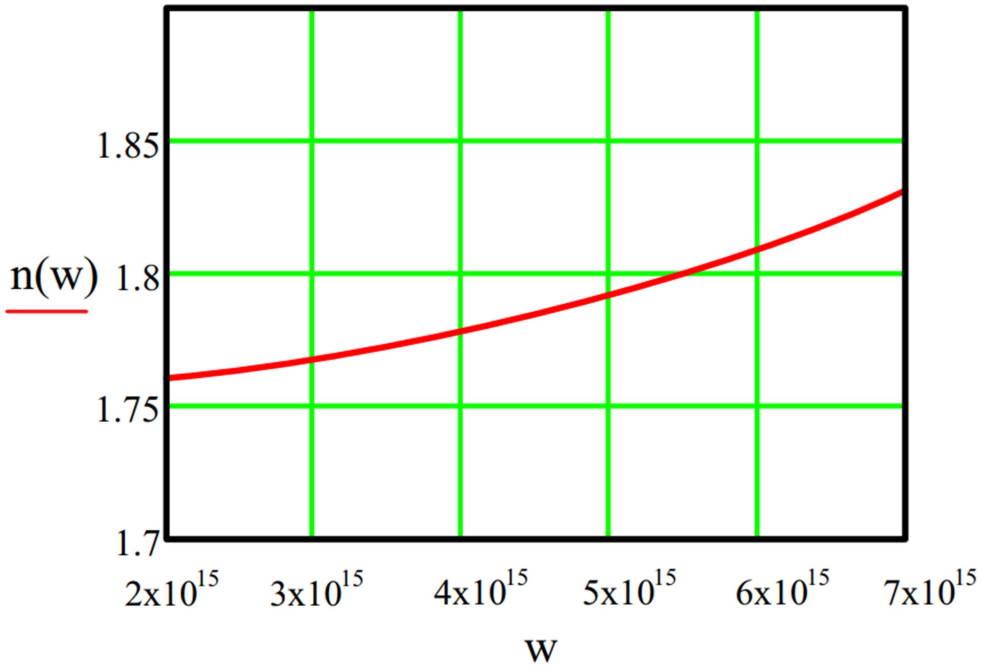


Рисунок 4.13 – Аппроксимированная зависимость коэффициента преломления сапфира от частоты

Частотный диапазон для коэффициента преломления можно определить как: $2\Delta\omega = 0{,}286 \times 10^{15}$ рад/с.

При этом фокусное расстояние линзы блока ввода, является функцией частоты, проходящего ОИ через блок ввода, и определяется как [184]:

$$F(\omega)=\frac{1}{(N-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}+\frac{(n(\omega)-1)\cdot\Delta t}{n(\omega)\cdot R_1\cdot R_2}\right)}, \qquad (4.5)$$

где относительный показатель преломления материала линзы N с толщиной Δt определяется как соотношение абсолютных показателей линзы $n(\omega)$ и окружающей среды n_1: $N=n(\omega)/n_1$; а радиусы кривизны правой поверхности линзы R_1 и левой R_2 определяются как: $R_1 = 77.623\times10^{-3}$ *мм*, $R_2 = 1175.794\times10^{-3}$ *мм* .

На рисунке 4.14 приведена зависимость фокусного расстояния сапфировой линзы от частоты оптического излучения [143].

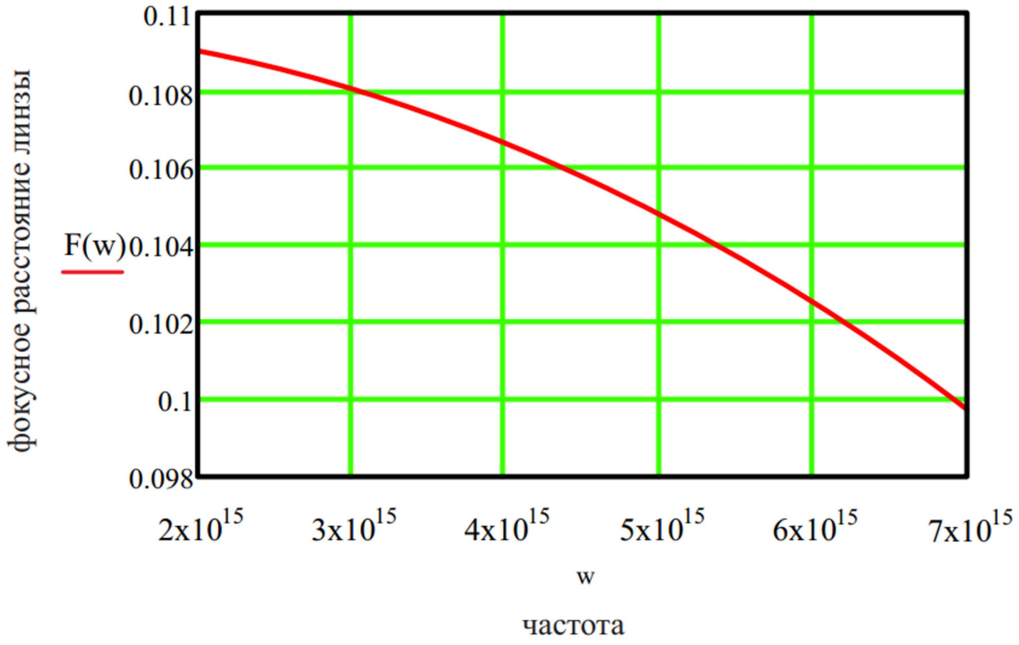


Рисунок 4.14 – Зависимость фокусного расстояния сапфировой линзы от частоты оптического излучения

Часть поверхности линзы, с которой ОИ полностью вводится в торец ОВ, можно определить как ее эффективный диаметр, изменение которого от частоты определяется следующим соотношением:

$$D_{эф}(\omega)=\begin{cases} F_m(\omega)\dfrac{d}{\delta}, & при \quad -2\delta \le \Delta F_m(\omega) \le 0 \\ F_m(\omega)\dfrac{d}{(\delta+\Delta F_m(\omega))}, & при \quad \Delta F_m(\omega) > 0 \\ F_m(\omega)\dfrac{d}{-(\delta+\Delta F_m(\omega))}, & при \quad \Delta F_m(\omega) < -2\delta \end{cases}, \qquad (4.6)$$

где $\Delta F_m(\omega)$ – разность между фокусными расстояниями линзы блока ввода на частотах ω_1 и ω_2.

Согласно [185] полный поток энергии ОИ на поверхности линзы определяется ее полным диаметром D:

$$\Phi_D = \frac{\pi}{4} I D^2 . \qquad (4.7)$$

Тогда, поток энергии оптического излучения, введенного в ОВ, можно определить через эффективный диаметр линзы блока ввода $D_{эф}$ [184, 185]:

$$\Phi_{Dэф}(\omega) = \frac{\pi}{4} I D_{эф}^2(\omega), \qquad (4.8)$$

где I - освещенность на поверхности линзы.

Отсюда следует, что ЭЧХ блока ввода оптического излучения в оптоволокно можно определить как:

$$W_{iu}(\omega)=\begin{cases} \left(F_m(\omega)\dfrac{d}{D\delta}\right)^2, & при \quad -2\delta \le \Delta F_m(\omega) \le 0 \\ \left(F_m(\omega)\dfrac{d}{D(\delta+\Delta F_m(\omega))}\right)^2, & при \quad 0 < \Delta F_m(\omega) < -2\delta \end{cases}. \qquad (4.9)$$

Результат компьютерного моделирования теоретической энергочастотной характеристики блока ввода приведен на рисунке 4.15 [143].

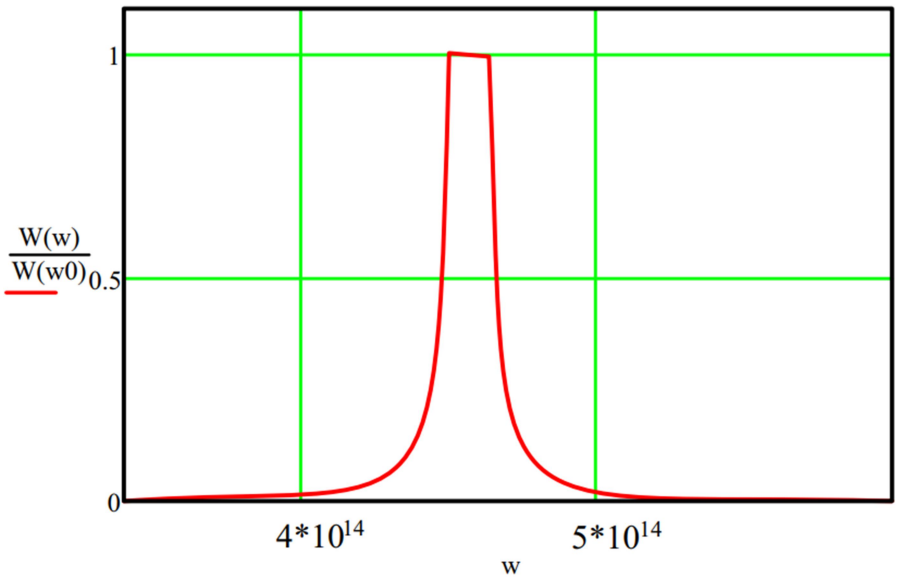


Рисунок 4.15 – Теоретическая энергочастотная характеристика блока ввода с сапфировой входной линзой

Расчет проводился при следующих исходных данных: $\theta = 14^o$, $D = 50.8 мм$, $d = 62 мкм$, $\omega_0 = 4.65 \cdot 10^{15}\ {}^{рад}/_{с}$.

В данном случае полоса пропускания ЭЧХ блока ввода короткофокусной линзы равняется $0.227 \cdot 10^{14}, {}^{рад}/_{с}$, что свидетельствует о том, что данная система узкополосная.

На основании полученных результатов можно сформировать перечень критериев, которым должен удовлетворять блок ввода оптического излучения в оптоволокно [143]:

1. Энергочастотная характеристика ОВ имеет достаточно узкую полосу пропускания. Поэтому возникает потребность в достаточно точной настройки блока ввода на заданный диапазон анализируемых частот оптического диапазона. Это может быть достижимо путем перемещения торца ОВ относительно оптической оси входной линзы блока ввода.

2. При проектировании блока ввода требуется учитывать материал линзы, у которой коэффициент преломления имел бы равномерный участок в

зависимости от частоты оптического излучения в заданном диапазоне частот и тип оптического волокна с диаметром сердцевины 300-850 нм или с коническим профилем. По заданным критериям подходят полимерные оптические волокна (ПОВ). Данное требование обеспечивает уменьшение информационных потерь и расширяет полосу пропускания ЭЧХ.

3. Конструкция блока должна обеспечивать вибрационную устойчивость расположения торца оптического волокна и входной линзы после его настройки.

4.2.2 Исследование искажений аппаратной функции спектрального прибора, возникающих в результате применения оптического волокна

Упрощённая оптическая схема СПК на базе дифракционной решетки с передачей анализируемых сигналов по оптическому волокну приведена на рисунке 4.16, где ИИ – контролируемый источник оптического излучения, ОВ – оптическое волокно, ДР – дифракционная решетка, ФП – плоскость фотоприёмника.

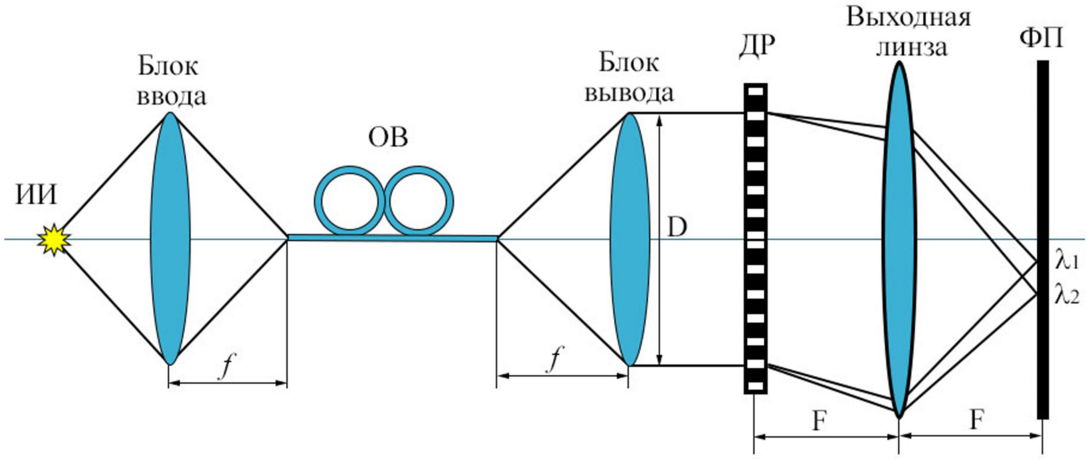


Рисунок 4.16 – Оптическая схема СПК на базе дифракционной решетки

Падающее на дифракционную решетку спектрального прибора контроля анализируемое оптическое излучение после прохождения по оптическому волокну имеет искаженный волновой фронт (неоднородный и неплоский). Это приводит к дополнительным погрешностям результатов

спектральных измерений из-за уширения аппаратной функции такой спектроскопической системы.

Поэтому была предложена математическая модель, позволяющая рассчитать искажение аппаратной функции дифракционного спектрального прибора на базе решетки, возникающее из-за искажения передаваемого по оптическому волокну сигнала [144].

Как было показано во второй главе, оптическое излучение, в частности сформированное естественным источником, к которому можно отнести пламя, адекватно описывается нормальным распределением. Поэтому адекватное описание поля на торце одномодового ОВ можно представить в виде усеченного распределения Гаусса [186]:

$$U(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{(d/2)^2}\right), \tag{4.10}$$

где d – диаметр сердцевины ОВ.

Распределение поля на торце одномодового волокна приведено на рисунке 4.17.

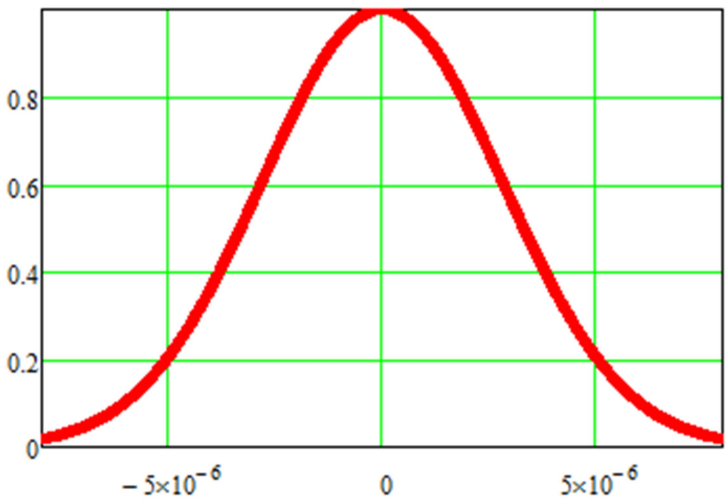


Рисунок 4.17 – Распределение поля на торце волокна

Применение многомодового оптического волокна приводит к тому, что поле на его торце приобретает более сложную структуру в виде хаотически расположенных освещенных и затемненных пятен, так называемую спекл-структуру. Это требует описывать поле на торце многомодового волокна более сложным распределением, чем гауссово.

После прохождения оптического волокна анализируемое излучение падает на апертуру линзы блока вывода волоконно-оптической системы передачи. Два слоя свободного пространства и линза блока вывода выполняют пространственное преобразование Фурье падающего оптического излучения:

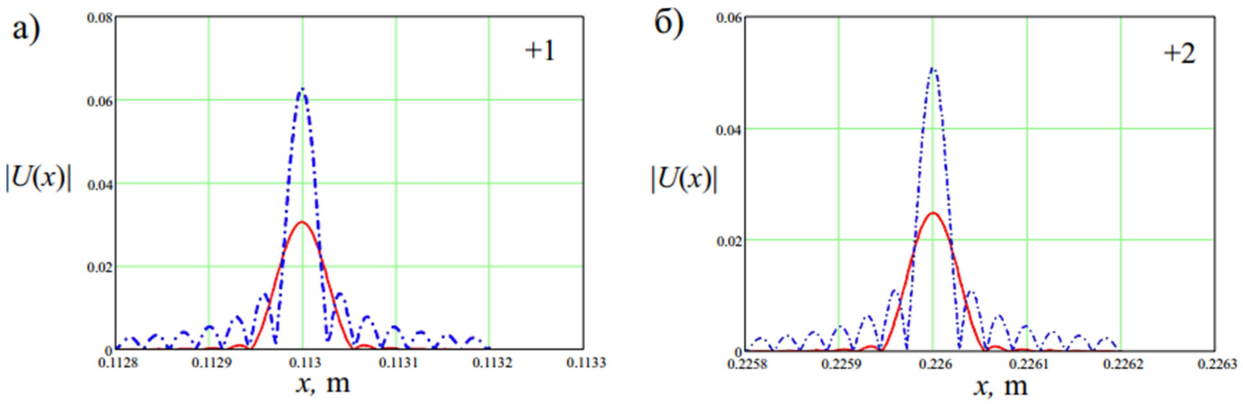
$$U(\xi) = \frac{1}{\sqrt{\lambda f_1}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} u(\zeta) \cdot \exp(-\frac{ik\zeta\xi}{\lambda f_1}) dx \,. \qquad (4.14)$$

После пространственного преобразования Фурье ОИ с искаженным и неоднородным волновым фронтом падает на дифракционную решетку, после которой выходной линзой фокусируется на плоскость фотоприемника. Математически это можно представить как операцию перемножения функции распределения падающего поля и функции прозрачности дифракционной решетки с последующим повторным пространственным Фурье-преобразованием результата перемножения с помощью линзы, с двух сторон окруженной слоями свободного пространства [187], т.е.:

$$U(x) = \hat{\mathrm{F}}[T(\xi) \cdot U(\xi)] \,. \qquad (4.15)$$

Применение такого подхода позволяет выполнить расчет результата спектроскопического измерения дифракционным спектральным прибором с волоконно-оптической системой передачи для каждого конкретного дифракционного порядка.

Результаты компьютерного моделирования результата спектроскопического измерения монохроматического излучения дифракционным прибором при передаче анализируемого ОИ по оптоволокну и без применения волокна для первого +1 и второго +2 дифракционных порядков представлены на рисунке 4.18 а) и б) соответственно.



штрихпунктирная линия – без применения волокна; сплошная линия – при передаче анализируемого ОИ по оптоволокну

Рисунок 4.18 – Результаты компьютерного моделирования в +1 и +2 порядках соответственно

В качестве исходных данных при компьютерном моделировании использовались следующие параметры: λ = 632 нм, период дифракционной решетки T_g=5 мкм, размер апертуры решетки L=1 см, фокусное расстояние выходной линзы F=50 см.

Результаты теоретических расчетов показывают искажение аппаратной функции в виде ее уширения более чем на 20% для одномодового волокна.

Также были проведены экспериментальные исследования искажений аппаратной функции дифракционного спектрального прибора при применении волоконно-оптической системы передачи анализируемых сигналов. Эксперимент проводился на разработанном экспериментальном стенде с применением дифракционной решетки и ВОСП анализируемого оптического сигнала.

Фотография экспериментального стенда для исследования влияния ВОСП на аппаратную функцию ДСП приведена на рисунке 4.19 [144].

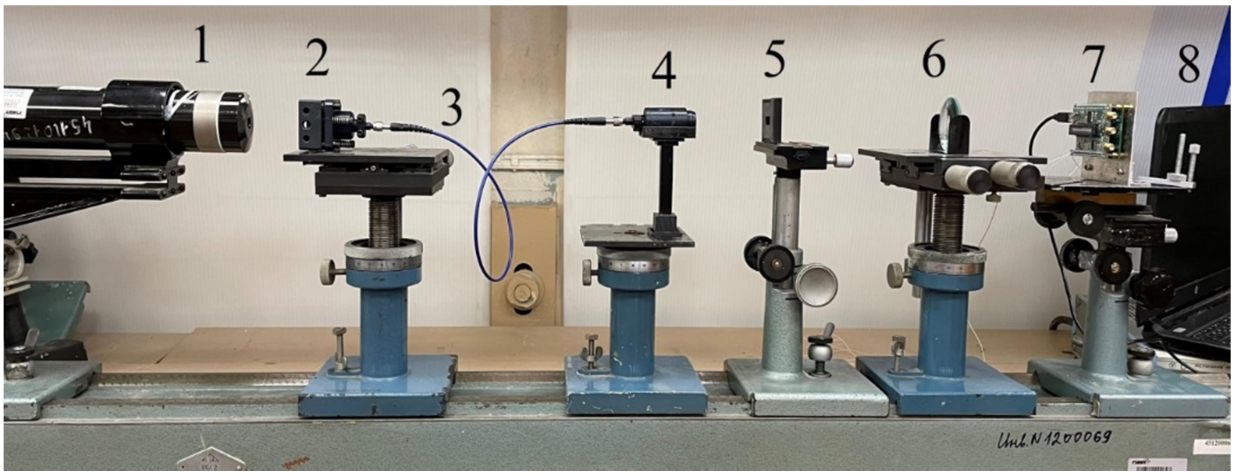


Рисунок 4.19 – Экспериментальный стенд с ВОСП

Стенд состоит из следующих функциональных узлов: 1 – He-Ne лазер с центральной длиной волны 632 нм; 2 – блок ввода оптического излучения в оптоволокно; 3 – оптическое волокно; 4 – блок вывода; 5 – дифракционная решетка пропускающего типа; 6 – оптическая линза с фокусным расстоянием 25 см; 7 – ПЗС линейка с электронным блоком обработки; 8 – компьютер.

Оптический кабель подсоединялся к блокам вывода и ввода через соединитель SMA-905. В рамках эксперимента исследовались два типа оптических кабеля:

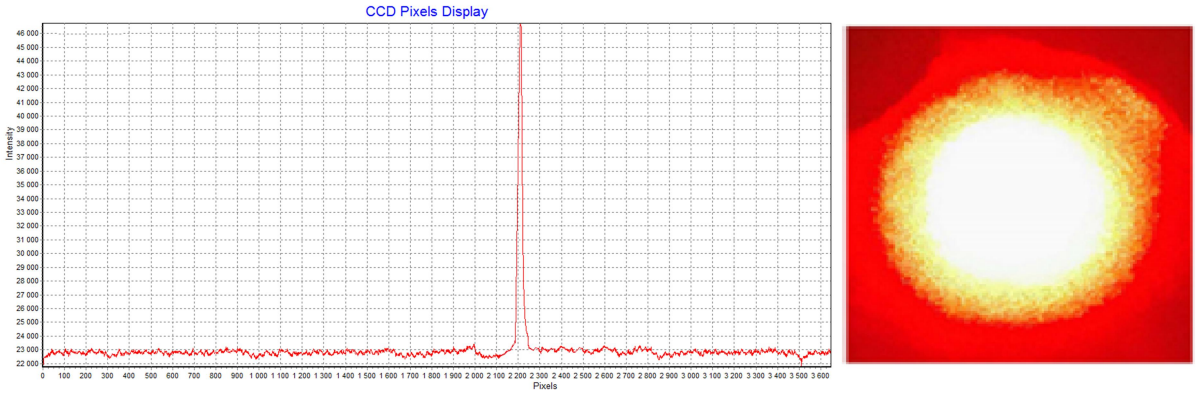
- на основе многомодового ОВ Nufern-FUD-3759 MM-S105/125-22A-HIOH (рабочий спектральный диапазон волокна – от 200 до 1200 нм, диаметр сердцевины волокна – 105 мкм);
- на основе одномодового ОВ PM-S405-XP (рабочий спектральный диапазон волокна – от 400 до 680 нм, диаметр сердцевины волокна – 3 мкм).

Эксперимент по исследованию искажений АФ дифракционного спектрального прибора при применении волоконно-оптической системы передачи анализируемых сигналов состоял из трех этапов:

1 этап: лазерное излучение проходило через дифракционную решетку без применения оптоволокна (рисунок 4.20);

2 этап: лазерное излучение проходило через дифракционную решетку после прохождения через одномодовое ОВ PM-S405-XP (рисунок 4.21);

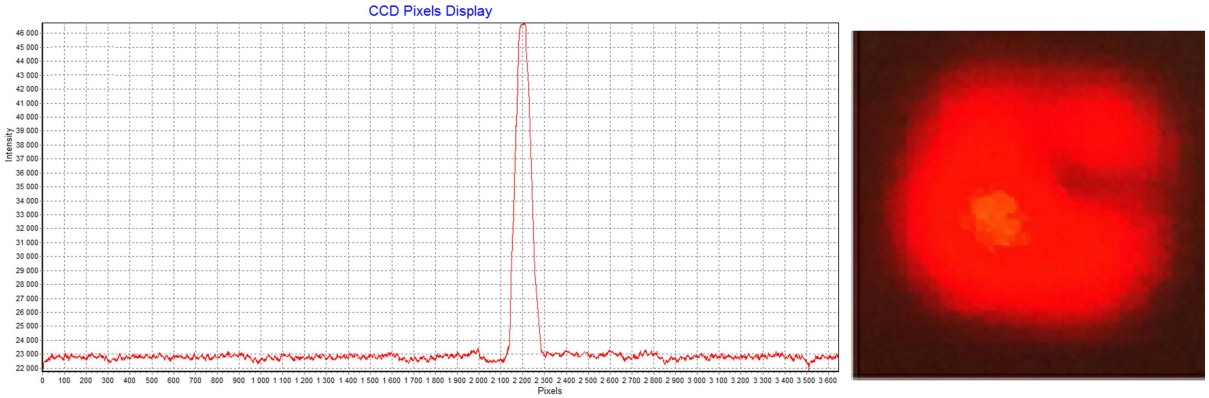
3 этап: лазерное излучение проходило через дифракционную решетку после прохождения через многомодовое ОВ Nufern-FUD-3759 (рисунок 4.22).



а) б)

а) аппаратная функция ДСП без применения волоконно-оптической системы передачи; б) излучение лазера на поверхности дифракционной решетки

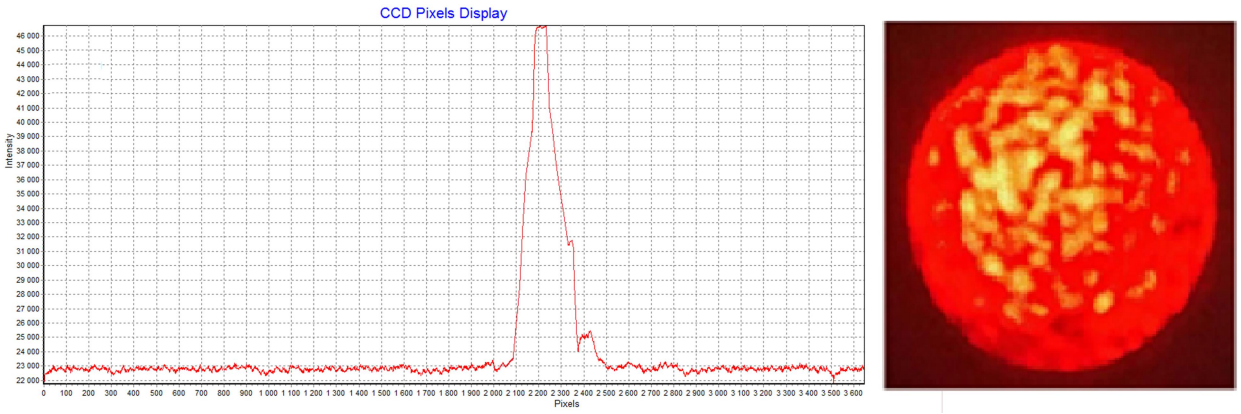
Рисунок 4.20 – Результат эксперимента (1 этап)



а) б)

а) аппаратная функция ДСП с применением одномодового ОВ; б) излучение лазера на поверхности дифракционной решетки после прохождения через одномодовое ОВ

Рисунок 4.21 – Результат эксперимента (2 этап)



а) б)

а) аппаратная функция ДСП с применением многомодового ОВ; б) злучение лазера на поверхности дифракционной решетки после прохождения через многомодовое ОВ

Рисунок 4.22 – Результат эксперимента (3 этап)

Как показал эксперимент, применение оптоволокна для передачи анализируемого сигнала на заданное расстояние приводит к неоднородности волнового фронта оптического излучения, что проявляется в виде пространственной модуляции его интенсивности и появлении так называемой спекл-картины. В результате происходит искажение аппаратной функции дифракционного спектрального прибора, проявляющееся в ее уширении, что приводит к ухудшению разрешающей способности прибора более чем на 30% при применении одномодового оптоволокна и более чем на 60% при применении многомодового оптоволокна.

Ухудшение разрешающей способности приводит к увеличению погрешности спектральных измерений, и, как следствие, к снижению достоверности контроля, проводимого спектральным прибором контроля.

Стоит отметить, что энергетические потери при применении одномодового волокна существенно выше по сравнению с применением многомодового, ввиду меньшего диаметра волокна.

4.2.3 Исследование энергетических потерь в волоконно-оптической системе передачи

Зная характеристику затухания волокна и линзы, можно рассчитать потери, влияющие на эффективность передачи анализируемого излучения на вход разрешающей системы спектрального прибора. Результаты расчета позволяют с высокой точностью определить параметры волоконно-оптической системы передачи при решении конкретной задачи спектроскопического контроля.

На первом этапе необходимо определить потери в ОВ. Зависимость коэффициента затухания ПОВ от длины волны показан на рисунке 4.23.

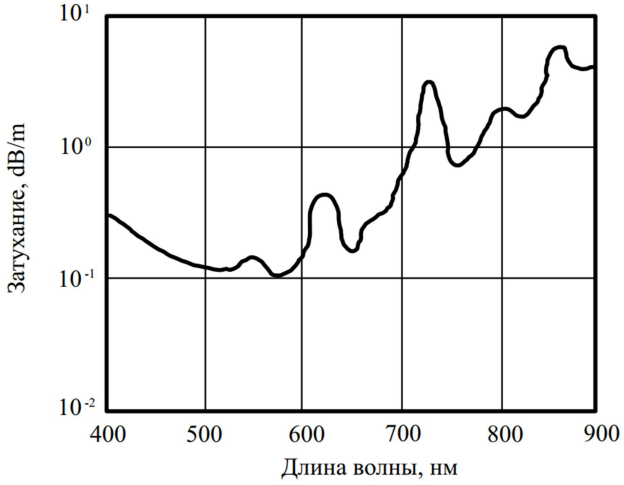


Рисунок 4.23 - Зависимость коэффициента затухания ПОВ от длины волны

Минимальные потери достигаются при длине волны приблизительно 580 и 650 нм, т.е. в видимом диапазоне длин волн. Максимум поглощения вблизи длины волны 620 нм является локальным. В диапазоне длин волн 450 – 600 нм пластиковые волокна также обладают хорошей прозрачностью.

Если волоконно-оптическая система имеет сложную топологию, то следует учитывать потери во всех участках оптического кабеля.

Учитываются также потери при вводе излучения от контролируемого процесса горения в ОВ. В большинстве случаев эти потери являются

главным фактором при выборе числовой апертуры ОВ, применяемого в волоконно-оптических системах передачи анализируемых сигналов.

График зависимости коэффициента пропускания сапфира от длины волны приведен на рисунке 4.24.

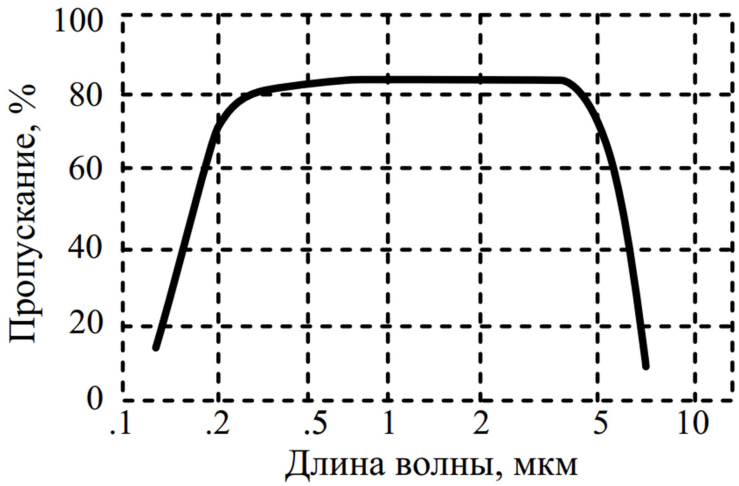


Рисунок 4.24 – График зависимости коэффициента пропускания сапфира от длины волны

Далее с учетом имеющихся характеристик и теоретической ЭЧХ (см. п.4.2.1) блока ввода можно рассчитать характеристику энергетических потерь в волоконно-оптической системе.

Результаты выполненного расчета представлены рисунке 4.25 [144].

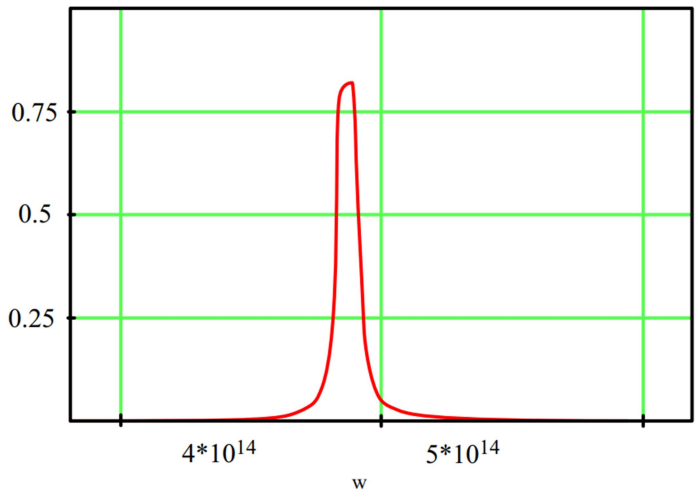


Рисунок 4.25 – ЭЧХ блока ввода излучения в ВОСП при использовании сапфировой линзы и ПОВ

Исходя из полученных результатов, можно определить оптимальное оптическое волокно и материал линзы, для конкретной волоконно-оптической системы и конкретных задач контроля методом оптической спектроскопии, тем самым учесть потери в разрабатываемой системе.

На втором этапе необходимо рассмотреть энергетические потери, возникающие при выводе оптического излучения из оптоволокна вследствие дифракционной расходимости пучка и распространении части излучения вне апертуры линзы, как показано на рисунке 4.26 [131].

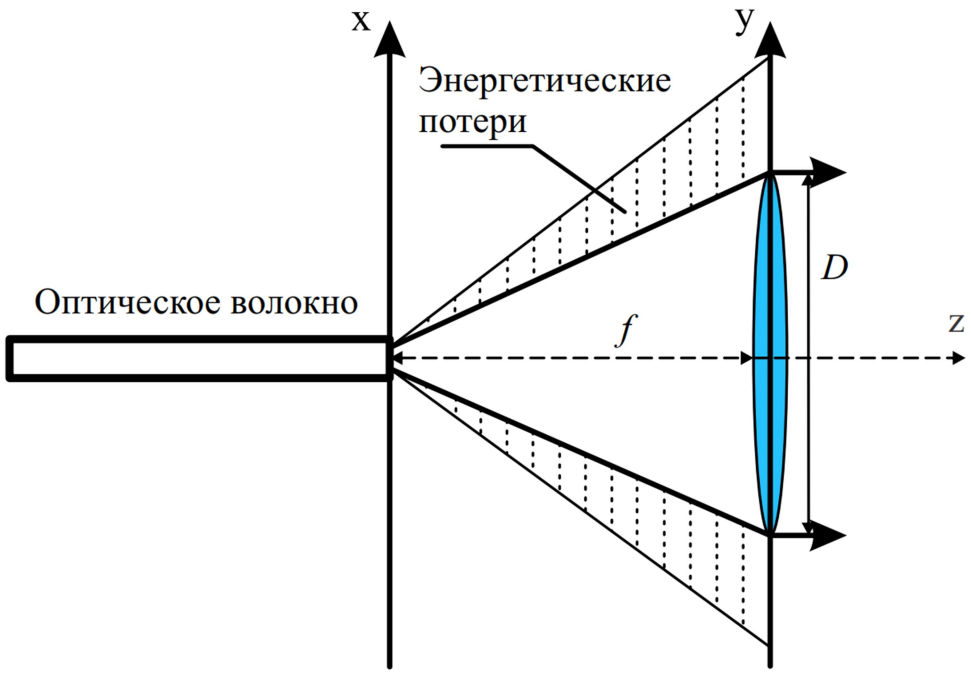


Рисунок 4.26 – Возникновение дифракционных энергетических потерь в блоке вывода оптического излучения

Для этого необходимо рассмотреть процесс преобразования в этой системе оптического поля $u(x)$ с торца волокна, которое, как было отмечено выше, довольно хорошо аппроксимируется гауссовым распределением.

Распределение поля на расстоянии от торца волокна, т.е. в ближней зоне, определяется дифракцией Френеля [187]. Таким образом, на протяженности апертуры линзы распределение поля может быть представлено в виде:

$$U(y) = \sqrt{\frac{e^{ikz}}{i\lambda z}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} u(x) \exp(i \frac{k}{2z}(x-y)^2) \mathrm{d}x \,, \qquad (4.16)$$

где λ – длина волны оптического излучения, z – расстояние между торцом оптоволокна и линзой, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число.

Для того чтобы минимизировать энергетические потери диаметр линзы D блока вывода должен быть таким, чтобы основная часть оптического излучения, выходящего из оптоволокна, попадала на апертуру линзы. В противном случае, распространение части излучения за пределами апертуры линзы приведет к увеличению энергетических потерь, а, следовательно, ухудшению чувствительности спектрального прибора контроля.

При этом данных о решении вопроса выбора оптимальных соотношений диаметра торца волокна d, размера апертуры линзы D и расстоянии от линзы до торца волокна z с целью минимизации энергетических потерь при выводе излучения из оптоволокна до настоящего времени в литературе не обнаружено.

Поскольку конечные размеры апертур линз вызывают искажения и потери при передаче анализируемых сигналов по волоконно-оптической системе спектрального прибора контроля, в работе [131] было предложено оценивать эти потери путем определения количества энергии оптического излучения, не попадающего на апертуру линзы блока вывода.

Энергетические потери оптического излучения, возникающие в результате непопадания части оптического излучения на поверхность линзы, можно записать в виде:

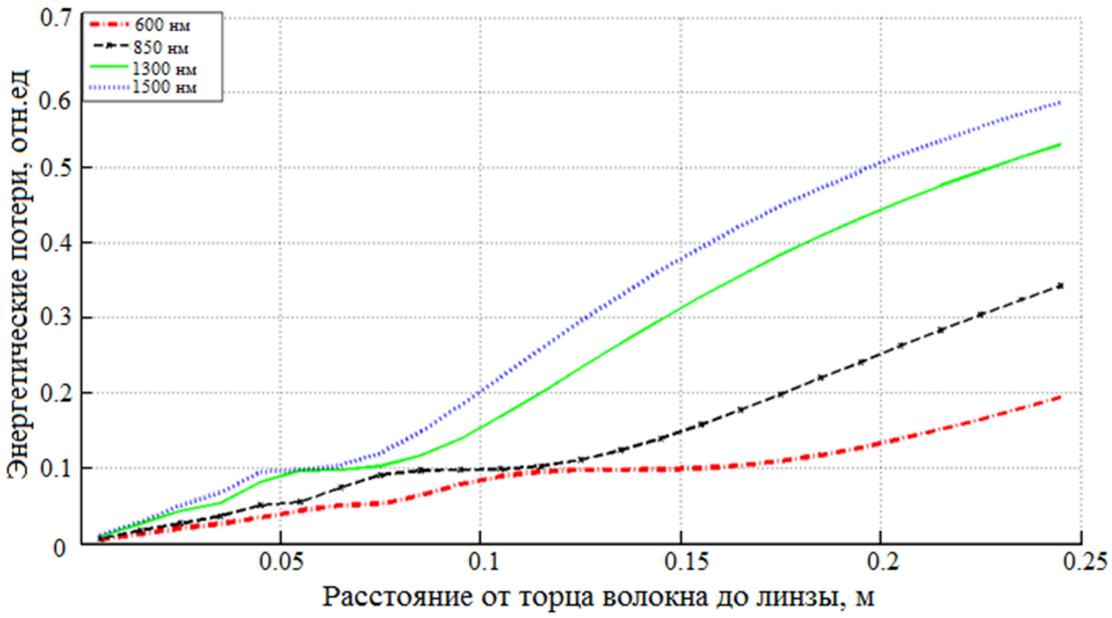
$$\Delta = 1 - \frac{\left(\int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} I(y) \mathrm{d}y \right)}{\left(\int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} I_0(x) \mathrm{d}x \right)}, \qquad (4.17)$$

где $I_0(x)=|u(x)|^2$, $I(y)=|U(y)|^2$ – распределение интенсивности ОИ на оси x и y соответственно, D – диаметр линзы.

Из полученных соотношений (4.16) и (4.17) следует, что энергетические потери, возникающие в результате непопадания части оптического излучения на апертуру линзы блока вывода, зависят от следующих параметров: расстояния между торцом оптоволокна и линзой, ее апертуры и длины волны передаваемого оптического излучения. Применение полученных результатов позволяет оценить энергетические потери и вносимые искажения передаваемого сигнала по оптоволокну в зависимости от этих параметров.

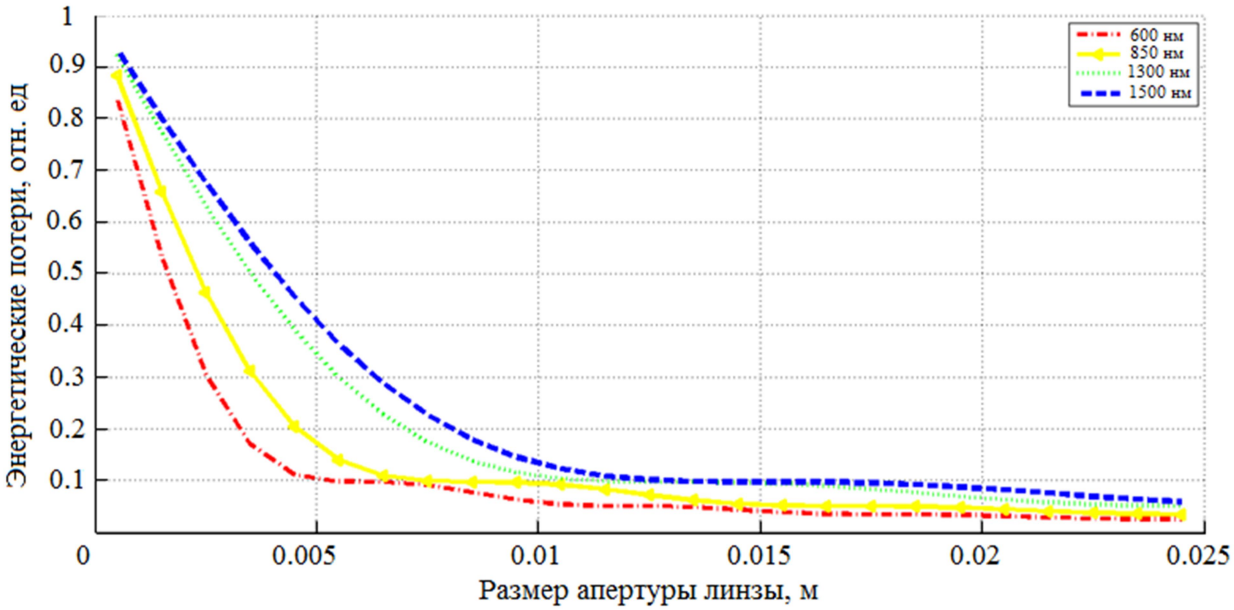
В пакете прикладных программ Matlab был разработан программный алгоритм, позволяющий рассчитать энергетические потери оптического излучения при проектировании волоконно-оптической системы передачи.

Результаты компьютерного моделирования для четырех различных длин волн: 600 нм, 850 нм, 1300 нм и 1500 нм, - приведены на рисунках 4.27 и 4.28 соответственно.



При диаметре торца волокна d =8 мкм, размер апертуры линзы D = 5 см.

Рисунок 4.27 – Зависимость потерь от расстояния между торцом волокна и линзой



При диаметре торца волокна *d*=8 мкм и расстоянии от торца до линзы z=8 см.

Рисунок 4.28 – Зависимость потерь от размера апертуры линзы *D*

Программный код разработанного алгоритма, позволяющего рассчитать энергетические потери оптического излучения, приведен на рисунке 4.29.

```
clc;
clear all;

Lambda = 600*10^(-9);
k = 2*pi/Lambda;
r = 0.01;
z = 0.3;
dz =0.05;
dx = 10^(-5);
Rmax = 0.015;
x = -Rmax/2 : dx : Rmax/2;
nfig = 1;
figure(nfig); nfig = nfig + 1;
clf;
I0 = 1;

X1 = -sqrt(k/pi/z)*(r/2+x);
X2 = sqrt(k/pi/z)*(r/2-x);
C1 = mfun('FresnelC',X1);
S1 = mfun('FresnelS',X1);
C2 = mfun('FresnelC',X2);
S2 = mfun('FresnelS',X2);
T = (C2-C1).^2 + (S2-S1).^2;
I = (I0/2)*T;
plot(x,I);
xlabel('y, m');
ylabel('I(y)');
title('Intensity of Diffracted Wave');
grid on;
figure(nfig); nfig = nfig + 1;
clf;

i = 0;
t = 0;
Rmax = 0.01;
x = -Rmax/2 : dx : Rmax/2;
for Lambda= 0.1*10^(-6):0.5*10^(-6):1.6*10^(-6);
    i = 0;
    k = 2*pi/Lambda;
for z=0.01:dz:1;
    X1 = -sqrt(k/pi/z)*(r/2+x);
    X2 = sqrt(k/pi/z)*(r/2-x);
    C1 = mfun('FresnelC',X1);
    S1 = mfun('FresnelS',X1);
    C2 = mfun('FresnelC',X2);
    S2 = mfun('FresnelS',X2);
    T = (C2-C1).^2 + (S2-S1).^2;
    I = (I0/2)*T;
    R(t+1,i+1) = 1 - trapz(x,I)/I0/r;
    i = i+1;
end;
    t=t+1;
end
```

```
z = 0.01:dz:1;
hold on;
plot (z, R(1, : ), 'r');
plot (z, R(2, : ), 'y');
plot (z, R(3, : ), 'g');
plot (z, R(4, : ), 'b');
Legend ('100 nm', '600 nm', '1100 nm', '1600 nm');
xlabel('z, m');
ylabel('\Delta');
grid on
title('Dependence from z (d = D = 1 cm)');
hold off;

figure(nfig); nfig = nfig + 1;
clf;
L = 1;
R1 = 0.01;
Rmax = 0.015;
t = 0;
dx = 10^(-4);

for Lambda= 0.1*10^(-6):0.5*10^(-6):1.6*10^(-6);
    i = 0;
    k = 2*pi/Lambda;
for a = 0.004:dx:Rmax/2;
    m = -a:dx:a;
    X11 = -sqrt(k/pi/L)*(R1/2+m);
    X22 = sqrt(k/pi/L)*(R1/2-m);
    C11 = mfun('FresnelC',X11);
    S11 = mfun('FresnelS',X11);
    C22 = mfun('FresnelC',X22);
    S22 = mfun('FresnelS',X22);
    T1 = (C22-C11).^2 + (S22-S11).^2;
    U1 = (I0/2)*T1;
    Q(t+1, i+1) = 1-trapz(m,U1)/I0/0.01;
    i = i+1;
end;
    t=t+1;
end;


a = 0.004:dx:Rmax/2;
hold on;
plot (a, Q(1, : ), 'r');
plot (a, Q(2, : ), 'y');
plot (a, Q(3, : ), 'g');
plot (a, Q(4, : ), 'b');
Legend ('100 nm', '600 nm', '1100 nm', '1600 nm');
xlabel('D, m');
ylabel('\Delta');
grid on
title('Dependence from D (d = 1 cm, z = 1 m)');
hold off;
```

Рисунок 4.29 – Программный код разработанного алгоритма

Полученные результаты в графическом виде можно использовать при проектировании волоконно-оптической системы передачи анализируемого сигнала, входящей в состав спектрального прибора контроля, для подбора оптимальных параметров формирующей оптики при заданном уровне минимальных допустимых энергетических потерь.

Для экспериментальной отработки разработанной методики вычисления энергетических потерь был разработан стенд, оптическая схема

которого приведена на рисунке 4.30, где ОВ – оптическое волокно, ИД – ирисовая диафрагма, ИМ – измеритель оптической мощности.

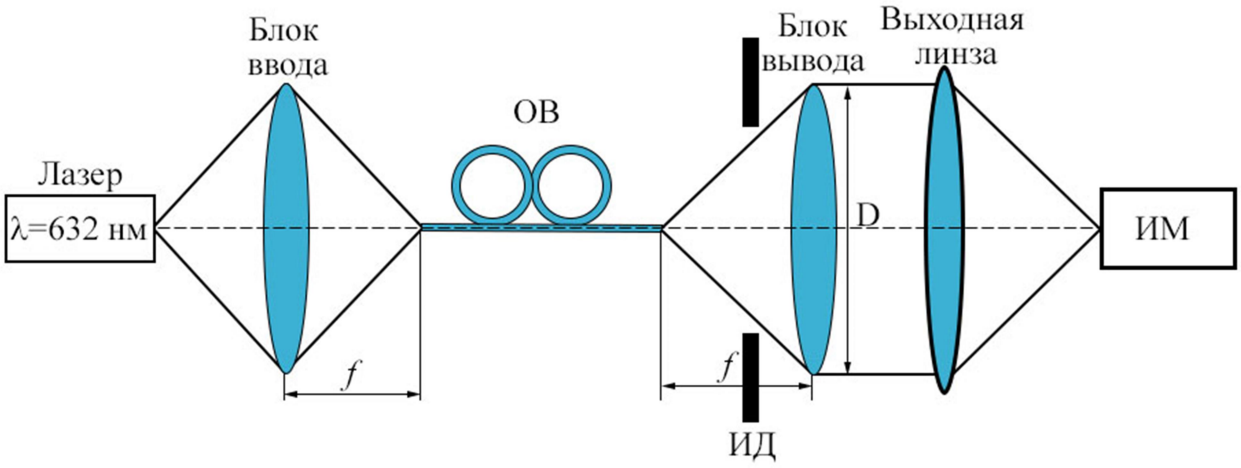


Рисунок 4.30 – Схема экспериментального стенда

Фотография стенда приведена на рисунке 4.31, где 1 – лазер He-Ne, 2 – блок ввода излучения в оптическое волокно, 3 – оптическое волокно, диаметр сердцевины которого равен 8 мкм, 4 – выходной торец ОВ, 5 – линза, перед которой установлена ирисовая диафрагма, 6 – выходная линза, фокусирующая оптическое излучение в ОВ, которое подключено к измерителю мощности.

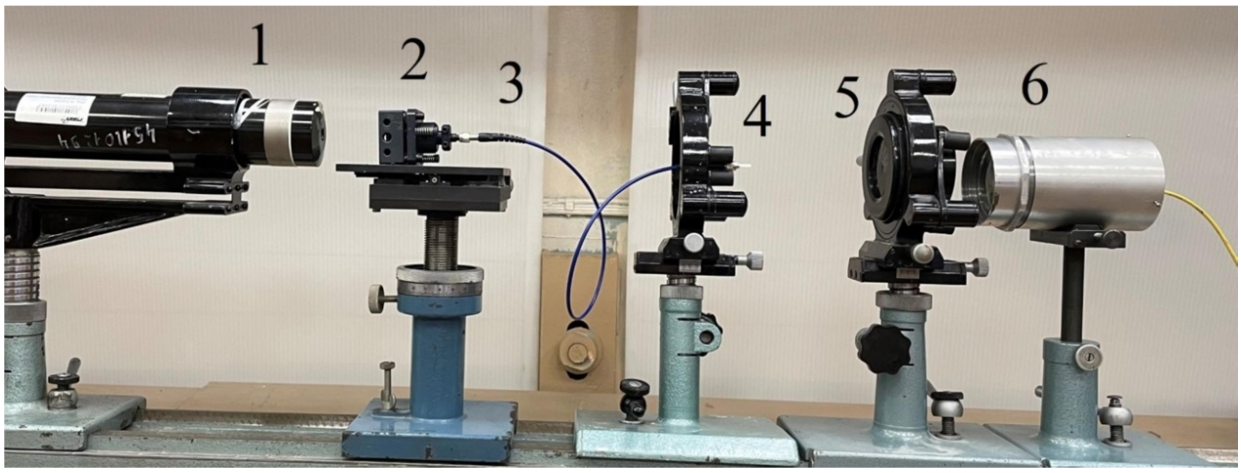


Рисунок 4.31 – Фотография экспериментального стенда

Имитация возникновения энергетических потерь ОИ выполнялась путем регулировки относительного отверстия апертурной диафрагмы.

Фокусное расстояние линзы блока вывода f соответствовало 94 мм, рабочая длина волны применяемого лазера $\lambda = 632$ нм.

Измерение энергетических потерь выполнялось следующим образом: Фиксировался уровень мощности оптического излучения, фокусируемого на измеритель мощности, при максимальном отверстии апертурной диафрагмы (полностью открыта). Данный уровень мощности принимался за опорный уровень и соответствовал P_{max}=-31,4 дБм. Следующие измерения уровней мощности оптического излучения происходили при уменьшении относительного отверстия апертурной диафрагмы до минимального значения с шагом 5 мм.

Полученные результаты экспериментального исследования и расчетов приведены в таблице 4.2 [131].

Таблица 4.2. Результаты эксперимента

d, мм	P, дБм	P, мкВт	P/P_{max}	$\Delta = (1 - P/P_{max}) \cdot 100\%$
5	–42,5	53	0,074	92,4
10	–36,7	205	0,287	71,1
15	–34,5	341	0,484	51,6
20	–33,7	414	0,576	42,2
25	–33	502	0,705	29,2
30	–32,6	522	0,75	26
35	–32,5	546	0,773	22,3
40	–32,4	547	0,774	22,4
45	–32,3	576	0,811	18,7
50	–31,8	642	0,913	8,7

Графическое сравнение результатов теоретического расчета и экспериментального исследования энергетических потерь приведено на рисунке 4.32.

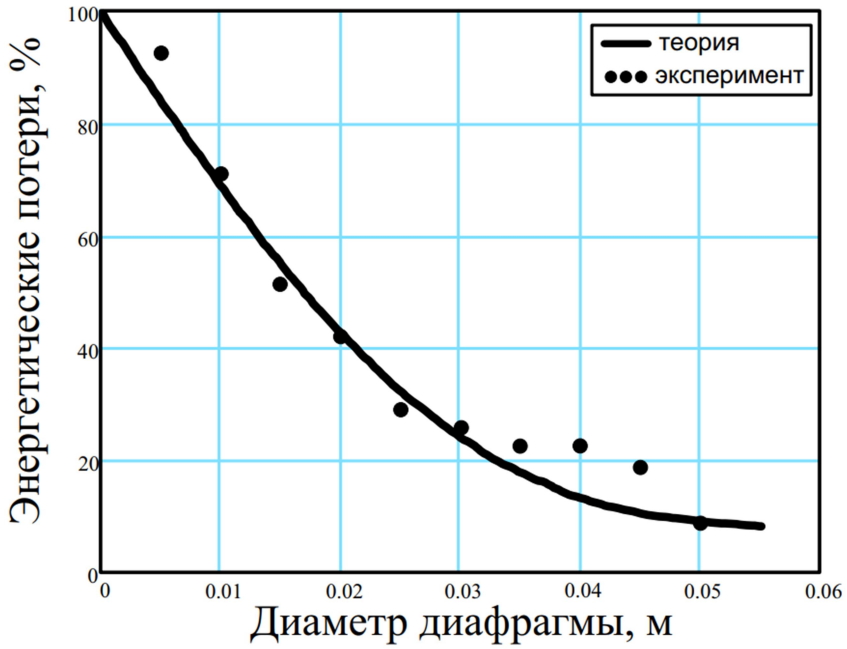


Рисунок 4.32 – Экспериментальные и теоретические расчеты энергетических потерь

Полученные результаты исследования подтверждают сходимость разработанной методики расчета энергетических потерь с экспериментальными данными.

Поэтому данная методика может быть применена для учета энергетических потерь при проектировании более сложных спектроскопических систем контроля с применением волоконно-оптических линий передач, например, для систем контроля процессов, протекающих в неблагоприятных условиях окружающей среды (повышенная температура и влажность, агрессивная химическая среда и т.п.).

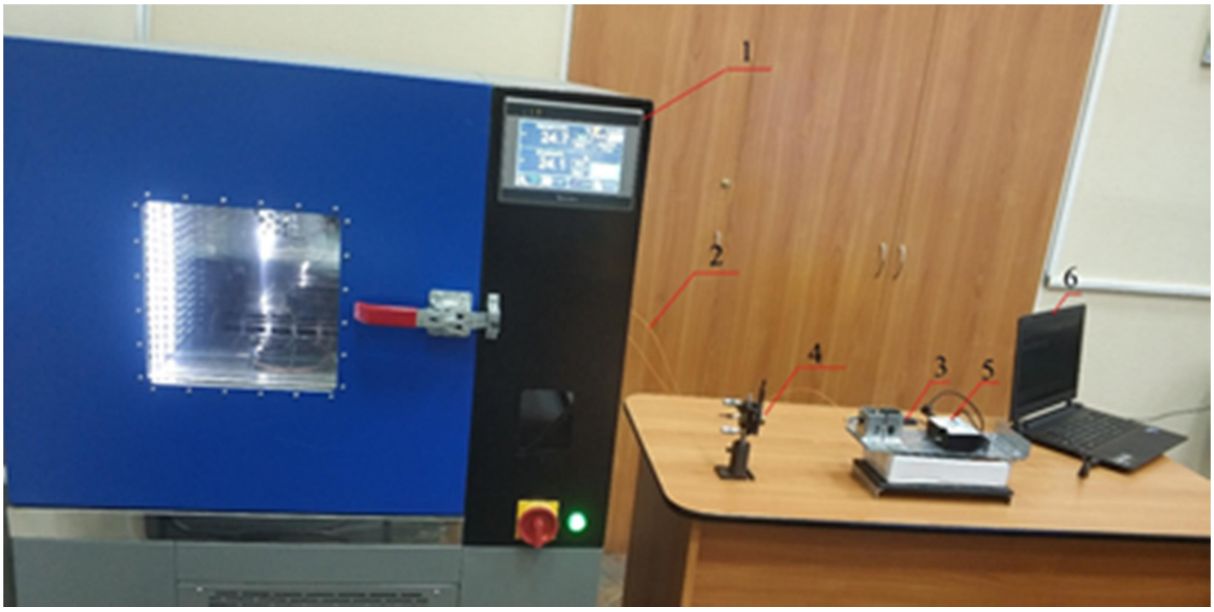
4.2.4 Экспериментальное исследование влияния температуры окружающей среды на передачу анализируемого сигнала по оптическому волокну

Применение разрабатываемой в рамках данной работы спектральной аппаратуры направлено на решение задачи контроля процессов горения, протекание которых сопровождается повышением температуры окружающей

среды. Поэтому при организации контроля, где анализируемое излучение сначала передается по оптическому волокну на заданное расстояние от контролируемого объекта, формирующая оптика, предназначенная для ввода оптического излучения в волокно, и часть самого волокна находятся также в этих условиях. Следовательно, при обработке результатов спектроскопического измерения чрезвычайно важно учитывать влияние неблагоприятных условий окружающей среды на передачу анализируемых сигналов по оптическому волокну.

В работах [133, 148] были представлены результаты экспериментального исследования влияния температуры окружающей среды на передачу анализируемого сигнала по оптическому волокну при изменении температуры от минус 20 до плюс 120 градусов по Цельсию.

Исследование влияния температуры окружающей среды на передачу анализируемого сигнала по оптическому волокну проводилось на разработанном стенде, фотография которого приведена на рисунке 4.33.



1 - климатическая камера УП-64ТХВ, 2 - оптическое волокно, 3 – лазер, 4 - фокусирующая линза, 5 – спектрометр, 6 – компьютер

Рисунок 4.33 – Фотография экспериментального стенда

Эксперимент проводился на оптическом волокне Nufern-FUD-3759 длиной 10 м. Рабочий спектральный диапазон волокна соответствует 200 – 1200 нм, диаметр сердцевины волокна – 105 мкм, рабочая температура – от минус 40 до плюс 85 ^{0}C.

Волокно было помещено в климатическую камеру УП-64ТХВ. Камера предназначена для испытаний технических изделий на стойкость к воздействию повышенной (пониженной) температуры и влажности воздуха при эксплуатации.

На входной торец оптического волокна с помощью фокусирующей линзы подавалось излучение лазера на длине волны 632 нм.

Выходной торец ОВ был подключен к спектрометру USB2000+.

Суть эксперимента состояла в следующем: на первом этапе было проведено измерение спектральной линии лазера, излучение которого передавалось по оптическому волокну при комнатной температуре (20^{0}C). Климатическая камера не была включена, оптическое волокно находилось в ней. Интенсивность лазерного излучения составила 67 тыс. кодовых единиц. Данный уровень был взят за опорный, относительно которого проводилось дальнейшее сравнение полученных результатов при изменении температуры.

Второй этап эксперимента заключался в нагреве оптического волокна за счет повышения температуры внутри климатической камеры до 120 градусов по Цельсию. Результаты прохождения анализируемого сигнала по оптическому волокну фиксировались на спектрометре при каждом изменении температуры на 10 градусов по Цельсию.

Полученная спектрограмма при нагреве оптического волокна до плюс 90^0 C приведена на рисунке 4.34.

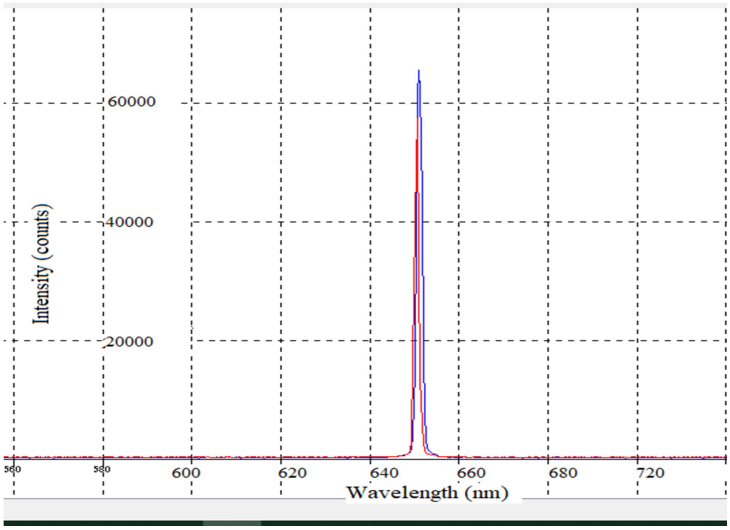


Рисунок 4.34 – Спектрограмма лазерного излучения при увеличении температуры до 90 ^{0}C

На рисунке 4.34 спектрограмма синего цвета соответствует опорному уровню, т.е. спектрограмме при комнатной температуре, спектрограмма красного цвета – спектрограмме при температуре 90 ^{0}C.

Как видно из рисунка интенсивность лазерного излучения уменьшилась на 12 тыс. к.е. относительно опорного уровня и составила 56 тыс. к.е.

Полученная спектрограмма при нагреве оптического волокна до плюс 120 ^{0}C приведена на рисунке 4.35.

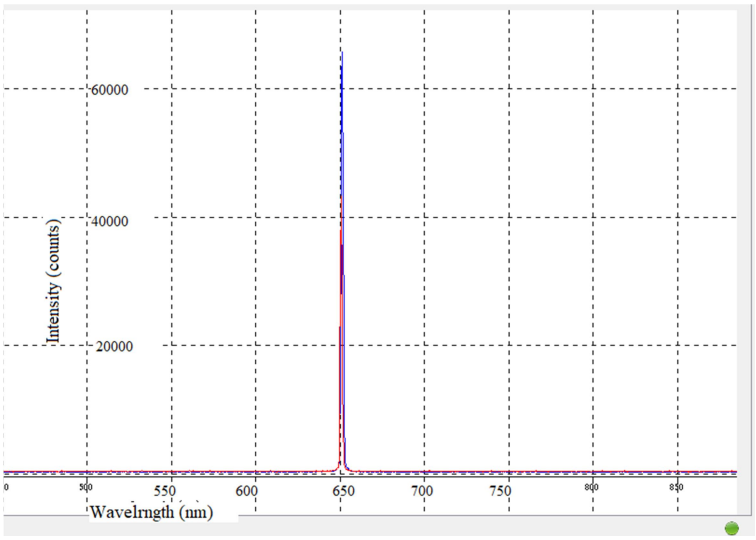


Рисунок 4.35 – Спектрограмма лазерного излучения при увеличении температуры до 120 ^{0}C

Как видно из рисунка 4.35, интенсивность лазерного излучения уменьшилась на 22 к.е. относительно опорного уровня и составила 45 тыс. к.е.

После этого рабочая температура камеры была приведена в соответствие с комнатной температурой.

Третьим этапом было понижение температуры до минус 20 градусов по Цельсию за счет понижения температуры внутри климатической камеры, при этом результаты фиксировались на спектрометре при каждом изменении температуры на 5 градусов по Цельсию.

Полученная спектрограмма при охлаждении оптического волокна до 0 ^{0}C приведена на рисунке 4.36.

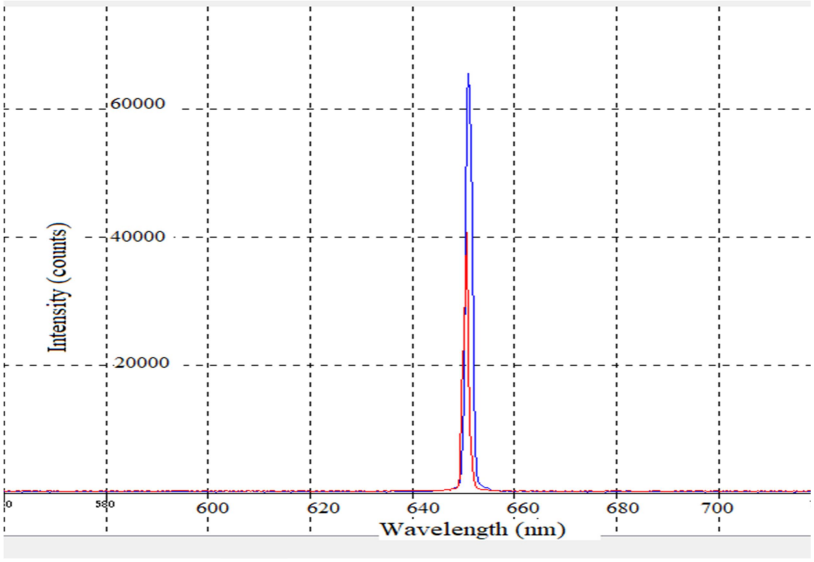


Рисунок 4.36 – Спектрограмма лазерного излучения при понижении температуры до 0 ^{0}C

Как видно из рисунка 4.36, интенсивность лазерного излучения уменьшилась на 26 тыс. к.е. относительно опорного уровня и составила 41 тыс. к.е.

Полученная спектрограмма при охлаждении оптического волокна до минус 15^{0}C приведена на рисунке 4.37.

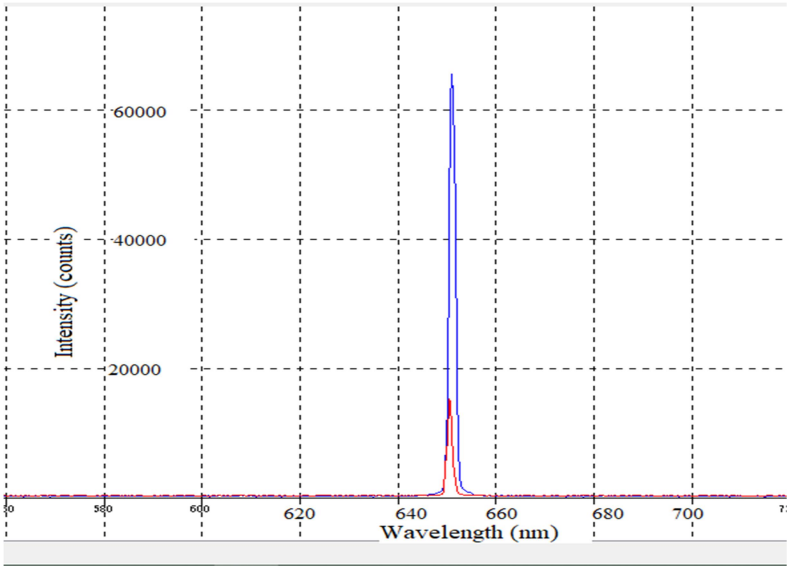


Рисунок 4.37 – Спектрограмма лазерного излучения при понижении температуры до минус 15 ^{0}C

Как видно из рисунка 4.37, интенсивность лазерного излучения уменьшилась на 51 тыс. к.е. относительно опорного уровня и составила 16 тыс. к.е.

Полученная спектрограмма при охлаждении оптического волокна до минус 20^{0}C приведена на рисунке 4.38.

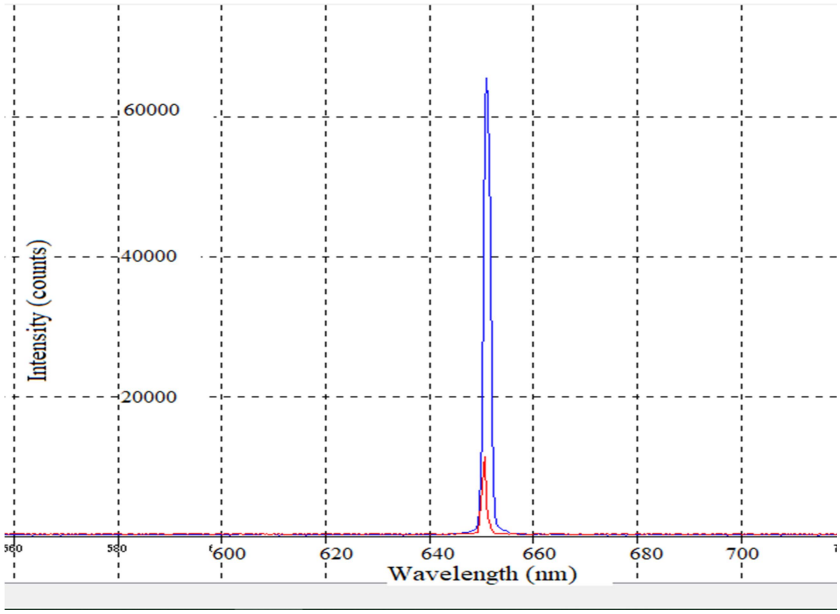


Рисунок 4.38 – Спектрограмма лазерного излучения при понижении температуры до минус 20 ^{0}C

Как видно из рисунка 4.38, интенсивность лазерного излучения уменьшилась на 55 тыс. к.е. относительно опорного уровня и составила 12 тыс. к.е.

Зависимость потерь в волокне от температуры окружающей среды была построена на одном графике, который приведен на рисунке 4.39.

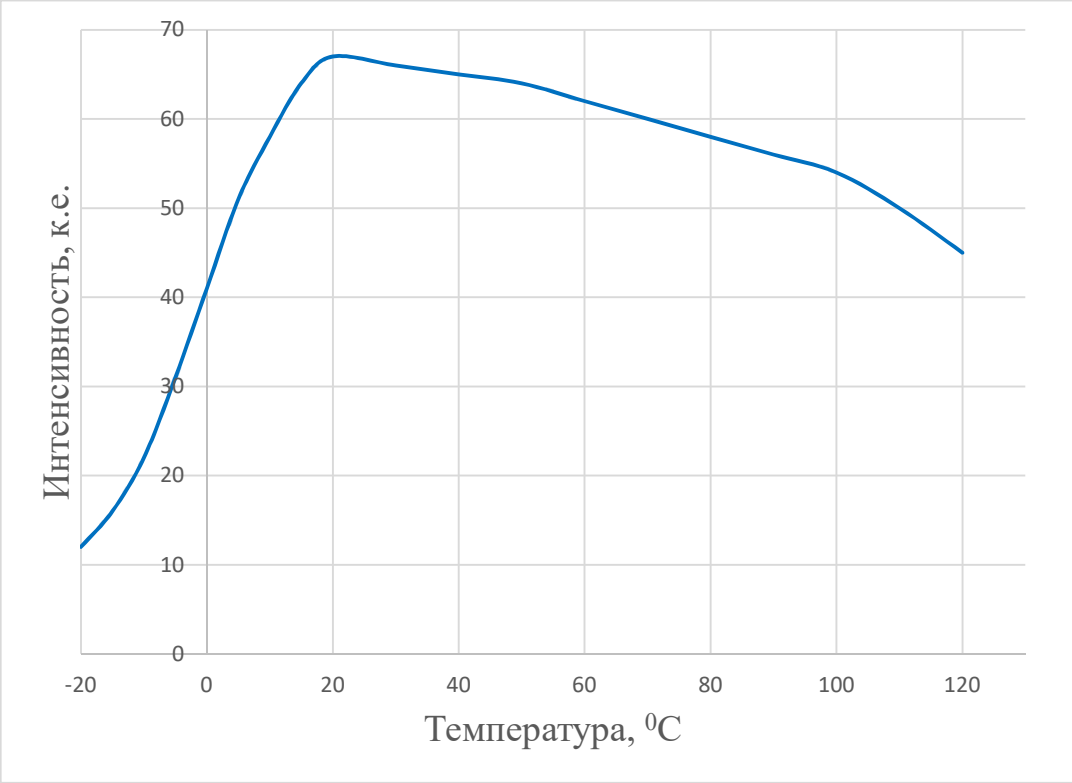


Рисунок 4.39 – Зависимость потерь в волокне от температуры окружающей среды

Как следует из рисунка 4.39, интенсивность излучения, прошедшего через оптическое волокно, значительно (более 10%) уменьшается при повышении температуры от 60 ^{0}C и выше, что соответствует увеличению потерь в волокне при такой температуре. При понижении температуры значительное увеличение потерь наблюдается уже при температуре 15 ^{0}C и ниже, при этом крутизна кривой имеет более ярко выраженный характер, чем при повышении температуры. Это говорит о том, что более низкие температуры оказывают значительное влияние на передачу анализируемого излучения по оптическому волокну.

4.3 Выводы по главе 4

1. 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.

2. 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% по сравнению со спектрометрами других типов. Повышение его разрешающей способности может быть достигнуто путем применения спектрально-селективного элемента с решеткоподобной структурой. 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.

3. 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.

4. 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 оптоволокна для передачи анализируемого сигнала на заданное расстояние, приводит к

неоднородности волнового фронта оптического излучения, в результате чего происходит искажение аппаратной функции спектрального прибора и ухудшение его разрешающей способности более чем на 30% при применении одномодового оптоволокна и более чем на 60% при применении многомодового оптоволокна.

5. Разработана методика коррекции потерь и искажений, возникающих при передаче анализируемых сигналов по оптическому волокну. Применение данной методики при проектировании спектральных приборов контроля позволит улучшить технические и эксплуатационные характеристики разрабатываемых приборов.

6. Показано, что влияние температуры окружающей среды на искажения анализируемого сигнала при передаче по оптическому волокну приводит к увеличению потерь.

7. Учет и корректировка при обработке результатов спектроскопического измерения потерь и искажений, возникающих при передаче анализируемых сигналов по оптическому волокну, позволят улучшить эксплуатационные характеристики разрабатываемых спектральных приборов контроля в отличие от прототипов.

8. Основные результаты данной главы опубликованы в работах [78, 79, 84, 87, 116, 119 - 121, 123, 129 - 131, 133, 134, 136, 137, 139, 141 - 148].

5 Спектроскопические параметры, характеризующие горение газообразных углеводородов, и методика подготовки и проведения спектроскопического контроля

Результативность методики подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения зависит от правильности определения контролируемых параметров, т.е. тех спектральных линий или спектральных участков, которые однозначно позволяют судить о состоянии и динамике контролируемого процесса горения, их интенсивности, взаимного соотношения и определения их оптимального числа (минимально необходимого) для решения конкретной практической задачи контроля с требуемой достоверностью.

В данной работе для решения задачи контроля процессов горения ГУ предлагается применение методов эмиссионной оптической спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии. Поэтому исследование спектроскопических информационных параметров было основано именно на этих методах спектроскопии.

5.1 Информационные параметры в спектре излучения контролируемого процесса горения газообразных углеводородов

Задача контроля процесса горения газообразных углеводородов, применяемого для выработки тепловой энергии, приобретает особую актуальность при оптимизации режимов работ различных теплоэнергетических установок, печей и котлов во многих отраслях промышленности: энергетике, химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, металлургической и т.п.

Горение – это сложный физико-химический процесс, при котором горючие вещества и материалы под воздействием высоких температур вступают в химическое взаимодействие с окислителем (кислородом воздуха), превращаясь в продукты горения [9]. В результате горения происходит

интенсивное выделение тепла и светового излучения. От условий, в которых происходит горение, зависят параметры оптического излучения, а, следовательно, оно содержит в себе информацию об этом процессе горения.

Одним из объективных источников информации о процессе горения является спектральный состав испускаемого пламенем оптического излучения. Поэтому повышение достоверности контроля процессов горения путем применения методов оптической спектроскопии по сравнению с существующими методами контроля, основанными на измерении второстепенных параметров, становится очевидной. При этом для результативного решения задачи контроля процессов горения необходимо провести детальные исследования спектральных характеристик излучения пламени, их зависимостей от режимов горения и сформировать систему спектроскопических информационных параметров, характеризующих процесс горения газообразных углеводородов с точки зрения его эффективности и экологичности. Под результативным решением задачи контроля подразумевается его выполнение с требуемой достоверностью при применении технических средств с минимальными необходимыми характеристиками.

Качественный и количественный анализ излучения пламени может проводиться в трех основных диапазонах спектра: УФ-, видимый- и ИК-диапазоны спектра, а его спектральный состав характеризуется тремя типами спектра [9].

Линейчатые спектры обусловлены испусканием света свободными атомами химических элементов, участвующих в процессе горения, причем каждая линия соответствует переходу электрона из одного стационарного состояния в другое. Атомарные линии в основном сосредоточены в УФ и видимом диапазонах [9].

Полосатые спектры в видимой и ультрафиолетовой областях соответствуют электронным переходам в молекулах. Такие электронные переходы сопровождаются одновременным изменением вращательной и

колебательной энергии, поэтому каждый электронный переход в молекуле дает ряд полос, а каждая полоса в свою очередь обладает ионной структурой. Полосатые спектры в инфракрасной области обусловлены поглощением или излучением энергии молекулами, однако обычно они связаны не с электронными переходами, а с изменением колебательной и вращательной энергии [9].

Непрерывные спектры обусловлены излучением или поглощением света частицами веществ, находящихся в твердой или жидкой фазах, например, частицах сажи. Спектральный состав этого излучения соответствует закону Планка для излучения черного тела, а его интенсивность зависит, в первую очередь, от количества в зоне горения частиц и их температуры [9].

Среди наиболее интенсивных систем в спектрах пламен можно выделить системы полос следующих радикалов - продуктов горения: OH, C_2, CN и CH. Это обусловлено тем, что у этих радикалов резонансные переходы из основных электронных состояний в нижние возбужденные имеют относительно низкие энергии [95]. Эти полосы лежат в ближней УФ и в видимой областях и могут легко возбуждаться при сравнительно низких температурах. В спектрах ряда пламен также присутствуют некоторые слабые полосы многоатомных радикалов - HCO и CN [95].

В инфракрасном участке спектрального диапазона наиболее интенсивная полоса принадлежит CO_2 и соответствует 4,4 мкм, а полоса в области 2,8 мкм соответствует основным продуктам горения - CO_2 и H_2O. В инфракрасном диапазоне спектра пламени также наблюдаются и менее интенсивные полосы - CO и OH [95, 188]. В результате сильного фонового излучения элементов топки контроль пламени на основе регистрации этих полос излучения не представляется возможным.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что наиболее предпочтительными для анализа СХ племен являются ближний УФ и видимый диапазоны.

В большинстве случаев на предприятиях энергетической и химической промышленностей для выработки тепловой энергии путем сжигания органического топлива в качестве топлива используется природный газ, основную часть которого составляет метан (CH4) от 76 до 98 % [35].

В основе процесса горения углеводородного топлива лежит химическое взаимодействие горючих компонентов топлива: углеводородов (C_mH_n), монооксида углерода (CO) и водорода (H_2) с окислителем под воздействием высоких температур. При этом состав горючей смеси характеризуется КИВ $\alpha_{КИВ}$, определяющий соотношение газ-воздух в горючей смеси [2].

Стоит отметить, что цвет пламени а, следовательно, и спектр его излучения изменяются в зависимости от количества воздуха и скорости его подачи. Ярко жёлтый окрас пламени соответствует режиму горения без подачи воздуха, спектр такого пламени является сплошным и широкополосным, что обусловлено тепловым излучением угольных частиц. При незначительной подаче воздуха окрас пламени приобретает прозрачный сине-фиолетовый оттенок. При дальнейшем увеличении подачи воздуха пламя разделяется на внешний и внутренний конусы ярко сине-зеленого и сине-фиолетового оттенка соответственно. При режиме горения с еще большей подачей воздуха для внутреннего конуса опять начинает преобладать фиолетовый оттенок [95].

В спектрах догорания всех органических горючих наблюдаются только спектр пламени окиси углерода и полосы OH; полосы CH и C_2 в этих спектрах отсутствуют. Это означает, что излучение света после прохождения пламени через горючее не связано с окислением исходного углеводорода. Спектр «догорания» однозначно указывает на то, что оно обусловлено сгоранием окиси углерода или окиси углерода и водорода [95].

Из вышесказанного следует, что, зная спектральный состав излучения, испускаемого в результате горения, а также установив зависимости его

изменения от режимов горения, возможно с высокой достоверностью выполнять контроль этого процесса в режиме реального времени.

Поэтому одной из задач данной диссертационной работы являлось проведение экспериментального исследования спектральных характеристик излучения пламени ГУ и их установление их зависимости от режимов горения.

Несмотря на то, что на теплоэнергетических объектах в качестве органического топлива применяется природный газ, в работе для исследований был выбран пропан, что обусловлено его доступностью. Как и природный газ, пропан также является газообразным углеводородным топливом и имеет похожую спектральную характеристику.

5.2 Экспериментальное исследование спектроскопических параметров в спектре излучения, возникающего при горении пропана

5.2.1 Метод эмиссионной оптической спектроскопии

Экспериментальное исследование СИП, характеризующих процесс горения пропана, методом эмиссионной оптической спектроскопии проводилось при применении спектрометра USB2000+ (OceanOptics Inc.), в котором спектральное разложение выполняется дифракционной решеткой по симметричной скрещенной схеме Черни-Тернера [87, 88, 90]. Данный спектрометр работает в диапазоне длин волн от 200 нм до 1100 нм с оптическим разрешением 1 нм. Спектрометр USB2000+ оснащен ПЗС-линейкой Sony с 2048 элементами. Для передачи анализируемого оптического сигнала и ввода его в спектрометр применялся волоконно-оптический зонд из многомодового кварцевого волокна с диаметром сердцевины 100 мкм, длина зонда составляла 2 м.

Эксперимент проводился на стенде с применением двухкомпонентной горелки, в которой предусмотрено предварительное смешивание газа и подаваемого компрессором воздуха. Для имитации топки промышленного

теплоэнергетического агрегата был разработан макет топочной камеры. Пропановоздушная смесь горела при атмосферном давлении.

Функциональная схема стенда приведена на рисунке 5.1, где 1 – спектрометр USB2000+, 2 – волоконно – оптический зонд, 3 – оптический конденсор, 4 – ротаметр для пропана, 5 – манометр для пропана, 6 – вентили регулировки подачи газовоздушной смеси, 7 – ротаметр для воздуха, 8 – манометр для воздуха, РС – компьютер, C_3H_8 – баллон с пропаном, К – компрессор.

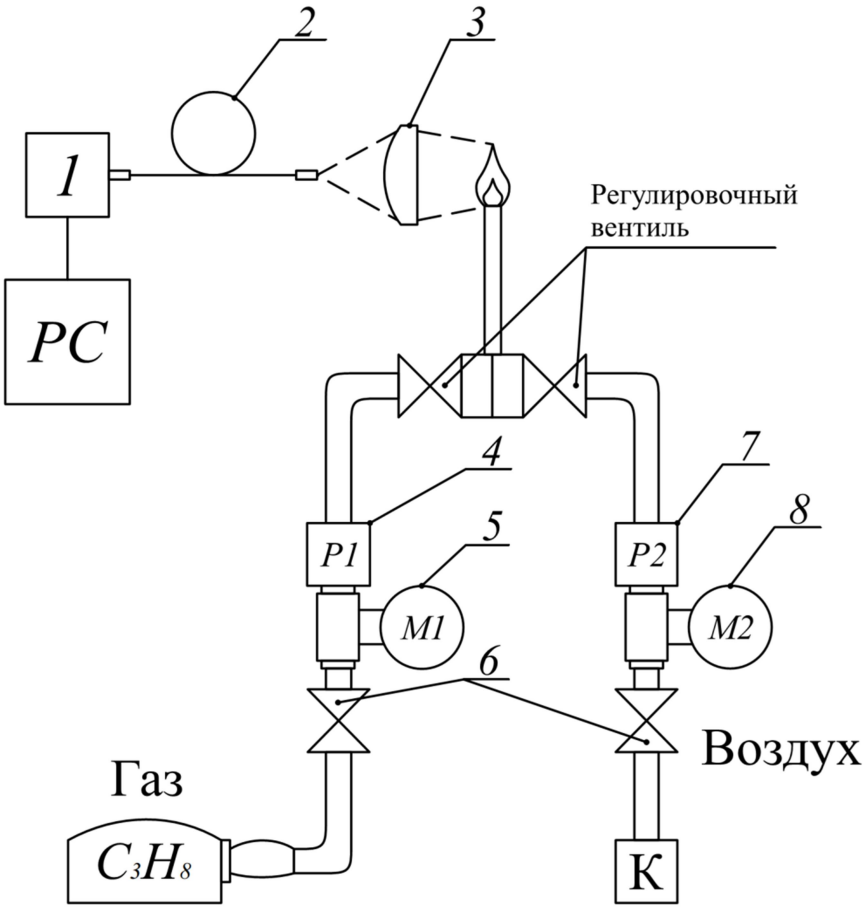


Рисунок 5.1 – Схема экспериментального стенда

Фотография стенда (без макета топочной камеры) приведена на рисунке 5.2, где 1 – спектрометр, 2 – волоконно–оптический зонд, 3 – конденсор, 4 – ротаметры, манометры и вентили регулировки, 5 – компрессор с баллоном воздуха, 6 – горелка, 7 – компьютер.

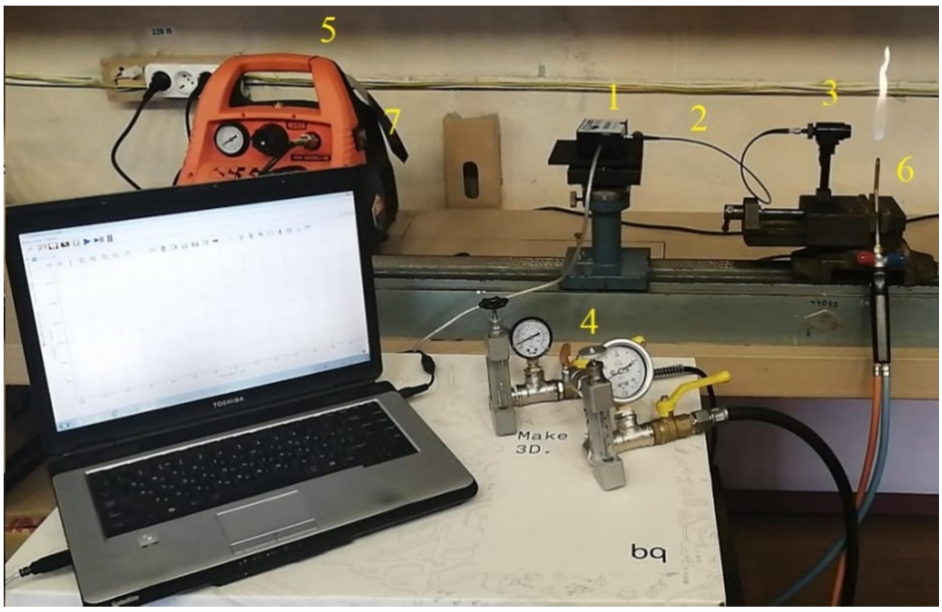


Рисунок 5.2 – Фотография экспериментального стенда

Фотография макета топочной камеры приведена на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Фотография макета топочной камеры

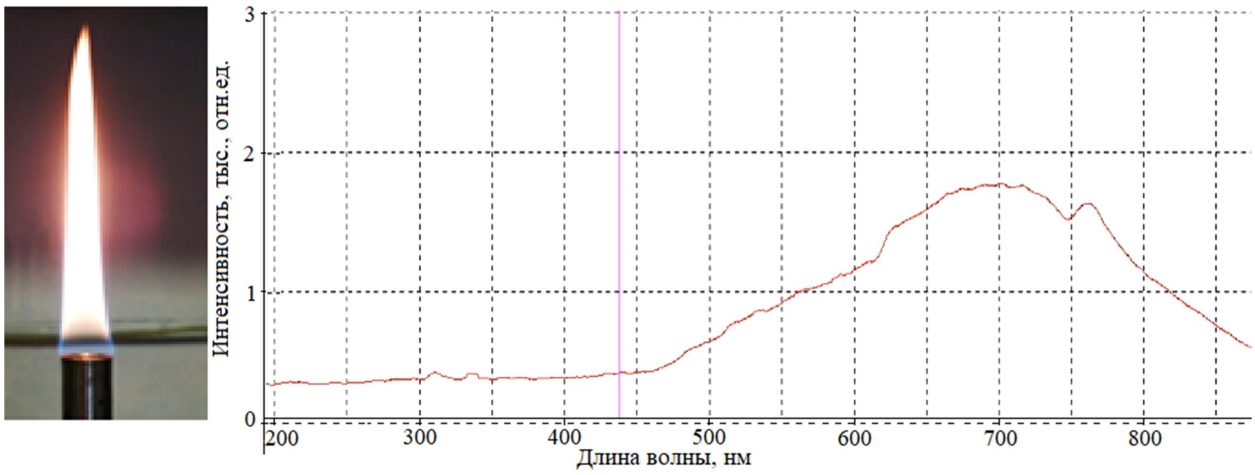
Эксперимент выполнялся в три этапа [90]:

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 режима стехиометрического горения.

Фотография пламени горелки и спектрограмма, полученная на спектрометре USB2000+ в режиме горения при поджоге пропана без подачи воздуха, приведена на рисунке 5.4.

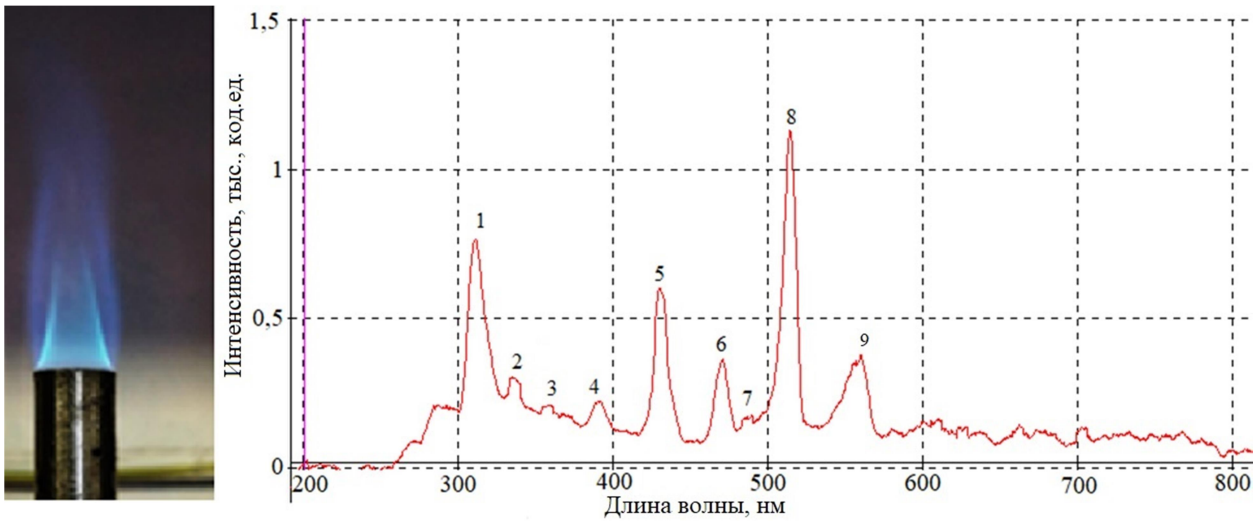


а) – фотография пламени горелки; б) - спектрограмма

Рисунок 5.4 – СХ излучения пламени без подачи воздуха.

При горении пропана без подачи воздуха цвет пламени приобрел яркий оранжево-красный оттенок и имел в основном сплошной характер от 450 до 850 нм с максимальной интенсивностью в районе 700 нм, что обусловлено тепловым излучением угольных частиц.

На втором этапе были установлены СИП, характеризующие стехиометрическое горение пропана. В этом случае пламя состояло из двух конусов: внутреннего конуса сине-зеленого цвета и внешнего сине-фиолетового оттенка. При этом спектр излучения пламени представлял собой характерную структуру в форме ряда специфических спектральных полос, соответствующих продуктам горения и отмеченных на рисунке 5.5 цифрами.



а) – фотография пламени горелки; б) - спектрограмма

Рисунок 5.5 – СХ пламени пропана

В результате эксперимента были установлены полосы молекулы углерода C_2 [95], расположенные в зеленой области спектра и представляющие собой компактную систему. Наиболее интенсивные полосы углерода соответствуют спектральным диапазонам около следующих длин волн: 470 нм (6 - на рисунке 5.5), 515 нм (8 - на рисунке 5.5) и 562 нм (9 - на рисунке 5.5).

В спектре пламени пропана наблюдались две системы полос углеводорода CH. В первой системе полос CH наиболее интенсивная полоса имеет максимум на длине волны 434 нм (5 - на рисунке 5.5), и менее интенсивная имеет максимум на длине волны 489 нм (7 - на рисунке 5.5). К другой системе полос CH относится полоса с максимумом на длине волны 390 нм (4 - на рисунке 5.5).

Кроме того, в пламени пропановоздушной смеси регистрировались интенсивные полосы углеводородного пламени: полоса HCO и полоса CN [95]. Наиболее интенсивная полоса углеводородного пламени HCO имеет максимум на длине волны 337,7 нм (2 - на рисунке 5.5), а полоса CN – на длине волны 358,8 нм (3 - на рисунке 5.5).

Также в спектре наблюдалась полоса гидроксильного радикала OH, которая имеет довольно отчетливые канты с интенсивным максимумом на длине волны 308 нм (1 - на рисунке 5.5).

Среди наиболее интенсивных полос в спектре пламени пропана, можно выделить следующие: полоса радикала OH с максимумом при 308 нм (1 - на рисунке 5.5); полоса радикала углеводорода CH с максимумом при 434 нм (5 - на рисунке 5.5) и полосы радикала углерода C_2 с максимумами в районе 470 нм (6 - на рисунке 5.5), 515 нм (8 - на рисунке 5.5) и 563,5 нм (9 - на рисунке 5.5) [189].

Для определения влияния режима горения на интенсивности установленных СИП, которые характеризуют процесс горения пропана, был проведен третий этап исследования. Данный этап заключался в измерении спектральной характеристики излучения, возникающего в результате горения пропана, при его фиксированном расходе и разных расходах воздуха.

Эксперимент проводился при различных коэффициентах избытка воздуха (соотношениях газ-воздух): от $\alpha_{КИВ}$ =0,5 до $\alpha_{КИВ}$ =2 [90]. Для примера, на рисунке 5.6 представлены спектральные характеристики пламени, полученные в результате эксперимента, для 4 вариантов соотношения газ-воздух: при $\alpha_{КИВ}$ =0,75; 0,9; 1,0 и 1,25. Каждая кривая соответствует одному соотношению газ-воздух и получена в результате усреднения 1000 измерений для каждого случая. Была выполнена нормировка кривых для удобства отображения на одном графике.

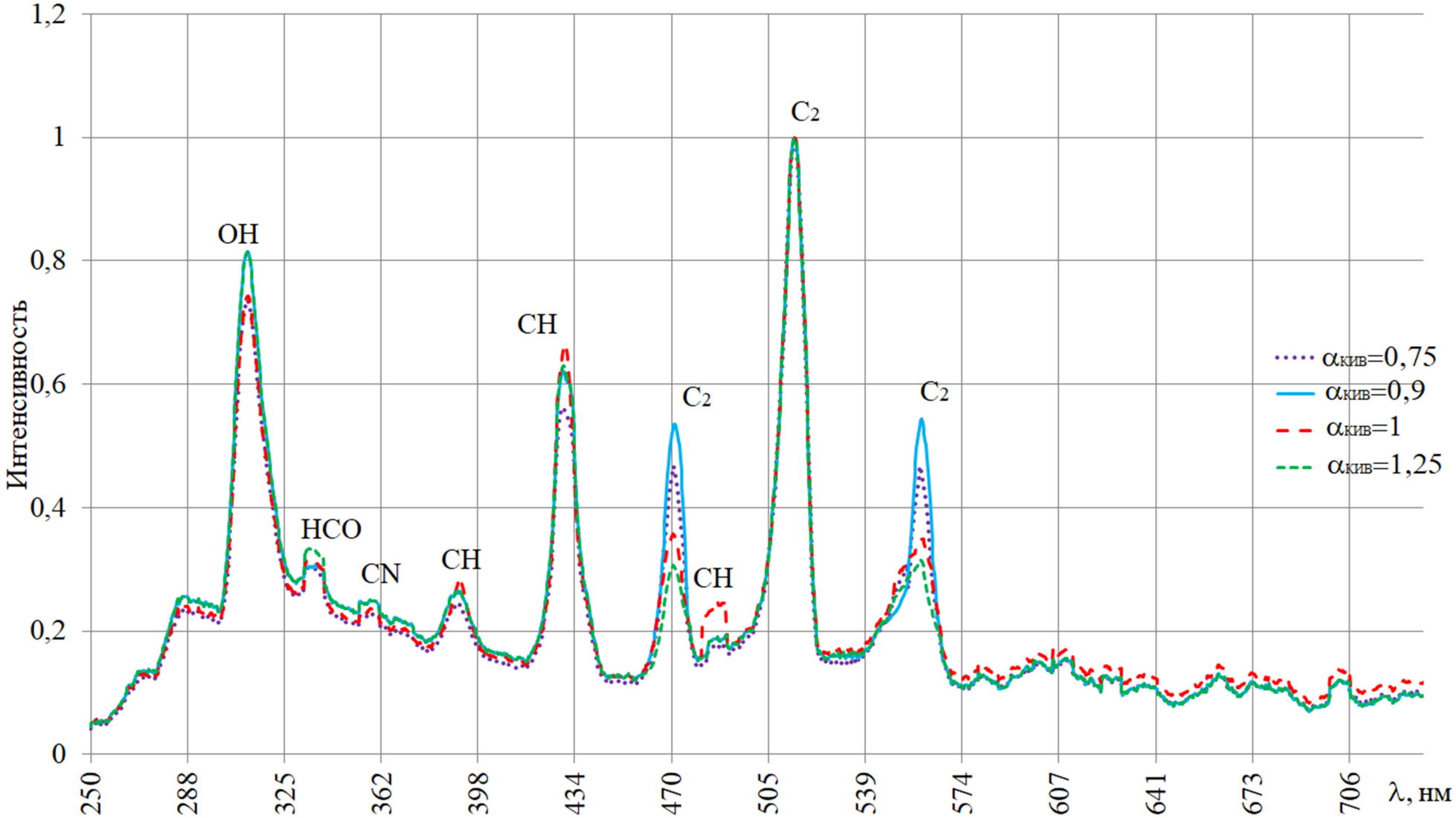


Рисунок 5.6 - Спектральная характеристика пламени при различных коэффициентах избытка воздуха

В результате эксперимента было установлено, что интенсивности различных полос в спектре пламени пропана существенно зависят от режимов его горения, т.е. состава пропановоздушной смеси.

В случае богатой смеси, когда подавалось незначительное количество воздуха, в спектре пламени наиболее интенсивны были полосы углерода C_2 и достаточно интенсивны полосы углеводорода CH, интенсивность полос углеводородного пламени HCO была не очень велика, а полоса OH имела плоский максимум интенсивности в такой смеси.

В случае бедной смеси, при избыточном количестве воздуха, интенсивность полос C_2 снижалась, при этом интенсивность спектральных полос углеводорода CH оставалась достаточно большой, а полос углеводородного пламени – средней, при этом цвет внутреннего конуса пламени изменился на сине-фиолетовый оттенок. Стоит отметить, что абсолютный максимум полосы углеводородного пламени проявлялся в смесях при составе близком к стехиометрическому, но в бедных смесях их интенсивность падала значительно меньше, чем интенсивность других полос, поэтому в спектре таких пламен их относительная интенсивность по сравнению с другими полосами была значительно выше.

При этом в спектре пламени пропана в случае стехиометрического горения или близкого к нему ($\alpha_{КИВ} \approx 1$) полосы углерода C_2 появлялись раньше по ходу реакции, чем полосы углеводорода CH. Полосы гидроксильного радикала OH появлялись также на ранних стадиях, а полосы углеводородного пламени – раньше полос CH, но несколько позже полос углерода C_2.

На рисунке 5.7 приведены кривые зависимости интенсивности излучения различных молекул продуктов горения, присутствующих в пламени пропановоздушной смеси, от коэффициента избытка воздуха [90, 91]. Была выполнена нормировка кривых для удобства отображения на одном графике.

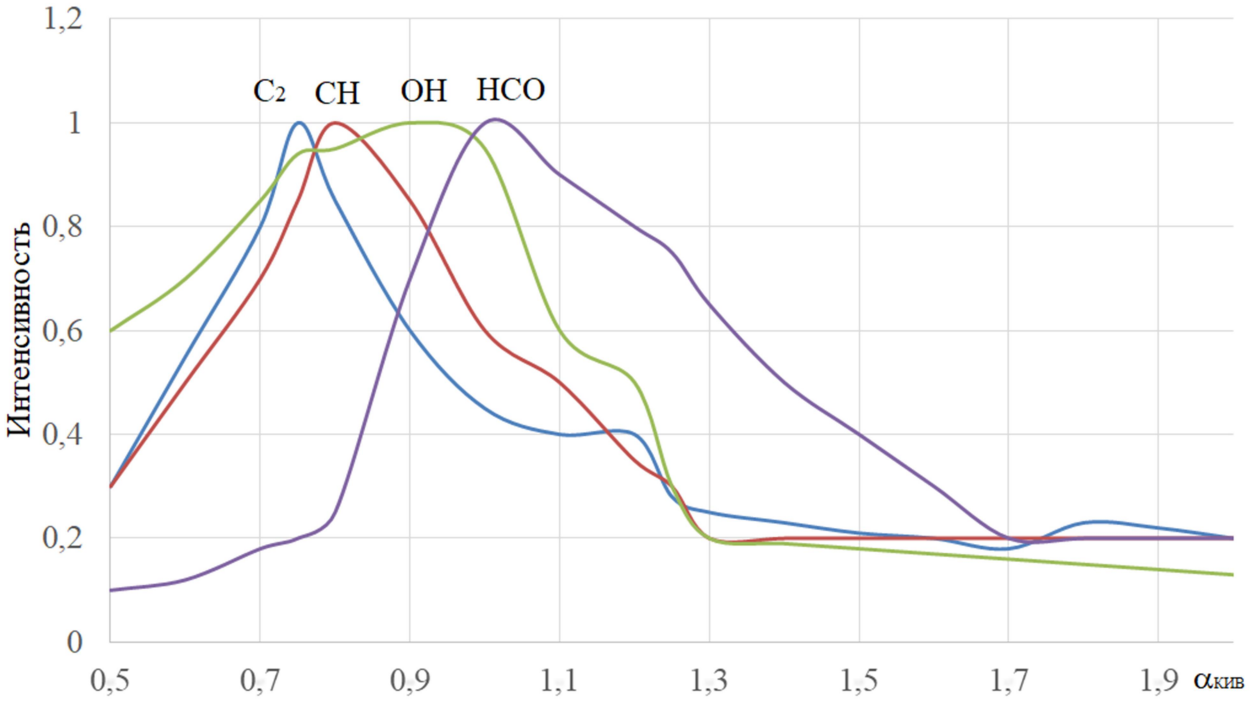


Рисунок 5.7 – Зависимость интенсивности излучения различных молекул от коэффициента избытка воздуха

Полученные экспериментальные зависимости показывают, что кривые имеют максимум интенсивности для C_2 – при $\alpha_{КИВ}$=0,75, для CH – при $\alpha_{КИВ}$ = 0,8, интенсивность полос OH имеет плоский максимум вблизи $\alpha_{КИВ}$=0,9, а полосы углеводородного пламени HCO – при режиме горения, близкому к стехиометрическому, когда $\alpha_{КИВ} \approx 1$.

5.2.2 Метод лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии

Помимо применения традиционного метода эмиссионной оптической спектроскопии для проведения контроля процесса горения газообразных углеводородов, в данной работе предлагается применение одного из наиболее перспективных аналитических методов – метода лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии [29].

Данный метод основан на измерении спектров вторичного излучения, возникающего в результате формирования и эволюции плазмы при воздействии на вещество мощного лазерного импульса.

Схема экспериментального стенда с ЛИЭС-установкой представлена на рисунке 5.8 [89, 190].

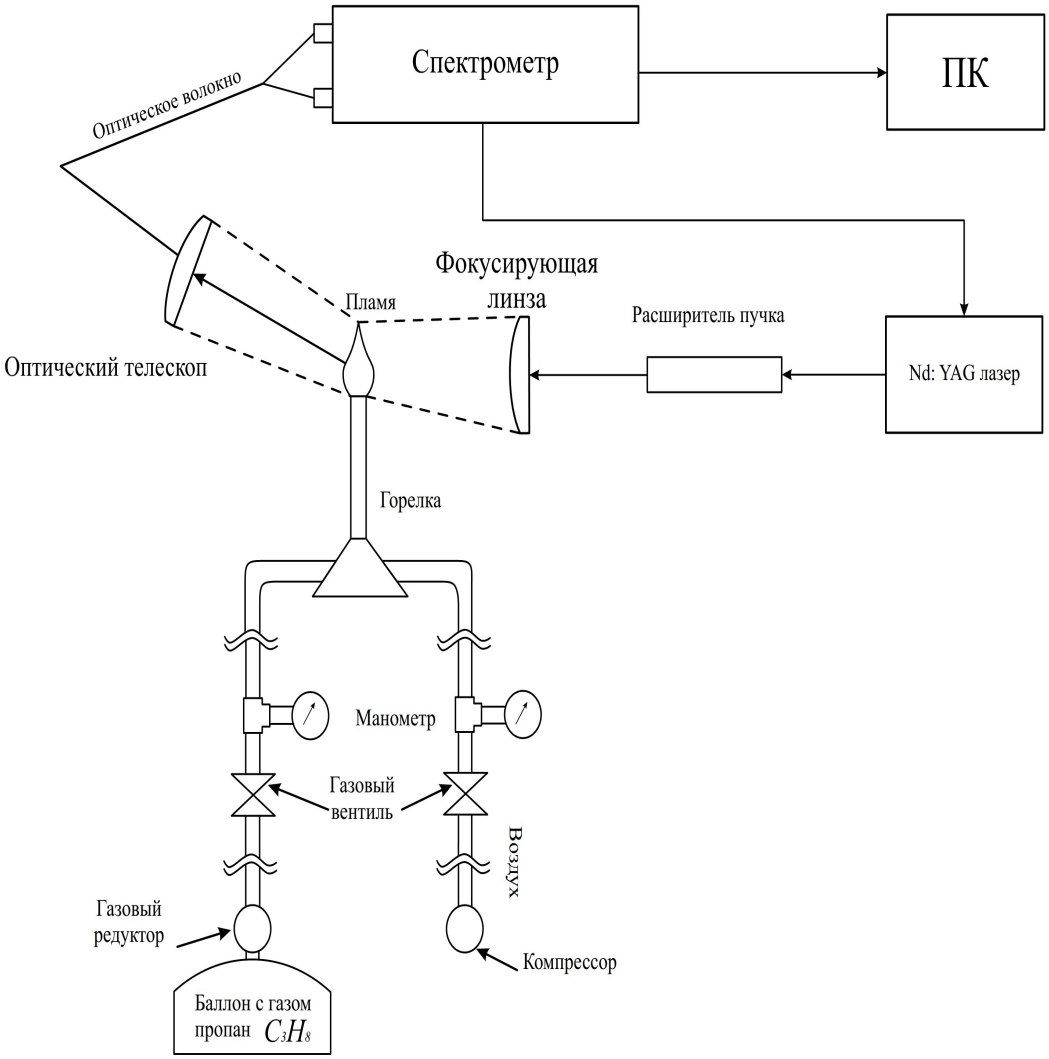


Рисунок 5.8 – Схема экспериментального стенда с ЛИЭС-установкой

Экспериментальный стенд с ЛИЭС -установкой включает в себя:

1. Nd:YAG лазер, в качестве которого используется твердотельный лазер LOTIS II 2134U, имеющий длину волны генерации 1064 нм;
2. расширитель пучка Eksma Optics 160-0051;
3. фокусирующую линзу, в качестве которой используется дублет с воздушной прослойкой ACA254-150-1064 с фокусным расстоянием 150 мм;
4. двухкомпонентную горелку, в которой предусмотрено предварительное смешивание газа и воздуха, подаваемого компрессором;

5. баллон с газом пропан C3H8;

6. оптический телескоп, к которому присоединено оптическое волокно;

7. двухканальный спектрометр AvaSpec-ULS4096CL-2-EVO. Первый канал спектрометра имеет рабочий диапазон 240 нм – 510 нм, второй – 490 нм – 1030 нм;

8. ПК – персональный компьютер.

Пропановоздушная смесь горела при атмосферном давлении. Излучение лазера LOTIS II 2134U с частотой 1 Гц, предварительно прошедшее через расширитель пучка со степенью увеличения 5x, фокусируется на пламени дублетом ACA254-150-1064. Применение расширителя пучка в сочетании с дублетом позволяет улучшить фокусировку лазерного излучения, тем самым повышается вероятность пробоя газовой среды. Энергия импульса во время эксперимента составляла 25 мДж, что с учетом оптической схемы экспериментальной установки достаточно для пробоя пламени и образования плазмы.

Для фокусировки и ввода излучения плазмы в оптическое волокно применялся оптический телескоп. При этом ось системы фокусировки излучения плазмы и оптическая ось падающего на пламя лазерного излучения находились под углом 45 град.

Излучение плазмы, переданное оптическим волокном, регистрировалось оптическим спектрометром AvaSpec-ULS4096CL-2-EVO, после чего полученная спектроскопическая информация передавалась на компьютер.

Фотография экспериментального стенда (без макета топочной камеры) с ЛИЭС-установкой представлена на рисунке 5.9, где 1 – Nd:YAG лазер LOTIS II 2134U, 2 – расширитель пучка Eksma Optics 160-0051, 3 – дублет ACA254-150-1064 с держателем, 4 – горелка, 5 – оптический телескоп, 6 – оптическое волокно, 7 –спектрометр AvaSpec-ULS4096CL-2-EVO, 8 – ПК.

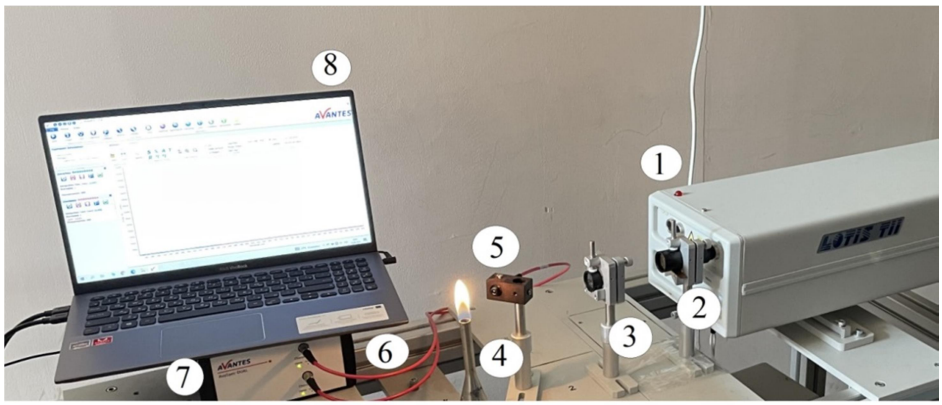


Рисунок 5.9 – Фотография экспериментального стенда с ЛИЭС-установкой

Эксперимент проводился при различных коэффициентах избытка воздуха: от $\alpha_{КИВ}$=0,5 до $\alpha_{КИВ}$=2,0.

На рисунках 5.10–5.12 представлены спектральные характеристики излучения плазмы, образованной в пламени горения пропана, при трех различных коэффициентах избытка воздуха: $\alpha_{КИВ}$ = 1 (смесь близкая к стехиометрической); $\alpha_{КИВ}$ = 0,75 (обогащенная смесь); и $\alpha_{КИВ}$ = 1,25 (обедненная смесь) [89, 91, 190].

Представленные спектральные характеристики являются суммарными от двух каналов спектрометра: 240 нм – 510 нм и 490 нм – 1030 нм. На всех рисунках красный спектр был получен первым каналом спектрометра, зеленый – вторым.

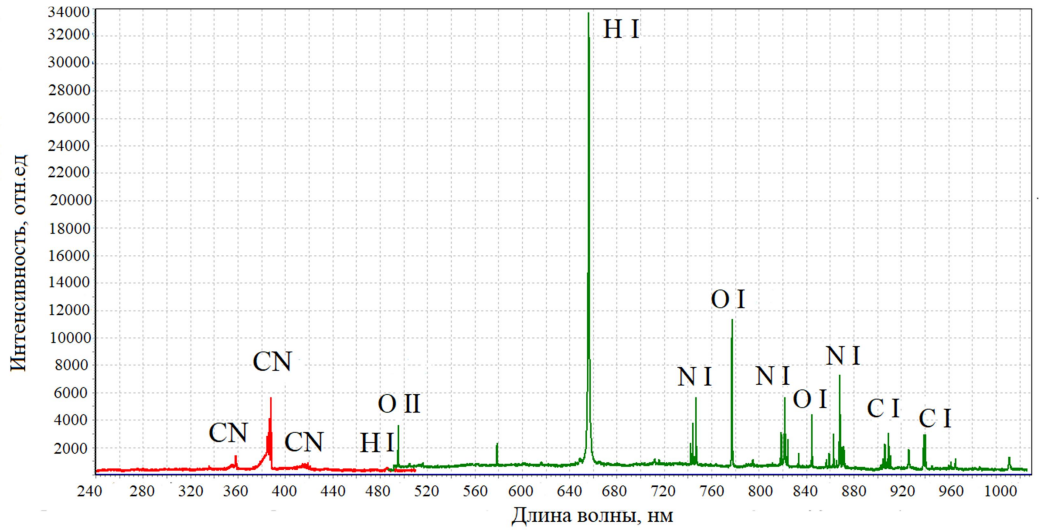


Рисунок 5.10 – Спектральная характеристика излучения плазмы, образованной в пламени, при $\alpha_{КИВ}$ =0,75 (обогащенная смесь)

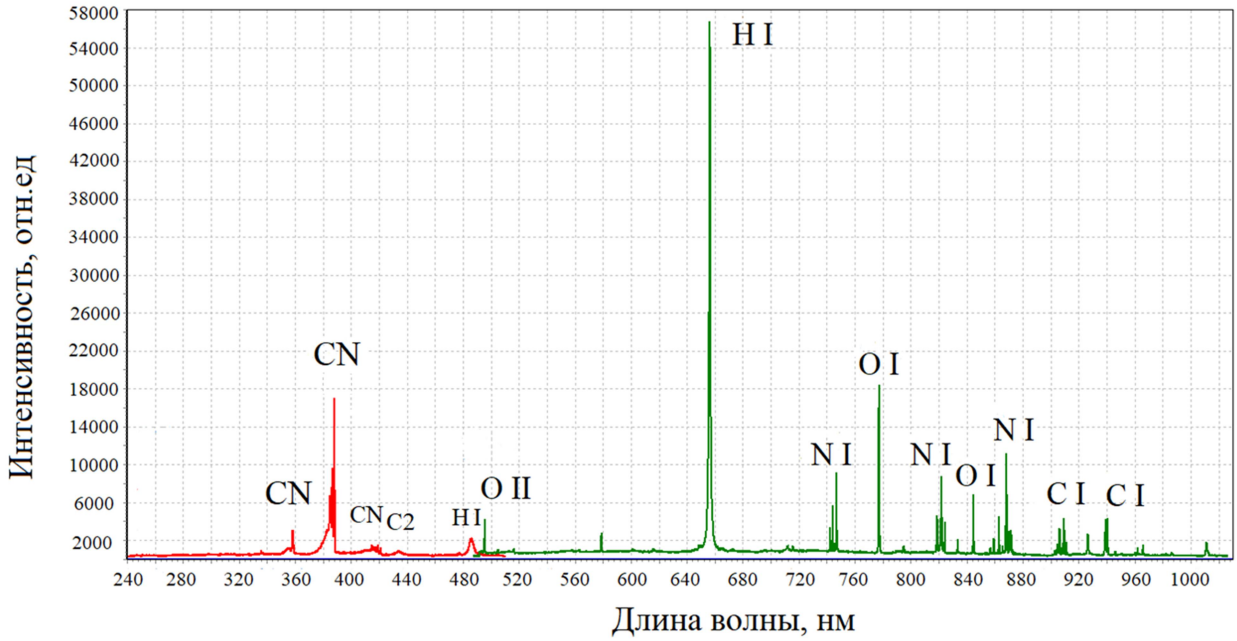


Рисунок 5.11 – Спектральная характеристика излучения плазмы, образованной в пламени, при $\alpha_{КИВ}$≈1 (смесь близкая к стехиометрической)

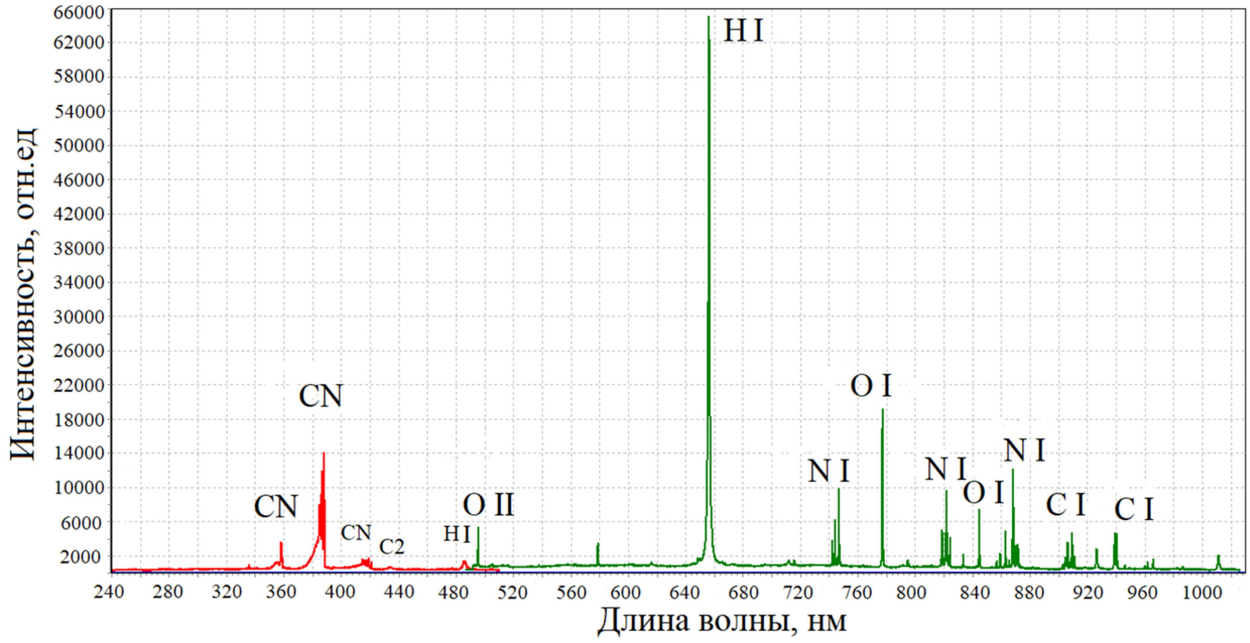


Рисунок 5.12 – Спектральная характеристика излучения плазмы, образованной в пламени, при $\alpha_{КИВ}$ =1,25 (обедненная смесь)

Наблюдаемые спектроскопические информационные параметры (спектральные линии) были идентифицированы с помощью интернет-базы спектральных линий [191].

По результатам проведенного эксперимента, можно сделать следующие выводы:

Спектральная характеристика излучения плазмы, образованной в результате воздействия мощного лазерного излучения в пламени пропана, представляет собой характерную структуру в форме ряда специфических спектральных линий, соответствующих продуктам горения: водорода H, кислорода O, азота N и углерода C.

Наиболее интенсивные линии соответствуют спектральным линиям кислорода O на длине волны 777 нм и водорода H на длине волны 656,3 нм. Также регистрировались менее интенсивные линии кислорода O с длинами волн 486,1 нм и 844,6 нм; азота N - с длинами волн 743,8 и 745,4 нм (дублет), 821,6 нм и 868,3 нм; углерода C - с длинами волн 908,9 нм и 940,6 нм, а также молекулярные полосы излучения радикала CN в спектральном диапазоне 355-420 нм.

Спектры пламени, полученные в результате эксперимента на втором канале спектрометра, представлены на рисунке 5.13 для трех вариантов коэффициента избытка воздуха: при $\alpha_{КИВ}$ = 0,75; 1,0 и 1,25. Каждая кривая соответствует одному соотношению газ-воздух и получена в результате усреднения 1000 измерений для каждого случая.

Бирюзовая кривая соответствует спектру смеси с соотношением газ-воздух $\alpha_{КИВ}$ =0,75; зеленая кривая соответствует спектру смеси для $\alpha_{КИВ}$ ≈1; красная кривая соответствует спектру смеси для $\alpha_{КИВ}$ =1,25.

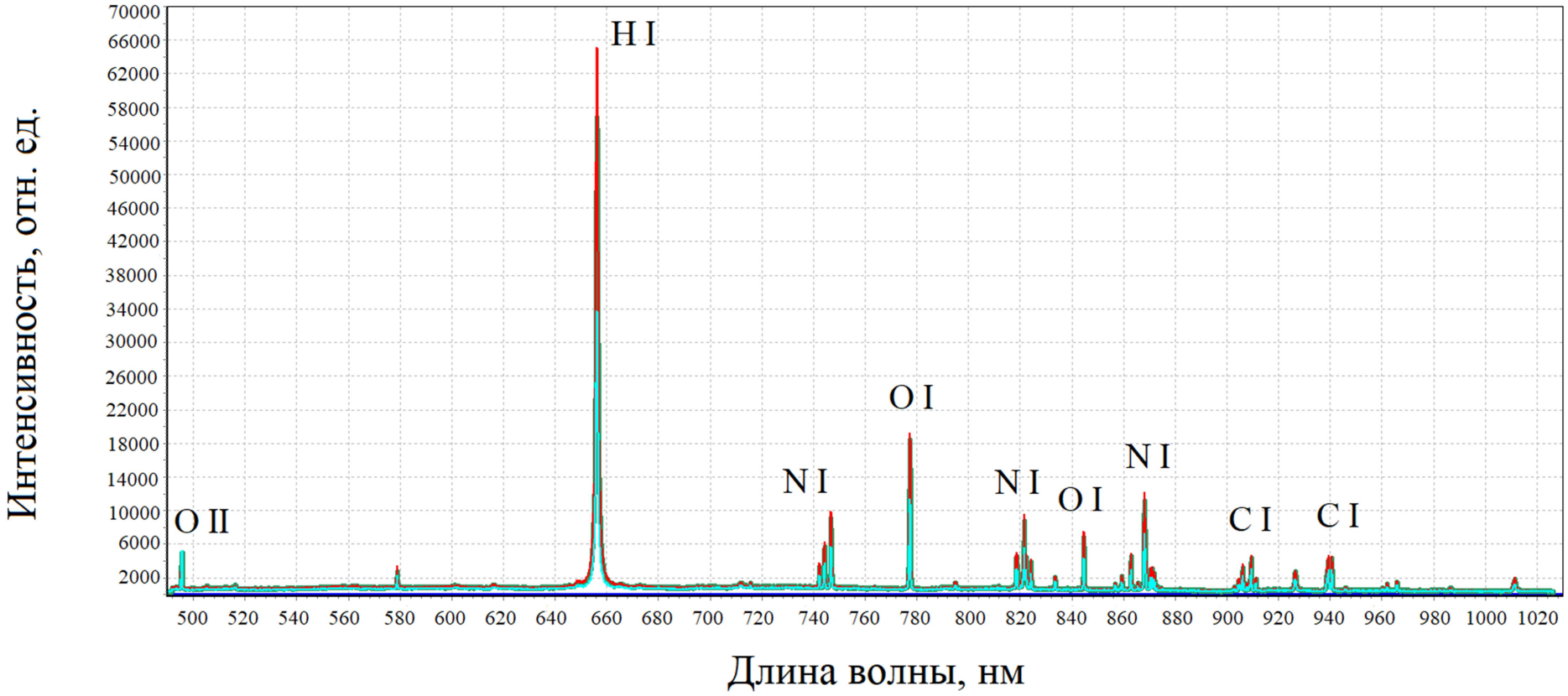


Рисунок 5.13 - Спектральная характеристика излучения плазмы, образованной в пламени, в диапазоне 490 нм – 1030 нм при различных соотношениях газ-воздух

Как показали результаты эксперимента, интенсивности различных спектральных линий в спектре пламени пропана существенно зависят от состава горючей смеси. Отношения интенсивностей спектральных линий H(656,3нм)/O(777нм), H(656,3нм)/N(746,8нм) для каждого случая соотношения газ-воздух при горении пропановоздушной смеси представлены в таблице 5.1 [89, 190].

Таблица 5.1 – Зависимость отношения интенсивностей спектральных линий от коэффициента избытка воздуха

Соотношение газ-воздух	Отношение H(656,3нм)/O(777нм)	Отношение H(656,3нм)/N(746,8нм)
0,75	2,86	5,86
≈1	3,07	6,33
1,25	3,41	6,6

Анализируя полученные результаты, можно определить, что существует линейная зависимость отношения интенсивностей спектральных пиков H (656,3 нм)/O (777 нм), H (656,3 нм)/N (746,8 нм) от коэффициента избытка воздуха. Отношения интенсивности H/O и H/N линейно возрастает с увеличением соотношения газ-воздух.

Помимо указанных спектральных линий, в спектре присутствуют молекулярные полосы излучения радикал CN.

Для более детального анализа данных молекулярных полос на рисунке 5.14 представлена область спектра в диапазоне 240 нм – 510 нм для всех трех случаев.

Бирюзовая кривая соответствует спектру смеси с соотношением газ-воздух $\alpha_{КИВ}$ =0,75; красная кривая соответствует спектру смеси для $\alpha_{КИВ}\approx1$; зеленая кривая соответствует спектру смеси для $\alpha_{КИВ}$=1,25.

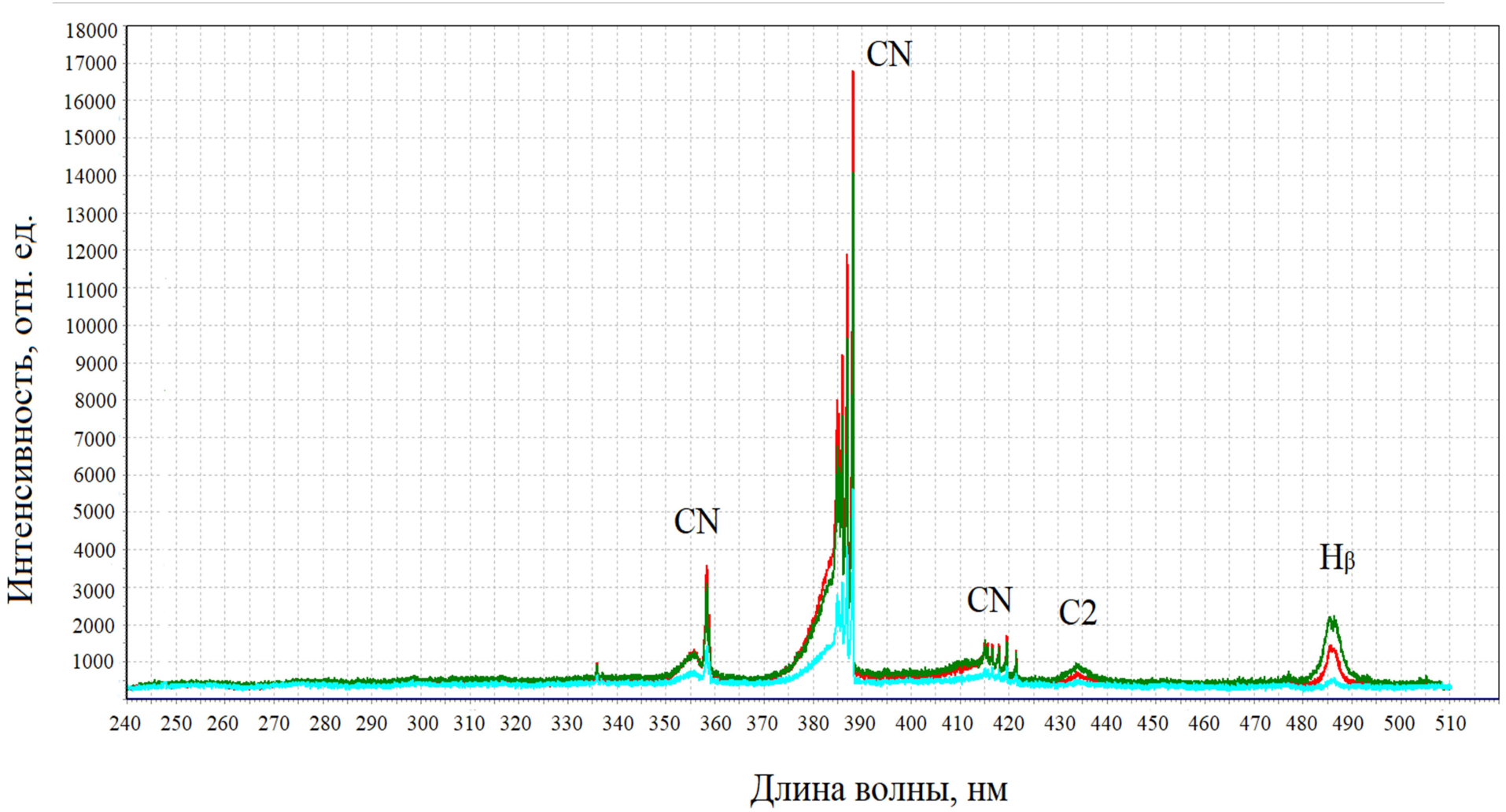


Рисунок 5.14 – Спектральная характеристика излучения плазмы, образованной в пламени, в диапазоне 240 нм – 510 нм при различных соотношениях газ-воздух

Появление углеродных полос CN в спектре излучения плазмы, является ярким доказательством того, что плазма была образована именно в пламени пропановоздушной смеси.

Анализируя полученные спектры, можно определить, что максимум интенсивности молекулярных полос CN соответствует горению, близкому к стехиометрическому.

На рисунке 5.15 приведены зависимости интенсивности излучения различных молекул продуктов горения, присутствующих в пламени пропановоздушной смеси и возбужденных плазмой, от коэффициента избытка воздуха [89, 91, 190]. Также была выполнена нормировка кривых для удобства отображения на одном графике.

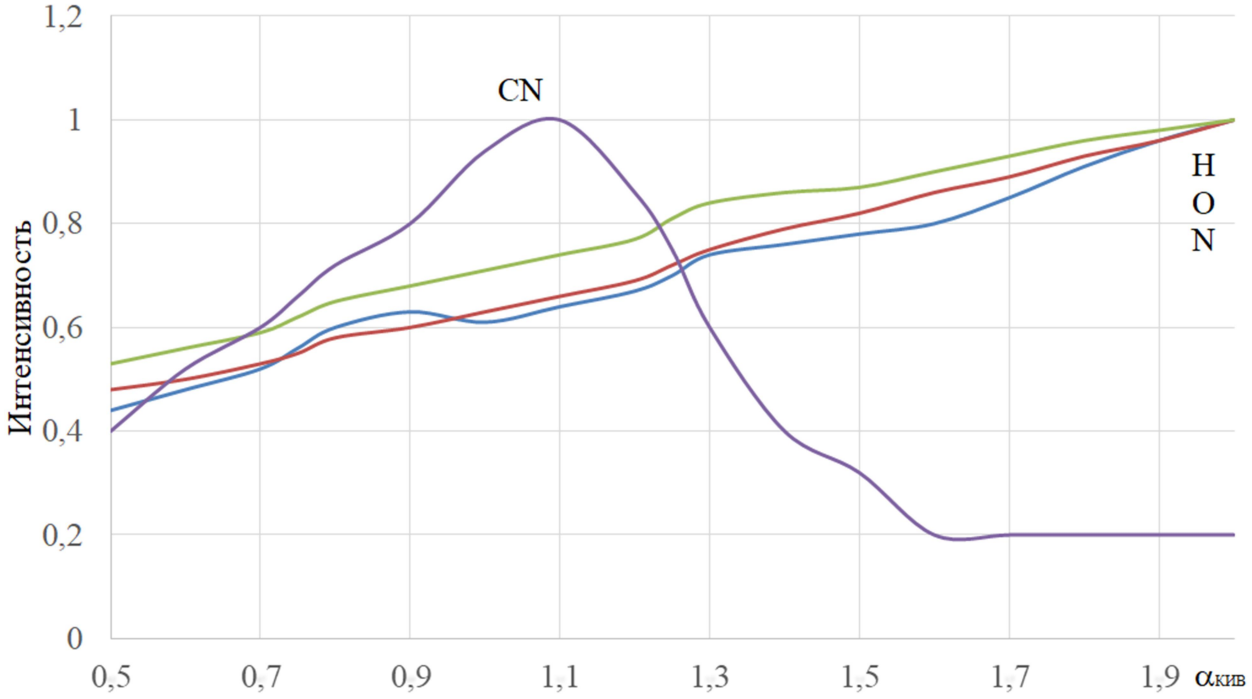


Рисунок 5.15 – Зависимость интенсивности излучения различных молекул, возбужденных плазмой, от коэффициента избытка воздуха

Максимум интенсивности спектральной полосы CN находится при $\alpha_{КИВ}$= 1,1, а интенсивность H, O и N линейно возрастает с увеличением соотношения газ-воздух.

Сравнивая спектральные характеристики пламени, полученные методом эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии, можно выделить одну особенность. При эмиссионной спектроскопии в спектре пламени пропана наблюдалась полоса углеводорода CH с максимумом на длине волны 390 нм (см. п.5.2.1 данной главы), а при лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии - 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 [91].

Так как максимум интенсивности полосы радикала углеводорода (CH) наблюдается при соотношении газ-воздух $\alpha_{КИВ}$ = 0,8, а максимум интенсивности полосы CN при $\alpha_{КИВ}$ = 1,1, это может дать дополнительную информацию о коэффициенте избытка воздуха при проведении контроля процесса горения газообразных углеводородов, тем самым увеличить достоверность контроля.

5.2.3 Экспериментальное исследование спектроскопических информационных параметров горения пропана разработанными спектральными приборами

С целью проверки возможности решения задачи контроля процесса горения пропана разработанными дифракционным спектральным прибором и многоканальным оптическим спектрометром, описание которых приведено в четвертой главе данной работы, были проведены соответствующие экспериментальные исследования.

Выполнялся только качественный анализ спектроскопических информационных параметров ввиду несовершенства программного обеспечения спектрометров.

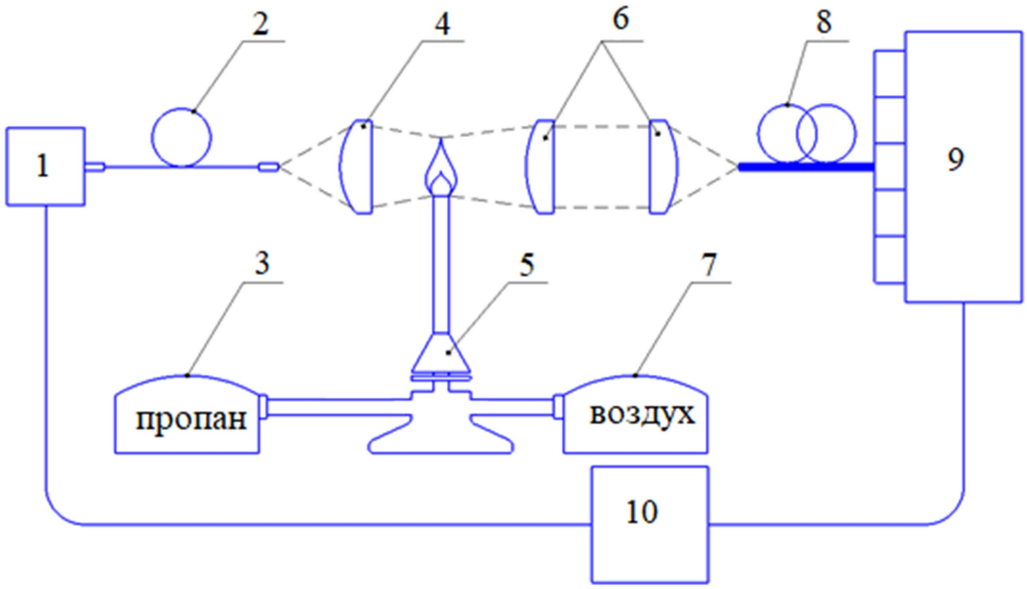
На основе проведенного предварительного экспериментального исследования спектральных характеристик пламени, возникающего при горении пропановоздушной смеси (см. п. 5.2.1), был выполнен выбор оптических фильтров для многоканального оптического спектрометра со средними длинами волн: 308 нм, соответствующий полосе OH с максимумом на длине волны 308 нм; 337 нм – полосе углеводородного пламени HCO с максимумом на длине волны 337,7 нм; 434 нм – полосе углеводорода CH с максимумом на длине волны 434 нм; 470 нм, 515 нм и 562 нм – первой, второй и третьей полосам углерода C_2 с максимумами на длинах волн 470 нм, 515 нм и 563,5 нм соответственно; 620 нм и 578 нм – в качестве опорных каналов для выполнения калибровки.

Полоса пропускания оптических фильтров составляет 8 нм. Так как полоса фильтра определяет разрешающую способность многоканального спектрометра, 8 нм является недостаточно хорошим разрешением для проведения качественного или количественного спектрального анализа, но для проведения спектроскопического контроля, основанного на регистрации отдельно стоящих спектральных полос в спектре пламени, такого разрешения вполне достаточно. Кроме того, фильтры с такой полосой пропускания отличаются низкой стоимостью по сравнению с фильтрами с более узкими полосами пропускания, например, 1 нм и меньше, что существенно снижает стоимость спектрального прибора контроля.

Если для других задач контроля будет требоваться более высокое разрешение и большее количество контролируемых параметров, возможно увеличить количество каналов и применить фильтры с более узкой полосой пропускания. На данный момент технология производства фильтров позволяет изготовить фильтры с полосой пропускания 0,5 и менее нм [192].

Для передачи анализируемого ОИ на заданное расстояние и ввода его в блоки узкополосной фильтрации применялся ВОЖ, состоящий из ста полимерных оптических волокон, диаметр сердцевины каждого волокна соответствовал 500 мкм.

Эксперимент проводился при одновременном измерении спектра излучения пламени, возникающего в результате горения пропана, на двух спектрометрах: дифракционном спектральном приборе и многоканальном оптическом спектрометре [87, 189]. Схема стенда приведена на рисунке 5.16.



1 – дифракционный спектральный прибор, 2 – волоконно-оптический зонд, 3 – баллон с газом (пропан), 4 – формирующая оптика для дифракционного прибора, 5 – горелка, 6 – формирующая оптика для многоканального оптического спектрометра, 7 – компрессор с баллоном воздуха, 8 – волоконно-оптический жгут, 9 – МОС, 10 – компьютер

Рисунок 5.16 – Схема стенда исследования ПГ газообразного углеводородного топлива

Первое измерение было выполнено при поджоге чистого пропана без подачи воздуха. Спектральные характеристики, полученные на дифракционном спектральном приборе и многоканальном оптическом спектрометре, приведены на рисунках 5.17 и 5.18 соответственно.



Рисунок 5.17 - СХ пламени горелки без подачи воздуха, полученная на дифракционном спектральном приборе

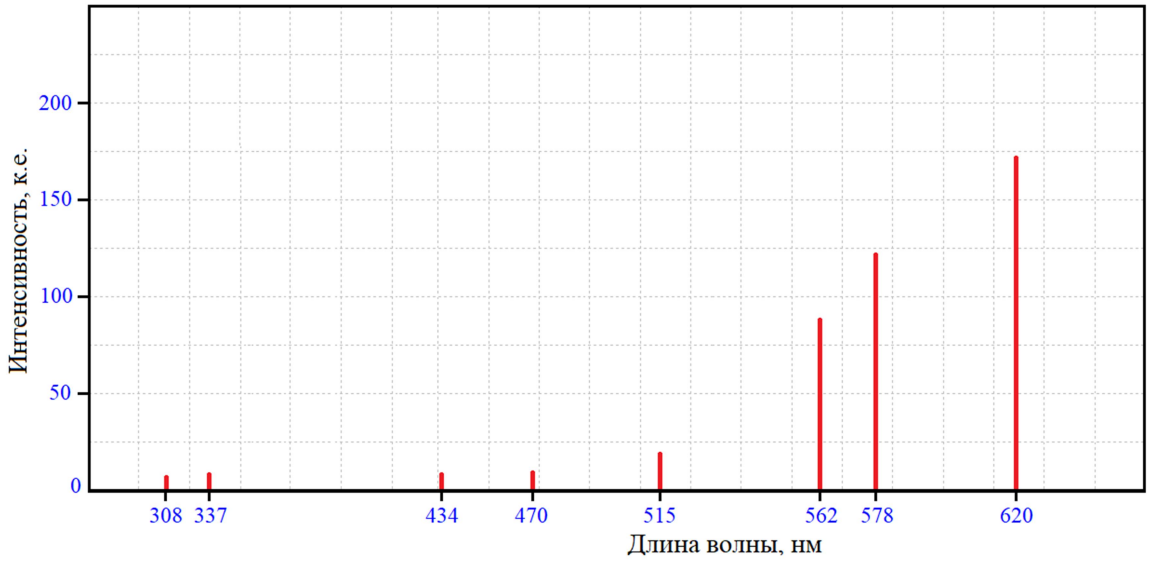


Рисунок 5.18 - СХ пламени горелки без подачи воздуха, полученная на многоканальном спектрометре

Как и в случае предварительного экспериментального исследования, выполненного на спектрометре OceanOptics USB2000+, спектр пламени имел сплошной характер от 450 до 850 нм.

Второе измерение было выполнено при такой подаче воздуха, при которой наблюдалось стехиометрическое горение. Спектральные

характеристики, полученные на ДСП и МОС, на рисунках 5.19 и 5.20 соответственно.

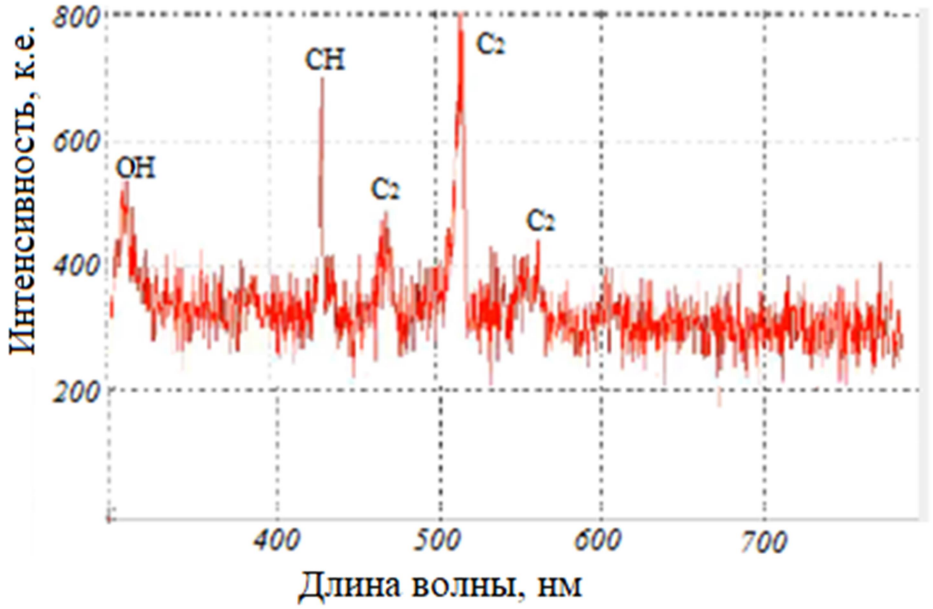


Рисунок 5.19 - СХ пламени горелки при стехиометрическом горении, полученная на дифракционном спектральном приборе

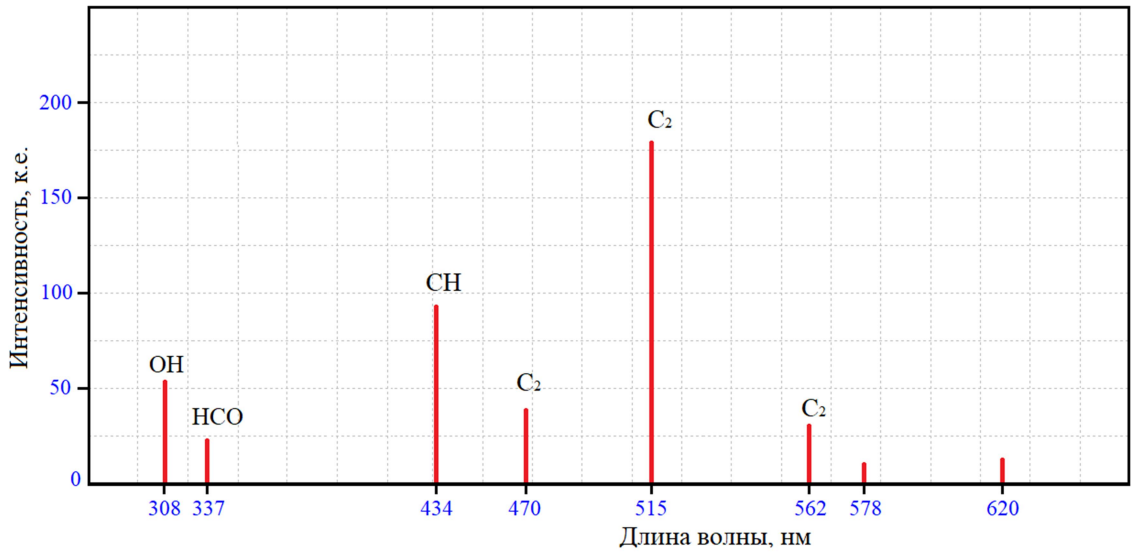


Рисунок 5.20 - СХ пламени горелки при стехиометрическом горении, полученная на многоканальном спектрометре

Аналогично предыдущему эксперименту, в спектре излучения пламени, возникающего в результате горения пропана, появились

характерные СИП в виде интенсивных полос, что проявилось в появлении сигнала значительной интенсивности в соответствующих каналах многоканального спектрометра.

Самыми интенсивными полосами в спектрах пламени являлись системы полос таких радикалов, как: OH с максимумом на длине волны 308 нм, CH с максимумом на длине волны 434 нм, и C2 с максимумами на длинах волн 470 нм, 515 нм и 563,5 нм.

Полученные результаты эксперимента доказывают возможность применения разработанных дифракционного спектрального прибора и многоканального оптического спектрометра для контроля процесса горения газообразного углеводородного топлива.

5.2.4 Спектроскопические информационные параметры, характеризующие процесс горения пропана

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований процесса горения газообразного углеводородного топлива – пропана двумя методами оптической спектроскопии, можно сформировать ряд спектроскопических информационных параметров, характеризующих процесс горения газообразных углеводородов. Данные параметры сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – СИП, характеризующие горение ГУ

Метод спектроскопии	Элемент	Спектральная линия/участок, нм	Обозначение
ЛИЭС-спектрометрия	H	656,3	λ1
	O	486,1	λ2
		777	λ3
		844,6	λ4

Продолжение таблицы 5.2

	N	743,8	λ5
		745,4	λ6
		821,6	λ7
		868,3	λ8
	C	908,9	λ9
		940,6	λ10
	CN	358,8	λ11
		389	λ12
		415-423	λ13
Эмиссионная спектроскопия	OH	308	λ14
	C2	470	λ15
		515	λ16
		562	λ17
	CH	389	λ18
		434	λ19
		489	λ20
	HCO	337,7	λ21
	CN	358,8	λ22

На основе установленной зависимости от режимов горения спектроскопических параметров в спектре излучения пламени газообразных углеводородов, указанных в таблице 5.2, и их взаимного соотношения, может быть построена система контроля процесса горения газообразного углеводородного топлива и организована процедура контроля методами эмиссионной спектроскопии или лазерно-искровой спектрометрии на любых объектах, в технологических процессах которых применяется сжигание газообразных углеводородов, в том числе природного газа.

5.3 Методика подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения

На основании результатов экспериментальных и теоретических исследований, представленных в 2, 3 и 4 главах, а также пп. 5.1-5.2 данной главы, была разработана методика подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения газообразных углеводородов.

Суть методики состоит в следующем:

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

1.1 Определить спектроскопические информационные параметры, характеризующие протекание контролируемого процесса горения:

1.1.1 определить количество и положение на оси длин волн спектроскопических информационных параметров;

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 спектроскопического параметра 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 спектроскопического параметра 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 параметра, 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 волоконно-оптической системы передачи).

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 контролируемого параметра.

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 волоконно-оптическую систему 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.

Алгоритм данной методики был разработан и апробирован автором настоящей работы.

5.4 Спектроскопический контроль процесса горения газообразных углеводородов

5.4.1 Постановка задачи экспериментальной отработки методики спектроскопического контроля

С целью проверки разработанного спектроскопического метода контроля процессов горения была выполнена экспериментальная отработка методики подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения на примере газообразного углеводорода – пропана.

Отработка методики проводилась в три этапа [91]:

1. Первый этап. Компьютерное моделирование допускаемых значений результатов спектральных измерений контролируемых параметров и минимальной вероятности ошибки контроля 1-го рода при заданной вероятности ошибки 2-го рода.

Моделирование выполнялось на основе разработанного спектроскопического метода контроля, представленного в третьей главе. С целью сокращения вычислительных ресурсов при компьютерном моделировании был выбран случай контроля по четырем параметрам.

2. Второй этап. Спектроскопический контроль процесса горения пропана методами эмиссионной оптической спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии, выполняемого спектральными приборами серийного производства.

В качестве серийных спектральных приборов в случае эмиссионного метода применялся спектрометр OceanOptics USB2000+, в случае ЛИЭС спектрометрии – двухканальный спектрометр AvaSpec-ULS4096CL-2-EVO.

Целью данного этапа было определение достоверности выполняемого контроля на серийных спектральных приборах контроля.

Было принято допущение, что процесс горения пропановоздушной смеси протекает в штатном режиме при соотношении газ-воздух $\alpha_{КИВ}$ от 0,9 до 1,1. Несмотря на то, что штатный режим горения газообразных

углеводородов в промышленных печах соответствует диапазону соотношения газ-воздух от 1,05 до 1,15, такой диапазон был выбран специально, чтоб смоделировать ситуацию переизбытка воздуха.

В качестве контролируемых спектроскопических информационных параметров были выбраны для эмиссионной спектроскопии - OH, HCO, CH, C_2 и для ЛИЭС-спектрометрии - CN, H, N и O.

Эксперимент проводился на экспериментальном стенде, схемы которого приведены на рисунках 5.1 и 5.8, одновременно для двух методов спектроскопии.

3. Третий этап. Спектроскопический контроль процесса горения пропана методом эмиссионной оптической спектроскопии при применении в качестве прибора контроля разработанного многоканального оптического спектрометра.

Описание многоканального спектрометра приведено в четвертой главе.

Целью данного этапа было определение достоверности выполняемого контроля на разработанном многоканальном спектральном приборе контроле.

Было принято такое же допущение, что процесс горения пропановоздушной смеси протекает в штатном режиме при соотношении газ-воздух $\alpha_{КИВ}$ от 0,9 до 1,1.

Эксперимент проводился на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рисунке 5.16.

Третий этап проводился только для случая контроля эмиссионным методом, поскольку на данный момент не предусмотрена возможность синхронизации разработанных спектральных приборов с лазером.

Тем не мене с учетом результатов второго этапа полученные результаты для эмиссионной спектроскопии можно экстраполировать и на случай лазерно-искровой спектрометрии.

5.4.2 Описание экспериментальной отработки методики спектроскопического контроля

5.4.2.1 Компьютерное моделирование допускаемых значений результатов спектральных измерений контролируемых параметров

1. В качестве критерия оптимального правила принятия решения был выбран критерий, обеспечивающий минимум уровня значимости, т.е. вероятности ошибки 1-го рода, при ограничении сверху вероятности ошибки 2-го рода.

2. Компьютерное моделирование было выполнено при различных значениях допускаемой вероятности ошибки контроля 2-го рода $\beta_{доп}$: от 3% до 10 % с шагом 1%.

3. Было введено допущение, что распределение погрешности измерения существенно меньше распределения контролируемых параметров, так, что выполняется равенство $\sigma_0=0{,}1\sigma$.

4. Были определены допускаемые минимальные и максимальные значения результатов спектральных измерений контролируемых параметров, обеспечивающие минимальную вероятность ошибки 1-го рода для различных значений ограничения вероятности ошибки 2-го рода $\beta_{доп}$.

Значения суммарной вероятности ошибки 1-го рода α_{Σ} и суммарный коэффициент соотношения $k_{\Sigma b\backslash a}$ допускаемых минимальных и максимальных значений результатов спектрального измерения (показания спектрометров в форме интенсивности в кодовых единицах) к минимальным и максимальным значениям контролируемых параметров, соответствующих штатному протеканию процесса, при заданных значениях вероятности ошибок 2-го рода $\beta_{доп}$ приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты компьютерного моделирования

№	$\beta_{доп},\%$	$k_{\Sigma b\backslash a}$	$a_{\Sigma},\%$
1	3	0,80	19,0
2	4	0,82	18,4
3	5	0,84	17,9
4	6	0,86	17,3
5	7	0,88	16,7
6	8	0,90	15,9
7	9	0,92	15,3
8	10	0,95	14,5

5.4.2.2 Спектроскопический контроль процесса горения пропана спектральными приборами серийного производства

1. В качестве контролируемых спектроскопических информационных параметров были выбраны спектральные полосы с наибольшей интенсивностью и определены их минимальные $I_{\min 0,9}$ и максимальные значения $I_{\max 1,1}$, соответствующие штатному протеканию процесса, т.е. при соотношении газ-воздух $\alpha_{КИВ}$ от 0,9 до 1,1 на эталонном спектрометре.

2. В данном случае в качестве результатов спектральных измерений использовались показания спектрометров на компьютере в форме интенсивности, выраженной в кодовых единицах, а не значения фототока.

3. За опорные минимальные $I_{\min 0,9}$ и максимальные $I_{\max 1,1}$ значения контролируемых СИП, соответствующих штатному протеканию процесса, были приняты усредненные, полученные в результате 1000 измерений показания спектрометра высокого разрешения и чувствительности AvaSpec-3648, который использовался в качестве эталонного спектрометра.

Перед измерениями была выполнена калибровка спектрометра по калибровочному источнику - вольфрамовому галогенному источнику LS-1 (ф. OceanOptics).

На рисунках 5.21 и 5.22 приведены спектральные характеристики пламени пропана для трех соотношений газ-воздух, которые были выбраны в качестве опорных значений для двух методов спектроскопии.

4. Спектроскопические параметры, их минимальные и максимальные значения, которые были выбраны в качестве опорных, приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Контролируемые параметры

№	Элементы	Значение, код. ед при $\alpha_{КИВ}$ =1,0	Минимальное значение $I_{min0,9}$, код. ед. при $\alpha_{КИВ}$ =0,9	Максимальное значение $I_{min1,1}$, код. ед. при $\alpha_{КИВ}$ =1,1
1	Для эмиссионной спектроскопии			
1.1	OH(308нм)	9930	10150	6090
1.2	HCO(337нм)	3700	2664	3320
1.3	CH(434нм)	5040	6720	4502
1.4	C_2(515нм)	11080	15200	10640
2	Для ЛИЭС спектрометрии			
2.1	CN(387нм)	14080	10800	16010
2.2	H(656,3нм)	57450	45930	63740
2.3	N(746,8нм)	9076	7396	9761
2.4	O(777нм)	18730	15568	19432

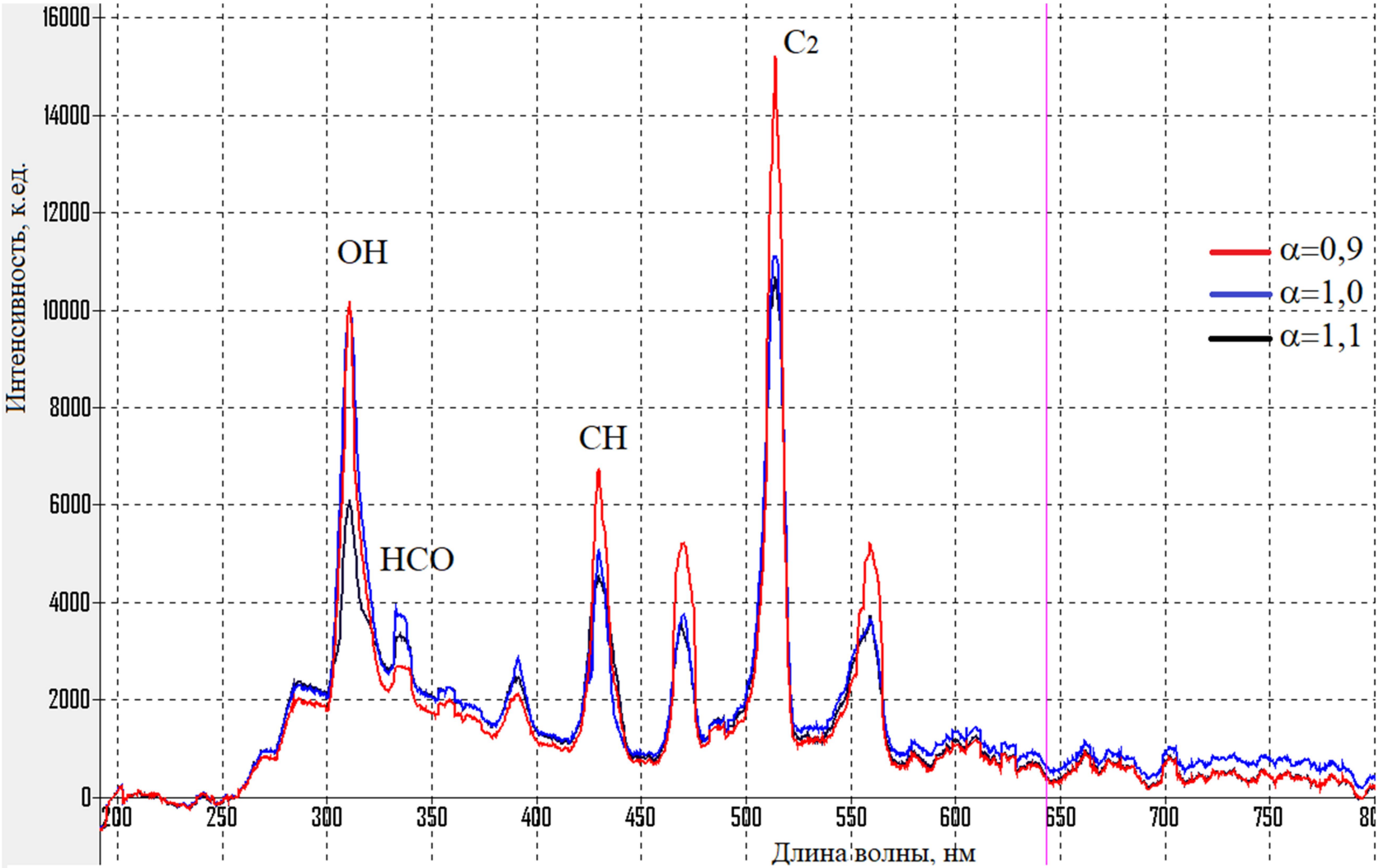


Рисунок 5.21 – Опорные CX пламени пропана для трех соотношений газ-воздух (эмиссионная спектроскопия)

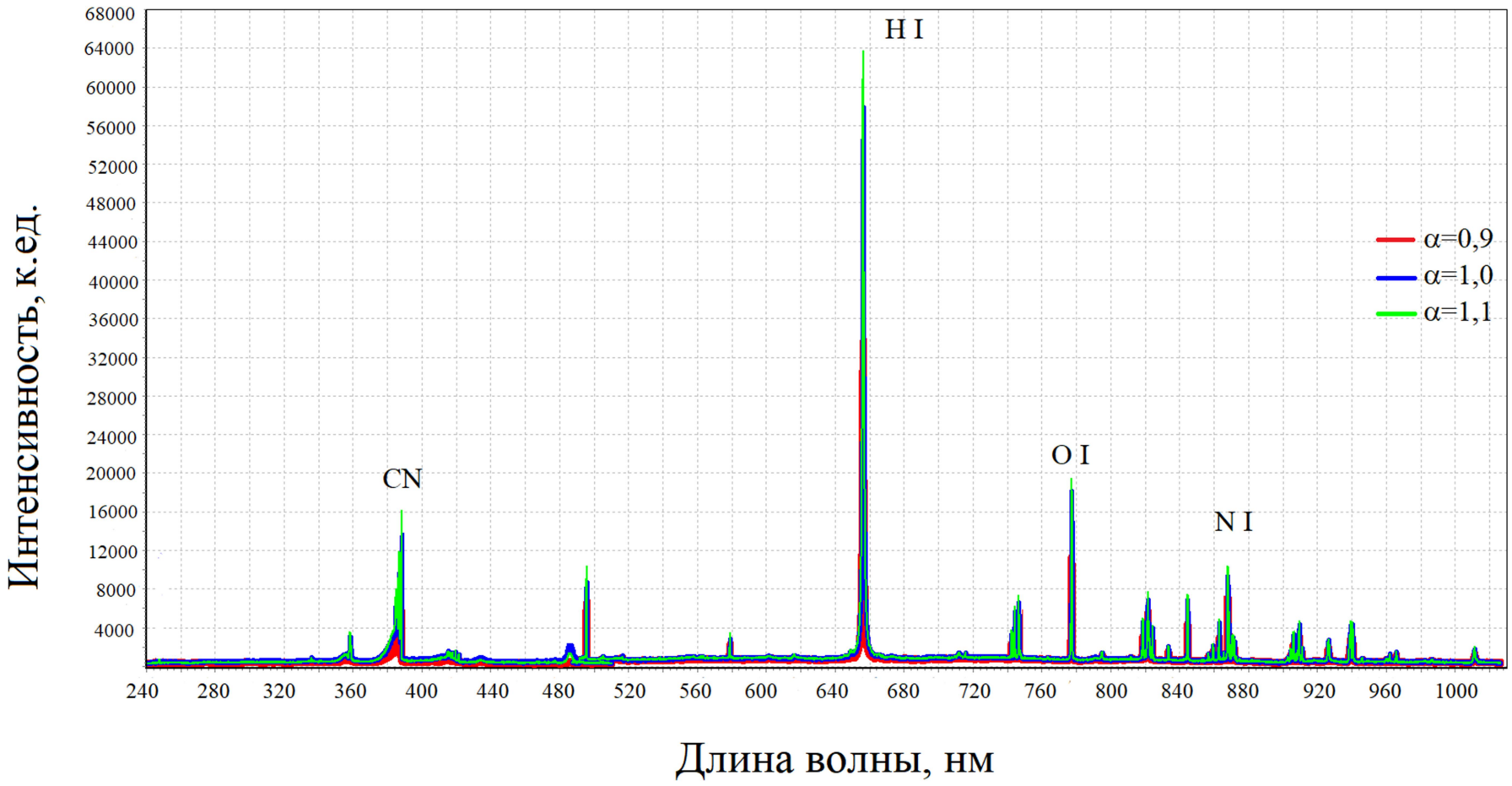


Рисунок 5.22 – Опорные CX пламени пропана для трех соотношений газ-воздух (ЛИЭС спектрометрия)

5. Перед измерениями спектральной характеристики излучения пропановоздушной смеси спектральными приборами контроля серийного производства были определены их погрешности измерения по калибровочному источнику - вольфрамовому галогенному источнику LS-1 (ф. OceanOptics), которые составили для спектрометра OceanOptics USB2000 – 3% и для спектрометра AvaSpec-ULS4096CL-2-EVO – 2%.

6. Измерения проводились по следующему алгоритму:

6.1 Обработки результатов измерений проводилась для двух групп спектроскопических параметров:

1. OH, HCO, CH, C_2 (определенных эмиссионным методом);

2. CN, H, N, O (определенных ЛИЭС методом).

Кодовые единицы для каждого прибора контроля были пересчитаны относительно кодовых единиц эталонного спектрального прибора.

6.2 Устанавливалось соотношение газ-воздух $\alpha_{КИВ}$ =1,0. Выполнялось 1000 измерений, и результаты измерений интенсивностей выбранных спектроскопических параметров сохранялись.

6.3 Соотношение газ-воздух менялось от 1,0 до 0, 84 с шагом 0,02. Выполнялось 1000 измерений для каждого шага, результаты измерений интенсивностей выбранных спектроскопических параметров сохранялись.

6.4 Соотношение газ-воздух менялось от 1,0 до 0,16 с шагом 0,02. Выполнялось 1000 измерений для каждого шага, результаты измерений интенсивностей выбранных спектроскопических параметров сохранялись.

7. Суть обработки результатов состояла в следующем:

7.1 Полученные в результате 1000 измерений значений интенсивностей каждого спектроскопического параметра из состава обозначенных групп для соотношений газ-воздух 0,9 и 1,1 сравнивались с полученными на эталонном спектрометре значениями $I_{\min 0,9}$ и $I_{\max 1,1}$ для каждого параметра, умноженных на коэффициент соотношения $k_{\Sigma b\backslash a}$ из таблицы 5.3, соответствующий определенной допускаемой вероятности ошибки 2-го рода $\beta_{доп}$.

Фиксировалось количество результатов измерений, не попавших в заданный диапазон. Таким образом, определялась вероятность ошибки 1-го рода.

7.2 Аналогичные операции выполнялись для соотношения газ-воздух 0,86 и 1,14 с целью определения вероятности ошибки 2-го рода.

7.3 Результаты экспериментальной отработки методики контроля с применением спектральных приборов серийного производства сведены в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты экспериментальной отработки методики контроля с применением спектральных приборов серийного производства

Теоретические вероятности ошибок		Экспериментальные вероятности ошибок			
		OH, HCO, CH, C_2 (эмиссионный метод)		CN, H, N, O (ЛИЭС метод)	
$\beta_{доп}$,%	a_{Σ},%	$\beta_{доп}$,%	a_{Σ},%	$\beta_{доп}$,%	a_{Σ},%
3	19,0	5,2	24,1	4,5	23,2
4	18,4	6,1	22,8	5,2	21,3
5	17,9	7,3	20,1	6,7	19,1
6	17,3	8,1	19,7	7,4	18,5
7	16,7	8,9	18,6	8,1	17,7
8	15,9	9,8	17,9	9,2	16,6
9	15,3	10,5	17,1	10,2	16,1
10	14,5	11,8	16,3	11,1	15,1

8. Результаты экспериментальной отработки:

При применении метода эмиссионной спектроскопии для контроля процесса горения пропана возникали наибольшие вероятности ошибок контроля по сравнению с методом ЛИЭС-спектрометрии. Это можно объяснить тем, что в этом случае погрешность измерения с применением спектрометра OceanOptics USB2000 составляла 3% по сравнению с лазерно-

искровым методом – 2%, где применялся спектрометр AvaSpec-ULS4096CL-2-EV.

Спектроскопический параметр HCO, измеряемый методом эмиссионной спектроскопии, внес основной вклад в ошибки контроля, поскольку чаще других выходил за диапазон допустимых значений, что можно объяснить его малой интенсивностью по сравнению с другими, особенно при соотношении газ-воздух 0,9.

При контроле методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии чаще всего выходил за диапазон допустимых значений параметр N, имеющий меньшую интенсивность по сравнению с остальными параметрами.

Стоит отметить, что при изменении режима горения (соотношения газ-воздух) от 1,0 до 0,84 наблюдалось увеличение интенсивности спектральных полос продуктов горения 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-спектрометрии, уменьшались.

При изменении соотношения газ-воздух от 1,0 до 1,16 наблюдалось обратная динамика изменения интенсивностей спектроскопических параметров: интенсивности спектральных полос продуктов горения CH, C_2 и OH уменьшались, а интенсивности спектральных линий H, N, O, определяемых методом ЛИЭС-спектрометрии, увеличивались. Интенсивность полосы углеводородного пламени HCO, определяемая эмиссионным методом, также уменьшалась, а интенсивность полосы CN, определяемая методом ЛИЭС-спектрометрии, 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. 5.6 и 5.17), что повышает оперативность проводимого контроля.

5.4.2.3 Спектроскопический контроль процесса горения пропана многоканальным оптическим спектрометром

1. Перед измерениями прибор контроля в форме многоканального оптического спектрометра был откалиброван по калибровочному источнику LS-1. Поправочные коэффициенты для каждого контролируемого параметра были учтены программным способом в блоке обработки спектроскопической информации.

2. Измерения проводились по такому же алгоритму, что и при применении спектрометров серийного производства.

Соотношение газ-воздух менялось от 1,0 до 0, 84 с шагом 0,02. Потом соотношение газ-воздух менялось от 1,0 до 0,16 с шагом 0,02. Выполнялось 1000 измерений для каждого шага, результаты измерений интенсивностей выбранных спектроскопических параметров сохранялись.

3. Обработка результатов измерений проводилась для спектроскопических параметров: OH, HCO, CH, C_2.

Измерения проводились только для случая контроля эмиссионным методом, поскольку на данный момент не предусмотрена возможность синхронизации многоканального оптического спектрометра с лазером.

4. Обработка результатов эксперимента проводилась по такому же алгоритму, что и при применении спектрометров серийного производства.

Полученные в результате 1000 измерений значения интенсивностей каждого спектроскопического параметра сравнивались с полученными на эталонном спектрометре значениями $I_{min0,9}$ и $I_{max1,1}$ для каждого параметра, умноженных на коэффициент соотношения $k_{\Sigma b\backslash a}$ из таблицы 5.3.

5. Результаты экспериментальной отработки методики контроля с применением многоканального спектрометра сведены в таблицу 5.6. Также для сравнения в этой таблице представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных эмиссионным методом на спектрометре OceanOptics USB2000+.

Таблица 5.6 – Результаты экспериментальной отработки методики контроля с применением многоканального спектрометра

Теоретические вероятности ошибок		Экспериментальные вероятности ошибок			
		OceanOptics USB2000 OH, HCO, CH, C_2 (эмиссионный метод)		Многоканальный спектрометр OH, HCO, CH, C_2 (эмиссионный метод)	
$\beta_{доп},\%$	$a_{\Sigma},\%$	$\beta_{доп},\%$	$a_{\Sigma},\%$	$\beta_{доп},\%$	$a_{\Sigma},\%$
3	19,0	5,2	24,1	4,7	22,3
4	18,4	6,1	22,8	5,1	20,9
5	17,9	7,3	20,1	6,2	19,4
6	17,3	8,1	19,7	6,8	18,1
7	16,7	8,9	18,6	7,9	17,0
8	15,9	9,8	17,9	8,8	16,8
9	15,3	10,5	17,1	9,7	15,9
10	14,5	11,8	16,3	10,9	15,2

8. Результаты контроля многоканальным спектрометром показали меньшие значения вероятностей ошибок, чем спектрометр OceanOptics USB2000. Это можно объяснить тем, что многоканальный прибор был откалиброван по эталонному источнику, также была выполнена корректировка искажений, вносимых волоконно-оптическим жгутом, что позволило уменьшить погрешность спектрального измерения.

Также как и в случае применения спектрометра OceanOptics USB2000+ чаще всего выходил за диапазон допустимых значений и внес основной вклад в ошибки контроля параметр HCO, что можно объяснить малой интенсивностью этой спектральной полосы по сравнению с другими, особенно при соотношении газ-воздух 0,9. Динамика изменения интенсивности от режима горения наблюдалась такая же, как и в случае измерения спектрометром OceanOptics USB2000+.

Особо стоит подчеркнуть, что для решения задачи 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 аналогами, например, со спектрометром OceanOptics USB2000+, рабочий диапазон которого составляет от 200 нм до 800 нм. Если для других задач контроля будет требоваться более высокое разрешение и большее количество контролируемых параметров, возможно увеличить количество каналов и применить фильтры с более узкой полосой пропускания. На данный момент технология производства фильтров позволяет изготовить фильтры с полосой пропускания 0,5 нм и менее.

Полученные результаты доказывают возможность выполнения контроля горения пропана разработанным многоканальным оптическим спектрометром.

5.5 Экспериментальное исследование процесса горения в топке промышленной печи и его контроль спектроскопическим методом

С целью подтверждения возможности повышения достоверности проводимого контроля процесса горения газообразного углеводородного топлива методами оптической спектроскопии по сравнению с существующими методами были проведены экспериментальные исследования по измерению спектральной характеристики пламени на

реальном промышленном объекте – в топке вращающейся печи обжига, которая установлена в цеху производства дефторированного фосфата ООО «ПГ «Фосфорит», г. Кингисепп, Ленинградская область [110, 193]. Данная печь применяется в производстве дефторированного фосфата для выработки за счет сжигания природного газа тепловой энергии, которая используется для нагрева поступающей шихты с целью удаления из нее фтора.

5.5.1 Описание технологического процесса производства дефторированного фосфата

Суть технологического процесса производства дефторированного (кормового) фосфата состоит в гидротермокислотном разложении апатитового концентрата при его смешивании во вращающихся печах обжига с фосфорной кислотой, гидроксидом натрия и кварцсодержащей добавкой.

Процесс производства дефторированного фосфата включает в себя следующие основные этапы [194]:

- прием и хранение апатитового концентрата, едкого натра, кварцсодержащей добавки и фосфорной кислоты;
- дозирование апатитового концентрата, фосфорной кислоты, едкого натра и кварцсодержащей добавки, приготовления шихты в смесителях;
- гидротермокислотная переработка шихты (обесфторивание);
- классификация продукта после печи, фасовка готового продукта марки «G»;
- размол клинкера, охлаждение и фасовка готового продукта марки «Р»;
- приготовление аммиачной воды;
- очистка отходящих газов от пыли и фтористых соединений;
- утилизация тепла и приготовление питательной воды для котлов-утилизаторов.

Схема производства дефторированного фосфата представлена на рисунке 5.23 [194].

В данное работе все операции технологического процесса подробно не рассматривались, а акцент был сделан только на процесс выработки тепловой энергии путем сжигания газообразных углеводородов.

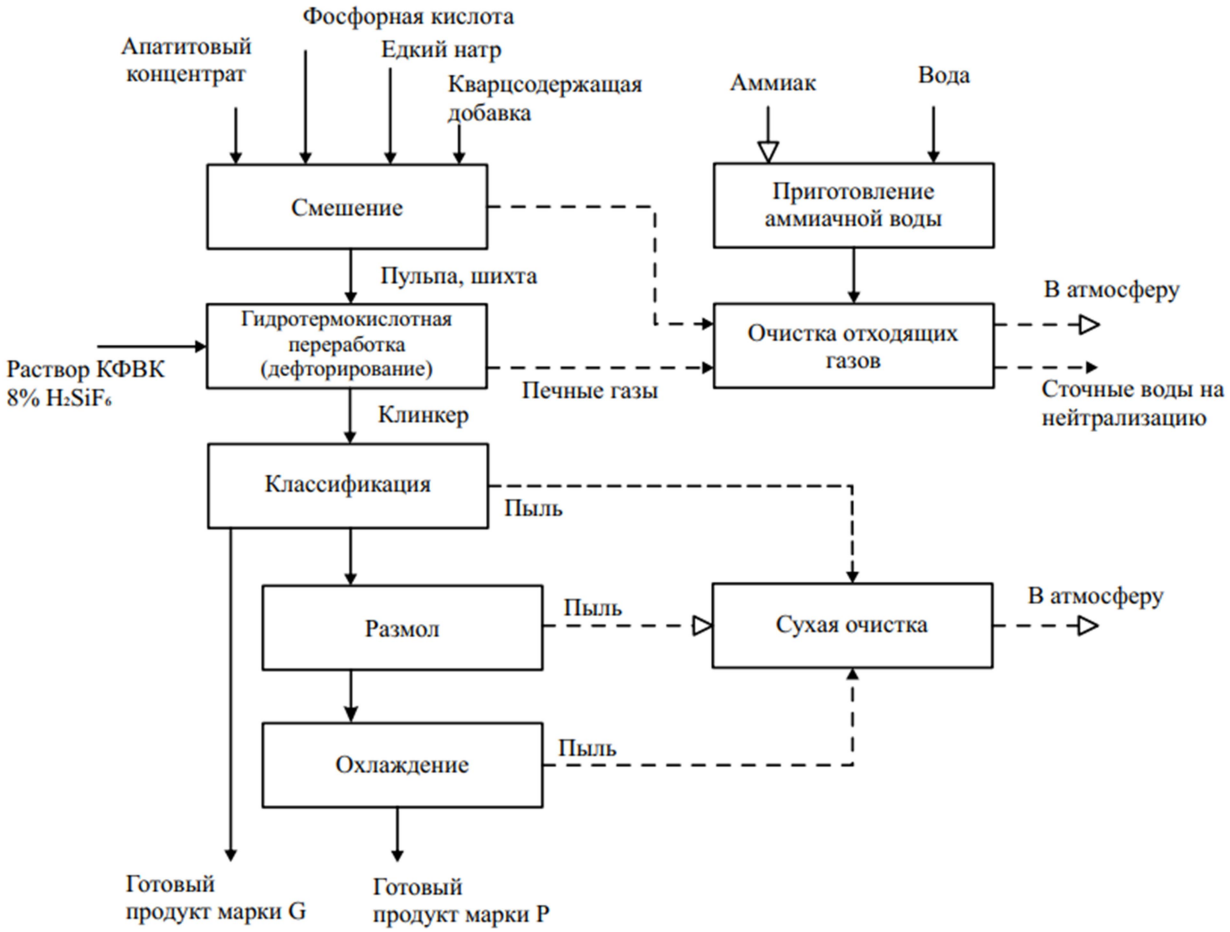


Рисунок 5.23 – Схема производства дефторированного фосфата [194]

Апатитовый концентрат перед загрузкой в печь обжига смешивается с экстракционной фосфорной кислотой в смесителе, после чего полученная смесь нейтрализуется раствором гидроксида натрия (едкого натра) с дозированием кварцевого песка [194].

Приготовление шихты начинается в двухвальном смесителе, где в результате взаимодействия фосфорной кислоты с карбонатами апатитового концентрата образуются гидро- и дигидрофосфаты кальция и магния (реакции 5.1-5.3) [194]:

$$CaCO_3 + 2H_3PO_4 = Ca(H_2PO_4)_2 \times H_2O + CO_2, \quad (5.1)$$

$$MgO_3 + 2H_3PO_4 = Mg(H_2PO_4)_2 \times H_2O + CO_2, \quad (5.2)$$

$$Ca(H_2PO_4)_2 \times H_2O + H_2O = CaHPO_4 \times 2H_2O + H_3PO_4. \quad (5.3)$$

Далее пульпа через слив поступает в одновальный смеситель, установленный последовательно за двухвальным смесителем, где свободная фосфорная кислота вступает во взаимодействие с гидрооксидом натрия, что приводит к образованию гидрофосфатов и ортофосфатов натрия (реакции 5.4- 5.6) [194]:

$$NaOH + H_3PO_4 = NaH_2PO_4 \times H_2O, \quad (5.4)$$

$$NaH_2PO_4 \times H_2O + NaOH = Na_2HPO_4 \times 2H_2O, \quad (5.5)$$

$$Na_2HPO_4 \times 2H_2O + NaOH + 9\ H_2O = Na_3PO_4 \times 12H_2O. \quad (5.6)$$

Во избежание загустевания получившейся шихты необходимо поддерживать температуру на уровне 50^0C [194].

Шихта, содержащая апатитовый концентрат и фосфаты натрия и кальция, с влажностью 32-36 % поступает во вращающуюся печь обжига, которая представляет собой металлический цилиндрический корпус (барабан), футерованный внутри огнеупорным материалом. Диаметр цилиндра составляет 3,6 м, длина – 100 м. Барабан установлен на шести роликоопорах с уклоном 3,5 град [194].

Холодная зона печи имеет свободный вход в пыльную камеру, через которую по загрузочной форсунке шихта поступает на обжиг. Для

предотвращения выброса печных газов с пыльной камеры через загрузочную форсунку предусмотрена подача сжатого воздуха от компрессорной станции в загрузочную течку по направлению движения шихты.

Со стороны высокотемпературной зоны печи установлена откатная горелка типа ВРГ-1 для сжигания природного газа внутри печи. Конструкция горелки ВРГ-1 дает возможность регулировать длину факела и его конфигурацию [195]. Для этого она снабжена подъемно-передвижным механизмом управления. Под воздействием тепловой энергии, получаемой в результате сжигания природного газа, шихта подвергается гидротермокислотной переработке, т.е. обесфториванию. Воздух на горение природного газа засасывается через рекуператоры, расположенные по периферии печи на ее выгрузочном конце. Время пребывания материала в печи составляет от 8 до 10 часов [194].

Вращение печи обжига выполняется электродвигателем через редуктор, подвенцовую и венцовую шестерни. Предусмотрено два привода: главный привод, обеспечивающий частоту вращения печи от 3000 сек/об. до 90 сек/об. (в режиме загрузки печи и в зависимости от количества подаваемого сырья в печь частота вращения может находиться в пределах от 140 сек/об до 90 сек/об) и вспомогательный привод [196]. За счет вращения и наклона печи загружаемая шихта перемещается вдоль печи.

Обесфторивание протекает при температуре 1340-1400^{0}C [197].

Механизм химического процесса в общем виде можно описать следующим уравнением [194]:

$$4Ca_{10}(PO_4)_6FOH+8H_3PO_4+SiO_2+16NaOH = 8Ca_5Na_2(PO_4)_4+SiF_4+22H_2O. (5.7)$$

В течение протекания вышеописанного технологического процесса ведется контроль на всех этапах, среди которых, с позиции применения методов прикладной оптической спектроскопии, можно выделить контроль процесса горения. 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.

Контроль процесса горения в печи обжига выполняется на основе измерений косвенных параметров: температуры и разряжения в различных областях печи, расхода газа по расходомеру, визуальной оценке процесса горения оператором. Полученные результаты измерений сопоставляются с режимными картами, на основе чего оператор принимает решение по управлению горелкой.

Применение методов оптической спектроскопии позволит осуществлять контроль процесса горения в печи, проводя измерения первичного параметра – спектральной характеристики пламени и тем самым оптимизировать процесс сжигания топлива в режиме реального времени, что приведет к обеспечению полноты сжигания топлива, минимизации выбросов вредных веществ в атмосферу и экономии топливных ресурсов.

5.5.2 Экспериментальное исследование процесса горения в печи обжига с помощью метода эмиссионной оптической спектроскопии и применение спектроскопического метода контроля

Эмиссионный метод предполагает, что ведется регистрация спектра оптического излучения, испускаемого источником. В случае производства дефторированного фосфата излучаемым объектом является пламя горелки, применяемой для обжига шихты во вращающейся печи.

Было проведено экспериментальное исследование процесса горения природного газа, применяемого для выработки тепловой энергии, которая расходуется на нагрев поступающей шихты, на производственном объекте-во вращающейся печи обжига [110, 193].

На основе полученных результатов 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 контрольно-измерительного оборудования, установленного на объекте штатно.

На рисунке 5.24 приведена фотография вращающейся печи обжига, установленной в цеху производства кормовых фосфатов ООО «ПГ «Фосфорит», и расположенное рядом с ней измерительное оборудование.

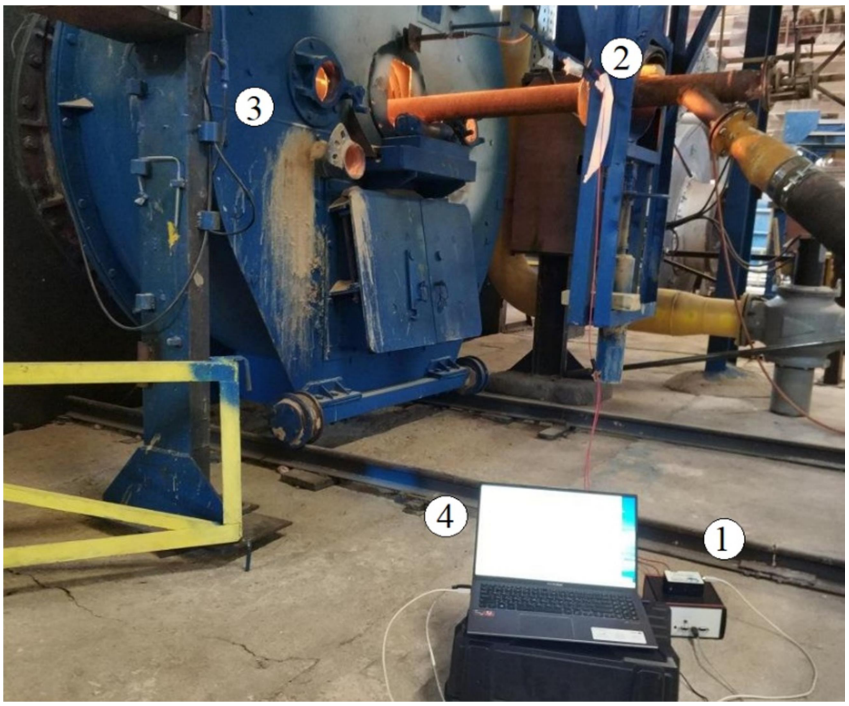


Рисунок 5.24 – Фотография печи обжига и измерительное оборудование

В качестве прибора контроля 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).

Эксперимент проводился в три этапа:

1. Измерение спектральной характеристики пламени во время розжига печи.

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).

Спектральные характеристики пламени горелки, полученные на первом этапе эксперимента во время розжига печи для разных этапов розжига, представлены на рисунке 5.25.

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, а цвет пламени имел оранжево – красный оттенок.

Кривая 2 соответствует приблизительно стехиометрическому горению $\alpha_{КИВ} \approx 1{,}05$. По показаниям расходомеров объем подаваемого газа соответствовал 1850 м^3/ч, объем подаваемого воздуха – 18490 м^3/ч.

В спектре излучения пламени отчетливо наблюдались характерные спектроскопические параметры в виде спектральных полос на длинах волн: 308 нм – полоса радикала OH; 337,7 нм и 358,8 нм – полосы углеводородного пламени HCO и CN; 390 нм и 434 нм – полосы радикала CH; 515 нм – полоса радикала C_2. По этим спектроскопическим параметрам и выполнялся контроль на следующем этапе эксперимента.

Кривая 3 соответствовала горению при соотношении газ-воздух $\alpha_{КИВ} = 1{,}45$. По показаниям расходомеров объем подаваемого газа соответствовал 1960 м^3/ч, объем подаваемого воздуха – 27056 м^3/ч.

В спектре также наблюдались спектральные полосы, характеризующие горение газообразного углеводородного топлива, 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.

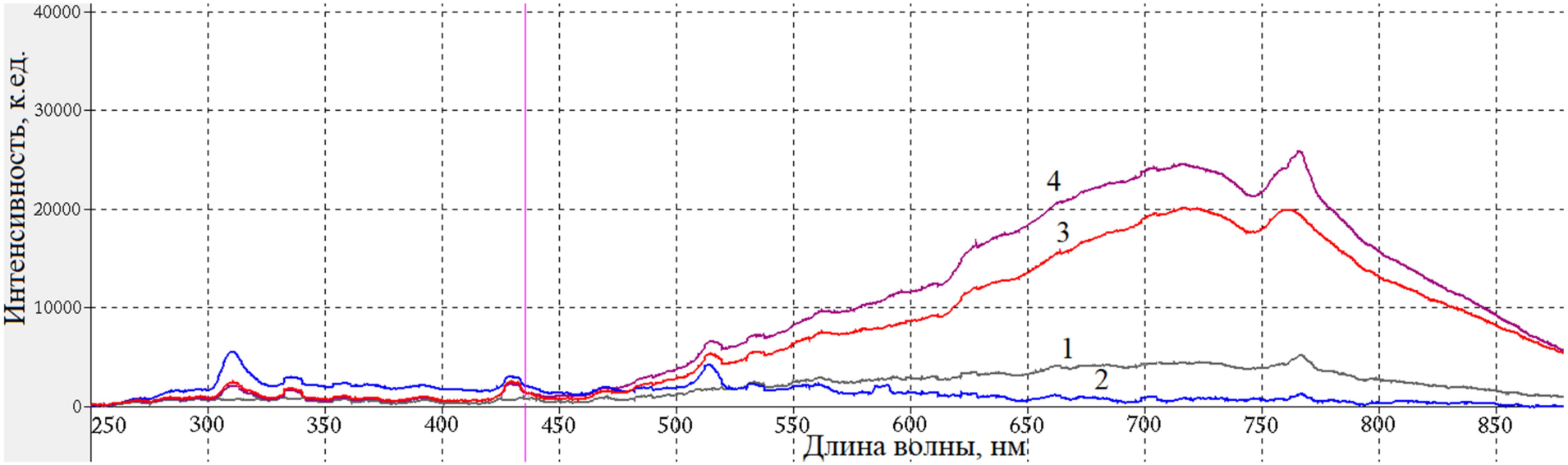


Рисунок 5.25 – Спектральная характеристика пламени горелки, полученная во время розжига печи

Кривая 4 также соответствовала горению при соотношении газ-воздух $\alpha_{КИВ}$ = 1,45, но объем подаваемого газа был увеличен до 2090 м^3/ч.

На втором этапе эксперимента на основе полученных результатов экспериментального исследования спектральной характеристики пламени горелки 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 контрольно-измерительного оборудования, установленного на объекте штатно. 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 КИВ. Результаты приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Результаты эксперимента по определению КИВ

Штатный расход газа, м3/ч	1850		
Необходимое кол-во воздуха для сгорания газа, м^3/ч	17612		
Фактический расход воздуха, м^3/ч	18490	22896	25537
Фактический коэффициент избытка воздуха	1,05	1,3	1,45
Коэффициент избытка воздуха, определенный спектроскопическим методом	1,055	1,305	1,46
Коэффициент избытка воздуха, определенный штатным методом	1,08	1,34	1,49
Перерасход газа из-за неправильного определения коэффициента избытка воздуха штатным КИО, м^3/ч	52	57	51

В результате проведенного эксперимента по определению коэффициента избытка воздуха было установлено, что спектроскопический метод обладает большей достоверностью по сравнению со штатным методом контроля, основанным на анализе состава уходящих газов, что проявлялось в более точном определении КИВ. Неправильное определение коэффициента избытка воздуха штатным методом приводило к необходимости увеличения подаваемого в топку газа, количество которого определялось расчетным методом, что в итоге приводило к его перерасходу.

Как показали результаты эксперимента, применение спектроскопического метода контроля процесса горения позволяет 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 эксперимента проводился дополнительно в исследовательских целях и заключался в измерении спектральной характеристики пламени во время обжига шихты. Данный эксперимент проводился в этом же цеху, но на другой печи, которая работала штатно, т.е. выполнялся технологический процесс – обжиг шихты.

Полученная спектральная характеристика пламени горелки печи обжига приведена на рисунке 5.26.

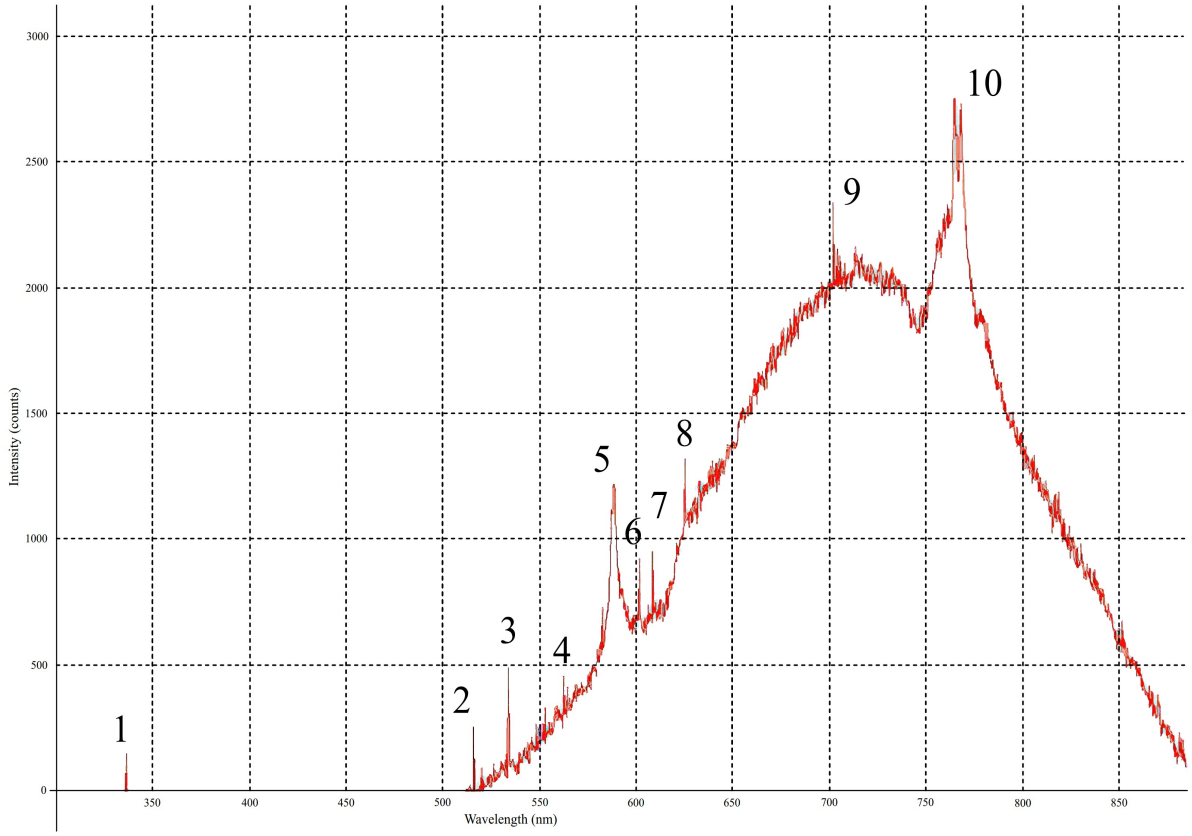


Рисунок 5.26 - СХ пламени горелки печи обжига

В полученном спектре ОИ, возникающего в результате протекания технологического процесса производства удобрений, характерные для горения углеводородного топлива спектральные полосы уже наблюдались не так отчетливо. Спектральная характеристика имела в основном сплошной характер, что обусловлено тепловым излучением угольных частиц, количество которых значительно было увеличено в результате присутствия в пламени шихты.

Тем не менее, проанализировав полученные результаты измерения, можно сделать вывод, что в спектре пламени горелки в печи обжига наблюдаются СИП, характерные для горения углеводородного пламени. Спектральная линия 2 (рисунок 5.26), а также линия 4, имеют максимумы на длинах волн 515 нм и 563 нм соответственно. Данные линии соответствуют излучению, возникающему в результате горения радикала углерода C_2 [95].

Остальные наблюдаемые СИП (спектральные линии) соответствуют элементам, присутствующим в обжигаемой шихте, см. формулу (5.7).

Принадлежность этих линий к химическим элементам была определена с помощью справочников и интернет базы спектральных линий [191].

Спектральные линии 1 (на рисунке 5.26) с максимумом на длине волны 330 нм и линия 5 с максимумом на длине волны 589 нм, которые регистрировались в спектре пламени печи, соответствуют дублетам натрия Na 330,3-330,2 и 589,0-589,6 соответственно [198]. Но эти дублеты не разрешились и зарегистрировались как одна сплошная линия, что обусловлено недостаточным разрешением оптического спектрометра.

Излучение на длинах волны 535 нм (линия 3) и 616 нм (линия 7) соответствуют излучению кальция Ca, который также присутствовал в обжигаемой шихте.

Спектральная линия 6 с максимумом на длине волны 604 нм соответствует излучению линии фосфора P [190, 199].

Линия 8 с максимумом на длине волны 634 нм соответствует химическому элементу кремнию Si. Среди наиболее интенсивных линий кремния можно выделить 252 нм, 298 нм, 390нм и 634 нм [200].

Спектральная линия 9 с максимумом на длине волны 703 нм соответствует излучению фтора P [191].

Две близкорасположенные спектральные линии 10 с максимумами на длинах волн: 767 и 770 нм (рисунок 5.26) являются дублетом линии калия K [201]. Калий не входит в состав обжигаемой шихты, но его появление в спектре пламени можно объяснить тем, что он является конструкционным материалом горелки и при ее нагреве частицы калия попадают в пламя. Данный эффект также отмечался в ряде работ [65, 202].

Несмотря на то, что в регистрируемом спектре излучения, возникающего в результате протекания технологического процесса производства дефторированного фосфата, спектроскопические информационные параметры, характеризующие состояние именно процесса горения, наблюдались не так отчетливо и были затенены сплошным излучением пламени, в котором находилась шихта, наличие их спектре и

возможность их измерения свидетельствует о том, что процедура контроля данного технологического процесса может быть реализована на основе применения методов оптической спектроскопии. Однако, для успешного внедрения спектроскопического метода контроля в данный технологический процесс необходимо проведение более масштабных и комплексных научных исследований со сбором статистических данных и зависимостей спектроскопических информационных параметров от состава сырья, режимов работы печи, в том числе с учетом присутствия в пламени шихты, состава конечной продукции, а также определения оптимального места установки контрольного оборудования.

Стоит отметить, что внедрение спектроскопического метода контроля в данный технологический процесс позволит выполнять не только контроль процесса горения с целью его оптимизации, но и выполнять контроль самого технологического процесса производства дефторированного фосфата, поскольку по регистрируемой спектроскопической информации можно определять концентрацию химических элементов, входящих в состав обжигаемой шихты.

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

5.6 Выводы по главе 5

1. Установлены спектроскопические информационные параметры в спектре излучения контролируемого процесса горения газообразных углеводородов на основе эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии.

2. Выполнено экспериментальное исследование спектроскопических информационных параметров, характеризующих процесс горения пропана,

методом эмиссионной оптической спектроскопии. Установлены интенсивные полосы в спектре пламени, возникающего при горении пропана: полосы радикалов углеводорода (CH), углерода (C_2), гидроксильного радикала (OH) и радикалов углеводородного пламени (HCO) и (CN). Установлены зависимости интенсивности излучения различных молекул продуктов горения, присутствующих в пламени пропановоздушной смеси, от режимов горения, т.е. соотношения газ-воздух.

3. Выполнено экспериментальное исследование спектроскопических информационных параметров, характеризующих процесс горения пропана, методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии. Установлены интенсивные спектральные линии, соответствующие продуктам горения: водорода (H), кислорода (O), азота (N) и углерода (C), и молекулярные полосы радикалов CN и C_2. Установлены зависимости отношений интенсивностей этих линий и молекулярных полос от режимов горения.

4. Показано, что процесс горения газообразного углеводородного топлива, может быть охарактеризован множеством параметров в количестве 22 шт., сформированных двумя методами оптической спектроскопии: методом эмиссионной оптической спектроскопии и методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии.

5. Продемонстрирована возможность применения разработанных дифракционного спектрального прибора и многоканального оптического спектрометра для контроля процесса горения газообразных углеводородов.

6. 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.

7. Была выполнена проверка разработанного спектроскопического метода контроля процессов горения и экспериментальная отработка методики подготовки и проведения контроля процесса горения газообразного

углеводорода на примере пропана методами эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии, выполняемого спектральными приборами серийного производства и разработанным многоканальным спектрометром. Определена достоверность проводимого контроля процесса горения пропана этими приборами.

8. Установлено, что наибольшие вероятности ошибок возникали при контроле процесса горения пропана методом эмиссионной спектроскопии, а наименьшие – при одновременном применении эмиссионного и ЛИЭС методов спектроскопии.

10. Показано, что одновременное применение 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. 5.6 и 5.17), что повышает оперативность проводимого контроля.

11. Полученные результаты являются удовлетворительными и доказывают возможность выполнения контроля горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии.

12. Экспериментально была продемонстрирована возможность повышения достоверности проводимого контроля процесса горения газообразного углеводородного топлива методами оптической спектроскопии по сравнению с существующими методами контроля на примере контроля процесса горения в топке вращающейся печи обжига на промышленном объекте.

13. 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. Кроме того, применение этого метода позволяет исключить необходимость визуального наблюдения оператором процесса горения в печи.

14. Был исследован спектр пламени горелки во время обжига шихты и установлены СИП, соответствующие химическим элементам, входящим в ее состав. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что внедрение спектроскопического метода контроля в данный технологический процесс позволит не только оптимизировать процесс горения, но и выполнять контроль самого технологического процесса производства удобрений, поскольку по регистрируемой информации можно определять концентрацию элементов, входящих в состав шихты.

14. Основные результаты данной главы опубликованы в работах [87 - 91, 110, 189, 190, 193].

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 волоконно-оптической системы передачи 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 анализируемых сигналов по оптическому волокну. 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 раздельном и комбинированном применении эмиссионной спектроскопии и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии. Показано, что процесс горения 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 процесса горения 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, испускаемого непосредственно очагом горения, но и дает возможность спрогнозировать направление изменения соотношения газ-воздух по взаимному изменению интенсивностей контролируемых параметров 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Российская Федерация. Правительство. Об энергетической стратегии России на период до 2035: распоряжение Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р. – Доступ из справочно-правовой системы Гарант.
2. Двойнишников, В.А. Конструкция и расчет котлов и котельных установок/ В.А. Двойнишников, Л.В. Деев, М.А. Изюмов. – Москва: Машиностроение. 1988. – 264 с.
3. Плетнев, Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций / Г.П. Плетнев. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 368 с.
4. Лавров, Н.В. Процессы горения топлива и защита окружающей среды / Н.В. Лавров, Э.И. Розенфельд, Г.П. Хаустович. – Москва: Металлургия, 1981. – 240 с.
5. Новиков, О.Н. Автоматическое управление качеством сжигания топлива – ключ к энергосбережению и энергоэкологической безопасности предприятия / О.Н. Новиков, А.Н. Окатьев, А.Л. Шкаровский // Инженерные система. – 2011. – № 1. – С. 38-43.
6. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьев, А.Г. Блох [и др.]; под ред. Г.Ф. Кнорре, И.И. Палеева. – Москва; Ленинград: Энергия. 1966. – 491 с.
7. Miller, B.G. Clean Coal Engineering Technology / B.G. Miller. – 2nd Edition. – Butterworth-Heinemann, 2017. – 856 p.
8. ГОСТ Р 50.05.16-2018 Оценка соответствия в форме контроля. Неразрушающий контроль. Метрологическое обеспечение: национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 декабря 2018 г. № 1173-ст. : введен взамен впервые: дата введения 01.03.2019. – 18 с.
9. Похил, П.Ф. Методы исследования процессов горения и детонации / П.Ф. Похил, В.М. Мальцев, В.М. Зайцев. – Москва: Наука, 1969. – 301 с.

10. Прохоров, Ю.В. Теория Вероятностей / Ю.В. Прохоров, Ю.А. Розанов. – Москва, 1973. – 494 с.
11. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – Москва: Физматгиз, 1964. – 576 с.
12. Пугачев, В. Теория вероятностей и математическая статистик / В. Пугачев. – Издательство: Кнорус, 2019. – 496 с. – ISBN: 978-5-4365-1551-9.
13. Крамер, Г. Математические методы статистки / Г. Крамер. – Москва: Мир, *1975*. – 648 с.
14. Титчмарш, Е. Введение в теорию интегралов Фурье / Е. Титчмарш. – Москва: ОГИЗ, 1948. – 480 с.
15. Френкс, Л. Теория сигналов/Л.Френкс; под ред. Д.Е.Вакмана; пер. с англ. М.Р. Краевская и Р.М. Седлецкий. – Москва: Сов. радио, 1974. – 343 с.
16. Давенпорт, В.Б. Введение в теорию случайных сигналов и шумов/ В.Б. Давенпорт, В.Л. Рут; под ред. Р.Л. Добрушина; пер. с англ. Б.Г. Белкина. – Москва: Изд-во иностранной литературы, 1960. – 468 с.
17. Солодов, А.В. Линейные автоматические системы с переменными параметрами / А.В. Солодов, Ф.С. Петров. – Москва: Наука, 1971. – 325 с.
18. Заде, Л. Теория линейных систем: пер. с англ. / Л. Заде, Ч. Дезоер. – Москва: Наука, 1970. – 704 с.
19. Гарднер, М.Ф. Переходные процессы в линейных системах с сосредоточенными постоянными: пер. с англ. / М.Ф. Гарднер, Дж. Л. Бэрнс. – Москва: Изд-во физ.-мат. лит., 1961. – 552 с.
20. Д'Анжело, Г. Линейные системы с переменными параметрами. Анализ и синтез / Г. Д' Анжело. – Москва: Машиностроение, 1974. – 288 с.
21. Голдман, С. Теория информации: пер. с англ. / С. Голдман. – Москва: Изд-во ИИЛ, 1957. – 446 с.

22. Тарасенко, Ф.П. Введение в курс теории информации / Ф.П. Тарасенко. – Томск: Изд-во Томского университета, 1963. – 240 с.
23. Мирошник, И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы / И.В. Мирошник. – Санкт-Петербург: Питер, 2005. – 336 с.
24. Гантмахер, Ф.Р. Теория матриц / Ф.Р. Гантмахер. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Наука, 1966. – 576 с.
25. Эльсгольц, Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. – Москва: Наука. 1965. – 424 с.
26. Чео, П.К. Волоконная оптика. Приборы и системы / П.К. Чео. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
27. Кульчин, Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети / Ю.Н. Кульчин. – Владивосток: Дальнаука, 1999. – 283 с.
28. Шмидт, В. Оптическая спектроскопия для химиков и биологов / В. Шмидт; под ред. С.В. Савилова; пер. с англ. Н.П. Ивановский. – Москва: Техносфера, 2007. – 363 с.
29. Кремерс, Д. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия / Д. Кремерс, Л. Радзиемски. – Москва: Техносфера, 2009. – 360 с.
30. ГОСТ 19431-84 Энергетика и электрификация. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27.03.84 № 1029 : введен взамен ГОСТ 19431-74 : дата введения 01.01.1986 / Сборник стандартов. – 8 с.
31. Адельсон, С. В. Новые процессы органического синтеза / С.В. Адельсон, Н.Л. Барабанов, Т.Н. Мухина и др.; под ред. Черных С. П. – Москва: Химия, 1989. – 398
32. Бекиров, Т.М. Первичная переработка природных газов / Т.М. Бекиров. – Москва: Химия, 1987. – 256 с.

33. Позин, М.Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот) : Ч. II / М.Е. Позин. – 4-е издание. – Ленинград: «Химия», 1974. – 768 с.
34. Иошитака, Ю. Оптимальное управление процессом горения с помощью перестраиваемого диодного лазерного газоанализатора TDLS200 / Ю. Иошитака, А. Мурата // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 6. – С. 26-30.
35. Другов, Ю.С. Газохроматографический анализ природного газа : практическое руководство / Ю.С. Другов, А.А. Родин. – 2-е изд., испр. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 177 с.
36. Арсеев, А.В. Сжигание природного газа/А.В. Арсеев. – Москва: Металлургиздат, 1963. – 407 с.
37. Истомин, И.Б. Пути снижения вредных выбросов при сжигании коксового газа / И.Б. Истомин, Н.А. Гутова, Г.С. Михайлов // Россия молодая: IX Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, 18-21 апреля 2017. – Кемерово, 2017. – С.0601002-1-0601002-5.
38. Vallero, D.A. Air Pollution Calculations / D.A. Vallero. – Elsevier, 2019. – 568 p.
39. ГОСТ 21204-97 Горелки газовые промышленные. Общие технические требования : принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации протокол № 11 от 25.04.97 : веден взамен ГОСТ 21204-83 : дата введения 01.07.1998. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 16.
40. Тележко, Г.М. Использование газоанализаторов для оптимизации режимов горения топлива / Г.М. Тележко, Е.В. Хойна // Новости теплоснабжения. – 2015. – № 4. – С. 27-31.
41. Патрахин, Ю.В. Перспективы применения цветной видеокамеры для контроля качества сжигания природного газа / Ю.В. Патрахин // Ползуновский альманах. – 2010. – № 2. – С. 93-95.

42. Кочергин, М.А. Энерго-экологическая оптимизация сжигания газообразного топлива в действующих промышленно-отопительных котлах : дис. … канд. техн. наук: 05.23.03 / Кочергин М.А. – Санкт-Петербург, 2001. – 191 с.
43. Загретдинов, И. Точное регулирование соотношения топливо-воздух энергетических котлов / И. Загретдинов, В. Тропин // Neftegaz.RU. – 2014. – № 1-2. – С. 37-41
44. Считаем экономию: повышение КПД вашего котла за счет повышения эффективности использования топлива // Журнал «Клуб Правильных инженеров». – 2019. – URL: https://1-engineer.ru/schitaem-ekonomiyu-povyshenie-kpd-vashego-kotla-za-schet-povysheniya-effektivnosti-ispolzovaniya-topliva/ (дата обращения 29.11.2022).
45. Считаем экономию. Замена горелочного устройства // Журнал «Клуб Правильных инженеров». – 2021. – URL: https://1-engineer.ru/schitaem-ekonomiyu-zamena-gorelochnogo-ustroistva/(дата обращения 29.11.2022).
46. Щур, Ю.А. Оптимизация процесса горения твердого топлива / Ю.А. Щур, С.В. Прегудов, В.Ф. Безъязычный // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – Т. 101, № 07. – С. 77-80.
47. Безопасность процессов сжигания. Анализаторы кислорода TDL. – URL: https://modcon.ru/wp-content/uploads/2014/06/MOD-500-TDL_Combustion_RU.pdf (дата обращения 29.11.2022).
48. Патрахин, Ю.В. Метод контроля качества горения газовоздушной смеси по контрасту цветовых компонентов пламени в топке котельного агрегата / Ю.В. Патрахин, С.П. Пронин, Е.А. Зрюмов // Ползуновский альманах. – 2012. – № 2. – С. 92-95.
49. Lu, G. Vision based monitoring and characterisation of combustion flames / G. Lu, G. Gilabert, Y. Yang, // J. Phys. Conf. Ser. – 2005. – Vol. 15. – P. 194-200. – doi: 10.1088/1742-6596/15/1/033.
50. Huang, Y. Vision-based measurement of temperature distribution in a 500-kW model furnace using the two-colour method / Y. Huang, Y. Yan, G.

Riley // Measurement. – 2000. – Vol. 28. – P. 175-183. – doi: 10.1016/S0263-2241(00)00010-5.

51. Hernández, R. Flame imaging as a diagnostic tool for industrial combustion / R. Hernández, J. Ballester // Combustion and Flame. – 2008. – Vol. 155. – P. 509-528. – doi: 10.1016/j.combustflame.2008.06.010.
52. Wójcik, W. Application of fibre-optic flame monitoring systems to diagnostics of combustion process in power boilers / W. Wójcik // Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences. – 2008. – Vol. 56, № 2. – P. 177-195.
53. Светодиодные и лазерные газоанализаторы для повышения эффективности сжигания топлива в теплоэнергетике / В.А. Фираго, С.Н. Дрозд, В. Вуйцик [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2005. – № 2. – С.55-62.
54. Методы лазерной спектроскопии в средствах непрерывного контроля содержания 02 и со в дымовых газах котлов / В.А. Фираго, В. Вуйцик, И.С. Манак [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2006. – № 1. – С. 43-57.
55. Yuki, Y. Optimum Combustion Control by TDLS200 Tunable Diode Laser Gas Analyzer / Y. Yuki, A. Murata // Yokogawa Technical Report English Edition. – 2010. – Vol. 53, № 1. – P. 19-22.
56. Broadband UV spectroscopy system used for monitoring of SO2 and NO emissions from thermal power plants / Y.G. Zhang, H.S. Wang, G. Somesfalean [et al.] // Atmospheric Environment. – 2010. – Vol. 44. – P. 4266-4271. –doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.06.050.
57. Measurement of low concentrations of NO2 gas by differential optical absorption spectroscopy method / A.-J. AbdulAziz, A.-B. Watheq, G. Khaled, M.S. Romadhon // Measurement. – 2019. – Vol. 146. – P. 613-617. – doi: 10.1016/ j.measurement.2019.07.022.

58. Laser-based combustion diagnostics / T. Dreier, R.S.M. Chrystie, T. Endres, C. Schulz // Encyclopedia of Analytical Chemistry. – J. Wiley & Sons Ltd., 2016. – P. 2118-2148.
59. Infrared laser-absorption sensing for combustion gases / C.S. Goldenstein, R.M. Spearrin, J.B. Jeffries [et al.] // Progress in Energy and Combustion Science. – 2016. – Vol. 60. – P. 132-176. – doi: 10.1016/j.pecs.2016.12.002.
60. Improvement of combustion control through real-time measurement of o2 and co concentrations in incinerators using diode laser absorption spectroscopy / Y. Deguchi, M. Noda, M. Abe [et al.] // Proceedings of the Combustion Institute. –2002. – Vol. 29. – P. 147-153. – doi: 10.1016/S1540-7489(02)80023-2.
61. A portable gas sensor for sensitive CO detection based on quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy / Y. He, Y. Maa, Y. Tonga [et al.] // Optics and Laser Technology. – 2019. – Vol. 115. – P. 129-133. – doi: 10.1016/j.optlastec. 2019.02.030.
62. Абрагам, Б. Теория электричества : Том 1 / Б. Абрагам. – 2-е изд. – Ленинград; Москва: ГОНТИ, 1939. – 262 с.
63. Спектрометр для исследования свойств пламени / С.М. Борзов, И.А. Зарубин, В.И. Козик, В.А. Лабусов / Горение твердого топлива : VIII Всероссийская конференция с международным участием. Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. – 2012. – С. 19.1-19.7.
64. Исследование спектральных свойств излучения твердого и газообразного топлива / С.М. Борзов, И.А. Зарубин, В.И. Козик [и др.] // Химия, химические технологии и новые материалы. – 2014. – С. 393-397.
65. Использование спектрометра «Колибри-2» для исследования излучения пламени / С.М. Борзов, В.И. Козик, В.А. Лабусов, Д.К. Шарабин // Зоводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 7. – С. 13-18.

66. Трансформация спектральных свойств углеводородного пламени при изменении режима горения / В.Д. Анцыгин, С.М. Борзов, О.И. Потатуркин, Н.Н. Шушков // Автометрия. – 1997. – №6. – С. 9-13.
67. Борзов, С.М. Оптическая диагностика процессов горения газообразных углеводородов: дис. … канд. тех. наук: 01.04.05 / Борзов С.М. – Новосибирск, 2000. – 124 с.
68. Parameswaran, T. Estimation of combustion air requirement and heating value of fuelgas mixtures from flame spectra / T. Parameswaran, P. Gogolek, P. Hughes // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 105. – P. 353-361. – doi: 10.1016/ j.applthermaleng.2014.11.034.
69. Phuoc, T.X. Laser-induced spark for simultaneous ignition and fuel-to-air ratio measurements / T.X. Phuoc // Opt. Lasers Eng. – 2006. – Vol. 44, № 6. – P. 520-534. – doi: 10.1016/j.optlaseng.2005.07.007.
70. Laser-induced breakdown spectroscopy as an analytical tool for equivalence ratio measurement in methane–air premixed flames, Spectrochim / P. Stavropoulos, A. Michalakou, G. Skevis, S. Couris // Acta B At. Spectrosc. – 2005. – Vol. 60, № 7-8. – P. 1092-1097. – doi: 10.1016/j.sab.2005.03.021.
71. Quantitative local equivalence ratio determination in laminar premixed methane – air flames by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) / P. Stavropoulos, A. Michalakou, G. Skevis, S. Couris // Chem. Phys. Lett. – 2005. – Vol. 404, № 4-6. – P. 309-314. – doi: 10.1016/j.cplett.2005.01.105.
72. Zimmer, L. Laser induced plasma spectroscopy for local equivalence ratio measurements in an oscillating combustion environment / L. Zimmer, S. Tachibana // Proc. Combust. Inst. – 2007. – Vol. 31, № 1. – P. 737-745. – doi: 10.1016/j.proci.2006.07.035.
73. Michalakou, A. Laser induced breakdown spectroscopy in reactive flows of hydrocarbon-air mixtures / A. Michalakou, P. Stavropoulos, S. Couris // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 92, № 8. – P. 081501. – doi: 10.1063/1.2839378.

74. Laser-induced plasma in methane and dimethyl ether for flame ignitionand combustion diagnostics / J. Kiefer, J. Tröger, Z. Li, M. Alden // Applied Physics. – 2011. – Vol. 103, № 1. – P. 229-236. – doi: 10.1007/s00340-010-4338-6.
75. Zimmer, L. Combined laser induced ignition and plasma spectroscopy: fundamentals and application to a hydrogen–air combustor / L. Zimmer, K. Okai, Y. Kurosawa // Spectrochim. Acta B At. Spectrosc. – 2007. – Vol. 62, № 12. – P. 1484-1495. – doi: 10.1016/j.sab.2007.10.024.
76. Laser-induced breakdown spectroscopy for measurement of fuel/oxygen mixing in combustion, in: Digital Holography and Three-Dimensional Imaging / M. Dackman, J.W. Lewis, Y.-L. Chen, C.G. Parigger. – Optical Society of America, 2008. – P. JMA22. – doi: 10.1364/BIOMED.2008.JMA22.
77. Сальников, М.В. Решение задач контроля процессов горения методами оптической спектрометрии / М.В. Сальников, М.А. Ваганов // Сборник трудов XIX International Conference for Young Researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 92-94.
78. 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.
79. Ваганов, М.А. Многоканальный оптический спектрометр бесконтактного анализа для контроля процессов горения / М.А. Ваганов // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 10. – С. 39-43.
80. 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.

81. 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.
82. Paraskun, A.S. Experimental Research of High-Temperature Burning Processes and Spectroscopic Measurements / A.S. Paraskun, M.A. Vaganov, 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.
83. 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.
84. 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.
85. 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.
86. 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.

87. 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.
88. 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 : В 3-х частях. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2021. – С. 34-40.
89. Ваганов, М.А. Диагностика процесса горения газообразного углеводородного топлива методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии / М.А. Ваганов // Датчики и системы. – 2021. – № 3. – С. 33-39. –doi: 10.25728/datsys.2021.3.4.
90. Ваганов, М.А. Спектральная диагностика процесса горения газообразного углеводородного топлива / М.А. Ваганов // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 10. – С. 12–17.
91. 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
92. Misnikova, T.S. Application of Optical Spectroscopy Methods to Combustion Processes Diagnostics / T.S. Misnikova, M. A. Vaganov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2021. – P. 1-4. – doi: 10.1109/WECONF51603.2021.9470663.
93. Ваганов, М.А. Контроль физико-химических и технологических процессов методами оптической спектрометрии: монография/ М.А. Ваганов. – Санкт-Петербург: ГУАП. – 2022. – 167 с. ISBN
94. Методы спектрального анализа / А.А. Бабушкин, П.А. Бажулин, Ф.А. Королев [и др.]; под ред. проф. В.Л. Левшина. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1962. – 509 с.

95. Гейдон, А. Спектроскопия и теория горения / А. Гейдон. – Москва: ИЛ, 1950. – 308 с.
96. Тарасов, К.И. Спектральные приборы / К.И. Тарасов. – 2-е изд. – Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отд., 1977. – 367 с.
97. Клудзин, В.В. Акустооптические устройства обработки сигналов / В.В. Клудзин. – Санкт-Петербург, 1997. – 62 с.
98. Раутиан, С.Г. Реальные спектральные приборы / С.Г. Раутиан // Успехи физических наук. – 1958. – Т. 66, № 3. – С. 475-517.
99. Малышев, В.И. Введение в экспериментальную спектроскопию / В.И. Малышев. – Москва: Наука, 1979. – 480 с.
100. Ваганов, М.А. Резонансный метод бесконтактного анализа оптических спектров и его техническая реализация для решения задач контроля процессов горения : дис. … канд. тех. наук: 05.11.13 / Ваганов М.А. – Санкт-Петербург, 2014. – 152 с.
101. HR2000+ES Spectrometer. – URL: https://www.oceaninsight.com/products/ spectrometers/high-resolution/hr2000es/?qty=1 (дата обращения 29.11.2022).
102. AvaSpec-ULS4096CL-EVO. – URL: https://www.avantes.com/products/ spectrometers/starline/avaspec-uls4096cl-evo/ (дата обращения 29.11.2022).
103. ASD FieldSpec 4 Hi-Res NG Spectroradiometer. – URL: https://www.malvern panalytical.com/en/products/product-range/asd-range/fieldspec-range/fieldspec-4-hi-res-ng-spectroradiometer (дата обращения 29.11.2022). r
104. SM642: The Choice for Low Signal Level Applications. – URL: https://www.spectralproducts.com/SM642/326 (дата обращения 29.11.2022).
105. 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.

106. 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.

107. 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.

108. 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.

109. 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.

110. 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.

111. Методы оптической спектроскопии в задачах предотвращения аварийных ситуаций при выплавке тугоплавких металлов / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, А.В. Коняшин [и др.] // Титан. – 2020. – Т. 67, № 1. – С. 31-34.

112. 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.

113. 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.

114. Moskaletz, O.D. Evaluation of the energy spectrum of optical radiation by multichannel resonant spectrometer / O.D. Moskaletz, A.S. Paraskun, M.A. Vaganov // 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.

115. Moskaletz, O.D. Photo detection process and power spectrum estimation of optical radiation by the multichannel resonant spectrum analyzer / O.D. Moskaletz, A.S. Paraskun, M.A. Vaganov // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 735, № 1. – P. 012060. – doi: 10.1088/1742-6596/735/1/012060.

116. Transformation of a harmonized random process by spectral devices that perform instantaneous spectrum analysis / V.I. Kazakov, D.O. Moskaletz, O.D. Moskaletz, M.A. Vaganov // Proc. of SPIE Optical Sensing and Detection V. – Bellingham, WA, 2018. – Vol. 10680. – P. 1068024. – https://doi.org/10.1117/12.2305386.

117. Comparison of optical spectral devices in the framework of system approach / V. Kazakov, O Moskaletz, M Vaganov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1124, № 5. – P. 051019. – doi: 10.1088/1742-6596/1124/5/051019.

118. 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.

119. Reading, Processing and Correction of Spectroscopic Information in a Diffraction Grating Spectral Device / L.N. Preslenev, V.I. Kazakov, A.S. Paraskun, M.A. Vaganov // 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.

120. Contactless optical spectroscopy methods in the tasks of monitoring physical and technological processes in extreme conditions / V.I. Kazakov, O.D. Moskaletz, A.S. Paraskun, M.A. Vaganov // Proc. of SPIE Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI. – Bellingham, WA, 2019. – Vol. 11056. – P. 110563W. – https://doi.org/10.1117/12.2525795.

121. Kazakov, V.I. High-order transmissive diffraction grating for high-resolution spectral systems / V.I. Kazakov, O.D. Moskaletz, M.A. Vaganov / Proc. of SPIE Modeling Aspects in Optical Metrology VII. – Bellingham, WA, 2019. – Vol. 11057. – P. 110571G. – https://doi.org/10.1117/12.2526004.

122. 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.

123. Kazakov, V.I. High-Order Diffraction Grating for Optical Spectral Device / V.I. Kazakov, M.A. Vaganov // 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.

124. The Application of Contactless Optical Spectroscopy in Automatic Control Systems of Technological Processes / S. Paraskun, O.D. Moskaletz, V.I. Kazakov, M.A. Vaganov // 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.

125. Measurement of optical spectrum by a spectral device based on an acousto-optic tunable filter with a stepwise tuning frequency / O.D.

Moskaletz, M.A. Vaganov, 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.

126. Moskaletz, O.D. Sequential heterodyne analysis of the spectrum of optical signals / O.D. Moskaletz, M.A. Vaganov, 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.

127. Measurement of Optical Spectrum by a Spectral Device Based on an Acousto-Optic Tunable Filter with a Stepwise Tuning Frequency / O.D. Moskaletz, M.A. Vaganov, 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.

128. Moskaletz, O.D. Spectrum analysis of optical signals using sequential heterodyning / D. Moskaletz, M.A. Vaganov, E.P. Suedov // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 862, № 2. – P. 022033. – doi: 10.1088/ 1757-899X/862/2/022033.

129. 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.

130. 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.

131. Kazakov, V.I. Diffraction losses investigation in a fiber-optic transmission line of analyzed signals for combustion processes automatic control systems / V.I. Kazakov, M.A. Vaganov // Informatics and

Cybernetics in Intelligent Systems. – Springer International Publishing, 2021. – P. 554-560. – doi: 10.1007/ 978-3-030-77448-6_54.

132. 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.

133. Kulakov, S.V. Experimental Study of the Influence of Ambient Temperature on the Transmission of the Analyzed Signal Through an Optical Fiber / S.V. Kulakov, M.A. Vaganov, 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.

134. 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 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». – Бюл. № 25. – 2 с.

135. 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 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». – Бюл. № 34. – 2 с

136. 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 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». – Бюл. № 11. – 2 с.

137. 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.

138. Акустооптические перестраиваемые фильтры для лазерных информационных и телекоммуникационных систем : отчет о НИР (итоговый) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель О.Д. Москалец; Инв. № 115020310156. – Санкт-Петербург, 2016. – 29 с.

139. 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 (итоговый) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель М.А. Ваганов; Инв. № АААА-Б17-217062020050-5. – Санкт-Петербург, 2017. – 37 с.

140. Методы теории сигналов и теории линейных систем в задачах спектрально-корреляционной обработки сигналов оптического диапазона : отчет о НИР (итоговый) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель О.Д. Москалец; Инв. № АААА-А16-116020960154-1. – Санкт-Петербург, 2016. – 29 с.

141. Разработка научно-технических основ создания приборов контроля процессов горения на базе методов бесконтактной оптической спектрометрии : отчет о НИР (итоговый) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель М.А. Ваганов; Инв. № АААА-А17-117041110152-4. – Санкт-Петербург, 2017. – 37 с.

142. Сопоставление и оценка эффективности и качества спектральных приборов при решении спектроскопических задач в экстремальных условиях : отчет о НИР (итоговый) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель В.И. Казаков; Инв. № АААА-А17-117041010189-1. – Санкт-Петербург, 2017. – 34 с.

143. Методы и аппаратура бесконтактной оптической спектроскопии в задачах контроля физических и технологических процессов : отчет о НИР (промежуточный) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель М.А. Ваганов; Инв. № АААА-А19-119091290050-1. – Санкт-Петербург, 2021. – 93 с.

144. Разработка научно-технических основ формирования сигналов ошибки на базе методов бесконтактной оптической спектроскопии в системах многоальтернативного автоматического управления : отчет о НИР (промежуточный) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; руководитель М.А. Ваганов; Инв. № АААА-А19-119091290050-1. – Санкт-Петербург, 2020. – 76 с.

145. 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.

146. 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.

147. Казаков, В.И. Высокопорядковая дифракционная решетка для оптического спектрального прибора / В.И. Казаков, М.А. Ваганов, О.Д. Москалец // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : XXII Международной научной конференции. Сборник статей : В 2-х частях. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2019. – С. 104-109.

148. 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.

149. Ахманов, С.А. Введение в статистическую радиофизику и оптику / С.А. Ахманов, Ю.Е. Дьяков, А.С. Чиркин. – Москва: Наука, 1981. – 640 с.

150. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – Москва: Мир, 1989. – 540 с.

151. Мирский, Г.Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов / Г.Я. Мирский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1972. – 456 с.

152. Хименко, В.И. Статистическая акустооптика и обработка сигналов / В.И. Хименко, Д.В. Тигин. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 1996. – 292 с.

153. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Радио и связь, 1982. – 624 с.

154. Железнов, Н.А. Некоторые вопросы спектрально корреляционной теории нестационарных сигналов / Н.А. Железнов // Радиотехника и электроника. – 1959. – Т. 4, № 3. – С. 359-373.

155. Лебедева, В.В. Техника оптической спектроскопии / В.В. Лебедева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во Московского ун-та, 1992. – 352 с.

156. Пейсахсон, И.В. Оптика спектральных приборов / И.В. Пейсахсон. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд., 1975. – 312 с.

157. Нагибина, И.М. Фотографические и фотоэлектрические спектральные приборы и техника эмиссионной спектроскопии / И.М. Нагибина, Ю.К. Михайловский. – Ленинград: Машиностроение, 1981. – 248 с.

158. Оптические спектральные приборы/ Сборник статей / Ред. коллегия: ... А. Н. Королев (отв. ред.) и др. – Ленинград: Энергия. Ленингр. отд., 1975. – 136 с

159. Сороко, Л.М. Основы голографии и когерентной оптики / Л.М. Сороко. – Москва: Наука, 1971. – 616 с.

160. Хинчин, А.Я. Асимптотические законы теории вероятности / А.Я. Хинчин. – Москва: ОНТИ, НКТП, 1936. – 96 с.

161. Физическая энциклопедия : Т. 4. – Москва: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1994. – 704 с.

162. Горелик, Г.С. Колебания и волны / Г.С. Горелик. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ГИФМЛ, 1959. – 572 с.

163. Краус, М. Измерительные информационные системы/ М. Краус, Э. Вошни; под ред. Я.В. Малкова; пер. с нем. Е.А. Чалый и В.И. Азовцев. – Москва: Мир, 1975. – 310 с.

164. Рубичев, Н.А. Измерительные информационные системы / Н.А. Рубичев. – Москва: Дрофа, 2010. – 334 с.

165. Коротков, В.Б. Интегральные операторы / В.Б. Коротков. – Новосибирск: Наука, 1983. – 224 с.

166. Москалец, О.Д. Линейность и интеграл суперпозиции / О.Д. Москалец // Оптические и оптико-электронные средства обработки

информации : сборник научных трудов. – Ленинград: АН СССР, ФТИ им А.Ф. Иоффе, 1989. – С. 279-285.

167. Арсенин, В.Я. Методы математической физики и специальные функции / В.Я. Арсенин. – 2-е изд. – Москва: Наука, 1984. – 384 с.

168. Размахнин, М. К. Функции с двойной ортогональностью в радиоэлектронике и оптике / перевод и научная обработка М.К. Размахнина, В.П. Яковлева. – Москва: Советское радио, 1971. – 245 с.

169. Хургин, Я.И. Финитные функции в физике и технике / Я.И. Хургин, В.П. Яковлев. – Москва: Наука, 1971. – 408 с.

170. Moskaletz, O.D. Physical signal theory as a part of quantum laser theory / O.D. Moskaletz // Proceedings SPIE. – 2002. – Vol. 5066. – P. 213-224. – doi: 10.1117/12.501661.

171. Power optical signals spectrum assessment using resonance spectral analysis method / V.I. Kazakov, A.Y. Zhdanov, M.A. Vaganov, O.D. Moskaletz // Proceedings of SPIE Optics + Photonics 2012. Optics and Photonics for Information Processing VI. – Bellingham, WA, 2012. – Vol. 8498. – P. 849812-1-849812-8. – doi: 10.1117/12.929129.

172. Свешников, А.А. Прикладные методы теории случайных функций / А.А. Свешников. – 2-е изд. – Москва: Наука, 1968. – 448 с.

173. Фрумкин, В.Д. Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике / В.Д. Фрумкин, Н.А. Рубичев. – Москва: Машиностроение, 1987. – 168 с.

174. Пинскер, М.С. Проблемы передачи информации / Пинскер М.С. – Вып. 14. –Москва, 1963. – 160 с.

175. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Радио и связь, 1989. – 656 с.

176. Сергеев, А.Г. Метрология / А.Г. Сергеев. – Москва: Логос, 2005. – 272 с.

177. Цветков, Э.И. Основы теории статистических измерений / Э.И. Цветков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1986. – 256 с.

178. Солодовников, В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления / В.В. Солодовников. – Москва: Физматгиз, 1960. – с. 655.

179. Gebbie, H. Fourier Transform versus Grating Spectroscopy / H. Gebbie // Applied Optics. – 1969. – № 8. – P. 501-504. – doi: 10.1364/AO.8.000501.

180. King, G.W. Spectroscopy from the Point of View of the Communication Theory. Part III. The Amount of Information in a Spectrum / G.W. King, A.G. Emslie // J. Opt. Soc. Am. – 1953. – Vol. 43. – P. 664-668. – doi: 10.1364/JOSA.43.000664.

181. Корн, Г. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – 2-е изд., перераб. – Москва: Наука, 1973. – 832 с.

182. ГОСТ Р 8.563-2009 Методики (методы) измерений : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. № 1253-ст. : введен взамен ГОСТ Р 8.563-96 : дата введения 15.04.2010. – 27.

183. Гуляев, Ю.В. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение / Ю.В. Гуляев, М.Я. Меш, В.В. Проклов. – Москва: Радио и связь. 1991. – 152 с.

184. Гайнутдинов, И.С. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения / И.С. Гайнутдинов, Е.А. Несмелов, И.Б. Хайбуллин; Акад. наук Респ. Татарстан. отд. физики, энергетики, наук о Земле. – Казань: Фэн, 2002. – 591 с.

185. Кучикян, Л.М. Физическая оптика волоконных световодов/ Л.М. Кучикян.– Москва: Энергия, 1979. –191 с.

186. Оптические устройства в радиотехнике / А.Ю. Гринёв, К.П. Наумов, Л.Н. Пресленев; под ред. В.Н. Ушакова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Радиотехника, 2009. – 264 с.

187. Папулис, А. Теория систем и преобразований в оптике: пер. с англ. / А. Папулис. – Москва: Мир, 1971. – 495 с.

188. Гвоздырев, А. В. Анализ спектров излучения в диапазоне (200÷950) нм для различных пламен и источников оптических помех / А. В. Гвоздырев // Пожарная безопасность. – 2013. – № 4. – С. 74-79.

189. Misnikova, T.S. Application of Optical Spectroscopy Methods to Combustion Processes Diagnostics / T.S. Misnikova, M. A. Vaganov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2021. – P. 1-4. – doi: 10.1109/WECONF51603.2021.9470663.

190. 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.

191. Сайт лаборатории физических измерений США (PML). – URL: https://physics. nist.gov// (дата обращения: 29.11.2022).

192. Optical interference filters: Catalog 2021: Omega Optical. Inc. 2021. PP. 49 – 55, 60.

193. 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.

194. ИТС 19-2016. Производство твердых и других неорганических химических веществ. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – Москва: Бюро НТД, 2016. – 305 с.

195. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): справочник / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусовский, А.Б. Усачёв. – Москва: Машиностроение-1, 2001. – 496 с.

196. Исламов, М.Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей / М.Ш. Исламов. – Ленинград: Химия, 1986. – 280 с.

197. Позин, М.Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот) : Ч. I / М.Е. Позин. – 4-е издание. – Ленинград: «Химия», 1974. – 792 с.

198. Натрий / В.М. Иванов, К.А. Семененко, Г.В. Прохорова, Е.Ф. Симонов. – Москва: Наука, 1986. – 255 с.

199. Аналитическая химия фосфора / А.А. Федоров, Ф.В. Черняховская, А.С. Вернидуб [и др.]. – Москва: Наука, 1974. – 220 с.

200. Мышляева, Л.В. Аналитическая химия кремния / Л.В. Мышляева, В.В. Краснощеков. – Москва: Наука, 1972. – 207 с.

201. Коренман, И.М. Аналитическая химия калия / И.М. Коренман. – Москва: Наука, 1964. – 255 с.

202. On the detection of spectral emissions of iron oxides in combustion experiments of pyrite concentrates / C. Toro, S. Torres, V.R. Parra Sánchez [et al.] // Sensors. – 2020. – Vol. 20. №. 5. – P. 1284. – doi: 10.3390/s20051284.

Приложение А Акт внедрения от ООО «СЕВЗАПТЕХНИКА»

СЕВЗАПТЕХНИКА.РФ

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом подтверждается, что полученные результаты в диссертационной работе Ваганова М.А. были апробированы на этапе пусконаладочных работ газовой электростанции G3516 мощностью 1000 кВт, работающей на природном газе, для контроля его сжигания.

Полученные результаты, подтверждают, что применение разработанного спектрального прибора контроля процессов горения газообразных углеводородов и методики подготовки и проведения контроля позволяет повысить КПД установки на 3% и сократить расходы топлива на 0,5 %, по сравнению с применяемым в настоящее время на объекте контрольным оборудованием.

Акт составлен для предоставления в диссертационный совет.

Генеральный директор
ООО «Севзаптехника» Лях А.Д.

Дата « 02 » декабря 2021 г.

Общество с ограниченной ответственностью «СЕВЗАПТЕХНИКА»
Юридический адрес: 199178, г. Санкт-Петербург, Линия 17-я В.О., дом 60 Лит. А, пом. 4Н, офис 2.
Почтовый адрес:188689, Ленинградская обл., Всеволожский р-н, пос. Янино, ОПС Янино
ОГРН 1027800557707; ОКПО 54308384; ИНН 7801166106; КПП 780101001

Приложение Б Акт внедрения от АО «КНАУФ ПЕТРОБОРД»

Дата: 20.01.2022

Акт внедрения

Настоящим актом подтверждается, что полученные результаты в диссертационной работе на соискание ученой степени доктора технических наук «Контроль процессов горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии» Ваганова Михаила Александровича были применены на ТЭЦ АО "КНАУФ ПЕТРОБОРД" для контроля процесса сжигания природного газа в паровом котле типа БКЗ 75-39 ГМА с паропроизводительностью 75 т/час.

Внедрение разработанных спектрального прибора контроля и методики подготовки и проведения контроля процессов горения газообразных углеводородов спектроскопическим методом позволило достигнуть сокращения расхода топлива на 2% и выбросов вредных веществ в атмосферу на 7% по сравнению с установленными на объекте техническими средствами контроля.

Акт для предоставления в диссертационный совет.

Руководитель ИТС-главный энергетик Лапин М.В.

Начальник ТЭЦ Дерманский А.В.

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КНАУФ ПЕТРОБОРД»,
188320, Ленинградская область, Гатчинский р-он, г.Коммунар, ул. Павловская д.9.
Тел.: (812)460-22-78,(812) 332-11-40; факс: (812)460-22-87,(812) 332-11-42; E-mail:kpb@knauf.ru
р/с 407 028 105 000 000 008 41 в ООО «Дойче Банк», г. Москва, к/с 301 018 101 000 000 001 01,
БИК 044 525 101, КПП 470 501 001, ИНН 471 901 1873

Приложение В Акт об использовании от ООО «Теплоэнергосервис ДКМ»

ООО ТЕПЛОЭНЕРГОСЕРВИС ДКМ

АКТ
об использовании результатов диссертации
Ваганова Михаила Александровича

Настоящий акт составлен в том, что научные результаты диссертации Ваганова М.А. «Контроль процессов горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии», представленной к защите по специальности 2.2.8 - Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки), а именно:

1. спектроскопический метод контроля процессов горения, основанный на регистрации, анализе и сопоставлении множества спектроскопических информационных параметров;

2. методика подготовки и проведения спектроскопического контроля процессов горения газообразных углеводородов

применены в рамках работ по модернизации Анадырской газомоторной теплоэлектроцентрали (Анадырская ГМ ТЭЦ) для контроля процесса сжигания природного газа в водогрейном котле LOSS UT-H 14500*10 с газовой горелкой WEISHAUPT WKGL-4/0-AZ с установленной тепловой мощностью 12,47 Гкал/час.

Проведенные испытания показали, что применение указанных результатов диссертационной работы позволяет уменьшить расход топлива на 2 %.

Акт составлен для предоставления в диссертационный совет.

С уважением,
Технический директор
ООО «Теплоэнергосервис ДКМ» **С.Б. Лукомский**

14.03.2022

ООО «Теплоэнергосервис ДКМ»
143981, Московская обл., г. Балашиха, микрорайон Кучино,
ул. Южная д.11, корп. 1., РФ; тел. (498) 304-69-66 (65),
факс: (498) 304-69-64; E-mail: info@tesdkm.ru; сайт: www.tesdkm.ru

Банковские реквизиты:
р/с 40702810640020006166;
в ПАО "Сбербанк России", г. Москва, РФ,
БИК 044525225; ИНН 7729513074 / КПП 501201001

Приложение Г Акт внедрения от ООО «ПГ «Фосфорит»

ЕвроХим

Общество с ограниченной ответственностью "Промышленная группа "Фосфорит"
188452, Ленинградская обл., Кингисеппский район, Промзона «Фосфорит»
тел.: +7 (81375) 9-53-12, факс: +7 (81375) 2-87-27
www.eurochemgroup.com, e-mail: info_KSP@eurochem.ru

В диссертационный совет
по месту защиты
диссертации
М.А. Ваганова

Акт внедрения

Настоящий акт составлен в том, что для контроля процесса сжигания природного газа, применяемого в технологическом процессе производства дефторированных фосфатов, был апробирован спектроскопический метод контроля, разработанный в диссертационной работе Ваганова М.А. «Контроль процессов горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии».

Контроль сжигания природного газа, основанный на измерении спектроскопических параметров в спектре излучения пламени горелки и установленной их зависимости от режимов горения, показал возможность достижения экономии топлива от 2 до 3 %, что позволит сократить расходы на топливо и снизить себестоимость выпускаемой продукции.

Директор по производству **З.В. Иванов**
ООО «ПГ «Фосфорит»

ЕвроХим
13.04.2022

Приложение Д Акт об использовании от АО «Научно-Исследовательский институт Точной Механики»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора

по научной работе АО «НИИ ТМ»

_____ К.С. Дубов

«07» 09 2022 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Ваганова Михаила Александровича

«Контроль процессов горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии»,

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 - Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)

Комиссия в составе:

- председатель А.А. Большаков – начальник комплексного отдела аналитического приборостроения и систем, главный конструктор по направлению;

- члены комиссии:

Ю.Л. Степанов – заместитель начальника отдела, к.т.н.;

В.В. Антонов – начальник сектора, к.т.н.;

П.С. Барсуковский – ведущий инженер

составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные в диссертационной работе Вагановым Михаилом Александровичем, а именно:

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

были использованы при разработке приборов в рамках ОКР, выполняемых комплексным отделом аналитического приборостроения и систем.

Применение указанных результатов и предложенных Вагановым М.А. технических решений позволило увеличить чувствительность разрабатываемых приборов на 10%.

Начальник отдела _____ / А.А. Большаков

Заместитель начальника отдела, к.т.н. _____ / Ю.Л. Степанов

Начальник сектора, к.т.н. _____ / В.В. Антонов

Ведущий инженер _____ / П.С. Барсуковский

Приложение Е Акт об использовании от ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

ГУАП

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»
(ГУАП)

Большая Морская ул., д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057,
E-mail: common@aanet.ru; http://www.guap.ru; ОКПО 02068462; ОГРН 1027810232680; ИНН/КПП 7812003110/783801001

28.11.2022 № 34-4598/22
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ГУАП
доктор экономических наук,
профессор
_____ Антохина Ю.А
«28» 11 2022 г.

АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы
Ваганова Михаила Александровича

«Контроль процессов горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды» (технические науки)

Комиссия в составе

Председателя – заместителя директора института радиотехники и инфокоммуникационных технологий по учебной работе, кандидата экономических наук Киршиной И.А.

Членов комиссии:

Шакина О.В. – профессора кафедры № 23, доктора технических наук

Сауты О.И. – профессора кафедры № 23, доктора технических наук

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Ваганова М.А. «Контроль процессов горения газообразных углеводородов методами оптической спектроскопии», а именно:

1. математическое описание оптического спектрального прибора как информационной измерительной системы;

2. техническая реализация приборов контроля на базе оптических спектральных приборов с применением волоконно-оптической системы передачи анализируемых сигналов с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками

использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям 12.03.05 и 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения в дисциплинах «Основы оптики» «Когерентная оптика», «Проектирование лазерных систем» и «Основы конструирования оптических и лазерных приборов и систем».

Заместитель директора по учебной работе,
канд. экон. наук И.А. Киршина

Профессор кафедры №23,
д-р техн. наук, профессор О.В. Шакин

Профессор кафедры №23,
д-р техн. наук, профессор О.И. Саута

Приложение Ж Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 86734

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА СИГНАЛОВ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2009116195

Приоритет полезной модели 28 апреля 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации *10 сентября 2009 г.*

Срок действия патента истекает 28 апреля 2019 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **86 734** (13) **U1**

(51) МПК
G01J 3/26 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ(титульный лист)

(21), (22) Заявка: 2009116195/22, 28.04.2009

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.04.2009

(45) Опубликовано: 10.09.2009 Бюл. № 25

Адрес для переписки:
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, ГУАП, ОИС

(72) Автор(ы):
Архипов Игорь Николаевич (RU),
Ваганов Михаил Александрович (RU),
Кулаков Сергей Викторович (RU),
Котликов Евгений Николаевич (RU),
Москалец Олег Дмитриевич (RU),
Пресленев Леонид Николаевич (RU),
Прокашев Вадим Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" (RU)

RU 86734 U1

(54) ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА СИГНАЛОВ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

RU 86734 U1

(57) Формула полезной модели

1. Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона, содержащий канал анализа спектра сигнала, состоящий из формирующей оптики, согласующего элемента, фотоприемника и регистратора, отличающийся тем, что устройство дополнительно содержит группу оптических волокон, блок обработки спектрометрической информации, блок индикации, пульт управления и n каналов анализа спектра сигнала, в каждый из которых дополнительно введены последовательно установленные по ходу светового пучка интерференционный фильтр, второй согласующий элемент, выход которого соединен с входом фотоприемника, а вход интерференционного фильтра оптически связан с выходом первого согласующего элемента, причем n выходов группы оптических волокон соединены со входами первых согласующих элементов для каждого канала, а вход оптически связан с формирующей оптикой, n входов блока обработки спектрометрической информации соединены с выходами фотоприемников каждого канала, а n+1 вход блока обработки спектрометрической информации соединен с пультом управления, первый его выход соединен с регистратором, а второй - с блоком индикации.

2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что группа оптических волокон выполнена в виде жгута из n оптических волокон с одним общим входом, разделенного у конца на n волокон.

3. Устройство по п.1, отличающееся тем, что блок обработки спектрометрической информации содержит мультиплексор, n входов которого соединены с выходами

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 100241

ОПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА СИГНАЛОВ

Патентообладатель(ли): ***Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2010127591**

Приоритет полезной модели **02 июля 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***10 декабря 2010 г.***

Срок действия патента истекает **02 июля 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **100 241** (13) **U1**

(51) МПК
G01J 3/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ(титульный лист)

(21), (22) Заявка: **2010127591/28, 02.07.2010**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.07.2010

(45) Опубликовано: **10.12.2010** Бюл. № **34**

Адрес для переписки:
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67, отдел интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):
Ваганов Михаил Александрович (RU),
Москалец Олег Дмитриевич (RU),
Пресленев Леонид Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" (RU)

(54) ОПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА СИГНАЛОВ

(57) Формула полезной модели

1. Оптический анализатор спектра сигналов, содержащий формирующую оптику, фотоприемный блок, выходы которого соединены с входами блока обработки спектроскопической информации, n+1 вход которого соединен с пультом управления, а первый выход блока обработки спектрометрической информации соединен с регистратором, а второй - с блоком индикации, отличающийся тем, что устройство дополнительно содержит оптическое волокно, вход которого оптически связан с формирующей оптикой, и n последовательно соединенных блоков фильтрации, вход первого блока фильтрации соединен с выходом оптического волокна, вход второго блока фильтрации соединен с первым выходом первого блока фильтрации, выход n-го блока фильтрации соединен с оптическим поглотителем, причем вторые выходы всех блоков фильтрации соединены с n входами фотоприемного блока, n выходов которого соединены с n входами блока обработки спектрометрической информации, а n+1 вход блока обработки спектрометрической информации соединен с пультом управления через шину, первый выход блока обработки спектрометрической информации соединен с регистратором через двунаправленную шину, а второй - с блоком индикации через шину.

2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что блок обработки спектрометрической информации содержит мультиплексор, n входов которого соединены с выходами усилителей, входы которых соединены с выходами фотоприемного блока, n+1 вход через шину соединен с одним из выходов микроконтроллера, а выход соединен со входом усилителя, выход которого соединен со одним из входов микроконтроллера, другой вход которого через шину соединен с блоком управления, а один из выходов соединен со входом блока индикации, вход преобразователя соединен с выходом микроконтроллера посредством двунаправленной шины, а выход - через

RU 100241 U1

RU 100241 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 188637

СЕЛЕКТИВНЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРОМЕТР

Патентообладатель: ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения" (RU)***

Авторы: ***Ваганов Михаил Александрович (RU),***
Бестугин Александр Роальдович (RU)

Заявка № **2018143314**
Приоритет полезной модели **06 декабря 2018 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **18 апреля 2019 г.**
Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **06 декабря 2028 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021668476

Программа для расчета параметров штрихов амплитудной пропускающей дифракционной решетки

Правообладатель: ***Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (RU)***

Авторы: ***Казаков Василий Иванович (RU), Ваганов Михаил Александрович (RU)***

Заявка № **2021668096**

Дата поступления **17 ноября 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ ***22 ноября 2021 г.***

Руководитель Федеральной службы

по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 0x02A5CE8C0D1AC1F9A60A2F08092E9A11B

Владелец Ивлиев Григорий Петрович

Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев