

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»**

На правах рукописи

Ваганов Михаил Александрович

**Резонансный метод бесконтактного анализа
оптических спектров и его техническая
реализация для решения задач контроля
процессов горения**

Специальность 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
О. Д. Москалец

Санкт-Петербург 2014

Содержание

Введение	4
1 Спектральные измерения в оптическом диапазоне для решения задач контроля процессов горения	18
1.1 Оптические методы контроля процессов горения	18
1.1.1 Фотографические методы	18
1.1.2 Теневые и интерференционные методы	19
1.1.3 Контроль процесса горения путем измерение скорости потока газа	20
1.1.4 Контроль процесса горения путем измерения температуры	21
1.1.5 Спектроскопические методы контроля процессов горения	22
1.2 Принципы получения спектроскопической информации в оптическом диапазоне	24
1.3 Методы анализа спектра в оптическом диапазоне и основные типы оптических спектральных приборов, выполняющие контактный анализ спектра	26
1.4 Сравнительный анализ спектральных приборов оптического диапазона	31
1.5 Оптические спектральные приборы бесконтактного анализа спектра	35
1.6 Принципы построения спектральных приборов, выполняющих бесконтактный анализ спектра оптического излучения резонансным методом	39
1.7 Аналитические методы спектрометрии	45
1.8 Выводы	51
2. Элементы теории линейных систем и теории сигналов в задачах аппаратного гармонического анализа	53
2.1 Постановка задачи	53
2.2 Радиооптический подход	56
2.3 Модель анализируемого оптического сигнала	57
2.4 Интеграл суперпозиции для спектрального прибора	61

2.5	Переменные во времени спектры	65
2.6	Выводы	70
3.	Резонансный метод бесконтактного параллельного анализа оптических спектров	72
3.1	Многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона	72
3.2	Теоретический анализ работы резонаторной системы многоканального спектрометра оптического диапазона	77
3.3	Анализ энергетического спектра оптических сигналов многоканальным резонаторным спектрометром	84
3.3.1	Анализ энергетического спектра оптического сигнала	84
3.3.2	Методы оценки энергетического спектра оптического сигнала	92
3.4	Выводы	95
4	Результаты экспериментального исследования	97
4.1	Аппаратурная реализация прибора контроля в форме многоканального спектрометра оптического диапазона	97
4.2	Результаты экспериментального исследования лабораторного макета многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона	109
4.3	Области возможного применения многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона	119
4.3.1	Многоканальный спектрометр для решения задач контроля процессов горения	119
4.3.2	Многоканальный спектрометр для решения задач контроля технологических процессов	127
4.4	Выводы	132
	Приложение А. Номенклатура интерференционных узкополосных оптических фильтров видимого диапазона, выпускаемых фирмой Omega Optical, Inc	133
	Заключение	138
	Список использованных источников	141

Введение

Актуальность темы. Процессы горения, встречающиеся в природе и в технике, весьма многообразны. Они широко используются в различных сферах: в двигателях внутреннего сгорания, ракетных двигателях, на тепловых электростанциях, в военном деле [1]. Методы экспериментального исследования процессов горения создавались в неразрывной связи с развитием теории горения. На различных стадиях развития представлений об этих процессах соотношение между теорией и экспериментом менялось, однако всегда ощущался недостаток экспериментальных данных [2]. Поэтому создание и развитие методов контроля и оптимизации процессов горения является одной из актуальных задач научных и прикладных исследований. Наибольшее распространение в практике нашли оптические методы контроля, отвечающие необходимости изучения быстропротекающих процессов горения. К таковым следует отнести фотографические методы в разных вариантах (скоростная и сверхскоростная фотография), теневые, интерференционные, спектроскопические и методы измерения температуры пламени или скорости потока газа, возникающего при горении [2].

К числу наиболее информативных оптических методов контроля относятся спектроскопические, где прибором контроля является спектрометр, который исследует электромагнитное излучение как сигнал, несущий спектроскопическую информацию об объекте, т.е. о процессе горения. Основные преимущества спектроскопических методов состоят в следующем [2]:

- не вносят возмущений в исследуемую среду и не вызывают изменения ее физических и химических свойств;
- обладают большой чувствительностью;
- позволяют осуществлять контроль в реальном времени;

- применимы для исследования нестационарных, быстропротекающих явлений (таких, как горение, детонация, распространение ударных волн и т.д.), так как они не обладают малой инерционностью [2];
- зачастую являются единственно возможными, например, при изучении весьма удаленных или труднодоступных объектов;
- обладают высокой информативностью. По получаемой спектроскопической информации можно судить о наличии соответствующего химического элемента, о кинетической температуре излучающего газа (доплеровское уширение контура линии), о плотности возмущающих частиц (уширение из-за эффекта давления), концентрации заряженных частиц (штарковское уширение) и о концентрации излучающих частиц по интенсивности обнаруженной линии [3, 4].

Большая роль спектроскопических методов при решении задач контроля процессов горения требует дальнейшего совершенствования известных и разработки новых методов анализа спектра оптических сигналов, создания широкой номенклатуры спектральных приборов оптического диапазона, а также дальнейшей разработки теории спектральных измерений.

Существующие технические средства оптической спектроскопии, построенные по традиционному принципу, выполняют контактный анализ, при котором излучение непосредственно падает на вход спектрального прибора, и они не способны решать задачи контроля таких процессов горения, где непосредственный контакт прибора контроля с полем излучения пламени невозможен, либо нежелателен. Отсюда возникает острая потребность в приборах, позволяющих выполнять контроль процессов горения на основе бесконтактного анализа спектра оптического излучения, исключая непосредственный контакт прибора с полем излучения источника (очага горения). При бесконтактном анализе оптический сигнал падает не на вход прибора, а сначала передается на безопасное для него расстояние от очага горения, например, с помощью оптического волокна. В настоящее

время существуют спектральные приборы, в которых для передачи анализируемого оптического сигнала используется одномодовые или многомодовые оптические волокна. Однако в этом случае возникает ряд трудностей, при использовании многомодового волокна происходит искажение волнового фронта анализируемого излучения за счет многомодового распространения излучения в волокне, что приводит к ухудшению разрешающей способности прибора и существенным погрешностям спектральных измерений [5]. При использовании одномодовых волокон возникают серьезные трудности с вводом оптического излучения в волокно [6], в результате чего снижается светосила линии передачи, а, следовательно, и ухудшается чувствительность прибора. Отсюда вытекает актуальность создания спектрометров с улучшенной чувствительностью, при сохранении или даже улучшении разрешающей способности прибора.

В диссертационной работе для решения задач контроля процессов горения разработан метод бесконтактного анализа оптических спектров, основанный на явлении резонанса в n параллельных каналах, и его техническая реализация в форме многоканального спектрометра. В разработанном приборе спектральное разложение осуществляется набором оптических резонаторов (узкополосных интерференционных оптических фильтров), настроенных на определенную частоту (длину волны). Для передачи излучений на вход спектрометра используется волоконно-оптический жгут. Этот метод позволяет повысить чувствительность прибора контроля, без ухудшения его разрешающей способности.

Многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона принципиально отличается от известных оптических спектральных приборов, и, следовательно, требует специального теоретического описания, выполненного на основе математического аппарата, который в спектрометрии раньше не применялся.

Разработка и исследование предлагаемого в данной диссертационной работе резонансного метода бесконтактного параллельного анализа оптических спектров и прибора контроля, реализующего этот метод, лежит в русле дальнейшего развития и совершенствования теории и практики оптической спектрометрии применительно к задачам контроля процессов горения, а также задачам контроля окружающей среды, различных веществ и материалов, что подчеркивает актуальность, проводимых в работе исследований.

Научные исследования, выполненные в рамках данной диссертационной работы, являются составной частью НИР, проводимых по грантам РФФИ № 10-07-00371, № 11-07-00308 и № 13-07-00238 [7, 8, 9], а новизна разработанного спектрометра подтверждается полученным на него патентом РФ № 86734 [10].

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является повышение чувствительности контроля процессов горения на основе резонансного метода бесконтактного параллельного анализа оптических спектров.

В данной работе **объектом исследования** являются процессы горения, например, в двигателях внутреннего сгорания, ракетных двигателях, теплоэнергетических установках, а также пожары, в частности в корабельных отсеках, и т.п., а **предметом исследования** – оптические излучения, содержащие спектроскопическую информацию об этих процессах.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить задачи:

1. Разработать метод бесконтактного параллельного анализа оптических спектров для решения задач контроля и обосновать его преимущества.
2. Предложить теоретический подход к анализу оптических спектров в рамках разработанного метода.

3. На основе предложенного подхода выполнить теоретическое исследование работы анализирующей части (резонаторной системы) многоканального спектрометра.

4. Дать теоретическое описание получения многоканальным спектрометром энергетического спектра, несущего информацию о состоянии контролируемого процесса горения.

5. Предложить схему построения прибора контроля, реализующего разработанный метод.

6. Разработать и создать лабораторный макет многоканального резонаторного спектрометра с передачей анализируемых сигналов по волоконно-оптическому жгуту.

7. Провести экспериментальное исследование источников оптического излучения с применением разработанного лабораторного макета.

Методы решения задач

При проведении теоретического описания процесс анализа спектра оптических сигналов разрабатываемым многоканальным резонаторным спектрометром оптического диапазона целесообразно разделить на два этапа. Сначала вычисляется комплексный спектр анализируемого оптического сигнала с помощью анализатора комплексного спектра, который входит в состав многоканального спектрометра и представляет собой его резонаторную систему. Второй этап заключается в дальнейшей обработке комплексного спектра детектирующей системой спектрометра для получения энергетического спектра, который является результатом спектрального измерения в оптическом диапазоне.

Теоретические исследования опираются на сформулированные в математической теории гармонического анализа [11] и теории сигналов понятия спектральных функций временных частот и их преобразований

линейными системами. И исследование действия резонаторной системы спектрометра должно опираться на методы теории линейных систем [12, 13, 14, 15] с привлечением теории сигналов [16, 17], где линейность устанавливается относительно мгновенных значений. В силу специфики рассматриваемого прибора, состоящего из n параллельных каналов, к его теоретическому описанию необходимо применить методы матричного исчисления [18].

В рамках системного подхода резонаторная система спектрометра рассматривается как многомерная линейная система, действие которой описывается линейным интегральным оператором. Ядром этого оператора является матричная аппаратная функция, которая вводится впервые в данной диссертационной работе. Такой подход устанавливает связь между математическим понятием спектра и аппаратным, т.е. физическим спектром, получаемым на выходе резонаторной системы.

Применяемая методология соответствует понятию радиооптики, под которой понимается определенный подход, характеризующийся перенесением известных идей и методов теоретической радиотехники в оптику, и наоборот [19]. Данный радиооптический подразумевает перенос идеи и метода параллельного анализа спектров, известных в радиодиапазоне, в теорию и практику оптической спектрометрии.

Специфика детектирования в оптическом диапазоне, результатом чего является измерение энергетических величин, потребовала переход от комплексного спектра к энергетическому спектру. Этот переход был выполнен с применением специального математического аппарата теории вытянутых волновых сфероидальных функций [20, 21].

Полученные в рамках данной диссертационной работы теоретические выкладки, описывающие действие резонаторной системы многоканального резонаторного спектрометра, также пригодны для описания процесса измерения спектра параллельными анализаторами спектра, работающими в

радиодиапазоне, поскольку опираются на общую методологию теории линейных систем и теорию сигналов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Для решения задач контроля процессов горения впервые разработан метод бесконтактного анализа спектра оптических излучений, основанный на явлении резонанса в n параллельных каналах, и реализующий его прибор контроля с улучшенной чувствительностью без ухудшения разрешающей способности по сравнению с существующими аналогами.

2. Впервые проведено теоретическое исследование процесса анализа спектра многоканальным спектрометром на основе математического аппарата (теория многомерных линейных, методы матричного анализа и теория вытянутых волновых сфероидальных функций), который в оптической спектрометрии раньше не применялся, что позволило дать адекватное методу параллельного анализа описание работы разработанного прибора.

3. В отличие от известной методики описания работы оптического спектрального прибора разработанный теоретический подход дает последовательное описание прохождения анализируемого оптического сигнала, отражающего состояние контролируемого процесса горения, через все узлы спектрального прибора.

4. Новизна разработанного спектрометра заключается в применении набора оптических резонаторов и волоконно-оптического жгута, используемого для ввода излучения в резонаторы и позволяющего удалить прибор контроля на безопасное расстояние от очага горения, и тем самым исключить его непосредственный контакт с полем излучения пламени.

Достоверность результатов подтверждается их непротиворечивостью ранее известным положениям, применением в процессе исследований адекватных физических и математических моделей, корректным использованием современных аналитических и расчетных методов, а также положительными результатами внедрения.

Практическая значимость диссертационной работы:

1. Результаты теоретических исследований позволили сформулировать требования к основным параметрам промышленных образцов спектрометров такого типа, разрабатываемым в дальнейшем, а именно требования к ширине полосы пропускания резонаторов, частотам (длинам волн) настройки резонаторов и времени интегрирования результатов фотодетектирования.

2. Разработан лабораторный макет прибора контроля в форме многоканального спектрометра, и подтверждена его работоспособность. Экспериментально доказано, что применение многомодового волоконно-оптического жгута в качестве линии передачи анализируемого сигнала значительно увеличивает чувствительность разработанного прибора и не приводит к ухудшению его разрешающей способности по сравнению с существующими спектральными приборами, что повышает чувствительность контроля на основе предложенного метода.

3. Результаты исследований легли в основу разработки 30-канального прибора контроля состояния жидкостного ракетного двигателя по спектру излучения его факела, диапазон анализируемых длин волн: 350-590 нм.

4. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при разработке анализатора спектра факела пламени мартеновской печи в рамках НИОКР по контракту №

11572p/20938, выполняемой при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере [22].

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований также могут быть использованы при разработке технических средств для решения задач контроля процессов горения и технологических процессов, протекающих в условиях повышенной температуры, влажности, агрессивной химической среды, повышенного уровня взрывоопасности и радиации.

6. На базе разработанного лабораторного макета многоканального резонаторного спектрометра с передачей анализируемых сигналов по волоконно-оптическому жгуту поставлены демонстрационные лабораторные работы по курсам «Основы оптики» и «Оптическая обработка информации» на кафедре электроники и оптической связи ГУАП.

Практическая значимость исследований подтверждается актами о внедрении.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод бесконтактного параллельного анализа оптических спектров для решения задач контроля процессов горения, и схема построения прибора контроля, реализующего этот метод.

2. Теоретическое исследование работы резонаторной системы многоканального спектрометра оптического диапазона.

3. Теоретическое исследование процесса получения многоканальным спектрометром энергетического спектра, несущего информацию о состоянии контролируемого процесса горения.

4. Результаты экспериментальных исследований многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на X, XI, XII, XIII, XIV, XV международных молодежных научных конференциях «Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems» (Санкт-Петербург, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 гг.); на научной сессии ГУАП (Санкт-Петербург, 2011, 2013 гг.); на X Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» (г. Таганрог, 2010 г.); на VI Международной научно-технической конференций «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики "АНТЭ-2011"» (г. Казань, 2011 г.); на международных научных конференциях «Лазеры, измерения, информация» (Санкт-Петербург, 2011, 2012 гг.); на Международных научных симпозиумах «SPIE Optics + Photonics» (г. Сан-Диего, США, 2010, 2011, 2012, 2013 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 24 печатных работах, 2 из которых – патенты, 3 – статьи в изданиях, рекомендованных ВАК России, 19 – публикаций в материалах российских и международных форумов и конференций.

Личный вклад автора. Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении методов их решения, получении и анализе результатов исследований.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка используемой литературы, одного приложения. Общий объем – 152 страницы, включая 50 рисунков и 4 таблицы. Список используемой литературы содержит 112 наименований.

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

В первом разделе выполнен обзор методов контроля процессов горения, на основании которого был выделен спектроскопический метод, как наиболее информативный. Выполнен обзор методов оптической спектроскопии, а также существующих спектральных приборов, выполняющих как контактный, так и бесконтактный анализ спектра оптических сигналов.

Проведенный анализ показал, что известные спектральные приборы обладают целым рядом недостатков, к числу которых можно отнести проблему формирования плоского однородного фронта анализируемого излучения и наличие прецизионной механической системы перестройки по диапазону анализируемых длин волн.

Отмечаются известные экспериментальные исследования по применению оптического волокна в качестве линии передачи анализируемого излучения в спектрометре на базе акустооптического перестраиваемого фильтра [5]. Полученные в этой работе результаты экспериментально подтверждают, что использование оптического волокна ведет к уширению и искажению формы аппаратной функции спектрометра, а значит к ухудшению разрешающей способности прибора, особенно в случае применения многомодового волокна.

Рассмотрены два новых принципа построения спектральных приборов, выполняющих бесконтактный анализ спектра оптического излучения на основе резонансного метода. Первый принцип реализован в виде оптического спектрометра на базе волоконных брэгговских решеток, второй – в виде многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона. Реализации обоих принципов в виде устройств защищены патентами РФ [10,

23]. Выделены достоинства этих спектрометров по сравнению с традиционными оптическими спектрометрами контактного и бесконтактного анализа.

Рассмотрены аналитические методы спектрометрии. Показаны важные аспекты теории современной оптической спектрометрии, которые все еще остаются недостаточно разработанными и требуют более детального исследования.

Во втором разделе разработан теоретический подход к анализу оптических спектров сигналов контролируемых процессов горения. Особое внимание уделено решению первостепенной задачи теории спектральных измерений, а именно установлению связи между спектром истинным (математическим), отражающим состояние контролируемого процесса горения, и аппаратным спектром (физическим), получаемым с помощью спектральной аппаратуры и дающим информацию получателю о состоянии этого процесса.

Исходя из информационного аспекта теории измерений, показано, что в качестве адекватной модели анализируемого оптического излучения следует взять гармонизируемый случайный процесс, который характеризует состояние контролируемого процесса горения.

Исходя из основной концепции теории линейных систем, обосновано, что в случае анализа спектра в оптическом диапазоне спектрального прибора определяется как его реакция на однородную плоскую монохроматическую волну. Также показано, что аппаратную функцию анализатора комплексного спектра, который входит в состав многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона, следует рассматривать как действие линейного ограниченного оператора на δ – воздействие в частотной области.

Помимо общеизвестных переменных во времени спектров (текущего и мгновенного) в теорию спектральных измерений были введены еще два спектра: выборочный и мгновенный, предложенный в новой форме.

В третьем разделе выполнено теоретическое исследование работы прибора контроля в форме многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона, реализующего разработанный метод. Теоретический анализ процесса измерения спектра разработанным многоканальным спектрометром выполнен на основе специального математического аппарата, опирающегося на теорию многомерных линейных систем, методы матричного исчисления и теорию вытянутых волновых сфероидальных функций. Специфика измерения спектра в оптическом диапазоне потребовала отдельного анализа резонаторной системы многоканального резонаторного спектрометра и всего прибора в целом.

Получено основное соотношение теории спектральных измерений в матричной форме, которое устанавливает связь между истинным распределением энергии по спектру, отражающим состояние контролируемого процесса горения, и спектральным распределением энергии по спектру, полученным экспериментально с помощью многоканального спектрометра и дающим информацию получателю о состоянии этого процесса.

В четвертом разделе приводятся результаты экспериментального исследования многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона, приведены фотографии действующего лабораторного макета и отдельных его блоков, а также некоторые конструктивные сведения. Приводятся результаты выполненных экспериментальных исследований, где в качестве тестовых источников оптического излучения использовались лампа накаливания и вольфрамовая галогенная лампа. Рассмотрены области возможного применения разработанного многоканального резонаторного спектрометра для решения задач контроля процессов горения, а именно диагностика жидкостного ракетного двигателя по спектру излучения его факела и создание абсолютно взрывобезопасных пламенных пожарных извещателей, а также для контроля технологических процессов,

протекающих в неблагоприятных условиях, например повышенной температуры, влажности и агрессивной-химической среды.

В приложении А приводятся скан-копии страниц из каталога оптических фильтров фирмы Omega Optical, Inc, содержащих информацию об основных характеристиках узкополосных оптических фильтрах (резонаторах оптического диапазона).

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1 Спектральные измерения в оптическом диапазоне для решения задач контроля процессов горения

1.1 Оптические методы контроля процессов горения

Среди методов контроля процессов горения, как отмечалось выше, наибольшее распространение в практике нашли оптические методы контроля, отвечающие необходимости изучения быстропротекающих процессов горения. К таковым следует отнести фотографические методы в разных вариантах (скоростная и сверхскоростная фотография), теневые, интерференционные, спектроскопические методы и методы измерения температуры пламени [2].

1.1.1 Фотографические методы

Фотографический метод исследования находит широкое применение почти во всех областях науки и техники. Фотография является неизменным средством наблюдения, регистрации и измерения, во многих случаях позволяющим добиться таких результатов, которые не могут быть получены никаким другим способом. Скоростная и сверхскоростная фоторегистрация позволяют наблюдать такие явления и процессы, которые человеческому глазу принципиально недоступны. К преимуществам скоростной фоторегистрации следует отнести возможность изменения масштаба времени, т.е. необходимого ускорения течения кинематографического изображения медленных и замедления быстрых процессов, возможность регистрации отдельных фаз чрезвычайно кратковременных и быстрых явлений, возможность одновременной одинаково точной фиксации огромного числа объектов и их элементов [2].

В настоящее время существует огромное количество устройств для контроля процессов горения фотографическим методом, но наилучшим приборами, получившими общее признание, являются телевизионные камеры (скоростные, высокоскоростные). С их помощью можно увидеть процессы, недоступные визуальному наблюдению. Обладая высоким

временным расширением (1мкс), камера позволяет следить не только за высокоскоростными турбулентными факелами, но и за взрывными процессами, а также за другими нестационарными проявлениями волны горения. Кинокамеру можно использовать для изменения распределения скорости потоков за фронтом горения по следу светящихся частиц [2].

Но, несмотря на свои достоинства, фотографический метод имеет и недостатки. Во-первых, последующая обработка полученной информации требует некоторого времени, что не позволяет проводить контроль процессов горения в реальном времени. Во-вторых, этот метод не обладает высокой информативностью, по полученным результатам нельзя судить о наличии того или иного химического элемента, о его концентрации и т.п.

1.1.2 Теневые и интерференционные методы

Прямое скоростное и высокоскоростное фотографирование явления в собственном свете дает важную информацию о развитии процесса горения, однако более полную информацию можно получить при использовании оптических методов контроля, основанных на взаимодействии проходящего света с исследуемым объемом газа [2].

Оптической неоднородностью, или шлирой, называют малую область в прозрачной среде, которая вызывает нерегулярные отклонения проходящего через нее света.

Нерегулярные отклонения света в различных точках шлиры вызываются изменением показателя преломления среды или изменением толщины прозрачного тела, или по обеим этим причинам. Характерными примерами шлир являются конвективные потоки воздуха от нагретых тел, фронт пламени и детонационной волны, ударные волны.

Основная идея теневых и интерференционных методов контроля процессов горения состоит в следующем: при прохождении через неоднородность световой луч отклонится на некоторый угол от первоначального направления распространения. Соответствующие

оптические системы позволяют определить либо время запаздывания пришедшего луча, либо угол отклонения пришедшего луча от первоначального направления распространения, либо смещение точки падения светового луча на экране [2].

По измеренным величинам становится возможным в каждой точке неоднородности вычислить показатель преломления среды. Зная показатель преломления среды в каждой точке с помощью известных соотношений можно рассчитать соответствующие значения других параметров среды.

Метод исследования оптических неоднородностей, основанный на измерении времени запаздывания, называется интерференционным методом; основанный на измерении отклонения — методом Теплера или шлирен-методом; основанный на измерении смещения — теневым методом.

К недостаткам этих методов контроля можно отнести невозможность проведения точных количественных исследований структуры оптической неоднородности, необходимость дальнейших расшифровок тенеграмм и интерферограмм и недостаточную информативность, как в случае фотографического метода контроля.

1.1.3 Контроль процесса горения путем измерение скорости потока газа

Измерение скоростей в потоках газа при горении представляет большие трудности. Любые датчики, введенные в сверхзвуковое пламя, вызывают образование ударных волн, значительно изменяющих поток, где замеряется скорость, а сами датчики подвергаются действиям высокой температуры и механических сил от потока горящего газа, которые часто разрушают их [2].

Одним из наиболее простых методов измерения скоростей газа является создание в движущемся газе «метки», перемещающейся вместе с потоком. Меткой служит небольшой объем газа, нагретый искровым разрядом, или ионное облачко, созданное тем же разрядом.

В зависимости от характера «метки» используется тот или иной способ регистрации ее движения. За движением нагретого объема газа удобно следить оптическим методом, позволяющим не только непрерывно регистрировать изменение положения «метки» в пространстве, но и визуально наблюдать другие гидродинамические неоднородности потока. Оптический метод регистрации с успехом использовался для определения профиля скорости потока газа, изучения пограничного слоя, измерения турбулентных характеристик потока [2].

Недостатками этого метода контроля являются недостаточная его информативность и возникновение возмущений в исследуемой среде, что может привести к изменению ее свойств.

1.1.4 Контроль процесса горения путем измерения температуры

Температура является одним из основных параметров многих физико-химических процессов. Для измерения температур пламён и газовых сред применяются следующие оптические методы: 1) яркостный метод; 2) цветовой метод; 3) метод обращения спектральной линии; 4) метод интенсивности насыщенного центра спектральной линии; 5) метод относительной интенсивности спектральных линий; 6) метод измерения температуры по вращательному молекулярному спектру; 7) метод измерения температуры по колебательному молекулярному спектру; 8) метод измерения температуры по доплеровскому уширению спектральной линии и др [2].

Необходимо отметить, что применимость перечисленных оптических методов, а также точность, достигаемая ими, целиком определяется свойствами исследуемых газовых сред и пламён. Ввиду того, что излучение газовых сред и пламён зависит не только от их температуры, но и от многих других факторов (от коэффициента излучения и размеров факела, от химических процессов, происходящих в газах и т. д.), применению выбранного оптического метода измерения температуры должно предшествовать проведение предварительных спектральных исследований

объекта; лишь после тщательного анализа свойств излучающей среды можно остановиться на том или ином оптическом методе определения температуры, который дает при измерении достаточную методическую точность [2].

Оптическими методами, применяемыми для определения температур светящихся газовых сред и пламён, в большинстве случаев измеряется не истинная температура, а некая эффективная радиационная, яркостная, цветовая температура, отличие которой от истинной определяется в основном испускательной способностью среды.

Оптико-электрические системы, применяемые при измерении температуры, имеют, как правило, три основных элемента: а) чувствительный элемент (приемник излучения); б) усилитель-преобразователь; в) регистрирующий прибор. В некоторых системах, работающих с применением метода лучеиспускания — поглощения, к данным элементам добавляется источник сравнения.

Ввиду того, что оптические методы определения температур требуют в большинстве случаев выделения и измерения узких спектральных полос (обладающих малой суммарной энергией излучения), сигнал, получаемый с чувствительных элементов, имеет весьма малую величину. Это обстоятельство в ряде случаев вынуждает применять электронные усилители, имеющие значительные коэффициенты усиления. Усилители, применяемые в таких приборах, могут вносить существенные погрешности при измерении быстропеременных температур, поэтому их широкополосность имеет важное значение.

1.1.5 Спектроскопические методы контроля процессов горения

К числу наиболее информативных оптических методов контроля процессов горения относятся спектроскопические.

В зависимости от характера исследуемых спектров различают спектральный анализ по спектрам испускания (эмиссионный), по спектрам поглощения (абсорбционный, позволяющий определять как элементарный,

так и молекулярный состав вещества), по спектрам комбинационного рассеяния света, по спектрам люминесценции, по рентгеновским спектрам и по спектрам микроволнового излучения. Спектроскопия в настоящее время является единственным экспериментальным методом, позволяющим изучать кинетику и механизм реакции, не нарушая и не прерывая ее [2].

Особенное значение спектроскопические методы имеют при изучении сложных химических реакций при горении, в ходе которых в реагирующей системе возникают и исчезают разнообразные промежуточные вещества. Поскольку в большинстве случаев эти вещества обладают весьма малой продолжительностью жизни, обычный химический анализ в данном случае оказывается бессильным; спектроскопический же метод в принципе позволяет не только идентифицировать отдельные промежуточные вещества, но и также измерять их концентрацию и установить их роль в механизме реакции.

Прибором контроля в данном случае является спектральный прибор, который исследует электромагнитное излучение как сигнал, несущий спектроскопическую информацию об объекте, т.е. о процессе горения.

Спектральные приборы позволяют: а) разложить исследуемое излучение в спектр и зафиксировать положение отдельных его участков или отдельных спектральных линий; б) измерить интенсивность того или иного участка спектра, той или иной спектральной линии.

Как отмечалось во введении, основные преимущества спектроскопических методов по сравнению с остальными состоят в следующем:

- не вносят возмущений в исследуемую среду и не вызывают изменения ее физических и химических свойств;
- обладают большой чувствительностью;
- позволяют осуществлять контроль в реальном времени;

- применимы для исследования нестационарных, быстропротекающих явлений (таких, как горение, детонация, распространение ударных волн и т.д.), так как они не обладают инерционностью;
- зачастую являются единственно возможными, например, при изучении весьма удаленных или труднодоступных объектов;
- обладают высокой информативностью, при этом получаемая спектроскопическая информация позволяет судить о наличии соответствующего химического элемента, о кинетической температуре излучающего газа (доплеровское уширение контура линии), о плотности возмущающих частиц (уширение из-за эффекта давления), концентрации заряженных частиц (штарковское уширение) и о концентрации излучающих частиц по интенсивности обнаруженной линии.

Особенное значение спектроскопических методов при решении задач контроля процессов горения подчеркивает актуальность разработки новых методов анализа спектра оптических сигналов и новых спектральных приборов оптического диапазона, а также дальнейшей разработки теории спектральных измерений.

1.2 Принципы получения спектроскопической информации в оптическом диапазоне

В настоящее время в практике оптической спектрометрии используется два принципа получения спектроскопической информации, которые следует назвать контактным и бесконтактным. Первый из них является традиционным, при котором анализируемое излучение непосредственно падает на вход прибора контроля, которым является спектральный прибор. На рисунке 1 показан контактный принцип измерения спектра оптических сигналов.

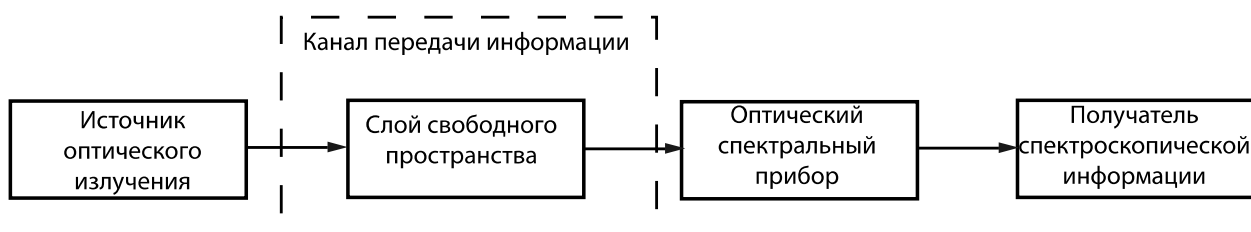


Рисунок 1 – Контактный принцип измерения спектра оптических сигналов

В течение многих лет этот принцип спектральных измерений оставался единственным в практике оптической спектрометрии, и оптическая спектрометрия являлась контактной, что сильно ограничивало ее возможности, особенно при решении задач контроля процессов горения, где непосредственный контакт прибора контроля с полем излучения пламени невозможен, либо нежелателен.

Существует целый ряд актуальных задач контроля, где выполнение спектрального анализа невозможно при непосредственном контакте спектральной аппаратуры с полем излучения источников, например с очагом горения. Поэтому в последнее время в практике спектральных измерений находят применение спектральные приборы, проводящие бесконтактный анализ спектра оптического излучения. Для устранения непосредственного контакта спектрального прибора с полем излучения анализируемого источника используется оптическое волокно [24, 25, 26]. На рисунке 2 показан бесконтактный принцип измерения спектра оптических сигналов.

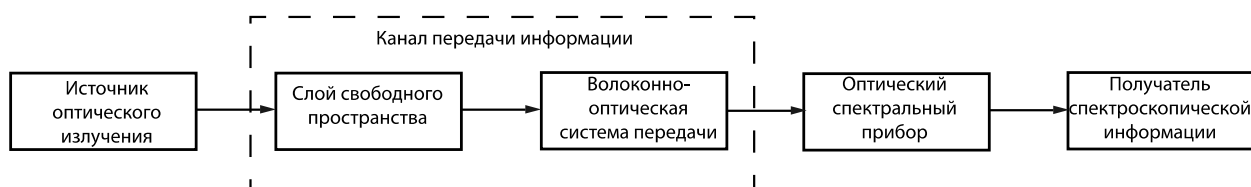


Рисунок 2 – Бесконтактный принцип измерения спектра оптических сигналов

При бесконтактном принципе измерения спектра каналом передачи информации является слой свободного пространства и волоконно-оптическая система передачи.

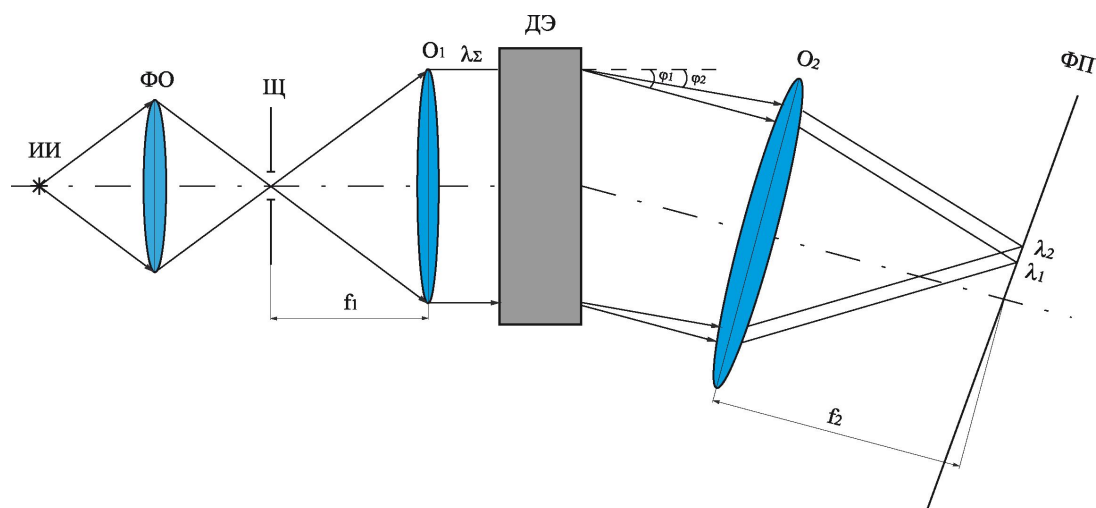
Несмотря на существенное достоинство бесконтактного анализа спектра, возникает и ряд сложностей при разработке спектральных приборов, реализующих этот принцип получения спектроскопической информации, связанных с применением оптического волокна, что стимулирует изыскание новых принципов построения спектральной аппаратуры, реализующей бесконтактный анализ спектра.

1.3 Методы анализа спектра в оптическом диапазоне и основные типы оптических спектральных приборов, выполняющие контактный анализ спектра

В основе действия спектральных приборов лежит одно из следующих явлений: интерференция, дифракция, резонанс. В соответствии с этим можно выделить следующие методы анализа спектра в оптическом диапазоне:

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

Наиболее широкое применение в оптической спектрометрии находят спектральные приборы, которые выполняют анализ спектра на основе дифракционного метода. Оптическая схема дифракционного спектрального прибора приведена на рисунке 3 [3].



ИИ – источник излучения, ФО – формирующая оптика, Щ – щель, O_1 и O_2 – входной и выходной объективы, ДЭ – диспергирующий элемент, ФП – фокальная плоскость выходного объектива

Рисунок 3 – Оптическая схема дифракционного спектрального прибора

Эти приборы выполняют пространственное разложение оптического излучения в спектр по длинам волн (частотам) с помощью диспергирующего элемента, которым излучения различных длин волн разделяются по направлению. Диспергирующий элемент преобразует падающий на него параллельный пучок оптического излучения в совокупность параллельных пучков монохроматического излучений, отклоненных на различные углы φ в зависимости от длины волны λ . Число параллельных пучков определяется набором длин волн входящих в состав исследуемого излучения. Далее эти пучки фокусируются выходным объективом в его фокальной плоскости и подвергаются дальнейшей обработке. В качестве диспергирующего элемента могут быть использованы дифракционная решетка (решеточные спектральные приборы) или преломляющая призма (призменные спектральные приборы) [4].

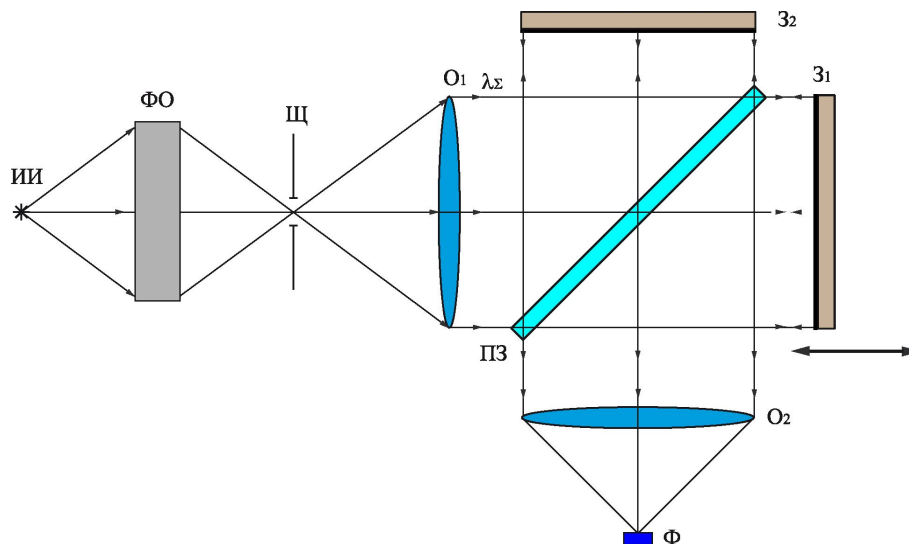
Наряду с вышперечисленными спектральными приборами, в последнее время находят довольно широкое применение оптические спектральные приборы, у которых в качестве диспергирующего элемента используются акустооптический перестраиваемый фильтр. Принцип работы

этих приборов заключается в том, что оптическое излучение дифрагирует на решеткоподобной структуре, которая формируется акустической волной, бегущей вдоль выбранного направления кристалла акустооптического модулятора [27].

Существует и другой класс оптических спектральных приборов, которые выполняют анализ спектра интерференционным методом – это приборы с интерференционной селективной модуляцией. Принцип действия этих приборов основан на модуляции светового потока. К таким спектральным приборам относятся спектрометры с интерференционной селективной амплитудной модуляцией (сисам), и фурье-спектрометры, те и другие строятся на основе интерферометра Майкельсона [4].

Фурье – спектрометр, где принцип измерения спектра основан на теореме Бохнера, включает в себя интерферометр Майкельсона, формирующий временную корреляционную функцию оптического излучения [28], и гармонический анализатор, вычисляющий преобразование Фурье этой функции.

Однолучевой интерферометр Майкельсона представлен на рисунке 4.



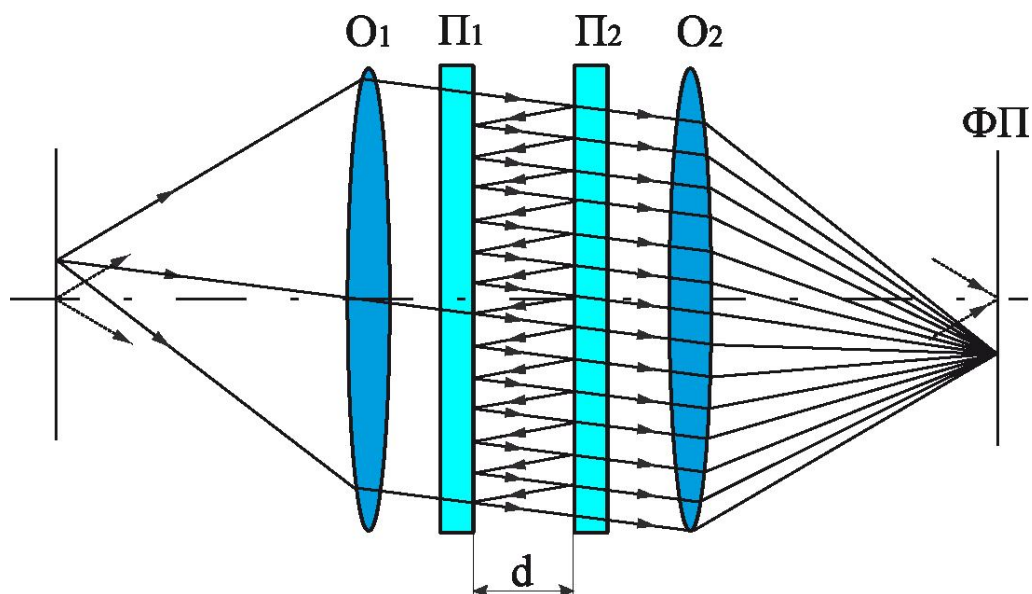
ИИ – источник излучения, ФО – формирующая оптика, Щ – щель, O_1 и O_2 – входной и выходной объективы, ПЗ – полупрозрачное зеркало, Z_1 и Z_2 – первое и второе зеркало, Ф – фотодетектор

Рисунок 4 – Оптическая схема интерферометра Майкельсона

После формирующей оптики анализируемое оптическое излучение проходит через щель, входной объектив и падает на полупрозрачное зеркало, на котором оно расщепляется на два пучка – проходящий и отраженный. Первый пучок отражается от подвижного первого зеркала, и часть его направляется полупрозрачным зеркалом в выходной объектив и на фотодетектор. Второй пучок падает на второе зеркало, отражается от него и, возвращается обратно, проходит через полупрозрачное зеркало, идя далее по одному пути с первым пучком, интерферирует с ним, создавая на фотодетекторе интерференционную картину, соответствующую разности хода обоих пучков. Величина тока фотоприемника пропорциональна средней интенсивности падающего на него излучения. Изменяя временную задержку с помощью подвижного первого зеркала, из полученного распределения средней интенсивности в интерференционной картине (интерферограмме) можно непосредственно определить временную корреляционную функцию светового поля [28]. Далее вычисляется Фурье-преобразование этой функции.

Интерферометр Майкельсона, согласно принципам построения корреляционных устройств звукового диапазона [29], можно отнести к последовательным корреляторам.

В особый класс можно выделить и спектрометры, построенные на базе интерферометра Фабри-Перо, представленного на рисунке 5. Эти спектрометры выполняют анализ спектра резонансным методом.



O_1 и O_2 – входной и выходной объективы, Π_1 и Π_2 – первая и вторая пластина, d – расстояние между пластинами, $\Phi\Pi$ – фокальная плоскость выходного объектива

Рисунок 5 – Оптическая схема интерферометра Фабри-Перо

Интерферометр (резонатор) Фабри-Перо состоит из двух стеклянных или кварцевых пластин, расположенных на некотором расстоянии d параллельно друг другу. Обращенные внутрь поверхности пластин покрыты отражающими металлическими или диэлектрическими слоями, частично пропускающими свет. В интерферометре Фабри-Перо образование когерентных пучков происходит в результате многократного отражения падающей волны от отражающих плоскостей и частичного ее выхода после каждого отражения. Пройдя через выходной объектив, когерентные волны интерферируют друг с другом в его фокальной плоскости и образуют пространственную интерференционную картину, имеющую форму концентрических колец с резкими интенсивными максимумами, положение которых зависит от длины волны [4].

Оптические спектральные приборы имеют следующие числовые технические характеристики [3, 4]:

1. Разрешающая способность (способность прибора разрешить две близко расположенные спектральные линии).

2. Диапазон анализируемых длин волн или частот.
3. Светосила прибора (величина, которая характеризует часть оптической энергии, испускаемой источником излучения, попавшую на фотоприемник спектрального прибора).
4. Динамический диапазон (характеризует способность прибора обрабатывать излучения разной интенсивности).
5. Быстродействие прибора (временной интервал, в течение которого спектральный прибор способен проанализировать весь диапазон заданных частот).
6. Угловая апертура устройства (определяет тот диапазон углов падения оптического излучения на прибор, в котором остальные его характеристики существенно не ухудшаются).
7. Вес, габариты, стабильность параметров при воздействии температуры и вибраций, удобство при эксплуатации.

Отмечая характеристики оптических спектральных приборов, реализующие рассмотренные методы анализа спектра, следует отдельно выделить еще одну характеристику реального спектрального прибора – аппаратную функцию, которая определяет степень аппаратных искажений и разрешающую способность [3]. Аппаратная функция описывает наблюдаемое спектральное распределение энергии по спектру на выходе прибора, при подаче на вход прибора монохроматического излучения [3, 4, 30].

1.4 Сравнительный анализ спектральных приборов оптического диапазона

Призмённые спектральные приборы характеризуются простотой конструкции диспергирующего элемента. Также к достоинствам призмённых спектральных приборов можно отнести отсутствие дополнительных дифракционных порядков в их выходной плоскости. Недостатками являются плохая разрешающая способность по сравнению с решеточными

спектральными приборами. Кроме того, сканирование спектра требует сложной, громоздкой и тяжелой прецизионной механической системы перестройки по диапазону анализируемых длин волн (частот).

Что касается решеточных спектральных приборов, то к их достоинствам можно отнести высокую разрешающую способность, которая достигается за счет применения решеток высокой разрешающей силы, и простоту конструкции дифракционной решетки. Основными недостатками решеточных спектральных приборов являются наличие в выходной плоскости многопорядковой дифракционной картины, что требует предварительной полосовой фильтрации с помощью монохроматора или оптического фильтра для устранения влияния соседних порядков на результат измерения, что ведет к ухудшению их чувствительности и сужению анализируемой полосы. Кроме того, как и в случае призмных спектральных приборов, недостатком является наличие, как правило, громоздкой и тяжелой прецизионной механической системы перестройки для сканирования по диапазону частот (длин волн).

Спектральные приборы, выполненные на базе акустооптического перестраиваемого фильтра, обладают большим быстродействием по сравнению с приборами, выполненными на базе дифракционной решетки, но, несмотря на это, они также имеют ряд недостатков. Для осуществления перестройки по диапазону частот необходимо наличие сложно технически реализуемого акустооптического модулятора, который определяет полосу анализируемых частот и разрешающую способность спектральных приборов, что значительно ухудшает массогабаритные характеристики спектрального прибора и усложняет процесс анализа спектра.

К общим существенным недостаткам дифракционных спектральных приборов, следует отнести то, что их разрешающая способность напрямую зависит от размера входной щели, и чтобы добиться нужного разрешения при достаточном отношении сигнал / шум необходимо подбирать оптимальный размер щели. При этом для улучшения разрешающей способности при

спектральных измерениях необходимо стремиться к работе с возможно меньшей шириной входной щели, однако, с уменьшением размера щели уменьшается доля энергии анализируемого излучения, падающего на спектральный прибор. Поэтому проблема ширины щели приобретает особую актуальность при создании дифракционных спектральных приборов [30]. Кроме того, разрешающая способность дифракционных спектральных приборов зависит и от длины волны.

В дифракционных спектральных приборах возможен как последовательный режим считывания спектроскопической информации, так и одновременный (параллельный). При последовательном режиме в качестве приемно-регистрирующей части спектрального прибора, используется один фотоприемник, а сканирование спектра осуществляется за счет вращения диспергирующего элемента (так называемого «качания»), либо изменения периода акустической бегущей волны, возбуждаемой в кристалле акустооптического модулятора. Последовательная перестройка по диапазону частот, требующая значительного времени, ухудшает быстродействие и неизбежно приводит к пропуску одиночных и редко повторяющихся коротких импульсов, например, взрыв.

При одновременном режиме не требуется «качания» диспергирующего элемента, и в качестве приемно-регистрирующей части используется уже либо набор фотоприемников, либо ПЗС – структура, с соответствующей сложной системой считывания результатов измерения спектров.

Достоинством интерферометров (резонаторов) Фабри-Перо является высокая разрешающая способность. Недостатки заключаются в том, что интерферометр Фабри-Перо является резонансной системой с распределенными параметрами, и для работы с ними необходимо предварительное выделение достаточно узкого спектрального участка предварительным монохроматором или оптическим фильтром, более того, они имеют весьма ограниченный рабочий диапазон анализируемых оптических частот, определяемый поглощением света в пластинах и

зеркальных покрытиях. Кроме того, интерферометр Фабри-Перо имеет сложную прецизионную механическую систему перестройки, причем при сборке и юстировке интерферометра отражающие поверхности пластин должны быть установлены взаимопараллельно с точностью до 0.01 длины световой волны, что представляет определенную сложность [4].

Приборы с селективной модуляцией светового потока обладают исключительно высокой светосилой по сравнению с другими спектральными приборами. Но что касается сисама, его существенным недостатком является большая величина постоянного светового потока с частотами, лежащими по соседству с выделяемым спектральным диапазоном, что приводит к значительному увеличению шумов фотоприемного устройства [4].

Преимуществом фурье - спектрометра по сравнению с сисамом является возможность получения высокого разрешения и одновременная запись всего спектрального диапазона; недостатки же заключается в том, что полученные временные корреляционные функции оптического излучения в виде интерферограмм требуют дальнейшей спектральной обработки [4].

К общим недостаткам сисама и фурье – спектрометра следует отнести наличие громоздких и тяжелых элементов конструкции.

Как показал сравнительный анализ, перечисленные спектральные приборы имеют громоздкие и тяжелые элементы конструкции, что значительно ухудшает массогабаритные характеристики спектральных приборов. Последнее является немаловажным критерием при разработке аппаратуры для летательных аппаратов.

Проблема формирования плоского однородного фронта анализируемого излучения актуальна для всех вышеперечисленных спектральных приборов. Эти приборы предназначены для измерения временных спектров и потому требуют исключить влияние пространственных характеристик оптического излучения, отсюда вытекает острая необходимость формирования плоского однородного фронта оптического излучения подаваемого на вход спектрального прибора.

Искажение волнового фронта анализируемого излучения, вызванного конечными размерами щели, приводит к существенным погрешностям спектральных измерений.

1.5 Оптические спектральные приборы бесконтактного анализа спектра

Оптические спектральные приборы, проводящие бесконтактный анализ спектра оптических сигналов, строятся по такому же принципу, что и спектральные приборы для контактного анализа спектра. Единственным отличием является применение линии передачи анализируемого сигнала – носителя спектроскопической информации на заданное расстояние от источника оптического излучения, т.е. очага горения. В качестве линии передачи оптического сигнала используется одномодовые или многомодовые оптические волокна.

Одной из первых работ, где приводятся результаты разработки оптического спектрального прибора реализующего бесконтактный принцип получения спектроскопической информации, является диссертация [5]. В качестве диспергирующего элемента в этом спектральном приборе используется акустооптический перестраиваемый фильтр [5].

В настоящее время существует ряд портативных спектрометров с применением оптического волокна в качестве линии передачи анализируемого оптического сигнала. Эти оптические спектрометры в основном выпускаются зарубежными фирмами [24, 25, 26].

Портативные спектрометры являются дифракционными спектральными приборами, и в качестве диспергирующего элемента используются дифракционные решетки, либо диспергирующая система, состоящая из дифракционных решеток и/или призм.

В таблице 1 приведены некоторые технические характеристики приборов, реализующих бесконтактный метод анализа спектра оптических

сигналов и выпускаемые фирмами Ocean Optics Inc., ASD Inc. и Avantes [24, 25, 26].

Таблица 1. Технические характеристики спектрометров, реализующих бесконтактный метод анализа спектра оптических сигналов

	Малогабаритный оптоволоконный спектрометр USB4000 (Ocean Optics Inc)	Портативный спектрометр FieldSpec® 3 (ASD Inc)	Автоматизированный оптоволоконный спектрометр AvaSpec-1024 (Avantes)
Спектральный диапазон, нм	Зависит от типа установленной решётки (14 различных вариантов, от УФ до ближней ИК-области)	350-2500	200 - 1100
Разрешение, нм	до 10 (зависит от типа решетки, размера вх. щели)	3 (в видимом диапазоне) 10 (1400 - 2100 нм)	до 20 (зависит от типа решетки, размера вх. щели)
Тип детектора	линейный ПЗС (Toshiba TCD1304AP)	512 элементный кремниевый фотодиод	CMOS линейная матрица, 1024 элемента
Вес, г	190	5200	3900
Длина оптического волокна, м	~2	~1-5	~2

Подробный анализ рекламных данных производителя [24, 25, 26] показал, что данные портативные оптические спектрометры имеют недостаточно высокие технические характеристики. Отсюда можно сделать вывод, что эти спектральные приборы не способны обеспечить быстродействия, так как являются приборами последовательного типа, и высокой разрешающей способности по всему диапазону анализируемых длин волн, а значит, они не могут быть использованы для анализа оптических излучений очагов горений.

Кроме того, длина оптического волокна, используемого в приведенных спектрометрах в качестве линии передачи оптического сигнала, сравнительно небольшая. Отсюда следует, что волоконно-оптический зонд используется для удобства оператора при проведении спектральных измерений во внелабораторных условиях. Следовательно, эти приборы не способны решить задачу контроля процессов горения путем получения спектроскопической информации от очагов горения. А увеличение длины волоконно-оптического зонда неизбежно приведет к ухудшению технических характеристик спектрометра.

Поскольку в качестве диспергирующего элемента у приведенных в таблице 1 спектрометров используется дифракционная решетка, либо призма, они обладают теми же недостатками, которые присущи традиционным дифракционным спектральным приборам. Кроме этого, использование оптического волокна в качестве линии передачи анализируемого оптического сигнала значительно искажает волновой фронт анализируемого излучения за счет многомодового распространения излучения в оптическом волокне, что приводит к существенным погрешностям спектральных измерений.

В диссертационной работе [5] было экспериментально подтверждено, что использование оптического волокна в качестве линии передачи анализируемого сигнала ведет к уширению и искажению аппаратной функции спектрометра, а значит к ухудшению разрешающей способности прибора. При проведении экспериментальных исследований использовались два типа стандартных кварцевых оптических волокон: многомодовое и одномодовое.

Как показал эксперимент, многомодовое оптическое волокно разрушает плоский одномерный фронт анализируемого оптического излучения. После прохождения по оптическому волокну распределение интенсивности оптического излучения имеет ярко выраженные максимумы и минимумы (так называемая спекл-картина), обусловленные

многомодовостью оптического волокна. Это распределение интенсивности зависит от положения волокна в пространстве и если его изменять, то и распределение интенсивности излучения на выходе волоконно-оптического тракта будет постоянно изменяться по случайному закону. Таким образом, на вход оптического спектрометра поступает оптическое излучение, интенсивность которого имеет пространственную модуляцию по случайному закону. Пространственная модуляция оптического излучения сказывается на уширении и искажении формы аппаратной функции прибора, что непременно ведет к ухудшению его разрешающей способности [5].

При передаче анализируемого сигнала по одномодовому волокну пространственная модуляция интенсивности излучения на выходе волоконно-оптического тракта практически отсутствовала, но при этом значительно уменьшалась мощность передаваемого сигнала, что снижало чувствительность спектрометра [5].

В работе [6] показано, что при использовании одномодовых волокон возникают серьезные трудности с вводом оптического излучения в волокно, а также снижается светосила линии передачи, и как следствие, ухудшается чувствительность прибора. В одномодовое волокно удастся ввести лишь несколько процентов анализируемого широкополосного излучения [6].

Из сказанного выше можно сделать вывод, что применение волоконно-оптического жгута в качестве линии передачи анализируемого сигнала приведет только к многократному увеличению пространственной модуляции анализируемого оптического излучения, а, следовательно, к значительному ухудшению разрешающей способности прибора.

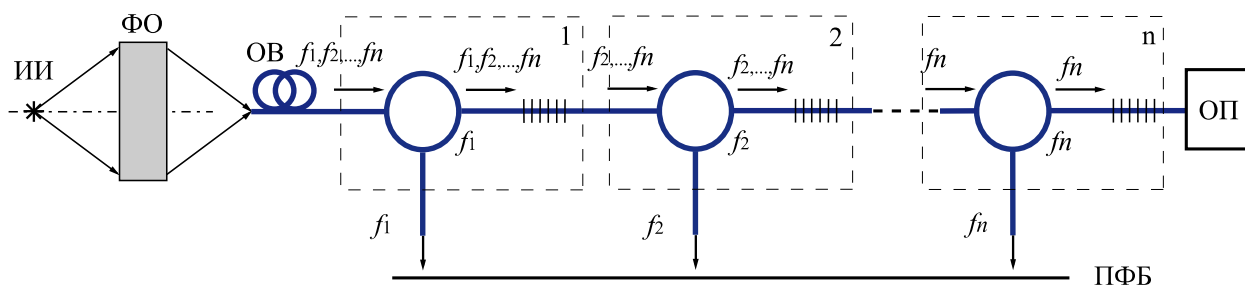
Отсюда вытекает актуальность создания спектрометров, позволяющих выполнять бесконтактный анализ спектра оптических сигналов, с улучшенной чувствительностью, при сохранении или даже улучшении разрешающей способности прибора.

1.6 Принципы построения спектральных приборов, выполняющих бесконтактный анализ спектра оптического излучения резонансным методом

В этом подразделе диссертационной работы рассматриваются новые принципы построения спектральных приборов, выполняющих бесконтактный анализ спектра оптического излучения на основе резонансного метода и позволяющие решить задачи контроля процессов горения, где непосредственный контакт прибора контроля с полем излучения пламени невозможен, либо нежелателен.

Первый принцип построения спектрометра заключается в том, что прибор состоит из волоконно-оптической системы, включающую себя формирующую оптику и оптическое волокно, и последовательно соединенных резонаторных блоков, каждый из которых содержит оптический циркулятор и волоконную брэгговскую решетку, обладающую селективными свойствами [23].

Оптическая схема спектрометра на базе волоконных брэгговских решеток приведена на рисунке 6.

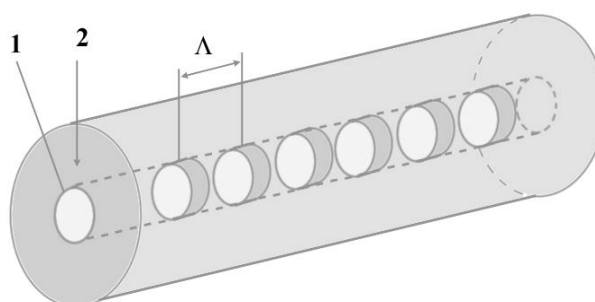


ИИ – источник излучения; ФО – формирующая оптика; ОВ – оптическое волокно; f_1, f_2, f_n – анализируемые оптические частоты; 1 – первый резонаторный блок; 2 – второй резонаторный блок; n – n-ый резонаторный блок; ОП – оптический поглотитель; ПФБ – плоскость фотоприемного блока

Рисунок 6 - Схема спектрометра на базе волоконных брэгговских решеток

В качестве фотоприемного блока может использоваться ПЗС – структура или набор фотоприемников.

Брэгговская волоконная решетка представляет собой участок волоконного световода (оптического волокна), в сердцевине которого наведена периодическая структура показателя преломления с периодом Λ , имеющая определенное пространственное распределение, схематически показанное на рисунке 7 [31].



1 – сердцевина оптического волокна, 2 – оболочка оптического
волокна

Рисунок 7 – Схематическое изображение брэгговской волоконной
решетки

Как правило, решетка формируется в фоточувствительной сердцевине оптического волокна, в то время как показатель преломления кварцевой оболочки остается неизменным. Такая структура обладает уникальными спектральными характеристиками. Наиболее важным свойством волоконных брэгговских решеток является узкополосное отражение оптического излучения, спектральная ширина которого может составлять сотые доли нанометров [31].

Волоконные брэгговские решетки связывают основную моду оптического волокна с той же модой, распространяющейся в противоположном направлении [31]. Это означает, что на определенной частоте (длине волны) распространяющееся по оптическому волокну излучение отражается от решетки полностью или частично. Свойства этого отражения зависят от параметров решетки. Для однородной решетки длины L

коэффициент отражения R на резонансной длине волны брэгговской решетки λ_p выражается как $R = h^2(kL)$, где $k = \pi \Delta n_{mod} h / \lambda$ – коэффициент связи (Δn_{mod} – амплитуда синусоидальной модуляции показателя преломления, h – часть мощности основной моды, которая распространяется по сердцевине оптического волокна) [31].

Спектральная ширина резонансной кривой однородной решетки на полувывоте может быть выражена следующим приближенным соотношением [31]:

$$\Delta\lambda_{0,5} = 2\lambda_p \alpha \sqrt{\left(\frac{\eta \Delta n}{2n}\right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{L}\right)^2}, \quad (1)$$

где α – параметр порядка единицы для глубоких решеток и порядка 0.5 для решеток небольшой глубины; n – эффективный показатель преломления основной моды.

Спектр отражения R типичной брэгговской волоконной решетки приведен на рисунке 8.

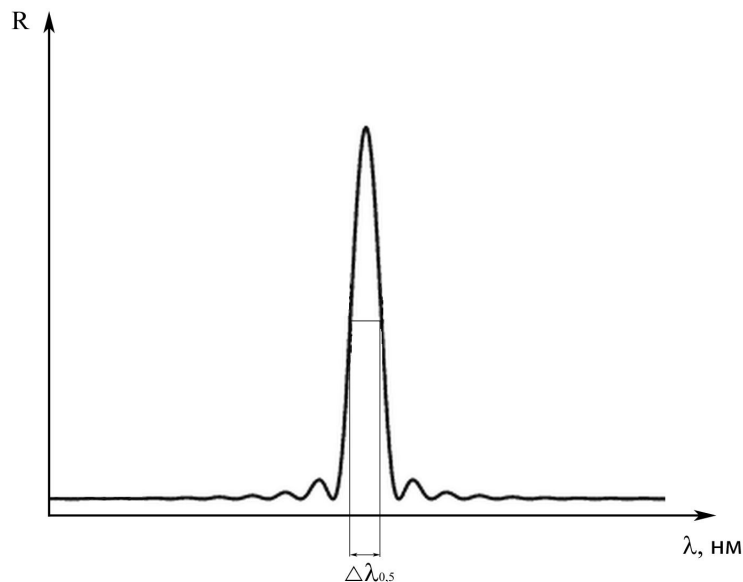


Рисунок 8 – Спектр отражения брэгговской волоконной решетки

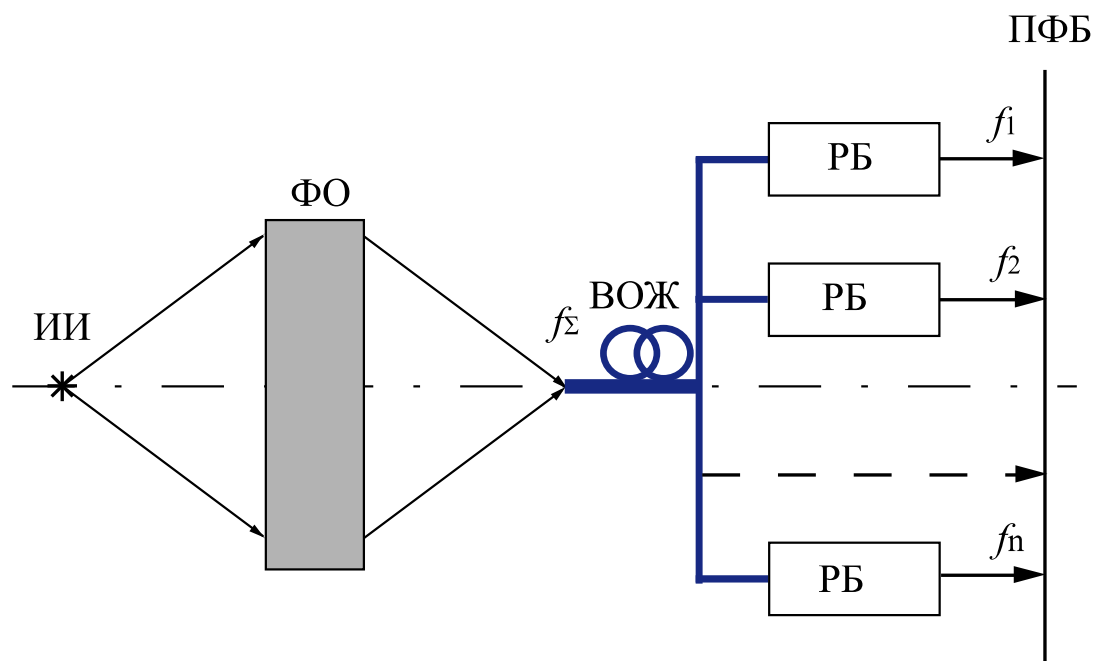
Спектрометр на базе волоконных брэгговских решеток, оптическая схема которого изображена на рисунке 6, работает следующим образом:

оптическое излучение, несущее спектроскопическую информацию о контролируемом процессе горения, поступает из окружающего пространства на формирующую оптику. В ее фокальном пятне расположен входной торец оптического волокна, по которому оптическое излучение передается на заданное расстояние от очага горения и поступает в резонаторные блоки, содержащие оптический циркулятор и волоконную брэгговскую решетку. Излучение с частотой (длиной волны), для которой выполняется условия Брэгга в данной волоконной брэгговской решетке, отражается и через оптический циркулятор падает на плоскость фотоприемного блока. Оптическое излучение на других частотах, не удовлетворяющих условию Брэгга, почти не взаимодействует с волоконной брэгговской решеткой, проходит сквозь нее и поступает на вход следующего резонаторного блока, и так далее пока анализируемое излучение не пройдет все резонаторные блоки. Оставшееся излучение поступает на вход оптического поглотителя, где полностью поглощается для исключения обратного отражения. Выделенные с помощью резонаторных блоков спектральные составляющие являются отсчетными значениями спектра анализируемого пламени.

Реализация этого принципа в виде оптического спектрометра защищена патентом Российской Федерации [23].

Второй принцип построения спектрометра, выполняющего бесконтактный анализ спектра оптического излучения на основе резонансного метода, заключается в том, что прибор состоит из волоконно-оптической системы, включающую себя формирующую оптику и волоконно-оптический жгут, и набор резонаторных блоков, каждый из которых содержит оптический резонатор, настроенный на определенную частоту (длину волны) [10]. Волоконно-оптический жгут позволяет перенести анализируемое оптическое излучение, несущее спектроскопическую информацию о контролируемом процессе горения, на заданное расстояние от очага горения, и тем самым исключить непосредственный контакт спектрометра с полем излучения источника.

Оптическая схема спектрометра на базе резонаторов оптического диапазона приведена на рисунке 9.



ИИ – источник излучения; ФО – формирующая оптика; ВОЖ – волоконно-оптический жгут; f_1, f_2, f_n – анализируемые оптические частоты; РБ – резонаторный блок; ПФБ – плоскость фотоприемного блока

Рисунок 9 – Схема спектрометра на базе резонаторов оптического диапазона

В качестве фотоприемного блока может использоваться ПЗС – структура или набор фотоприемников.

Реализация этого принципа в виде многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона защищена патентом Российской Федерации [10].

Многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона разработан в рамках данной диссертационной работе и детально будет рассмотрен в следующих разделах.

Нетрадиционный принцип измерения спектра оптического излучения набором резонаторных блоков [10, 23], позволяет выделить эти спектрометры в отдельный класс спектральных приборов.

Особый принцип построения рассмотренных в двух вариантах спектрометров, не требующий точной юстировки и жесткой конструкции, позволяет устранить значительную часть недостатков, присущих традиционным оптическим спектральным приборам, как контактного, так и бесконтактного анализа, и реализовать прибор контроля при весьма строгих требованиях к массогабаритным показателям [32]. Причем острая проблема “ширины щели”, присущая рассмотренным в предыдущих подразделах спектральным приборам, при таком принципе построения становится не актуальной, потому, что результат спектральных измерений определяется параметрами волоконной брэгговской решетки в первом случае и полосой пропускания резонаторов во втором случае.

Благодаря особенностям нетрадиционного построения спектральных приборов явление многомодового распространения оптического излучения в оптическом волокне, использующегося для передачи излучения, также не влияет на результат анализа спектра оптических излучений. При анализе спектра такими спектрометрами нет необходимости формировать плоский однородный фронт волны анализируемого излучения, и может быть решена задача повышения чувствительности контроля процесса горения, путем применения жгута волокон.

Рассмотренные принципы построения оптических спектрометров позволяют разработать приборы для решения задач контроля процессов горения, где непосредственный контакт прибора с полем излучения пламени невозможен, либо нежелателен. Удалить прибор контроля на безопасное расстояние от очага горения, тем самым исключить непосредственный контакт прибора с его полем излучения, позволяет оптическое волокно или волоконно-оптический жгут, используемые в качестве линии передачи.

Набор селективных элементов, в качестве которых используются либо волоконные брэгговские решетки, либо резонаторы оптического диапазона, позволяет сосредоточить эти элементы на определенном участке спектра, что дает возможность анализировать конкретный участок, а не весь диапазон.

1.7 Аналитические методы спектromетрии

Спектromетрия – это область физики и техники, разрабатывающая методы и теорию измерения спектров. Спектromетрия объединяет разделы прикладной спектроскопии, метрологии и теории линейных систем [33].

Радикальное отличие оптических спектральных приборов от анализаторов спектра радиодиапазона обусловило формирование и самостоятельное развитие двух областей спектromетрии – оптической спектromетрии и радиоспектromетрии. Эти области спектromетрии развивались независимо, без взаимного проникновения, они имели различные научные методологии и методы описания процедур спектральных измерений.

Несмотря на то, что к настоящему времени различные аспекты теории и практики оптической спектromетрии рассмотрены в многочисленной литературе, целый ряд важных теоретических вопросов все еще остается не достаточно исследованным.

Основополагающим соотношением в теории спектральных приборов оптического диапазона является введенный в работе [30] интегральный оператор

$$f(x') = \int_{-\infty}^{\infty} a(x' - x)\varphi(x)dx, \quad (2)$$

где $f(\cdot)$ – спектральное распределение энергии по спектру, полученное экспериментально с помощью реального спектрального прибора; $a(\cdot)$ – аппаратная функция - реакция спектрального прибора на монохроматическое излучение; $\varphi(\cdot)$ – функция, описывающая истинное распределение энергии по спектру, x и x' – длина волны, частота или координаты в плоскости спектра, либо координаты на записи спектра.

В случае решения задачи контроля процесса горения: $f(\cdot)$ – аппаратный спектр излучения пламени, получаемый с помощью прибора

контроля и дающий спектроскопическую информацию получателю об этом процессе горения; $\varphi(\cdot)$ – спектральное распределение энергии по спектру излучения пламени, отражающее истинное состояние контролируемого процесса горения.

Соотношение типа (2) имеет широкое распространение в теории линейных систем, которая играет огромную роль во многих областях науки, например в оптике, в теории спектральных измерений, теории электрических и радиотехнических цепей. Так, оно связывает одномерный объект и его оптическое изображение в телескопе или микроскопе, истинный контур спектральной линии с наблюдаемым в спектрографе, колебания на входе и выходе линейного фильтра и т.д [21].

Соотношение (2) является основой решения трех основных задачи теории линейных систем [21, 34]:

1. Задача анализа системы: по известной характеристике системы и известному входному воздействию, найти выход системы. В случае динамической линейной системы ее исчерпывающей характеристикой является импульсная реакция.

2. Обратная задача анализа: по известной характеристике системы и известному выходу, найти входное воздействие. В этом случае соотношение (2) рассматривается как линейное интегральное уравнение относительно входа [30].

3. Задача синтеза системы: по известному входному воздействию и известному выходу системы найти характеристику системы.

Соотношение (2) играет важнейшую роль в теории оптических спектральных измерений, и с его помощью описывается действие всех известных спектральных приборов оптического диапазона [3, 4, 35, 36, 37, 38]. Фундаментальный характер этого соотношения требует его тщательного анализа, и его критика сводится к следующему:

- Методика получения этого соотношения носит эвристический характер [39], что является неприемлемым при выводе основного

соотношения, устанавливающего связь вход – выход спектрального прибора и линейной системы вообще.

- Аппаратная функция спектрального прибора как реакция на монохроматическое излучение вводится в форме постулата, и это требует обоснования.
- Не определены понятия $\varphi(\cdot)$ «истинного распределения энергии по спектру» и «наблюдаемого распределения энергии по спектру» $f(\cdot)$, полученного экспериментально с помощью реального спектрального прибора.
- Под аргументами x и x' понимаются длина волны, частота или координаты в плоскости спектра, либо координаты на записи спектра [30], т.е. величины различной физической размерности, что представляется неприемлемым, поскольку измеряемые величины при физическом эксперименте должны иметь конкретные размерности.
- Из соотношения (2) следует, что аппаратная функция неизменна по всему диапазону анализируемых длин волн, что не является верным, так как ширина аппаратной функции зависит от длины волны. И свертка должны быть заменена более общим соотношением.

Применение общего подхода в форме (2) к описанию действия анализаторов спектра радиодиапазона нашло свое применение с запозданием. До этого в радиоспектрометрии применялись частные методы описания конкретных методов измерения спектра.

При последовательном анализе измерение спектра производится с помощью одного резонатора при последовательной перестройке анализатора по всему диапазону анализируемых частот. Эта перестройка выполняется двумя способами: либо с помощью перестраиваемого гетеродина, либо с помощью перестраиваемого резонатора. Для описания действия последовательных гетеродинных анализаторов спектра радиодиапазона был

детально разработан метод динамических частотных характеристик линейных пассивных систем при воздействии на их вход колебания с линейно изменяющейся частотой [40, 41, 42, 43, 44]. Менее разработанным остался вопрос о динамических частотных характеристиках для последовательного анализа спектра при изменении частоты настройки резонансной системы [45]. Разработанная теория динамических частотных характеристик фактически означала установление аппаратных функций спектральных приборов радиодиапазона, однако, представления результатов измерения спектров в форме подобной (2) сделано не было, поскольку целью выполненных исследований было установление разрешающей способности спектрального прибора.

Впервые вопрос о представлении результатов измерения комплексных спектров радиосигналов в форме интегрального оператора, подобного (2), был поставлен в работе [46], и далее нашел применение в публикациях [47, 48, 49].

При параллельном анализе спектра радиосигналов разрешающая система анализатора состоит из набора резонаторов, каждый из которых настроен на определенную частоту [50, 51]. Структурная схема системы, выполняющей параллельный анализ спектра, приведена на рисунке 10 [51].

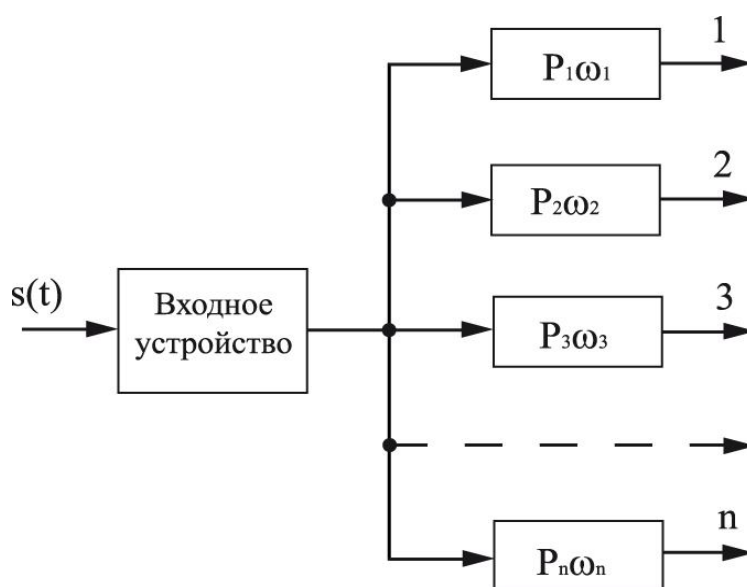


Рисунок 10 – Структурная схема системы, выполняющей параллельный анализ спектра

При воздействии исследуемого сигнала на все резонаторы каждый из них будет откликаться на воздействие совокупности спектральных компонент, находящихся в пределах его полосы пропускания. По числу, по уровню сигнала и по расположению по оси частот возбужденных резонаторов можно судить о структуре исследуемого спектра.

По сравнению с последовательным анализом спектра параллельный анализ имеет намного более высокую скорость анализа. При последовательном анализе процесс перестройки резонатора не может происходить очень быстро, так как в противном случае результаты анализа будут искажены переходными явлениями в резонансных системах [50]. Отсюда следует, что последовательный анализ, в отличие от параллельного, не пригоден для анализа процессов, быстро изменяющих свой ход явлений, в частности, для анализа редко повторяющихся и одиночных импульсов.

В случае параллельного анализа исследование действия анализатора спектра сводилось либо к изучению действия резонатора [50], либо к исследованию динамической частотной характеристики при постоянной настройке резонатора и воздействии на его вход гармонического колебания [51, 52]. Как и в случае последовательного анализа, целью этих исследований было установление разрешающей способности анализатора в переходном режиме, и таким образом связь вход-выход спектрального прибора для параллельного анализатора спектра установлена не была.

В общем случае отклик реального резонатора, на вход которого в момент времени $t=0$ включено воздействие $x(t)$, может быть выражен следующим образом:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau, \quad (3)$$

где $g(t)$ – импульсная реакция резонатора.

В более общем случае для резонатора импульсная реакция может быть представлена в виде [50]

$$g_n(t) = \operatorname{Re} s(t)e^{i\omega_n t}, \quad (4)$$

где ω_n - частота настройки резонатора.

Подстановка (4) в (3) дает, что отклик резонатора на входное воздействие $x(t)$ равен [50, 53]

$$y(t) = \operatorname{Re} e^{i\omega_n t} \int_0^t x(\tau)r(\tau-t) \cdot e^{-i\omega_n \tau} d\tau, \quad (5)$$

где интеграл представляет комплексный текущий спектр с весовой функцией $r(\tau-t)$.

Из соотношения (5) видно, что всякий реальный резонатор дает нам не истинный спектр анализируемой функции, а спектр взвешенной функции, причем функция веса зависит от характеристики резонатора [50].

Преимущества параллельного анализа стимулируют изыскание возможности переноса метода параллельного анализа из радиодиапазона в оптический диапазон.

Принцип построения оптического спектрометра, выполняющего бесконтактный параллельный анализ спектра динамических оптических сигналов, впервые был предложен в патенте РФ №86734 [10].

1.8 Выводы

1. На основании проведенного обзора методов контроля процессов горения был выделен спектроскопический метод как наиболее информативный и зачастую единственно возможный при изучении весьма удаленных или труднодоступных объектов.

2. Проведен обзор методов оптической спектроскопии, а также существующих спектральных приборов, выполняющих как контактный, так и бесконтактный анализ спектра оптических сигналов.

3. Проведенный анализ показал, что известные спектральные приборы обладают целым рядом недостатков, к числу которых можно отнести проблему формирования плоского однородного фронта анализируемого излучения и наличие прецизионной механической системы перестройки по диапазону анализируемых длин волн, а при использовании оптического волокна в качестве линии передачи анализируемого оптического излучения возникают дополнительные трудности.

4. При использовании многомодового волокна происходит искажение волнового фронта анализируемого излучения за счет многомодового распространения излучения в волокне, что приводит к ухудшению разрешающей способности прибора и существенным погрешностям спектральных измерений. При использовании одномодовых волокон возникают серьезные трудности с вводом оптического излучения в волокно, в результате чего снижается светосила линии передачи, а, следовательно, ухудшается чувствительность прибора. Отсюда вытекает актуальность создания спектрометров с улучшенной чувствительностью, при сохранении или даже улучшении разрешающей способности прибора.

5. Рассмотрены два новых принципа построения спектральных приборов, выполняющих бесконтактный анализ спектра оптического излучения на основе резонансного метода и позволяющие исключить

значительную часть недостатков, присущих существующим оптическим спектральным приборам.

6. Некоторые важные аспекты теории современной оптической спектрометрии все еще остаются недостаточно разработанными. Соотношение, устанавливающее связь вход-выход спектрального прибора, требует некоторых уточнений с позиции теории линейных систем и теории сигналов.

7. В известных исследованиях, посвященных параллельному анализу спектра, вопрос о связи между математическим и физическим спектром не ставился и не обсуждался.

2 Элементы теории линейных систем и теории сигналов в задачах аппаратурного гармонического анализа

Большая роль спектроскопических методов при решении задач контроля процессов горения требует разработки новых методов и принципов анализа спектров оптических сигналов и хорошо разработанной теории спектральных измерений, в частности в оптическом диапазоне.

2.1 Постановка задачи

Анализ спектра оптического излучения относится к одному из двух основных классов обратных задач в оптике, целью которых является получение информации о временных изменениях, т.е. о динамике функций источников (очагов горения) или временных частотных спектрах [54]. Иными словами, речь идет об измерении спектров колебательных явлений оптического диапазона, причем согласно существующему подходу оптической спектрометрии [3, 4, 35, 37, 38] анализируемые сигналы в оптическом диапазоне описываются скалярными функциями, несмотря на векторную природу электромагнитного поля [55].

Важнейшей задачей теории спектральных измерений является установление связи между спектром истинным и спектром, получаемым с помощью измерительной спектральной аппаратуры. Под истинным или теоретическим спектром понимается спектр в математическом смысле, а спектр, получаемый с помощью спектрометра – прибора контроля, мыслится как физический [56], т.е. аппаратурный. В случае решения задачи контроля процесса горения: истинный спектр излучения пламени отражает истинное состояние контролируемого процесса горения, аппаратурный спектр – спектр излучения пламени, получаемый с помощью прибора контроля и дающий спектроскопическую информацию получателю об этом процессе горения. Установление связи между математическим и физическим спектрами представляет собой содержание одной из важнейших теорем теории колебаний и волн [56], и эта связь является базой теории спектральных

измерений, независимо от диапазона анализируемых частот и принципов действия спектрального прибора. И в данной работе рассматривается обработка сигналов не во временном пространстве, как это принято в теории динамических систем, а обработка спектральных функций динамических сигналов.

Понятие математического спектра дается в рамках теории рядов и интегралов Фурье [11], где аргументами спектральных функций являются частоты. Поэтому в данной работе, как и в случае радиочастотных спектральных измерений, в теорию оптической спектрометрии математические спектры вводятся как комплексные и энергетические спектральные функции, принятые в теории сигналов [16, 17]. Эти спектры определяются как функции частоты, а не длины волны, как принято в оптике.

Это соответствует общей тенденции дальнейшего освоения оптического диапазона, что связывается с перенесением на него хорошо развитых методов радиофизики и радиотехники [57]. Такое направление научных исследований получило название радиооптики [19]. Термином радиооптика характеризуется определенный подход к решению весьма широкого класса задач, объединяющий хорошо разработанный в теоретической радиотехнике аппарат преобразования сигналов и спектрального анализа с традиционными оптическими приложениями и, наоборот, проникновение известных оптических методов в обработку радиосигналов [19].

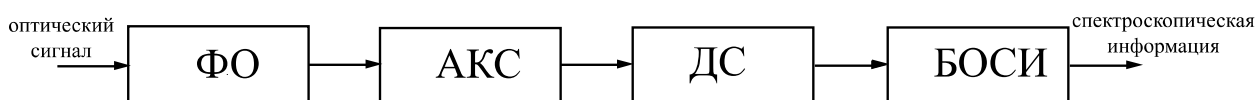
Соединив в себе возможности, как радиотехники, так и оптики, радиооптика способна решать задачи, непосильные по отдельности ни радиотехнике, ни оптике.

Математическая теория гармонического (спектрального) анализа рассматривается в классе линейных преобразований [11]. Поэтому естественным направлением исследования, в рамках которого представляется возможным установление связи между математическим и физическим

спектрами, является применение методов теории линейных систем [12, 13, 15] и теории сигналов [16, 17] к теории спектральных измерений.

Основной задачей теории линейных систем является установление связи между входом и выходом системы и в связи с этим определение ее исчерпывающей характеристики, которая бы наиболее просто и вместе с тем полно устанавливала бы эту связь [12].

В данной диссертационной работе под оптическим спектрометром, который является прибором контроля, понимается информационная измерительная система [58], структурная схема которой приведена на рисунке 11.



ФО – формирующая оптика; АКС – анализатор комплексного спектра; ДС – детектирующая система; БОСИ – блок обработки спектроскопической информации

Рисунок 11 – Структурная схема оптического спектрометра как информационной измерительной системы

В данной работе разработан оптический спектрометр, состоящий из n параллельных каналов, поэтому информационная измерительная система, изображенная на рисунке 11, должна быть рассмотрена как многоканальная система.

Анализатор комплексного спектра представляет собой резонаторную систему многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона и является его анализирующей частью. Он состоит из волоконно-оптического жгута и набора резонаторных блоков. Выходом анализатора комплексного спектра является комплексный спектр, который подлежит дальнейшей обработке детектирующей системой спектрометра для

получения энергетического спектра, который является результатом спектрального анализа в оптическом диапазоне и отражает состояние контролируемого процесса горения. Детектирующая система состоит из набора фотоприемников, каждый из которых подключен к соответствующему резонаторному блоку.

Такой подход дает строгое описание прохождения анализируемого оптического сигнала, отражающего состояние контролируемого процесса горения, через все узлы спектрального прибора, что, в конечном счете, дает решение основной задачи теории спектральных измерений.

В процессе описания спектральных измерений аппаратные комплексные спектры рассматриваются как первичные, а энергетические - как вторичные, полученные в результате дальнейшей обработки комплексных спектров [59]. Исчерпывающая характеристика многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона вводится как аппаратная функция.

2.2 Радиооптический подход

В данной диссертационной работе радиооптический подход понимается с точки зрения, отличной от традиционной, изложенной в работах [60, 61, 62], и являющейся основополагающей в известных разделах радиооптики. Исходные разделы радиооптики базируются на операционном методе решения задач с помощью преобразования Фурье и методов теории обобщенных функций [62]. Результатом развития исходных разделов радиооптики явилось перенесение идей и методов описания и обработки динамических сигналов линейными радиотехническими цепями в оптику. Это осуществлялось путем замены временных соотношений, описывающих представление и обработку динамических радиосигналов на пространственные соотношения, описывающие линейные преобразования статических сигналов (оптических изображений) оптическими системами. Речь идет о замене характерных для радиотехники таких переменных как

время и временная частота на пространственные координаты и пространственные частоты, соответственно. В результате появились такие понятия как импульсная характеристика слоя свободного пространства и его передаточная функция, пространственные модуляторы (решетки и пр.) [62, 63].

В данной работе представлены материалы, отражающие дальнейшее развитие радиооптики, которое характеризуется перенесением идей и методов параллельного анализа спектров, известных в радиотехнике, в теорию и практику оптической спектрометрии. Речь идет о попытке переноса идей и методов обработки динамических сигналов радиодиапазона на обработку динамических сигналов оптического диапазона. Кроме того, применяются понятия комплексного спектра и частотных функций при спектральной обработке сигналов оптического диапазона.

Разрабатываемый таким образом единый подход может быть использован при описании действия спектральных приборов, как радио -, так и оптического диапазонов.

Сказанное подразумевает радиооптический подход к решению поставленной задачи и его дальнейшее развитие.

2.3 Модель анализируемого оптического сигнала

Постановка вопроса о модели сигнала в теории оптических спектральных измерениях не обнаружена, поэтому этот вопрос рассматривается на основе известных моделей радиосигналов [64, 65].

Измерительный процесс является видом информационного процесса, поэтому измеряемые величины и функции должны описываться в терминах теории вероятностей, т.е. адекватной моделью анализируемого сигнала, который характеризует состояние контролируемого процесса горения, является случайный процесс. При этом возможны два пути установления связи между математическим и физическим спектрами. Первый путь заключается в установлении связи вход-выход спектрального прибора при

воздействии случайного процесса [66]. Второй путь состоит в исследовании обработки реализации случайного процесса спектральным прибором [67].

В общем виде в качестве модели случайного процесса следует взять гармонизируемый случайный процесс, представимый в форме интеграла Фурье – Стильтеса [68]:

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t) \cdot dF(\omega), \quad (6)$$

где ω – временная угловая частота; $F(\omega)$ – произвольная монотонно неубывающая функция аргумента ω .

Случайному процессу (6) соответствует стохастическая однородная плоская скалярная волна, в реальных условиях усеченная по пространственным координатам:

$$X(t, z) = D_{xy} \cdot X\left(t - \frac{z}{c}\right), \quad (7)$$

где D_{xy} – апертурная диафрагма, выполняющая пространственное усечение однородной плоской волны в плоскости, нормальной ее распространению; z – направление распространения волны; c – скорость распространения волны.

Волна (7) несет информацию о динамике функций источников, т.е. является носителем спектроскопической информации о контролируемом процессе горения. Представление носителя спектроскопической информации в оптическом диапазоне в форме скалярной однородной плоской волны полностью соответствует общим принципам оптической спектрометрии, например [3, 4, 35, 36, 37, 38], что отмечалось выше.

В общем случае случайная спектральная функция $F(\omega)$ в соотношении (6) не являются дифференцируемой. Примером является стационарный случайный процесс, который хорошо описывает колебания большинства

оптических источников [69]. В условиях реального физического эксперимента время T взаимодействия контролируемого процесса и прибора контроля всегда ограничено. Поэтому анализируемые сигналы должны рассматриваться как финитные, в частности как результат усечения во времени некоторого другого случайного процесса $Y(t)$ большей длительности

$$X_T(t) = Y(t) \cdot \chi(t) = \begin{cases} X(t), & t \in [t_1, t_2] \\ 0, & t \notin [t_1, t_2] \end{cases}, \quad (8)$$

где $T=t_2-t_1$; $\chi(t)$ - характеристическая функция промежутка $[t_1, t_2]$; т.е.

$$\chi(t) = \begin{cases} 1, & t \in [t_1, t_2] \\ 0, & t \notin [t_1, t_2] \end{cases} \quad (9)$$

Финитный нестационарный случайный процесс $X_T(t)$, также является гармонизируемым, и представим в форме интеграла Фурье-Стилтьеса [65]:

$$X_T(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t) dZ(\omega), \quad (10)$$

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

Случайная спектральная функция $Z(\omega)$ в соотношении (10) дифференцируема почти наверное, т.е. на всем множестве реализаций существует с вероятностью единица комплексная случайная спектральная функция [65]

$$S(\omega) = \frac{dZ(\omega)}{d\omega} \quad (11)$$

В условиях реального физического эксперимента одна из реализаций ${}^k S(\omega)$ ансамбля (11) является математическим спектром, который следует связать со спектром физическим.

Спектральной реализации ${}^k S(\omega)$ соответствует реализация ${}^k x(t)$ нестационарного случайного процесса (10)

$${}^k x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} {}^k S(\omega) \exp(i\omega t) d\omega, \quad (12)$$

где

$${}^k S(\omega) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} {}^k x(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (13)$$

- реализация комплексной спектральной функции из ансамбля (11), которая, являясь преобразованием Фурье реализации случайного процесса ${}^k x(t)$, т.е. математическим спектром, подлежит дальнейшей обработке спектральным прибором.

Поскольку, в оптическом диапазоне все сигналы-переносчики спектроскопической информации существуют исключительно в виде излучений, то при постановке вопроса спектральных измерений в этом диапазоне реализации случайного процесса ${}^k x(t)$ соответствует модель анализируемого оптического сигнала в форме однородной плоской усеченной волны (волнового пучка с плоским фронтом), которая, согласно соотношению (7), запишется как

$$\hat{V} [{}^k x(t)] = D_{xy} \cdot {}^k x(t - \frac{z}{c}), \quad (14)$$

в дальнейшем верхние индексы будут опущены, и под реализацией случайного процесса ${}^k x(t)$ понимаются колебания электрической компоненты оптического излучения, т.е. ${}^k x(t) = e(t)$.

В соотношении (14) \hat{V} – линейный ограниченный оператор перехода от колебательного процесса к волне вводится следующим образом [59]:

$$\hat{V}e(t) = D_{xy} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e(t') \cdot \delta(t - \frac{z}{c} - t') dt = D_{xy} \cdot e(t - \frac{z}{c}), \quad (15)$$

Волновой пучок (14), выдающий спектроскопическую информацию о динамике функции источников, т.е. о спектральных функциях оптических колебаний, падает на спектральный прибор с апертурой D_{xy} . Эта информация извлекается непосредственно из волны (14) и проявляется на выходе фотодетекторов. В этом заключается существенное отличие действия спектральных приборов оптического диапазона – волновых анализаторов, названных так, потому что они специально приспособлены для анализа волн, падающих на анализатор [50], от анализаторов спектра радиосигналов, где в качестве анализируемых сигналов рассматриваются колебательные явления в форме электрического тока или напряжения, в частности, формируемые с помощью приемной антенны.

2.4 Интеграл суперпозиции для спектрального прибора

В теории систем существует два подхода к описанию системы: микроподход и макроподход [70]. Микроподход предполагает, что известна структура системы, а макроподход рассматривает систему как «черный ящик». В теории спектральных измерений спектральный прибор рассматривается в рамках макроподхода [30, 66].

Абстрактная линейная система, как «черный ящик», осуществляет линейное преобразование, которое в общем смысле дается выражением:

$$y(\xi) = \widehat{L}x(\xi) \quad (16)$$

где \widehat{L} – линейный ограниченный оператор; $x(\xi)$, $y(\xi)$ – вход и выход линейной системы, соответственно.

Соотношение (16) имеет весьма общий характер и не может быть применено к описанию передачи сигнала линейной системой при решении ее основной задачи, т.е. установлении связи между входом и выходом системы на основе определения ее исчерпывающей характеристики. Под такой характеристикой в теории линейных систем понимается отклик системы на соответствующее δ – воздействие [21].

В 1935 году создатель математического аппарата квантовой механики Дж. фон Нейман сформулировал проблему представления линейного оператора в (16) в форме интегрального [71], т.е. интеграла суперпозиции

$$y(\xi) = \widehat{L}x(\xi) = \int_{\Xi} A(\xi, \xi') \cdot x(\xi') d\xi', \quad (17)$$

где ядро интеграла суперпозиции $A(\xi, \xi')$, функция–прообраз $x(\xi')$ и отображение $y(\xi)$ являются абстрактными функциями абстрактных аргументов.

Решение этой проблемы на математическом уровне строгости было получено только к середине 70-х годов [71], до этого применялись эвристические методы, например [14, 30]. Причем при решении этой проблемы не был определен смысл ядра, необходимый для теории линейных систем. В связи с этим вопрос о представлении линейного оператора в форме интегрального был пересмотрен [72, 73]. В результате чего, была математически корректно заново установлена основная интегральная связь теории линейных систем в форме (17) с целью определения математического смысла аппаратной функции в форме действия линейного ограниченного оператора \widehat{L} на δ – функцию

$$A(\xi, \xi') = \hat{L}\delta(\xi - \xi'), \quad (18)$$

где $A(\xi, \xi')$ – аппаратная функция линейной системы.

Физически это означает, что аппаратная функция рассматривается как реакция линейной системы на соответствующее δ – воздействие, и является исчерпывающей характеристикой этой системы, что полностью согласуется с теорией линейных систем [21].

Роль аппаратной функции имеет исключительное значение и в теории линейных систем, и в теории оптических спектральных приборов, в частности. Аппаратная функция является ядром линейного интегрального оператора (2) и (17) и позволяет установить связь вход – выход спектрального прибора, как линейной системы. А в случае спектрального прибора оптического диапазона аппаратная функция, как реакция прибора на монохроматическое излучение, позволяет определить важнейшую его характеристику – разрешающую способность.

В настоящее время δ – функция является широко распространенным математическим объектом и используется во многих физико-технических приложениях. Введение δ – функции позволило ясно и коротко сформулировать смысл функции Грина [74], под которой понимается импульсная реакция, применяемая при описании линейных динамических систем, в том числе электрических и радиотехнических цепей, функцию влияния при анализе механических систем (струна, изгиб балки) [75]. Кроме того δ – функция является известной моделью при описании плотности точечного электрического заряда и плотности точечной массы [76].

В теории спектральных измерений δ – функция имеет специфический характер, и у нее нет наглядного представления в отличие от δ – функций, упомянутых выше, и она может быть введена формально следующим образом:

$$\delta(\omega - \omega') = \widehat{F} \exp(i\omega't), \quad (19)$$

где \widehat{F} – оператор прямого преобразования Фурье.

Соотношение (19) объясняет, почему при анализе спектра колебательных явлений аппаратная функция радиочастотных анализаторов спектра определяется как реакция прибора на гармоническое колебание $\exp(i\omega't)$ [47, 48, 49]. Тогда аппаратная функция анализатора спектра, выполняющего измерения комплексного спектра колебательного процесса, определяется следующим образом:

$$A(\omega, \omega') = \widehat{S}_o \widehat{F}^{-1} \delta(\omega - \omega'), \quad (20)$$

где \widehat{S}_o – линейный ограниченный оператор, описывающий действие собственного радиочастотного анализатора спектра, как линейной системы.

Далее, необходимо определить линейный оператор \widehat{L} в соотношении (18) для анализатора комплексного спектра, входящего в состав спектрометра оптического диапазона. Усеченная однородная плоская монохроматическая волна единичной амплитуды с учетом соотношения (15) записывается в форме

$$D_{xy} \cdot \exp[i(\omega't - kz)] = \widehat{V} \widehat{F}^{-1} \delta(\omega - \omega'), \quad (21)$$

и в случае спектральных измерений, оператор \widehat{L} в соотношении (18) с учетом соотношения (21) дается выражением

$$\widehat{L} = \widehat{S}_w \widehat{V} \widehat{F}^{-1}, \quad (22)$$

где \widehat{S}_w – линейный ограниченный оператор, описывающий действие анализатора комплексного спектра, как линейной системы, т.е. преобразование однородной плоской волны анализатором.

В соотношении (22) произведение линейных ограниченных операторов дает линейный ограниченный оператор [77], что соответствует постановке задачи преобразования линейной системы в самой общей форме (16).

С учетом соотношения (22) аппаратная функция определяется как

$$A(\omega, \omega') = \widehat{S}_w \widehat{V} \widehat{F}^{-1} \delta(\omega - \omega'). \quad (23)$$

Из выражения (23) виден смысл аппаратной функции анализатора комплексного спектра, как реакции на δ – воздействие, что соответствует теории линейных систем. Аппаратная функция (23) определяет однократный анализ спектра.

2.5 Переменные во времени спектры

При реальных измерениях происходит взаимодействие спектрального прибора с анализируемой реализацией случайного процесса в реальном времени, поэтому анализ спектра выполняется на нестационарном промежутке времени. Под нестационарным промежутком времени понимается отрезок, у которого одна или обе границы являются функциями текущего времени. Это обстоятельство требует формальное введение спектров переменных во времени [50]. Так в монографии [50] вводятся текущий и мгновенный спектры.

Как отмечалось выше, текущий спектр вводится в форме

$$S(\omega, t) = \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (24)$$

а мгновенный спектр определяется в виде

$$S_{T_a}(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} r(\tau - t) s(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (25)$$

где T_a - время анализа, $r(\tau - t)$ - весовая функция, которая определяется как

$$r(t) = \begin{cases} 1, & t \in [t - \frac{T_a}{2}; t + \frac{T_a}{2}] \\ 0, & t \notin [t - \frac{T_a}{2}; t + \frac{T_a}{2}] \end{cases} \quad (26)$$

Мгновенный спектр определен как спектр отрезка процесса длительность T_a , т.е. интервал анализа имеет постоянную длину, но перемещается по оси времени. Таким образом, мгновенный спектр, рассматривается в условиях «протягивания» временного окна $r(\tau - t)$ по оси времени.

Помимо введенных переменных во времени спектров в теорию спектральных измерений в работе [50] целесообразно определить еще два спектра: выборочный и мгновенный, установленный в новой форме. Как отмечал А.А. Харкевич, мгновенный спектр может определяться по-разному, например, в зависимости от способа действия измерительной аппаратуры [50].

Под выборочным спектром понимается анализ спектра на дискретной последовательности конечных временных интервалов. Идея введения такого спектра показана на рисунке 12 [78].

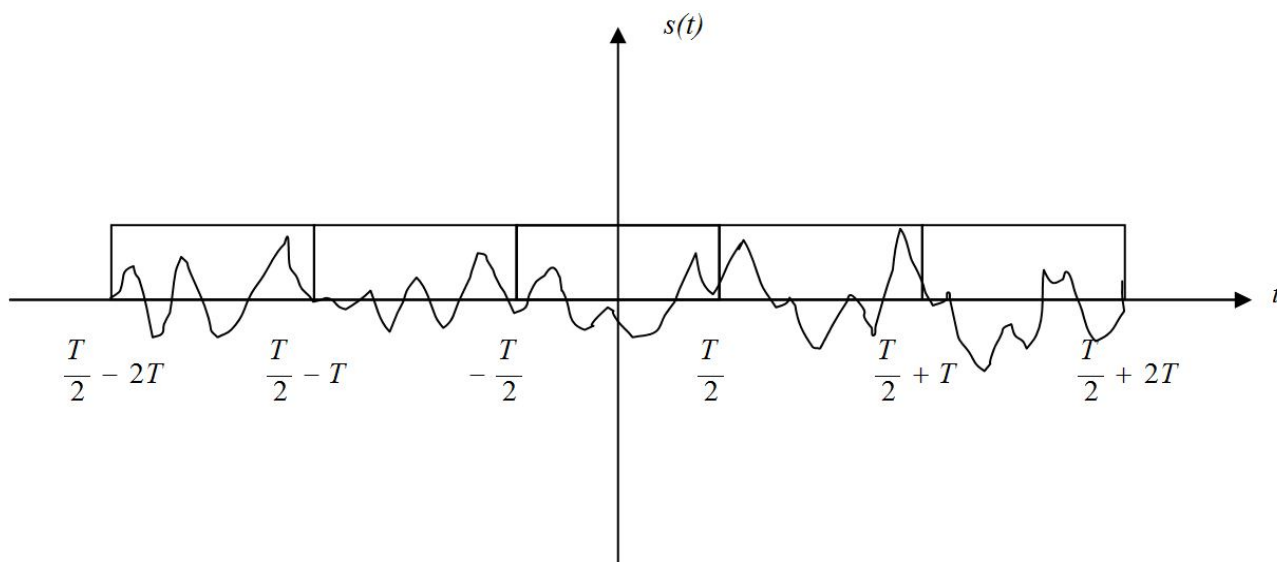


Рисунок 12 – Идея введения выборочного спектра

Выборочный спектр следует определить в виде

$$S_n(\omega, t_n) = \int_{-\frac{T_a+nT_a}{2}}^{\frac{T_a+nT_a}{2}} s(t) \cdot e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} r_n(t) s(t) \cdot e^{-i\omega t} dt, \quad (27)$$

где $t_n = nT_a$; $r_n(t)$ – временное окно

$$r_n(t) = \begin{cases} 1, & t \in [-\frac{T_a}{2} + nT_a; \frac{T_a}{2} + nT_a] \\ 0, & t \notin [-\frac{T_a}{2} + nT_a; \frac{T_a}{2} + nT_a] \end{cases}. \quad (28)$$

Введенный таким образом выборочный спектр соответствуют действию следующих спектральных приборов: последовательных анализаторов спектра радиодиапазона [45, 51], и дисперсионно-временных анализаторов спектра, действие которых основано на явлении дисперсии фазовой скорости в замедляющих системах [79]. Понятие выборочного спектра при анализе сигналов оптического диапазона предложено в работах [80, 81].

Мгновенный спектр, который вводится в виде, отличном от предложенного в работе [50], рассматривается в условиях «протягивания» колебания $s(t)$ мимо временного окна, и его можно определить как

$$S_M(\omega, t) = \int_{-\frac{T_a}{2}}^{\frac{T_a}{2}} s(\tau - t) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (29)$$

Произведем замену переменных $t - \tau = x$, $dx = -d\tau$, $x_H = -\frac{T_a}{2} - t$ и $x_B = \frac{T_a}{2} - t$. Далее, сделав соответствующие математические выкладки, получим:

$$S_M(\omega, t) = e^{-i\omega t} \int_{t - \frac{T_a}{2}}^{t + \frac{T_a}{2}} s(x) \cdot e^{i\omega x} dx = e^{-i\omega t} S_{T_a}^*(\omega, t) \quad (30)$$

Это значит что спектр, полученный в результате «протягивания» анализируемого процесса мимо зафиксированного во времени окна, является комплексно-сопряженным спектром анализируемого процесса умноженный на функцию $\exp(-i\omega t)$. Введенный таким образом мгновенный спектр соответствует действию акустооптического анализатора спектра радиосигналов [48, 49]. По этой причине утверждение, что акустооптический анализатор спектра радиосигналов вычисляет мгновенный спектр в соответствии с определенным в работе [50] мгновенным спектром [82] является некорректным.

Из вышесказанного следует, что временная зависимость аппаратных спектров $S_a(\omega, t)$ определяется спецификой действия спектрального прибора, что, в конечном счете, определяет аппаратную функцию.

Отсюда следует, что аппаратная функция зависит не только от частоты, но и от времени, а связь вход-выход анализатора комплексного спектра записывается в форме интеграла суперпозиции:

$$S_a(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, \omega', t) \cdot S(\omega') d\omega', \quad (31)$$

где $A(\omega, \omega', t)$ – комплексная аппаратная функция, зависящая еще и от времени как от параметра; $S_a(\cdot)$ – комплексный аппаратный (физический) спектр; $S(\cdot)$ – комплексный спектр сигнала на входе анализатора комплексного спектра, т.е. математический спектр.

Переменные в непрерывном времени спектры могут быть получены при выполнении анализа либо в пространственно-временных системах, например с помощью акустооптического анализатора спектра радиосигналов [48, 49], либо в многоканальных системах. Что касается выборочного спектра, он может быть получен при анализе одноканальной системой, например дисперсионно-временным анализатором спектра [79].

Аргументы спектральной функции могут быть как континуальным множеством значений, так и дискретным множеством, в последнем случае образуется совокупность $\{\omega_k\}$. Дискретное множество аргументов спектральной функции имеет место при цифровой обработке сигнала и при обработке многоканальным спектральным прибором в виде полученных значений с каждого канала, которые являются отчетными значениями спектра.

Соотношение (31) устанавливает связь вход-выход анализатора комплексного спектра с позиции теории линейных систем.

В данной работе для решения задач контроля процессов горения разработан метод бесконтактного анализа оптических спектров, основанный на явлении резонанса в n параллельных каналах. Поэтому дальнейшее

исследование преследовало цель обобщить соотношение (31) на случай параллельного анализа, т.е. преобразовать его к матричной форме.

2.6 Выводы

1. Разработан теоретический подход к анализу оптических спектров предложенным прибором контроля, опирающийся на общие положения теории сигналов, теории многомерных линейных систем, методы теоретической радиотехники, методы матричного исчисления и принципы детектирования оптических сигналов.

2. Этот подход отражает одно из направлений радиооптики и характеризуется перенесением идей и методов параллельного анализа спектров, известных в радиодиапазоне, в теорию и практику оптической спектрометрии, и применением нетрадиционных для оптики понятий комплексного спектра и частотных функций при спектральной обработке сигналов оптического диапазона. Он одинаково пригоден для описания параллельных анализаторов спектра, как радио-, так и оптического диапазонов.

3. Разработанный теоретический подход дает последовательное описание прохождения анализируемого оптического сигнала через все узлы спектрального прибора и получения энергетического спектра, несущего информацию о состоянии контролируемого процесса горения.

4. При теоретическом описании процесс анализа спектра оптических сигналов было предложено разделить на два этапа: анализ комплексного спектра с помощью анализатора комплексного спектра, входящего в состав спектрального прибора, и последующая обработка полученного комплексного спектра детектирующей системой прибора для получения энергетического спектра. Такое разделение позволило дать последовательный анализ прохождения сигнала через прибор.

5. Вследствие того, что анализ спектра принадлежит категории информационных процессов, измеряемые величины и функции должны быть описаны в терминах теории вероятностей, при этом в качестве адекватной модели анализируемого оптического излучения был принят гармонизируемый случайный процесс, который характеризует состояние контролируемого процесса горения.

6. Показано, что в случае анализа спектра в оптическом диапазоне аппаратная функция спектрального прибора определяется как его реакция на однородную плоскую монохроматическую волну, и аппаратную функцию анализатора комплексного спектра, следует рассматривать как действие линейного ограниченного оператора на δ – воздействие в частотной области, что полностью согласуется с теорией линейных систем.

7. Помимо общепринятых в теории спектральных измерений переменных во времени спектров [50] введены еще два спектра: выборочный и мгновенный, который определен в виде отличном от предложенного в работе [50], и установлена связь между этими двумя мгновенными спектрами.

8. Полученный интеграл суперпозиции для анализатора комплексного спектра устанавливает связь вход-выход анализатора с позиции теории линейных систем. Дальнейшее исследование преследует цель обобщить полученное соотношение на случай параллельного анализа, поскольку в данной работе для решения задач контроля процессов горения разработан метод бесконтактного анализа оптических спектров, основанный на явлении резонанса в n параллельных каналах.

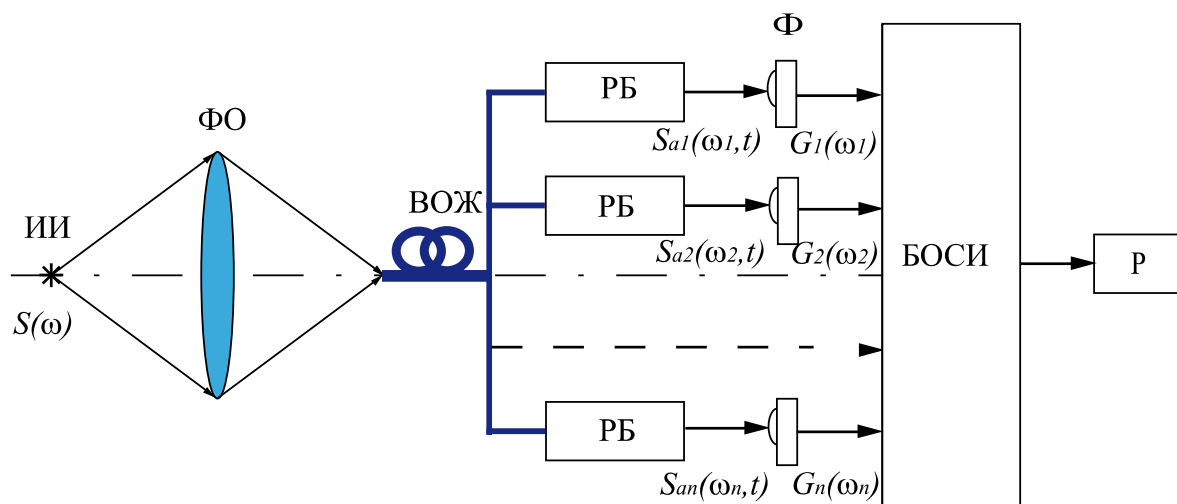
9. Основные результаты данного раздела опубликованы в работах [7], [9], [32], [59], [67], [81], [83] и [84].

3 Резонансный метод бесконтактного параллельного анализа оптических спектров

Принцип построения прибора контроля в форме многоканального спектрометра оптического диапазона, реализующего разработанный метод, впервые был предложен в патенте РФ [10]. В этом приборе спектральное разложение выполняется путем использования набора оптических резонаторов в n параллельных каналах. Волоконно-оптический жгут, используемый для ввода оптического излучения в резонаторы, позволяет перенести прибор на безопасное для него расстояние от очага горения, тем самым, исключив непосредственный контакт с полем излучения пламени.

3.1 Многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона

Структурная схема многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона приведена на рисунке 13 [67, 85].

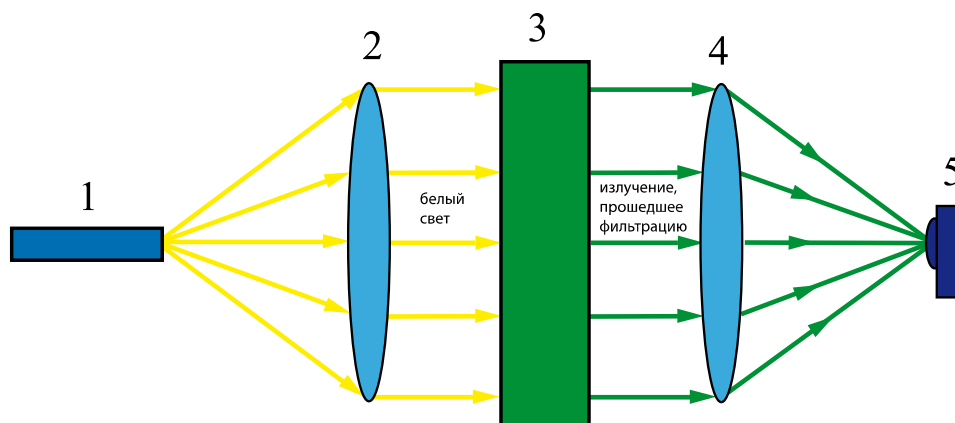


ИИ – источник оптического излучения; ФО – формирующая оптика;
ВОЖ – волоконно-оптический жгут; РБ – резонаторные блоки; Ф –
фотоприемники; БОСИ – блок обработки спектроскопической информации;
Р – регистратор; $S(\omega)$ – комплексный спектр излучения на входе
спектрометра; $S_a(\omega, t)$ – комплексный аппаратурный спектр; $G_k(\omega_k)$ –
энергетический спектр оптического излучения получаемый спектрометром

Рисунок 13 - Структурная схема многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона

Совокупность оптических волокон и резонаторных блоков образуют анализатор комплексного спектра, т.е. резонаторную систему многоканального спектрометра оптического диапазона, а набор фотоприемников – детектирующую систему.

Функциональная схема одного канала анализа спектра многоканального спектрометра приведена на рисунке 14.



1 – выходной торец волоконно-оптического жгута, 2 - первая коллимирующая линза, 3 – резонатор, 4 – вторая коллимирующая линза, 5 – фотоприемник

Рисунок 14 – Функциональная схема одного канала анализа спектра многоканального спектрометра

Первая коллимирующая линза, резонатор и вторая коллимирующая линза образуют резонаторный блок.

Линза 2 преобразует расходящийся пучок оптического излучения, исходящий из торца оптического волокна, в параллельный пучок. Линза 4 фокусирует падающий на нее параллельный пучок, прошедший фильтрацию, на фотоприемник детектирующей системы, как показано на рисунке 14.

Многоканальный резонаторный спектрометр работает следующим образом: оптическое излучение, несущее спектроскопическую информацию о контролируемом процессе горения, поступает на формирующую оптику. В ее

фокальном пятне расположен общий входной торец волоконно-оптического жгута выполненного из n оптических волокон, его другой конец разделен на n отдельных волокон. По волоконно-оптическому жгуту оптическое излучение передается на заданное расстояние от очага горения и поступает в резонаторные блоки, выполняющие спектральное разложение с помощью резонаторов оптического диапазона, которые настроены на определенную частоту (длину волны). Далее оптический сигнал поступает в детектирующую систему, где оптическое излучение преобразовывается в электрический сигнал с помощью фотоприемников и подается на вход блока обработки спектроскопической информации. Задача этого блока состоит в считывании уровней сигналов, поступающих с каждого фотоприемника, и отображении спектроскопической информации о контролируемом процессе горения в воспринимаемом оператором виде на регистраторе, например, на осциллографе [83].

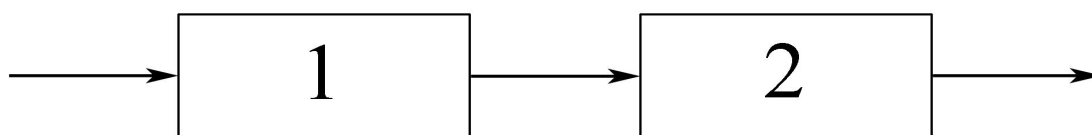
В оптическом диапазоне резонаторная система многоканального спектрометра включает набор резонаторов с распределенными параметрами и, каждый из которых имеет множество резонансов. Всякую систему с распределенными параметрами можно рассматривать как сосредоточенную с достаточно большим числом степеней свободы. В отношении частотного спектра любая распределенная колебательная система эквивалентна совокупности сосредоточенных колебательных систем с одной степенью свободы, каждая из которых имеет собственную частоту, совпадающую с одной из собственных частот распределенной системы [86]. Каждая из таких систем должна рассматриваться как колебательный контур, представляющий собой резонатор с сосредоточенными параметрами. В оптическом диапазоне за счет особой конструкции резонатора добиваются того, чтобы он представлял собой систему эквивалентную системе с сосредоточенными параметрами, т.е. колебательному контуру.

Переход от распределенной системы к эквивалентной системе с сосредоточенными параметрами позволяет далее рассматривать анализ

колебательного процесса $e(t)$, и соотношение (23) переписывается следующим образом:

$$A(\omega, \omega') = \hat{S}_w \hat{F}^{-1} \delta(\omega - \omega'). \quad (32)$$

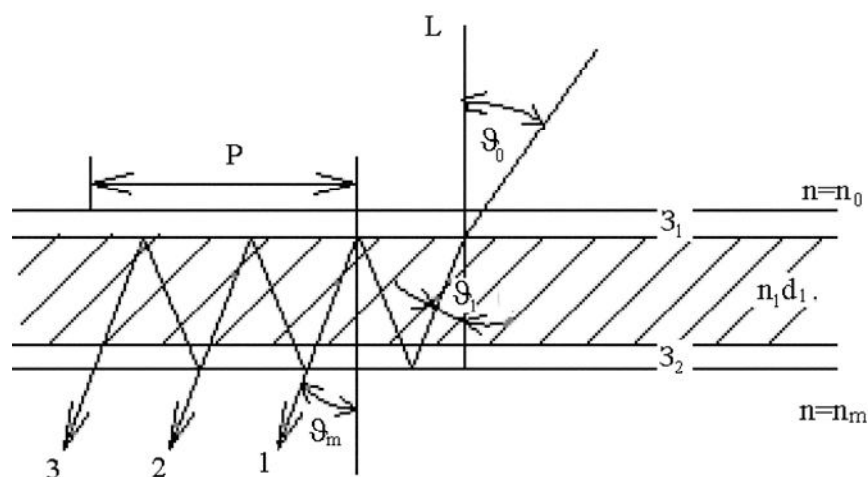
Радиотехническую аналогию элемента резонаторной системы многоканального спектрометра можно представить в виде структурной схемы, приведенной на рисунке 15.



1 – четырехполюсник с коэффициентом передачи, описывающим частотные свойства оптического волокна; 2 – колебательный контур, описывающий фильтрующие свойства резонатора

Рисунок 15 – Структурная схема радиотехнической аналогии элемента резонаторной системы многоканального спектрометра

Согласно терминологии принятой в оптике резонатор оптического диапазона называется узкополосным интерференционным оптическим фильтром. Он, как правило, построен по схеме интерферометра Фабри – Перо, который образован двумя зеркалами, расположенными параллельно друг другу на некотором расстоянии [87]. Резонатор оптического диапазона также образован двумя зеркалами, расположенными на одной подложке и разделёнными слоем диэлектрика. Схема такого резонатора показана на рисунке 16.



ϑ_0 – угол падения света на резонатор, ϑ_1 – угол распространения излучения в разделительном слое толщиной d_1 и показателем преломления n_1 , ϑ_m – угол распространения света в подложке, Z_1 и Z_2 – зеркала

Рисунок 16 – Схема резонатора оптического диапазона

В качестве зеркал могут выступать слои металла, диэлектрические четвертьволновые зеркала, или слои диэлектрика, работающие при углах падения больших критического [87].

Спектральная характеристика резонатора, т.е. спектральная зависимость коэффициента пропускания T резонатора от длины волны (частоты), приведена на рисунке 17.

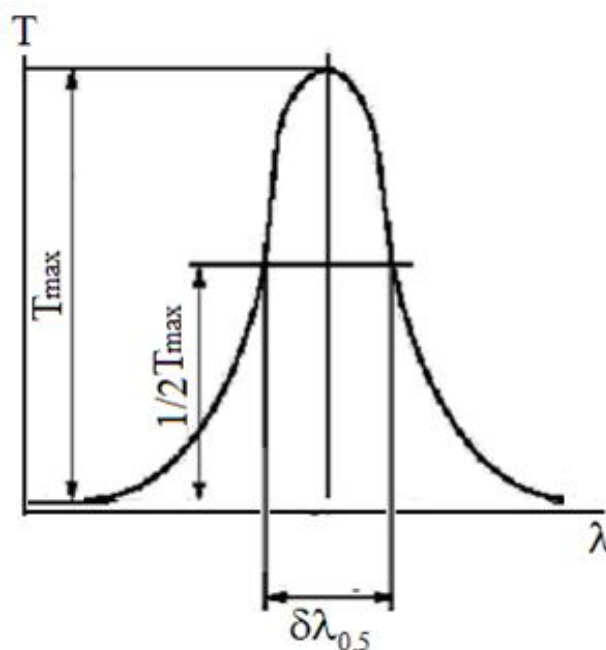


Рисунок 17 – Спектральная характеристика резонатора оптического диапазона

Для описания спектральной характеристики резонатора оптического диапазона вводится понятие полуширины резонатора $\delta\lambda_{0,5}$ [87]. Аналогично определению полуширины по мощности в радиофизике и радиотехнике, это – спектральная ширина резонатора на уровне $0,5T_{max}$.

Теоретическая спектральная характеристика резонатора оптического диапазона практически совпадает с квадратом теоретической АЧХ одиночного колебательного контура.

3.2 Теоретический анализ работы резонаторной системы многоканального спектрометра оптического диапазона

Полученное в предыдущем разделе данной диссертационной работы соотношение (31), как отмечалось, устанавливает связь вход-выход одноканального анализатора комплексного спектра. В случае многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона его резонаторная система является многомерной линейной системой, поэтому необходимо представить оператор \hat{S} из соотношения (23) в виде адекватном параллельному анализу. Следовательно, соотношение, устанавливающее

связь вход - выход такой системы, должно быть получено в матричной форме.

Традиционно теория многомерных линейных систем применялась к описанию динамических систем [12, 13, 15]. К описанию многоканальных спектрометров теория многомерных линейных систем применена впервые.

Структурная схема многомерной линейной системы в общем случае (со связанными каналами) приведена на рисунке 18 [88].

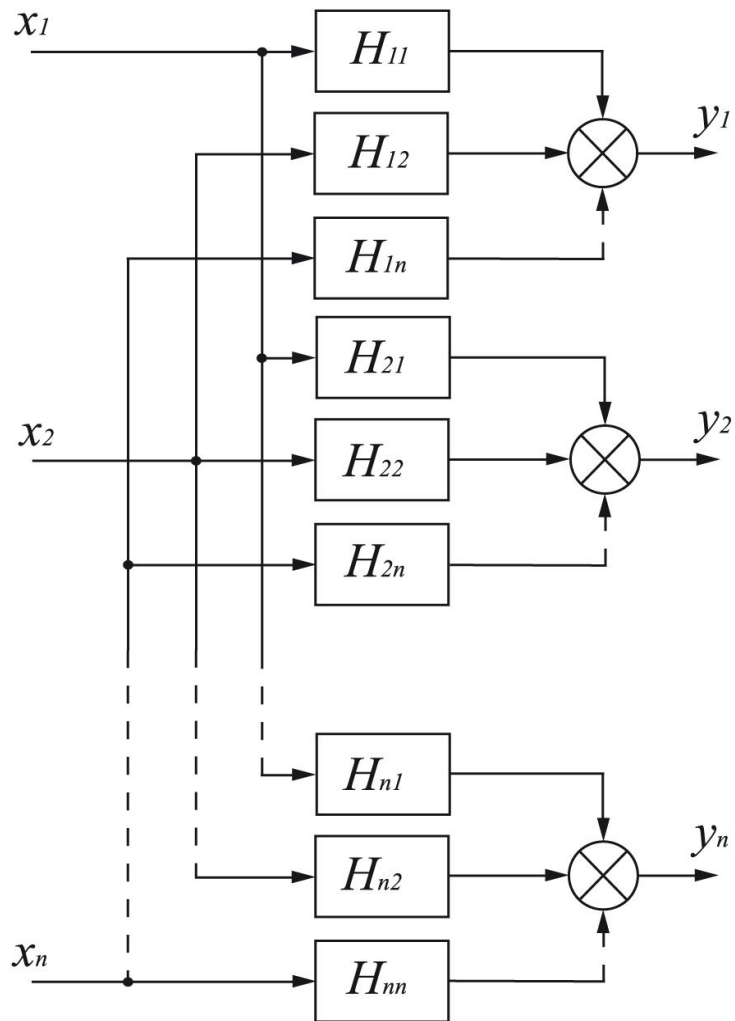


Рисунок 18 – Структурная схема многомерной линейной системы со связанными каналами

В общем случае передача сигнала многомерной линейной системой со связанными каналами, например [88], описывается следующим образом:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \dots & H_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}, \quad (33)$$

где $\|y_j\|$ – матрица-столбец выходов; $\|H_{ii}\|$ – передаточная матрица многомерной линейной системы, которая является ее исчерпывающей характеристикой; $\|x_j\|$ – матрица-столбец входов.

Резонаторная система многоканального спектрометра является многомерной линейной системой без перекрестных связей между каналами, которая называется автономной системой [88], и свойства такой системы характеризуются диагональной матрицей [88]. С учетом выражений (31) и (33) спектральная обработка сигнала резонаторной системой такого спектрометра определяется следующим образом:

$$\begin{pmatrix} S_{a1}(\omega, t) \\ S_{a2}(\omega, t) \\ \vdots \\ S_{ak}(\omega, t) \\ \vdots \\ S_{an}(\omega, t) \end{pmatrix} = \int_{-\infty}^{\infty} \begin{pmatrix} A_{11}(\omega_1, \omega', t) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{22}(\omega_2, \omega', t) & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{kk}(\omega_k, \omega', t) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & A_{nn}(\omega_n, \omega', t) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S(\omega') \\ S(\omega') \\ \vdots \\ S(\omega') \\ \vdots \\ S(\omega') \end{pmatrix} d\omega', \quad (34)$$

где $\|S_{ak}(\omega_k, t)\|$ – матрица-столбец, описывающая отсчетные значения комплексного спектра анализируемого излучения; $A_{kk}(\omega_k, \omega', t)$ – «парциальная» аппаратная функция k -го канала резонаторной системы, т.е. отсчетное значение аппаратной функции анализатора комплексного спектра, определяемой диагональной матрицей; $\|S(\omega')\|$ – матрица-столбец, описывающая комплексного спектра анализируемого излучения на входе.

Выражение (34), устанавливающее связь между истинным комплексным спектром, отражающим истинное состояние контролируемого процесса горения, и получаемым комплексным спектром на выходе

резонаторной системы многоканального спектрометра, впервые введено в данной диссертационной работе.

Комплексная «парциальная» аппаратная функция k -го канала резонаторной системы определяется как [59, 67, 85]

$$A_{kk}(\omega_k, \omega', t) = K_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot B_{kk}(\omega') \cdot e^{i\omega' t}, \quad (35)$$

где $B_{kk}(\omega')$ – передаточная функция отрезка оптического волокна, $K_{kk}(\omega_k, \omega')$ – передаточная функция k -го резонаторного блока.

Тогда матричная аппаратная функция всей системы определяется следующим образом:

$$\text{diag}\{A_{kk}(\omega_k, \omega', t)\} = \text{diag}\{K_{kk}(\omega_k, \omega')\} \cdot \text{diag}\{B_{kk}(\omega')\} \cdot e^{i\omega' t}, \quad (36)$$

Для определения комплексной аппаратной функции всей резонаторной системы достаточно рассмотреть обработку сигнала в одном канале резонаторной системы многоканального спектрометра оптического диапазона, т.к. принцип действия всех каналов одинаков.

Подставим соотношение (35) в равенство (31), тогда соотношение, описывающее преобразование спектра в k -ом канале, примет вид

$$S_{ak}(\omega_k, t) = \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot B_{kk}(\omega') \cdot S(\omega') e^{i\omega' t} d\omega', \quad (37)$$

где $2\Delta\omega_k$ – полоса пропускания резонатора в k – ом канале спектрометра. Применение теоремы о спектре произведения двух функций к соотношению (37) дает:

$$S_{ak}(\omega_k, t) = 2\pi \int_0^t h_k(t - \tau) \cdot s(\tau) d\tau, \quad (38)$$

где $h_k(t)$ – импульсная реакция радиотехнического аналога k -го канала резонаторной системы многоканального спектрометра.

Так как резонатор является узкополосной системой, то его импульсная реакция определяется следующим образом [53]:

$$h_k(t) = H_k(t) \cdot e^{i\omega_k t}, \quad (39)$$

где $H_k(t)$ – комплексная огибающая импульсной реакции.

В таком случае

$$S_{ak}(\omega_k, t) = \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot H_k(t - \tau) \cdot e^{i\omega_k(t - \tau)} d\tau = e^{i\omega_k t} \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot H_k(t - \tau) \cdot e^{-i\omega_k \tau} d\tau. \quad (40)$$

Последнее выражение в цепи (40) представляет комплексный текущий спектр с весовой функцией [59]. Следует отметить, что физически текущий спектр проявляется в форме модуляции несущего колебания $\exp(i\omega_k t)$.
Причем

$$\dot{U}(t) = \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot H_k(t - \tau) \cdot e^{-i\omega_k \tau} d\tau, \quad (41)$$

где $\dot{U}(t)$ – комплексная огибающая, которая соответствует выражению текущего спектра, полученного в работе А.А. Харкевича [50].

Разложим весовую функцию $H_k(t)$ в ряд Тейлора:

$$H_k(t) = H_k(0) + \frac{H'_k(0) \cdot t}{1!} + \frac{H''_k(0) \cdot t^2}{2!} + \dots \quad (42)$$

В нулевом приближении весовой функции $H_k(t)$ соотношение (40) принимает вид

$$S_{ak}(\omega_k, t) = e^{i\omega_k t} H_k(0) \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot e^{-i\omega_k \tau} d\tau. \quad (43)$$

В случае многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона весовая функция $H(t)$ имеет матричную форму. Правило суммирования матриц позволяет представить матрицу в виде ряда матриц. Тогда в матричной форме соотношение (42) запишется следующим образом:

$$\text{diag}\{H(t)\} = \text{diag}\{H_{kk}(0)\} + \text{diag}\left\{\frac{H'_{kk}(0) \cdot t}{1!}\right\} + \text{diag}\left\{\frac{H''_{kk}(0) \cdot t^2}{2!}\right\} + \dots \quad (44)$$

Разложение (44) дает возможность оценить погрешности измерения текущего спектра реальными резонаторами.

При параллельном анализе физический спектр представляется в виде дискретных значений (отсчетов), тогда как спектр финитного сигнала на входе спектрометра, согласно теореме Винера – Пэли [21], описывается целой функцией экспоненциального типа степени $T/2$. Такие функции являются не только непрерывными, но и бесконечно дифференцируемыми. Это свойство спектральной функции ставит вопрос о соотношении между анализируемым спектром и его дискретным представлением.

Названное соотношение устанавливается с помощью интерполяционной теоремы Уиттекера (теорема отсчетов), определяющей свойства преобразований Фурье финитных функций. Теорема отсчетов известна в теории связи как теорема Котельникова и доказана им для функций времени. Интерполяционная теорема Уиттекера носит общий характер и, таким образом, имеет аналог в частотной области [90]. Теорема отсчетов в частотной области утверждает следующее: если $S(\omega)$ есть спектр

функции $s(t)$, тождественно равной нулю вне интервала $T_1 < t < T_2$, то $S(\omega)$ однозначно определяется последовательностью его значений в точках, отстоящих на расстоянии [90]

$$\Delta\omega \leq \frac{\pi}{T_2 - T_1}, \quad (45)$$

где $T = T_2 - T_1$ длительность импульса.

Тогда спектр определяется как

$$S(\omega) = \sum_{-\infty}^{\infty} S\left(\frac{n\pi}{T}\right) \cdot \frac{\sin(\omega T - n\pi)}{(\omega T - n\pi)}, \quad (46)$$

Анализ текущего спектра выполняется на нестационарном интервале $[t_0, t]$, длительность которого непрерывно увеличивается. Иными словами, длительность обрабатываемой реализации в соответствии с (43) изменяется и непрерывно возрастает как $t - t_0$ до значения T , это соответствует непрерывному сгущению отсчетных точек, которые определяются интервалами частот между частотами настройки резонаторов

$$\Delta\omega(t) \leq \frac{\pi}{t - t_0}. \quad (47)$$

В реальных условиях количество резонаторов и интервал между частотами настройки резонаторов определены заранее, поэтому при $t - t_0 > T$ восстановление спектра в соответствии с соотношением (45) становится невозможным.

В случае анализатора спектра радиосигналов его теоретический анализ заключается в описании процесса измерения комплексного спектра [51].

3.3 Анализ энергетического спектра оптических сигналов многоканальным резонаторным спектрометром

3.3.1 Анализ энергетического спектра оптического сигнала

При оптических спектральных измерениях, как отмечалось выше, оперируют с энергетическими спектрами, поэтому получаемый на выходе резонаторной системы многоканального спектрометра комплексный спектр подлежит дальнейшей обработке его детектирующей системой.

Принимая во внимание то, что все каналы многоканального спектрометра, структурная схема которого изображена на рисунке 13, одинаковы, то достаточно рассмотреть процесс анализа энергетического спектра оптического сигнала для одного канала.

Все детекторы в оптическом диапазоне являются квадратичными, так как сила тока любого фотоприемника пропорциональна мощности падающего излучения. Таким образом, сила тока фотоприемника определяется как

$$i = \alpha P = \alpha \iint_{\Delta S} \vec{\Pi} d\vec{s}, \quad (48)$$

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

Поскольку фотоприемники реагируют на электрическую компоненту электромагнитного поля, то вектор Пойнтинга необходимо представить следующим образом [55]:

$$\vec{\Pi} = |\vec{\Pi}| \cdot \vec{e} = \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot E^2 \vec{e}, \quad (49)$$

где \vec{e} – единичный вектор; c – скорость света; ε – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; E – напряженность электрического поля световой волны.

Тогда мощность падающего излучения выражается как

$$P = \iint_{\Delta S} |\vec{\Pi}| \cdot \vec{e} d\vec{s} = \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \iint_{\Delta S} E^2 \vec{e} d\vec{s}. \quad (50)$$

Пологая, что оптическое излучение падает нормально на плоскость фотоприемника, то выражение мощности можно переписать как

$$P = \iint_{\Delta S} |\vec{\Pi}| \cdot ds = \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \iint_{\Delta S} E^2 ds. \quad (51)$$

Вектор Пойнтинга является функцией координат (x, y) в плоскости фотоприемника. И его можно представить степенным рядом функции двух переменных

$$|\vec{\Pi}| = |\vec{\Pi}|(0,0) + \frac{1}{1!} \cdot \left(\frac{\partial |\vec{\Pi}|}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial |\vec{\Pi}|}{\partial y} y \right) + \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{\partial^2 |\vec{\Pi}|}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{\partial^2 |\vec{\Pi}|}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{\partial^2 |\vec{\Pi}|}{\partial y^2} \Delta y^2 \right) + \dots \quad (52)$$

В дальнейшем предполагается, что можно ограничиться нулевым приближением ряда (52), тогда фототок (48) дается выражением

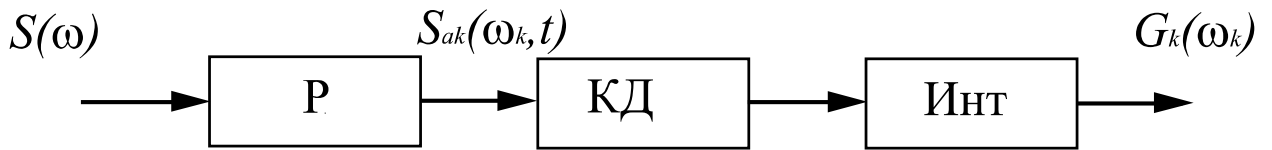
$$i = \alpha \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot \iint_{\Delta S} E^2(0,0) ds = \alpha \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E^2(0,0) \Delta S. \quad (53)$$

Полученное соотношение отражает известное утверждение о том, что фототок пропорционален квадрату напряженности электрической компоненты светового поля и, как следует из разложения (52), является не всегда корректным.

При регистрации спектра оптического излучения нужно учесть значительную инерционность фотоприемника по отношению к периоду оптических колебаний. И процедура фотодетектирования инерционным

фотоприемником описывается безинерционным квадратичным детектированием с последующим временным интегрированием полученного фототока [28].

Учитывая специфику рассматриваемого прибора контроля в форме многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона, спектральное разложение в котором выполняется с помощью набора резонаторов, процесс анализа энергетического спектра оптического сигнала в одном канале можно представить функциональной схемой изображенной на рисунке 19 [59].



Р – резонатор, КД – квадратичный детектор, Инт – интегратор, $S(\omega)$ – сигнал на входе спектрометра, $S_{ak}(\omega_k, t)$ – комплексный спектр на выходе k -го канала резонаторной системы спектрометра, $G_k(\omega_k)$ – энергетический спектр оптического сигнала на выходе k -го канала спектрометра.

Рисунок 19 – Функциональная схема вычисления энергетического спектра оптического сигнала

Учитывая, что комплексный спектр пропорционален напряженности электрической компоненты оптического излучения, математическая форма последовательности операций, представленных на рисунке 19, имеет вид:

$$G_k(\omega) = \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} i_k(t) dt = P_k(\omega_k) \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} |S_{ak}(\omega, t)|^2 dt = P_k(\omega_k) \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} S_{ak}(\omega, t) S_{ak}^*(\omega, t) dt, \quad (54)$$

где $P_k(\omega_k)$ – коэффициент, учитывающий спектральную чувствительность фотоприемника для k -го канала; T_R – время интегрирования; $t_0 = -\frac{T_R}{2}$.

При подстановке соотношения (37) в (54) получим

$$\begin{aligned}
G_k(\omega) &= P_k(\omega_k) \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} dt \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}(\omega_k, \omega') B_{kk}(\omega') S_0(\omega') e^{i\omega' t} d\omega' \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}^*(\omega_k, \omega'') B_{kk}^*(\omega'') S_0^*(\omega'') e^{-i\omega'' t} d\omega'' = \\
&= P_k(\omega_k) \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} dt \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}(\omega_k, \omega') B_{kk}(\omega') K_{kk}^*(\omega_k, \omega'') B_{kk}^*(\omega'') S_0(\omega') S_0^*(\omega'') e^{i(\omega' - \omega'') t} d\omega' d\omega'',
\end{aligned} \tag{55}$$

где $2\Delta\omega_k$ – полоса пропускания резонатора в k – ом канале многоканального резонаторного спектрометра.

Интегрирование по времени в выражении (55) дает:

$$\int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} e^{i(\omega' - \omega'') t} dt = \frac{2 \sin \frac{T_R}{2} (\omega' - \omega'')}{(\omega' - \omega'')}. \tag{56}$$

С учетом соотношения (56) выражение (55) примет вид

$$\begin{aligned}
G_k(\omega) &= (\Delta\omega_k) \cdot P_k(\omega_k) \cdot \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}(\omega_k, \omega') B_{kk}(\omega') K_{kk}^*(\omega_k, \omega'') B_{kk}^*(\omega'') \cdot \\
&\cdot S_0(\omega') S_0^*(\omega'') \frac{2 \sin \frac{T_R}{2} (\omega' - \omega'')}{(\omega' - \omega'')} d\omega' d\omega''.
\end{aligned} \tag{57}$$

Дальнейшие выкладки опираются на теорию вытянутых волновых сфероидальных функций, которые являются собственными функциями усеченного преобразования Фурье [20, 21].

Следуя [20, 21], введем безразмерные переменные: $\xi' = \omega' / \Delta\omega_k$, $\xi'' = \omega'' / \Delta\omega_k$, тогда соотношение (57) примет вид

$$G_k(\omega) = (\Delta\omega_k)^2 P_k(\omega_k) \int_{-1}^1 K_{kk}(\xi') B_{kk}(\xi') S_0(\xi') d\xi' \int_{-1}^1 K_{kk}^*(\xi'') B_{kk}^*(\xi'') S_0^*(\xi'') \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'', \quad (58)$$

где $c = 0,5 T_R \Delta \omega_k$.

Представим $K_{kk}^*(\xi'')$ $B_{kk}^*(\xi'')$ $S_0^*(\xi'')$ – в виде суммы вещественной и мнимой части

$$K_{kk}^*(\xi'') \cdot B_{kk}^*(\xi'') \cdot S_0^*(\xi'') = Z(\xi'') + iQ(\xi'') \quad (59)$$

и разложим в усеченный ряд по системе вытянутых волновых сфероидальных функций [21], тогда соотношение (59) примет вид

$$Z(\xi'') + iQ(\xi'') = \sum_{Z=0}^N a_Z \cdot \psi_Z(\xi'') + i \cdot \sum_{Q=0}^N b_Q \cdot \psi_Q(\xi''), \quad (60)$$

где $\{\psi_i(\xi)\}_{i=0}^{\infty}$ – ортогональная система вытянутых волновых сфероидальных функций.

Выбирая N в разложении (60), можно получить нужную степень приближения.

Преобразуем отдельно один из интегралов соотношения (58), учитывая соотношение (60)

$$\begin{aligned} & \int_{-1}^1 K_{kk}^*(\xi'') \cdot B_{kk}^*(\xi'') \cdot S_0^*(\xi'') \cdot \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' = \\ & = \int_{-1}^1 \left[\sum_{Z=0}^N a_Z \cdot \psi_Z(\xi'') + i \cdot \sum_{Q=0}^N b_Q \cdot \psi_Q(\xi'') \right] \cdot \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' = \quad (61) \\ & = \int_{-1}^1 \sum_{Z=0}^N a_Z \cdot \psi_Z(\xi'') \cdot \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' + i \cdot \int_{-1}^1 \sum_{Q=0}^N b_Q \cdot \psi_Q(\xi'') \cdot \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi''. \end{aligned}$$

Согласно теории вытянутых волновых сфероидальных функций имеет место равенство [20, 21]

$$\frac{1}{\mu_n} \cdot \psi(\xi') = \int_{-1}^1 \psi(\xi'') \cdot \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'', \quad (62)$$

где $\psi_i(\xi)$ - собственные функции интегрального уравнения, т.е. вытянутые волновые сфероидальные функции; $\mu_n(c)$ – собственные значения.

При спектральных измерениях в оптическом диапазоне всегда выполняется условие $c \gg 1$, тогда $\mu_n(c) \approx 1$, следовательно

$$\psi(\xi') = \int_{-1}^1 \psi(\xi'') \cdot \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi''. \quad (63)$$

Иными словами ядро интегрального оператора (63) в этом случае является воспроизводящим ядром.

Согласно соотношению (62), полученный результат в соотношении (61) можно представить как

$$\begin{aligned} & \int_{-1}^1 \sum_{Z=0}^N a_Z \cdot \psi_Z(\xi'') \cdot \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' + i \cdot \int_{-1}^1 \sum_{Q=0}^N b_Q \cdot \psi_Q(\xi'') \cdot \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' = \\ & = \sum_{Z=0}^N a_Z \psi_Z(\xi') + i \cdot \sum_{Q=0}^N b_Q \psi_Q(\xi'). \end{aligned} \quad (64)$$

Выполнив обратные преобразования, получим

$$\sum_{Z=0}^N a_Z \psi_Z(\xi') + i \cdot \sum_{Q=0}^N b_Q \psi_Q(\xi') = Z(\xi') + iQ(\xi') = K_{kk}^*(\xi') \cdot B_{kk}^*(\xi') \cdot S_0^*(\xi'). \quad (65)$$

Тогда соотношение (61) примет вид

$$\int_{-1}^1 K_{kk}^*(\xi'') \cdot B_{kk}^*(\xi'') \cdot S_0^*(\xi'') \cdot \frac{2 \sin c(\xi' - \xi'')}{(\xi' - \xi'')} d\xi'' \cong K_{kk}^*(\xi') \cdot B_{kk}^*(\xi') \cdot S_0^*(\xi'). \quad (66)$$

Подстановка соотношения (66) в (58) дает

$$G_k(\omega) = (\Delta\omega_k)^2 P_k(\omega_k) \int_{-1}^1 |K_{kk}(\xi')|^2 \cdot |B_{kk}(\xi')|^2 \cdot |S_0(\xi')|^2 d\xi'. \quad (67)$$

При обратном переходе от безразмерных переменных ξ' к натуральным ω' получаем

$$G_k(\omega) = (\Delta\omega_k)^2 P_k(\omega_k) \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} |K_{kk}(\omega_k, \omega')|^2 \cdot |B_{kk}(\omega')|^2 \cdot |S_0(\omega')|^2 d\omega' = \quad (68)$$

$$= \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} W_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot G(\omega') d\omega'.$$

где $G(\omega')$ – энергетический спектр анализируемого колебания, отражающий истинное состояние контролируемого процесса горения (математический спектр), $G(\omega') = |S(\omega')|^2$; $W_{kk}(\omega_k, \omega')$ – «парциальная» энергетическая аппаратная функция k -го канала многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона.

Из соотношения (68) следует, что «парциальная» энергетическая аппаратная функция k -го канала многоканального резонаторного спектрометра равна

$$W_{kk}(\omega_k, \omega') = P_k(\omega_k) \cdot |K_{kk}(\omega_k, \omega')|^2 \cdot |B_{kk}(\omega')|^2. \quad (69)$$

Тогда соотношение, описывающее получение энергетического спектра оптического сигнала многоканальным резонаторным спектрометром, запишется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} G_{a1}(\omega) \\ G_{a2}(\omega) \\ \vdots \\ G_{ak}(\omega) \\ \vdots \\ G_{an}(\omega) \end{bmatrix} = \int_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} W_{11}(\omega_1, \omega') & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_{22}(\omega_2, \omega') & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_{kk}(\omega_k, \omega') & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & W_{nn}(\omega_n, \omega') \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G(\omega') \\ G(\omega') \\ \vdots \\ G(\omega') \\ \vdots \\ G(\omega') \end{bmatrix} d\omega'. \quad (70)$$

Полученное соотношение описывает энергетический спектр в форме его отсчетных значений и устанавливает связь между истинным распределением энергии по спектру (энергетическим спектром), отражающим состояние контролируемого процесса горения, и спектральным распределением энергии по спектру, полученным экспериментально с помощью многоканального спектрометра и дающим информацию получателю о состоянии этого процесса.

Соотношение (70) отражает результат однократного анализа энергетического спектра излучения пламени на промежутке T . После однократного измерения результаты сбрасываются, и начинается следующий цикл измерения. Поэтому, при такой обработке выполняется анализ не текущего спектра, а выборочного спектра, который был введен в предыдущем разделе.

С учетом соотношения (35) диагональную матричную энергетическую аппаратную функцию можно представить как

$$\begin{aligned} \text{diag}\{W_{kk}(\omega_k, \omega')\} &= \text{diag}\{|K_{kk}(\omega_k, \omega')|^2\} \cdot \text{diag}\{|B_{kk}(\omega')|^2\} \cdot \|P_k(\omega_k)\| = \\ &= \text{diag}\{|A_{kk}(\omega_k, \omega')|^2\} \cdot \|P_k(\omega_k)\|, \end{aligned} \quad (71)$$

где $\|P_k(\omega_k)\|$ – матрица – столбец коэффициентов, учитывающих спектральную чувствительность фотоприемника для каждого канала многоканального резонаторного спектрометра.

Таким образом, многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона может быть охарактеризован двумя матричными аппаратными функциями: комплексной и энергетической.

Полученное соотношение определяет оценку энергетического спектра излучения пламени, полученную с помощью многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона. Такая оценка в теории статистических измерений считается хорошей [91] и адекватно отражает состояние контролируемого процесса горения.

3.3.2 Методы оценки энергетического спектра оптического сигнала

Существует несколько эквивалентных способов получения оценки энергетического спектра [81, 91, 92, 93]:

1. с помощью предварительно определенной оценки корреляционной функции;
2. на базе обработки мгновенного спектра;
3. с помощью метода фильтрации.

В первом случае вычисление оценки энергетического спектра осуществляется на базе теоремы Бохнера. В принципе на базе этой теоремы возможно получение оценки энергетического спектра, как в радиодиапазоне, так и в оптическом диапазоне.

Как уже говорилось, в реальных условиях время измерения спектра ограничено, и обрабатывается единственная реализация. В этом случае функция корреляции для финитных сигналов может быть записана в форме:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s(t - \tau) dt. \quad (72)$$

Основываясь на теореме Бохнера, оценка энергетического спектра финитной реализации дается в виде

$$\bar{G}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{R}(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (73)$$

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

Аппаратурное получение этой оценки наталкивается на серьезные трудности, поскольку получение функции корреляции является непростой задачей. Поэтому вычисление оценки спектральной функции этим методом не является наилучшим, а в ряде случаев просто неприемлемым.

В оптическом диапазоне этот метод реализуется с помощью Фурье-спектрометров и сисамов, где временная корреляционная функция вычисляется с помощью интерферометра Майкельсона.

В дифракционных спектральных приборах оптического диапазона комплексный спектр, зависящий от времени, рассматривается в условиях «протягивания» колебания $s_R(t)$ мимо окна $r(t)$. В этом случае действие спектрального прибора описывается как [78]

$$S_M(\omega, t) = \int_{\omega_0 - \Delta\omega}^{\omega_0 + \Delta\omega} K(\omega, \omega') \exp(-i\omega't) \cdot S(\omega') d\omega'. \quad (74)$$

В выражении (74) ядро, т.е. комплексная аппаратная функция в форме $K(\omega, \omega') \exp(-i\omega't)$, есть необходимое и достаточное условие вычисления комплексного мгновенного спектра.

Оценка $\bar{G}(\omega)$ энергетического спектра определяется следующим образом:

$$\bar{G}(\omega) = \int_{-T_R}^{T_R} S_M(\omega, t) S_M^*(\omega, t) dt, \quad (75)$$

где T_R – время обработки реализации случайного процесса.

Как показано в работе [78], соотношение (75) приводится к форме

$$\bar{G}(\omega) = C_R \int_{\omega_1}^{\omega_2} R(\omega, \omega') G(\omega') d\omega', \quad (76)$$

где $C_R = const$, $R(\cdot) = |K(\cdot)|^2$ – энергетическая аппаратная функция, $G(\cdot) = |S(\cdot)|^2$ – энергетический спектр колебания $s(t)$, $t \in (-T_R/2, T_R/2)$.

В случае если:

$$R(\omega, \omega') = \frac{[\sin(\omega - \omega') \cdot T_a]^2}{(\omega - \omega')^2}, \quad (77)$$

имеет место оценка со спектральным окном Бартлетта [91].

Выражение (76) представляет оценку энергетического спектра оптического излучения при анализе дифракционным спектральным прибором оптического диапазона.

Третий способ способом получения оценки реализуется с помощью метода узкополосной фильтрации [91, 93], и функциональная схема устройства для получения оценки энергетического спектра стационарного случайного процесса на основе этого метода приведена на рисунке 20 [91].

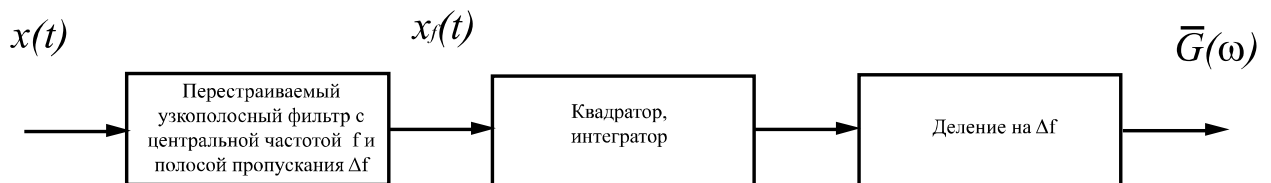


Рисунок 20 – Функциональная схема устройства для получения оценки энергетического спектра методом узкополосной фильтрации.

На вход фильтра (резонатора) подается реализация $x(t)$ случайного стационарного процесса с нулевым математическим ожиданием. После

фильтрации колебание $x_f(t)$ подвергается квадратичному детектированию и далее интегрированию. При этом усреднение производится на отрезке T , равном длительности обработки реализации. Фильтр должен обладать постоянной полосой пропускания Δf отличной от нуля, с центральной частотой f , которую можно изменять в диапазоне анализируемых частот спектра стационарного случайного процесса. Оказывается, что для получения состоятельной оценки энергетического спектра $\bar{G}(\omega)$ необходимо осуществить операцию фильтрации, позволяющую проводить усреднение в пределах некоторой полосы частот. Таким образом, окончательная оценка $\bar{G}(\omega)$ характеризует усредненную величину $x^2(t)$, которая содержит в себе составляющие в полосе частот $[f - 0,5\Delta f; f + 0,5\Delta f]$ и отнесена к ширине полосы Δf .

Изложенная в работах [91, 93] идея получения оценки энергетического спектра стационарного случайного процесса переносится в рамках данной диссертационной работы для оценки энергетического спектра оптического излучения с помощью многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона [10, 67]. Вместо перестраиваемого фильтра используется набор резонаторов, каждый из которых настроен на определенную частоту.

3.4 Выводы

1. Разработан новый метод бесконтактного параллельного анализа оптических спектров для решения задач контроля процессов горения и схема построения прибора контроля в форме многоканального спектрометра, реализующего этот метод.
2. Специфика разработанного теоретического подхода к анализу оптических спектров потребовала отдельного анализа резонаторной системы многоканального резонаторного спектрометра и всего прибора в целом.
3. Резонаторная система спектрометра рассмотрена как автономная линейная система, и ее исчерпывающая характеристика – аппаратная функция, введена в матричной форме впервые.

4. Получено соотношение в матричной форме, устанавливающее связь между истинным комплексным спектром и получаемым комплексным спектром на выходе резонаторной системы спектрометра.

5. Показано, что результат преобразования комплексного математического спектра в одном канале резонаторной системы многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона совпадает с выражением для текущего спектра функции времени, предложенным в работе Харкевича [50].

6. Выполнен переход от комплексного спектра к энергетическому, поскольку результатом спектрального измерения в оптическом диапазоне является энергетический спектр.

7. Получено основное соотношение теории спектральных измерений в матричной форме, которое устанавливает связь между истинным распределением энергии по спектру, отражающим состояние контролируемого процесса горения, и спектральным распределением энергии по спектру, полученным экспериментально с помощью многоканального спектрометра и дающим информацию получателю о состоянии этого процесса.

8. Показано, что многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона может быть охарактеризован двумя матричными аппаратными функциями: комплексной и энергетической.

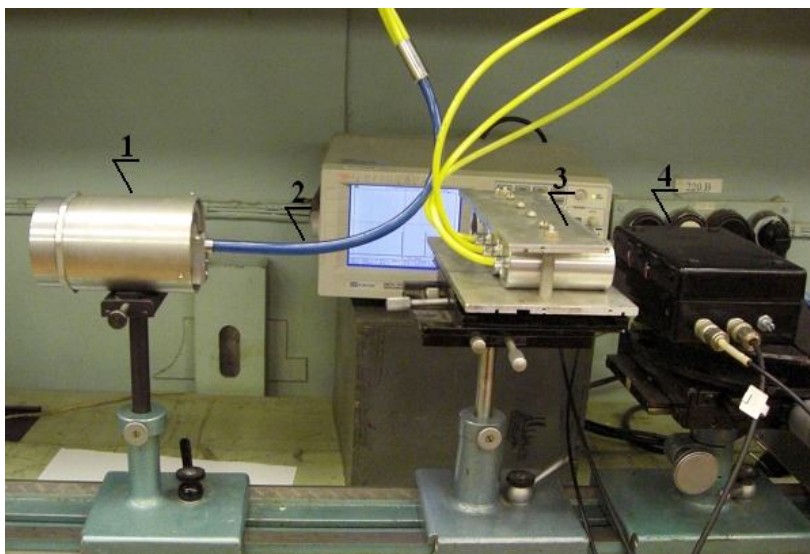
9. Установлено, что специфика измерения спектра оптического сигнала разработанным многоканальным резонаторным спектрометром соответствует способу получения оценки энергетического спектра на основе метода узкополосной фильтрации, который широко известен в теории статистических измерений.

10. Основные результаты данного раздела опубликованы в работах [7] – [9], [32], [59], [67], [81], [83], [85], [94] – [100].

4. Результаты экспериментального исследования

4.1 Аппаратурная реализация прибора контроля в форме многоканального спектрометра оптического диапазона

В лаборатории акустооптических устройств обработки информации Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения на основе патента [10] разработан лабораторный макет прибора контроля в форме многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона с передачей анализируемого сигнала по волоконно-оптическому жгуту. Детектирующая система спектрометра и блок обработки спектроскопической информации выполнены в одном корпусе и представляют собой приемно-регистрирующий блок. Фотография этого макета приведена на рисунке 21 [32, 98].



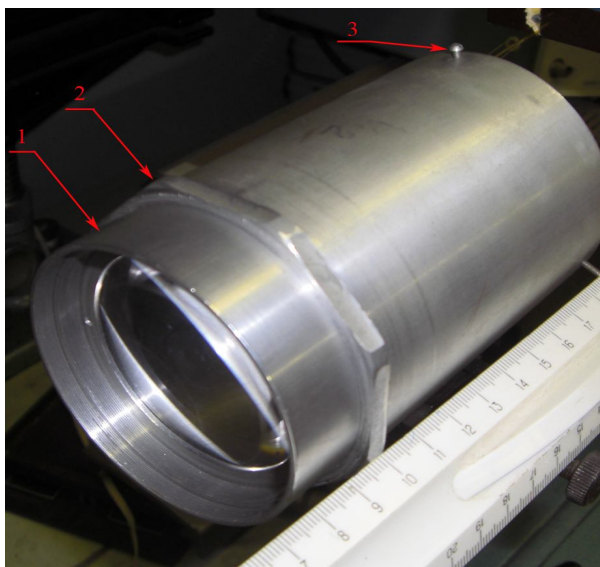
1 – формирующая оптика, 2 – волоконно-оптический жгут, 3 – три резонаторных блока, 4 – приемно-регистрирующий блок

Рисунок 21 – Лабораторный макет многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона

Лабораторный макет многоканального резонаторного спектрометра собран на оптической скамье, в качестве регистратора для отображения

спектрометрической информации использовался цифровой осциллограф GDS-840S.

Формирующая оптика выполнена в корпусе цилиндрической формы, который изготовлен из дюралюминия и имеет габаритные размеры 115x74 мм. Фотография формирующей оптики приведена на рисунке 22.



1 – цилиндрическая оправа входной сферической линзы, которая имеет возможность перемещаться вдоль оптической оси; 2 – фиксирующая гайка; 3 – настроечный винт

Рисунок 22 – Формирующая оптика

Фокусное расстояние линзы $F = 103$ мм.

Волоконно-оптический жгут состоит из 66 пластикового оптического волокна типа POF (Plastic Optical Fiber). Пластиковое волокно имеет больший диаметр сердцевины, чем кварцевое, что позволяет улучшить эффективность ввода оптического излучения в волокно. Являясь пластиком, волокно меньше подвержено механическим воздействиям. Диаметр сердцевины используемых в волоконно-оптическом жгуте равен 500 мкм, числовая апертура $NA = 0,5$, а длина оптических волокон равна 2 м. График

зависимости коэффициента затухания оптического волокна от длины волны (частоты) приведен на рисунке 23.

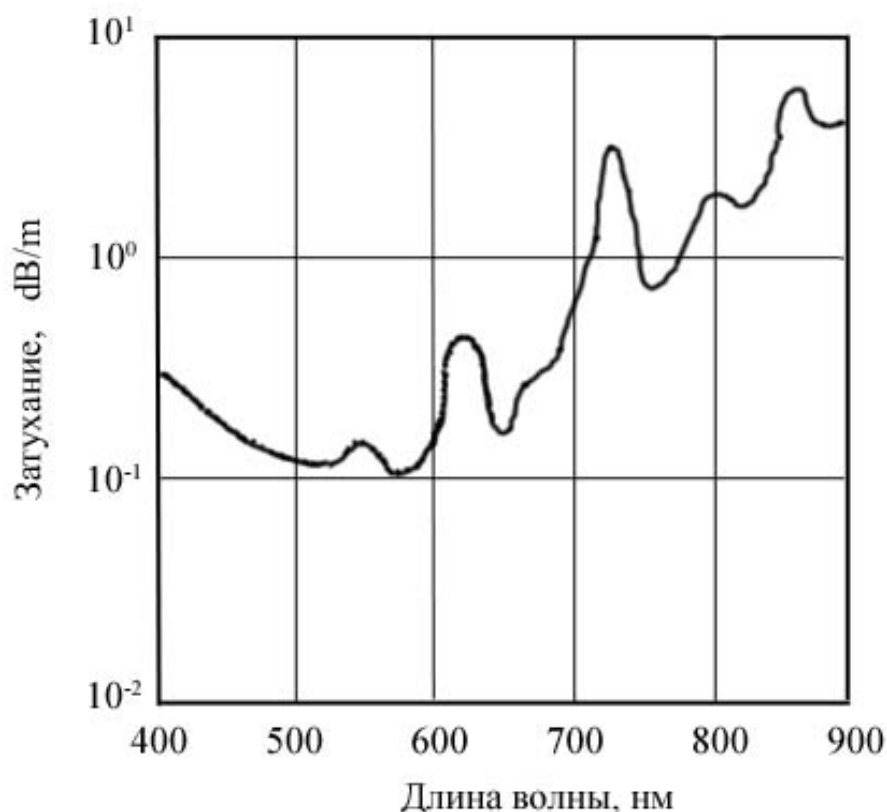


Рисунок 23 - График зависимости коэффициента затухания оптического волокна от длины волны

Формирующая оптика и волоконно-оптический жгут образуют волоконно-оптическую систему, используемую для ввода анализируемого излучения в резонаторные блоки, и удаления спектрометра на нужное расстояние от источника анализируемого излучения, т.е. очага горения.

Применение волоконно-оптического жгута позволяет передать в резонаторные блоки большую энергию анализируемого излучения, что улучшает чувствительность спектрометра.

Резонаторный блок выполнен в виде полого цилиндра из дюралюминия, в котором последовательно установлены в оправках из такого же материала первая коллимирующая линза, резонатор оптического диапазона и вторая коллимирующая линза. Внешний диаметр цилиндра равен 39 мм, внутренний – 30 мм, а его длина равна 82 мм. Перед первой

коллимирующей линзой на ее фокусном расстоянии в канале анализа спектра установлен держатель торца оптического волокна.

Фотография резонаторного блока приведена на рисунке 24.

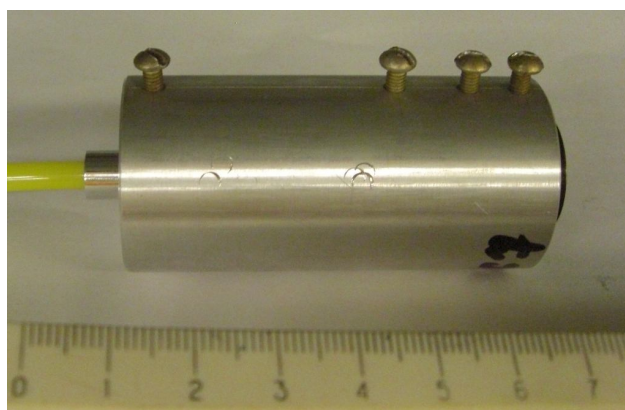


Рисунок 24 – Резонаторный блок

Выходные торцы волоконно-оптического жгута помещаются в держатели. Выполненный из дюралюминия держатель выходных торцов волоконно-оптического жгута изображен на рисунке 25. Внешний диаметр держателя выходного торца равен 30 мм, внутренний – 5 мм, его длина равна 10 мм.



Рисунок 25 – Держатель торца волоконно-оптического жгута

На рисунке 26 изображены резонаторы оптического диапазона (узкополосные интерференционные оптические фильтры) со средними длинами волн равными 460 нм, 530 нм и 680 нм соответственно. Диаметр оптических резонаторов равен 20 мм, толщина резонаторов на 530 нм и 680 нм равна 6 мм, толщина резонатора на 460 нм составляет 4 мм.

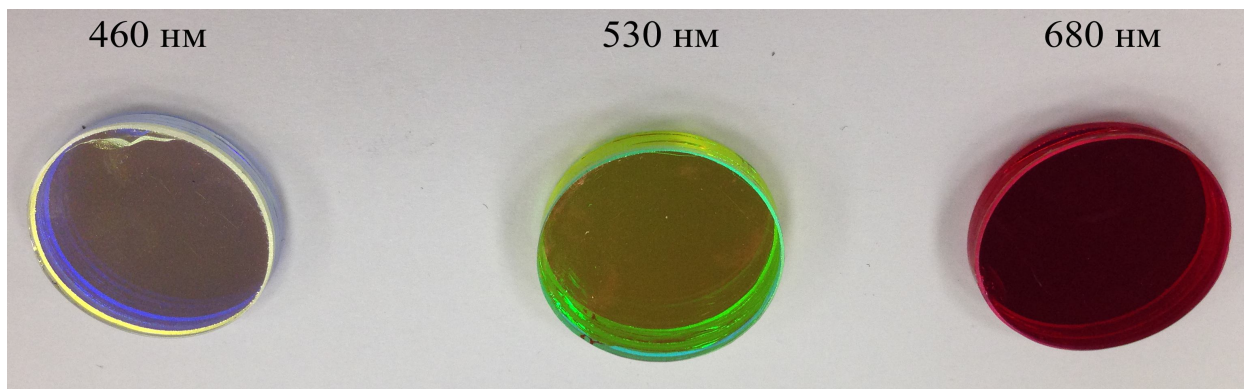


Рисунок 26 –Резонаторы оптического диапазона

Для установки резонаторов в резонаторные блоки были выполнены специальные оправы из дюралюминия.

Спектральные характеристики резонаторов оптического диапазона представлены на рисунках 27, 28 и 29. Эти характеристики были предоставлены фирмой – производителем.

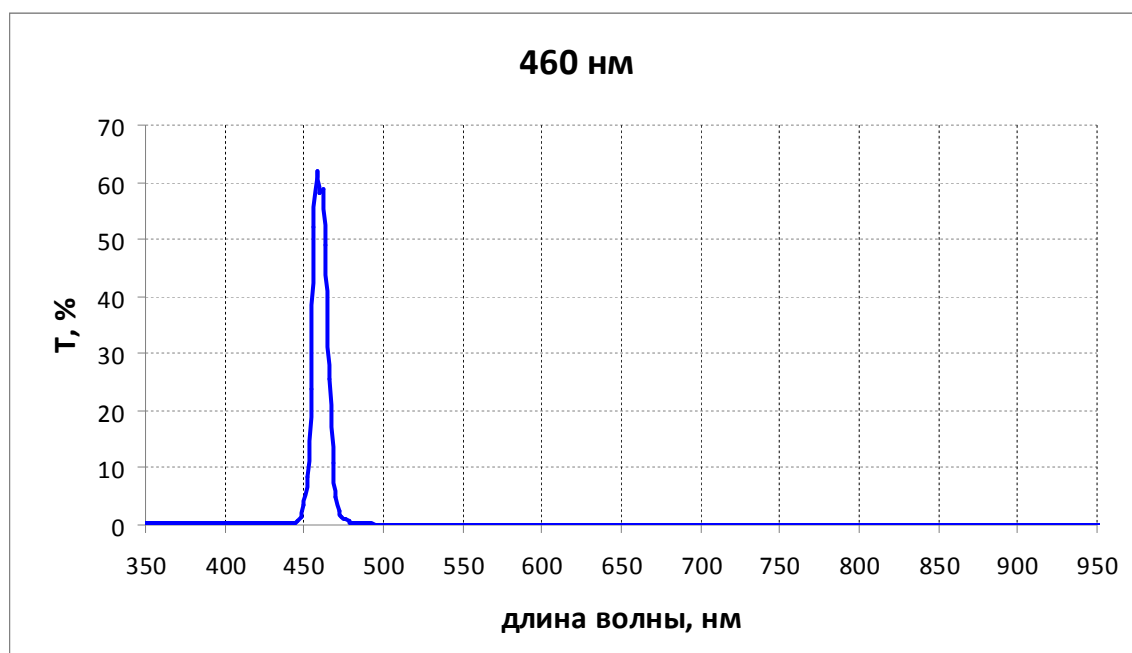


Рисунок 27 – Спектральная характеристика резонатора со средней длиной волны равной 460 нм

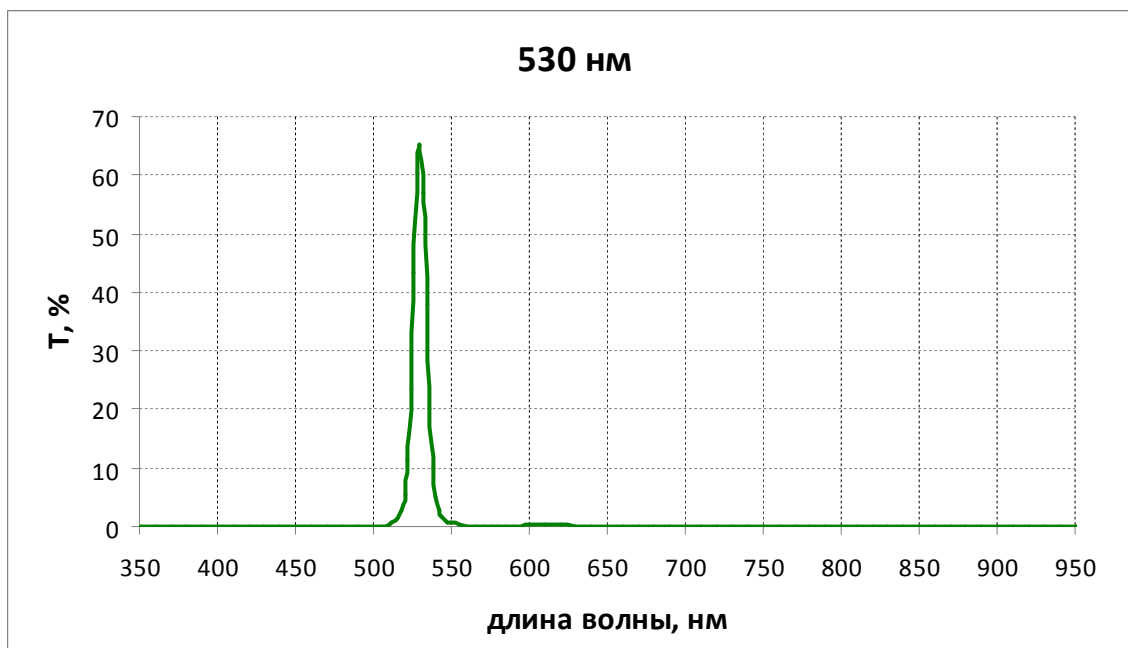


Рисунок 28 – Спектральная характеристика резонатора со средней длиной волны равной 530 нм

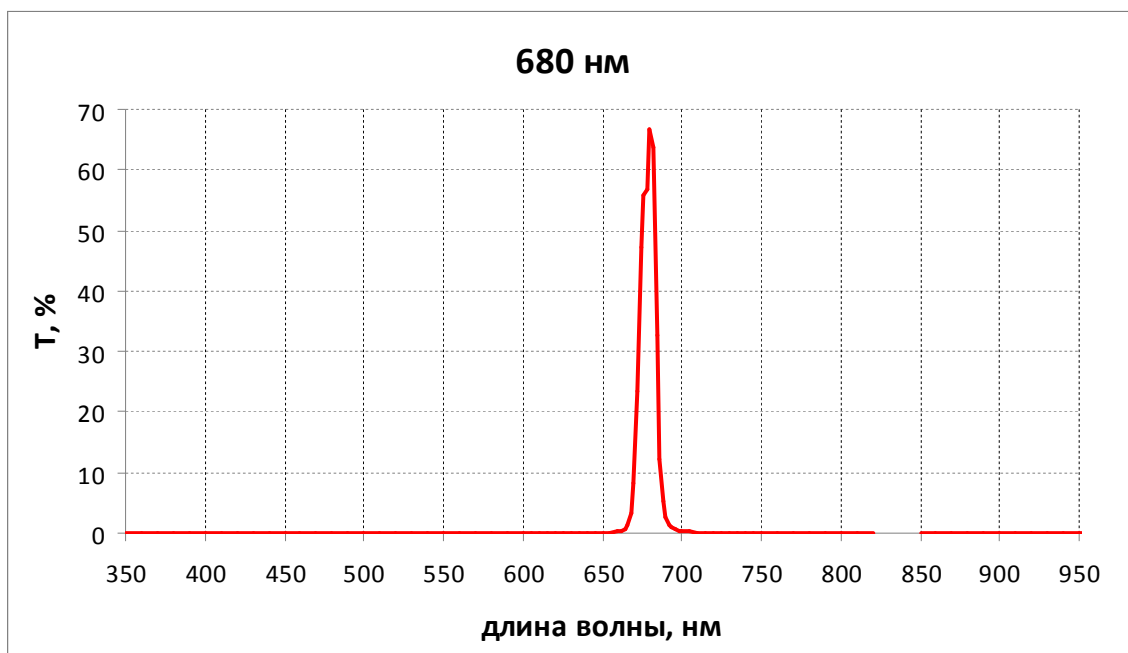


Рисунок 29 – Спектральная характеристика резонатора со средней длиной волны равной 680 нм

В лабораторном макете использовались резонаторы оптического диапазона, изготовленные фирмой «ФОТООПТИК». Данные резонаторы относятся к низкой ценовой категории, поэтому имеют относительно

широкую полосу пропускания, что не позволяет получить высокого разрешения.

В настоящее время производители резонаторов оптического диапазона выпускают широкую номенклатуру резонаторов (узкополосных интерференционных оптических фильтров) с достаточно узкой полосой пропускания и в широком диапазоне длин волн. При необходимости можно разработать резонатор с шириной пропускания 1 нм и менее для любой длины волны в ультрафиолетовом, видимом или инфракрасном диапазонах. Номенклатура интерференционных узкополосных оптических фильтров видимого диапазона, выпускаемых фирмой Omega Optical, Inc [101] представлена в приложении 2.

В качестве согласующих элементов используются коллимирующие линзы с фокусным расстоянием равным 35 мм. Оправы для линз также были выполнены из дюралюминия. На рисунке 30 изображена фотография коллимирующей линзы в оправе и без оправы, соответственно.



Рисунок 30 – Коллимирующая линза

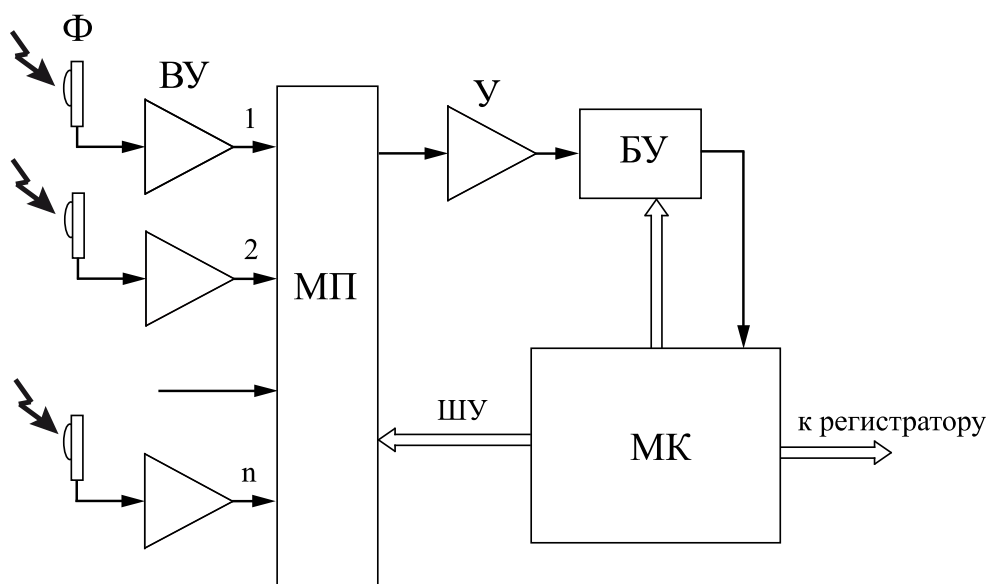
Фотография приемно-регистрирующего блока представлена на рисунке 31.



Рисунок 31 – Приемно-регистрационный блок

Задача приемно-регистрающего блока состоит в детектировании оптических сигналов и дальнейшей их обработке для каждого канала многоканального резонаторного спектрометра, а также отображении спектроскопической информации в воспринимаемом оператором виде на осциллографе.

Структурная схема приемно-регистрающего блока приведена на рисунке 32.



Φ – фотоприемники, ВУ – входные усилители, МП – мультиплексор, У – усилитель, БУ – блок усиления, МК – микроконтроллер, ШУ – шина управления мультиплексором

Рисунок 32 – Структурная схема приемно-регистрающего блока

В данном блоке предусмотрена как ручная регулировка коэффициента усиления для компенсации искажений уровней сигналов, поступающих с фотоприемников каждого канала анализа спектра, так и автоматическая регулировка [32, 98]. Искажения уровней сигналов возникают в результате неравномерностей характеристик оптического волокна, резонаторов и фотоприемников. Эта регулировка учитывает коэффициенты $P_k(\omega_k)$, $K_{kk}(\omega_k, \omega')$, $B_{kk}(\omega')$ в выражении (68).

Ручная регулировка предусмотрена у входных усилителей, которые усиливают сигнал, поступающий непосредственно с выходов фотоприемников. Заданный коэффициент усиления, для каждого канала, выставляется единожды при настройке оператором.

Автоматическая регулировка коэффициентов усиления предусмотрена в блоке усиления, который усиливает сигнал, поступающий с мультиплексора.

Перед измерением производится автоматическая калибровка устройства, причём анализируется каждый канал для исключения погрешностей измерения. Процесс калибровки автоматизирован, и для осуществления данной операции достаточно подать излучение одинаковой интенсивности и перевести устройство в режим калибровки. После считывания уровней на каждом канале микроконтроллер устройства вычислит коэффициенты, необходимые для компенсации разброса параметров элементов, входящих в состав устройства, и будет их учитывать в дальнейшем при работе в нормальном режиме. Следует заметить, что калибровку устройства желательно проводить с максимальным коэффициентом усилением усилителя. Объясняется это тем, что благодаря усилению, вносимому этим усилителем, общая крутизна преобразования возрастает (на макете — в 26 раз), следовательно, и разница относительных неравномерностей будет так же увеличена, что при ограниченном разрешении АЦП микроконтроллера означает увеличение точности калибровки. В устройстве применены фотоприемники фирмы SILONEX

SLSD-71N200 с интегральным встроенным усилителем. Такие фотоприемники упрощают конструкцию и избавляют от применения дополнительных усилителей в устройстве. Кроме того, для их питания необходимо напряжение 5 В, что совпадает с напряжением питания микроконтроллера.

Приемно-регистрирующий блок работает следующим образом: сигналы от фотоприёмников, величина каждого из которых зависит от интенсивности излучения на данной частоте (длине волны), поступают на входные усилители с ручной регулировкой коэффициентов усиления. После усиления сигналы от входных усилителей поступают на входы мультиплексора CD4067. Основой устройства является микроконтроллер ATmega8L. Микроконтроллер последовательно коммутирует посредством шины управления мультиплексором каждый из сигналов на один выход мультиплексора, подключённый к усилителю. Микроконтроллер подает на мультиплексор четырехразрядный двоичный код, четыре разряда обусловлены шестнадцатью каналами мультиплексора. Вход мультиплексора, соответствующий поданному коду, коммутируется на его выход, и сигнал поступает на усилитель. Усилитель построен на базе операционного усилителя, включённого в стандартную схему усиления без инвертирования. Этот усилитель обладает управляемым коэффициентом усиления и служит для грубой установки чувствительности прибора. Его коэффициент усиления по постоянному напряжению от 1 до 26 также задается оператором, только уже в процессе работы. Разрядность АЦП составляет 10 бит, что соответствует 1024 уровням при диапазоне измеряемых напряжений от 0 до 5 В, следовательно шаг преобразования АЦП составляет около 0,005 В при коэффициенте усиления усилителя U равным единице. Также микроконтроллер посылает значение индивидуального для каждого канала коэффициента коррекции в регулируемый первый усилитель блока усиления, задавая его коэффициент усиления. Микроконтроллер изменяет коэффициент усиления этого

усилителя при каждом переключении мультиплексора на следующий канал так, что компенсируется искажение сигналов поступающих с фотоприемников. С выхода первого усилителя сигнал поступает на второй регулируемый микроконтроллером усилитель блока усиления. Коэффициент усиления второго усилителя, устанавливаемый микроконтроллером, зависит только от максимального уровня сигналов всех каналов. Если максимальный уровень сигнала превышает допустимую величину, микроконтроллер автоматически уменьшает коэффициент усиления этого усилителя, приводя величину сигнала канала с наибольшим уровнем сигнала из всех к максимально допустимому значению. Если же уровень максимального сигнала какого-то из всех каналов будет много меньше максимально допустимого значения, микроконтроллер автоматически будет увеличивать коэффициент усиления этого усилителя, пока не приведёт значение этого уровня к максимально допустимому значению. Это решение упрощает наблюдение за сигналом, оптимизируя его для более детального считывания информации с фотоприемников. С выхода блока усиления сигнал поступает на вход АЦП микроконтроллера для оцифровки. Микроконтроллер производит обработку этого сигнала и выводит на осциллограф информацию об уровне сигнала каждого канала в виде столбчатой диаграммы.

Для создания блока была подобрана конкретная элементная база, причём за основу был взят микроконтроллер ATmega8L, возможности которого позволяют экономично подойти к реализации устройства с точки зрения, как общего количества использованных компонентов, так и габаритов устройства. Цифровая обработка и считывание данных позволяют избежать флуктуаций, характерных для аналоговых элементов индикации и обработки, но в то же время, микроконтроллер обладает ограниченными скоростными возможностями и точностью. Фотоприемники, использованные для создания блока, избавляют от необходимого применения внешних предусилителей, благодаря интегрированным схемам усиления.

На рисунке 33 представлен алгоритм работы программы, по которой работает микроконтроллер. Программа — важнейшая составляющая правильной работы устройства, так как микроконтроллер является его основой. Программа написана на языке «СИ» в среде компилятора CodeVision AVR, который позволяет составлять различные программы для большой номенклатуры микроконтроллеров AVR.

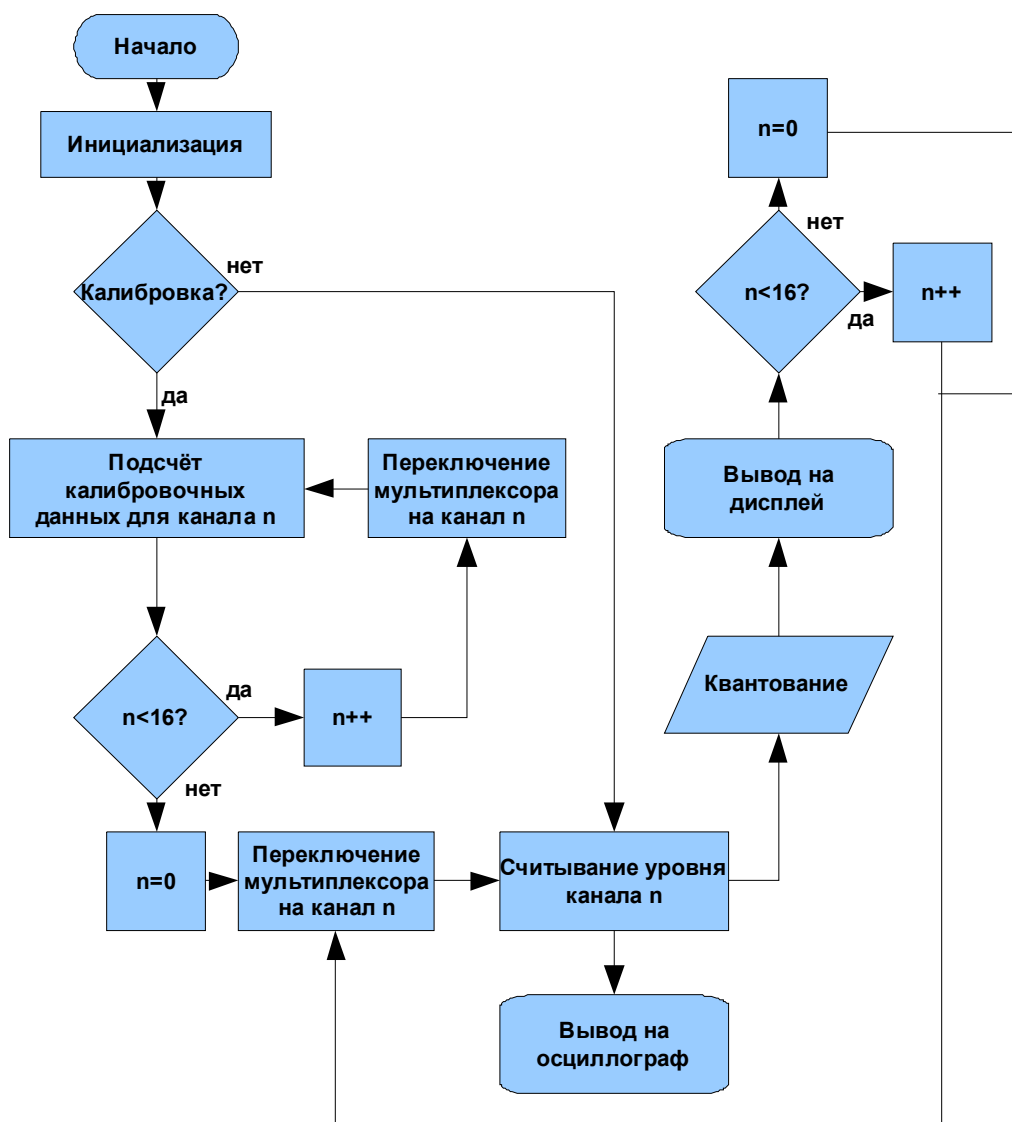


Рисунок 33 – Алгоритм программы микроконтроллера

Экспериментальные исследование данного лабораторного макета проведены, и получены предварительные результаты.

4.2 Результаты экспериментального исследования лабораторного макета многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона

При проведении экспериментальных исследований лабораторного макета многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона в качестве тестовых источников оптического излучения использовались лампа накаливания и вольфрамовая галогенная лампа.

Изначально в качестве линии передачи анализируемого излучения использовался волоконно-оптический жгут, состоящий из трех многомодовых волокон. Но передаваемой мощности было недостаточно для детектирования сигнала. Впоследствии этот жгут был заменен на волоконно-оптический жгут, состоящий из 66 волокон и разделенного на три выходных торца, в результате каждый резонатор оптического диапазона возбуждался не единственным волокном, а с помощью жгута волокон, состоящего из 22 многомодовых волокон, что значительно увеличило чувствительность прибора.

Зависимость чувствительности прибора от количества волокон, используемых в жгуте для передачи анализируемого излучения в отдельный резонатор, была подтверждена экспериментом, в результате которого была установлена зависимость уровня выходного сигнала от количества волокон. Нормированная гистограмма представлена на рисунке 34.

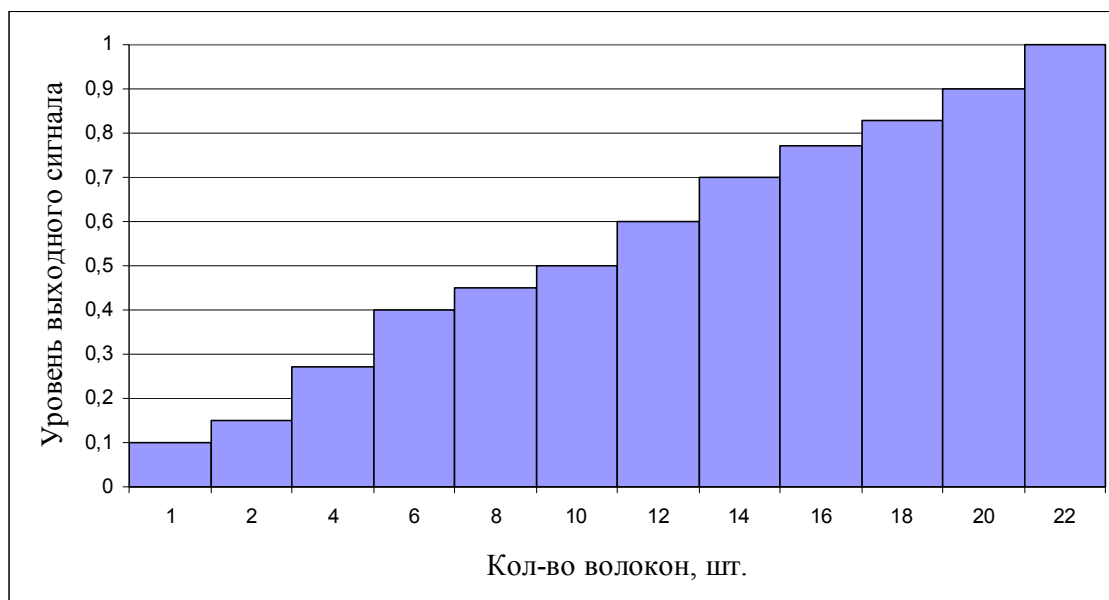


Рисунок 34 – Зависимость уровня выходного сигнала от количества оптических волокон в жгуте

Затем были измерены значения мощности оптического излучения на выходе функциональных узлов лабораторного макета. Для этого был использован измеритель оптической мощности ПТ2000. Эксперимент проводился для лампы накаливания 60 Вт. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2 Значения мощности оптического излучения на выходе функциональных узлов лабораторного макета многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона

Функциональный узел лабораторного макета	Мощность на выходе функционального узла, мВт
Формирующая оптика	0,87
Волоконно-оптический жгут	От 0, 04 до 0,05 (в зависимости от канала)
Волоконно-оптический жгут + резонаторный блок (с резонатором со средней длиной волны 680 нм)	$1,91 \times 10^{-5}$

Волоконно-оптический жгут + резонаторный блок (с резонатором со средней длиной волны 530 нм)	$1,05 \times 10^{-4}$
Волоконно-оптический жгут + резонаторный блок (с резонатором со средней длиной волны 430 нм)	$9,55 \times 10^{-6}$

Как видно из таблицы 2, по волоконно-оптическому жгуту (одного канала) передано 17% анализируемого излучения, поступившего на общий входной торец жгута, что значительно превышает значение, приведенное в работе [6], где говорится всего лишь о нескольких процентах введенного излучения в оптическое волокно.

Полученная гистограмма на рисунке 34 и результаты, представленные в таблице 2, экспериментально подтверждают, что чувствительность прибора возрастает при применении волоконно-оптического жгута в качестве линии передачи анализируемого оптического сигнала, причем, не приводит к ухудшению его разрешающей способности по сравнению с существующими спектральными приборами, что повышает чувствительность контроля процессов горения на основе предложенного метода.

Перед проведением экспериментальных исследований разработанного лабораторного макета, была экспериментально получена спектральная характеристика металлогалогенной лампы. Для снятия спектральной характеристики использовался спектрометр фирмы Avantes AvaSpec-3648. Полученная спектральная характеристика лампы приведена на рисунке 35.

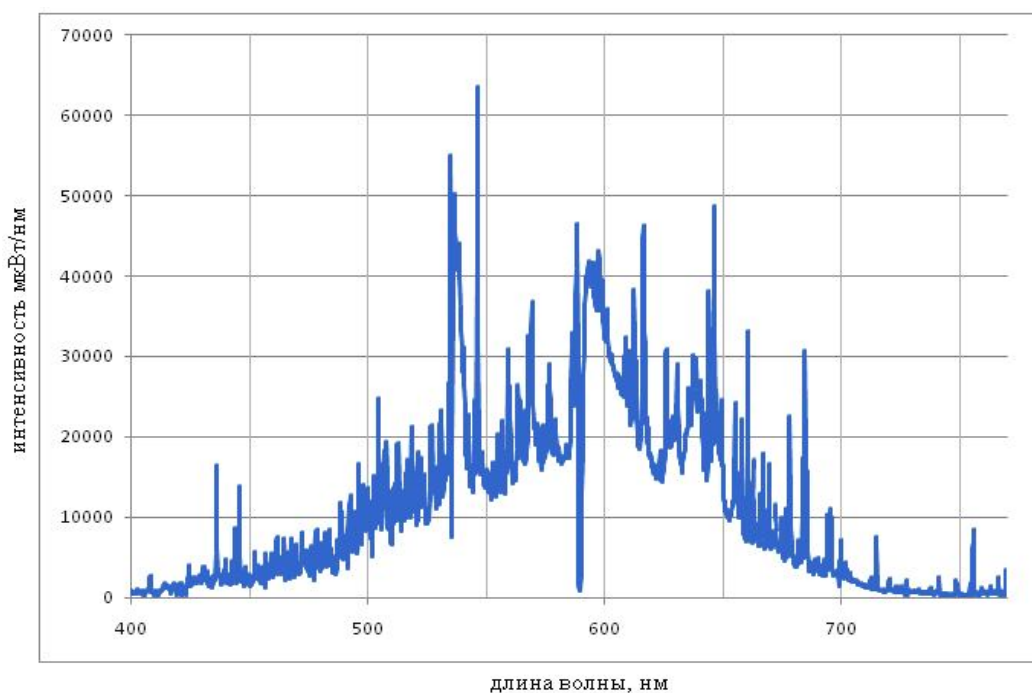


Рисунок 35 – Спектральная характеристика металлогалогенной лампы

Металлогалогенная лампа использовалась в качестве опорного источника оптического излучения для калибровки прибора. Калибровка необходима для компенсации вносимых искажений оптического сигнала в каждом канале спектрометра. С помощью усилителей с ручной регулировкой усиления, в каждом канале были выставлены определенные коэффициенты усиления.

После калибровки спектрометра по опорному источнику излучения были сняты спектральные диаграммы лампы накаливания и вольфрамовой галогенной лампы.

Фотография оптического излучения, прошедшего фильтрацию, представлена на рисунке 36.

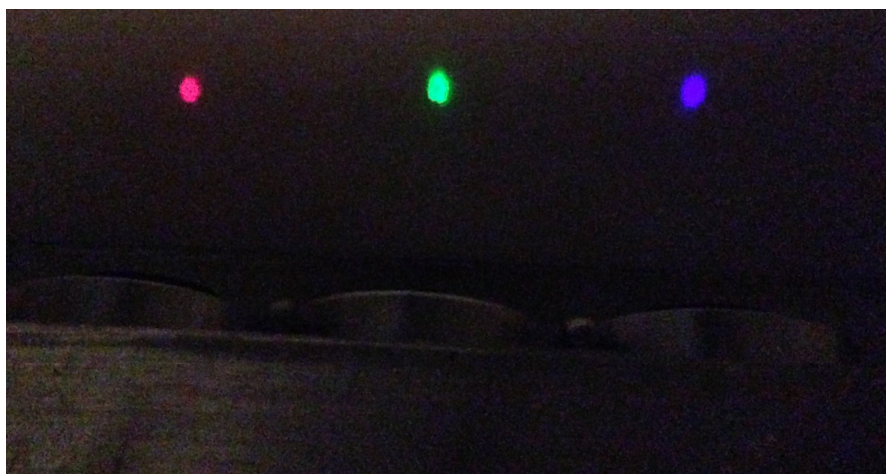


Рисунок 36 - Оптическое излучение, прошедшее фильтрацию

Отсчетные значения спектра излучений лампы накаливания и вольфрамовой галогенной лампы, полученные в результате проведенного эксперимента, приведены рисунках 37 и 38.

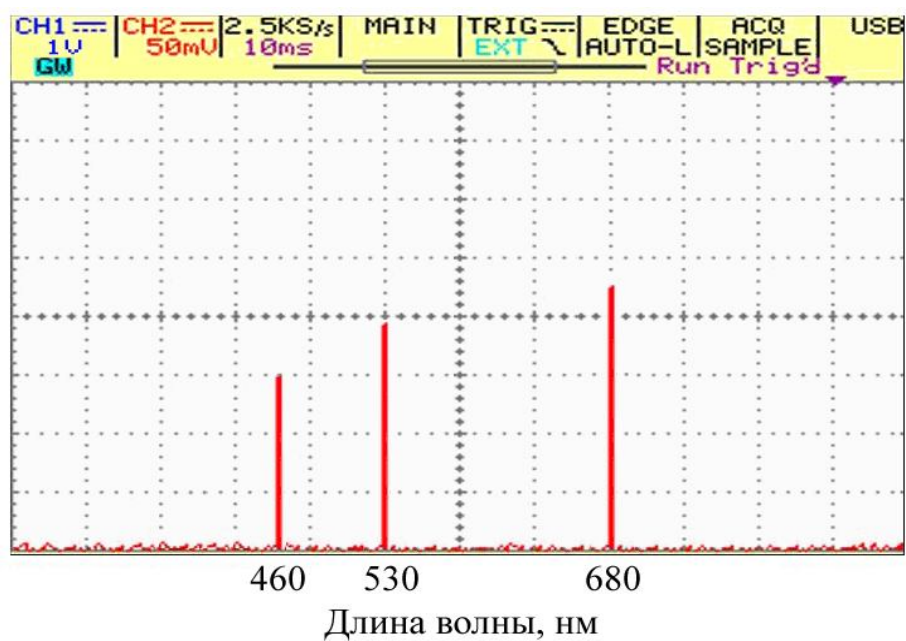


Рисунок 37 - Отсчетные значения спектра излучения лампы накаливания

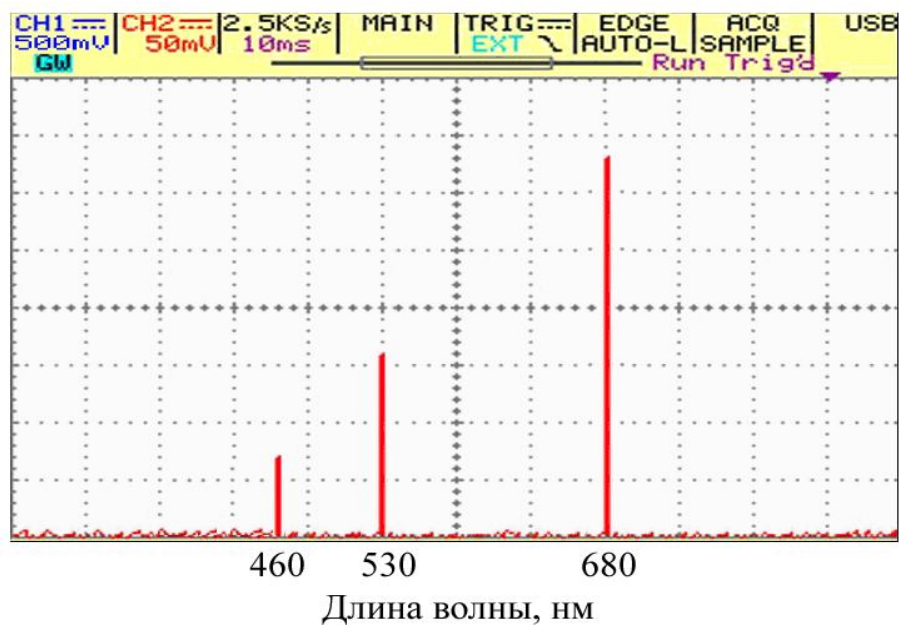


Рисунок 38 - Отсчетные значения спектра излучения вольфрамовой галогенной лампы

Отсчетные значения спектра излучения вольфрамовой галогенной лампы, полученные экспериментально с помощью разработанного прибора контроля, были графически сопоставлены со спектральной диаграммой этой лампы, данной производителем (фирма OceanOptics). На рисунке 39 приведены сопоставленные спектральные характеристики.

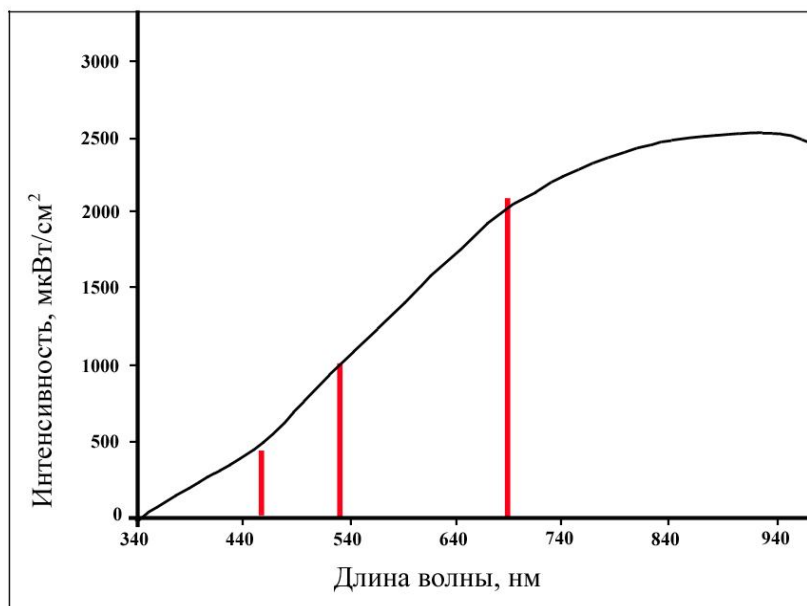


Рисунок 39 - Спектральные диаграммы вольфрамовой галогенной лампы

Спектральную характеристику вольфрамовой галогенной лампы, предоставленную производителем, можно считать эталонной.

Как видно из рисунка отклонение значения интенсивности анализируемого оптического излучения, полученное экспериментально с помощью разработанного прибора, от эталонного значения для длины волны 460 нм составляет 6 %, для 680 нм – 4%, при условии, что для длины волны 530 нм было принято нулевое отклонение. Отсюда можно сделать вывод, что погрешность разработанного прибора является приемлемой.

Кроме того, было исследовано прохождение оптического излучения (вольфрамовой галогенной лампы) через среду распространения, в качестве которой были использованы оптические стекла: СС-15, ЗС-8 и КС-10. Оптические стекла были изготовлены фирмой ООО «ФОТООПТИК» и их спектральные характеристики представлены на рисунках 40,41 и 42.

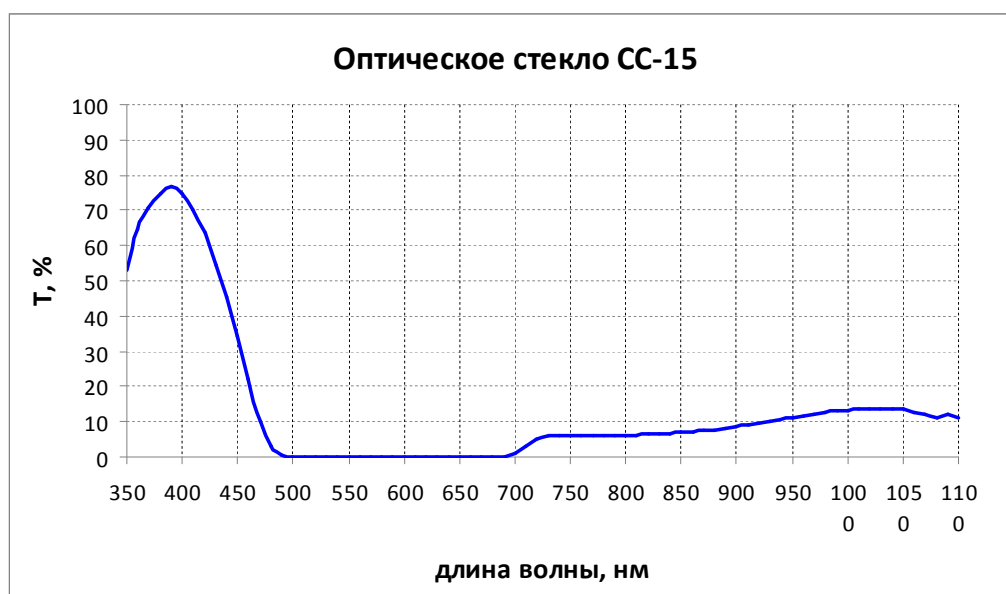


Рисунок 40 – Спектр пропускания оптического стекла СС-15

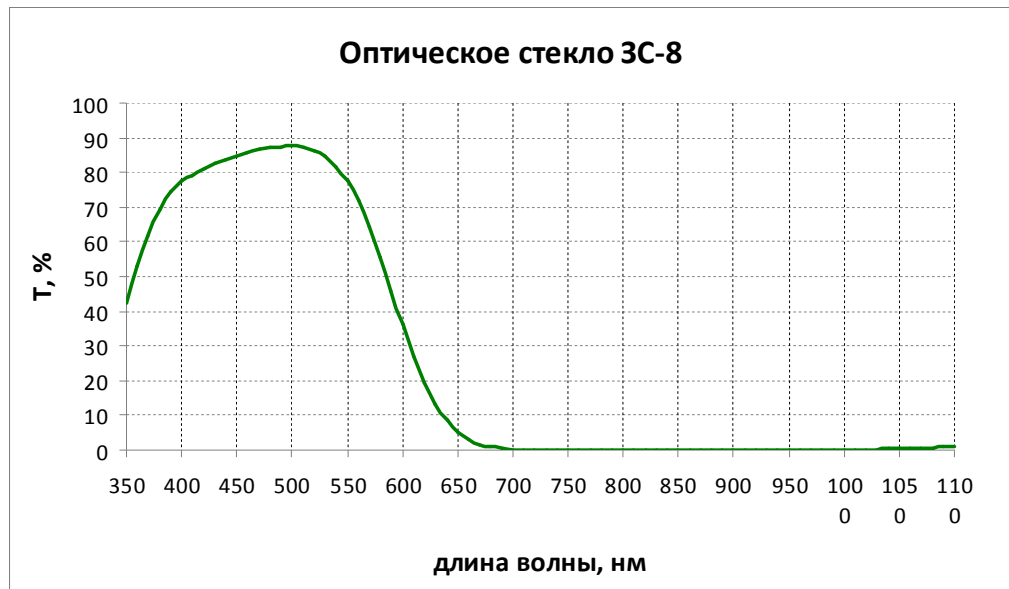


Рисунок 41 – Спектр пропускания оптического стекла ЗС-8

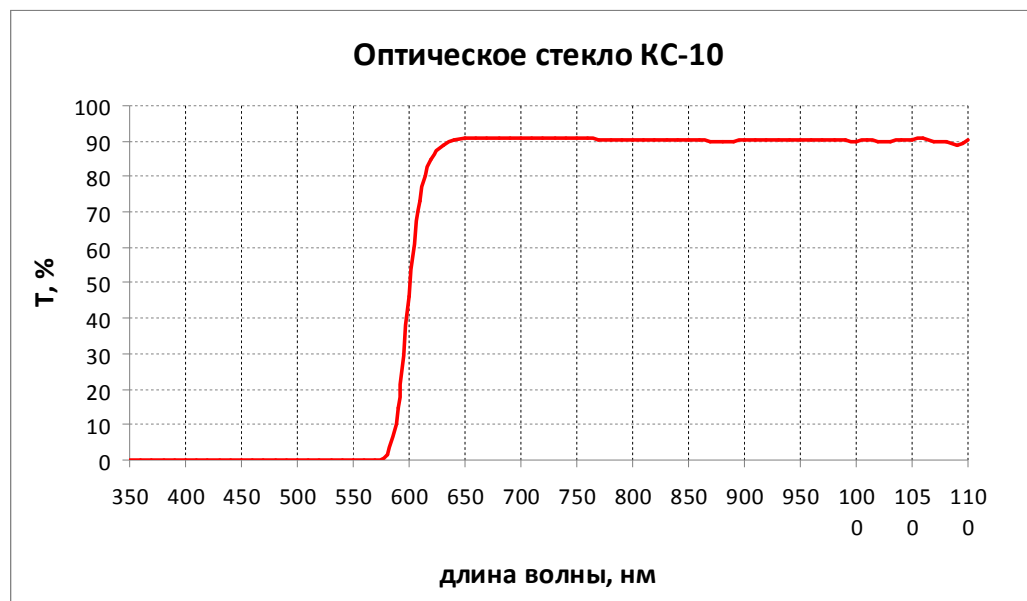


Рисунок 42 – Спектр пропускания оптического стекла КС-10

Спектральные диаграммы вольфрамовой галогенной лампы, полученные разработанным спектрометром при просвечивании оптических стекол, представлены на рисунках 43, 44 и 45.

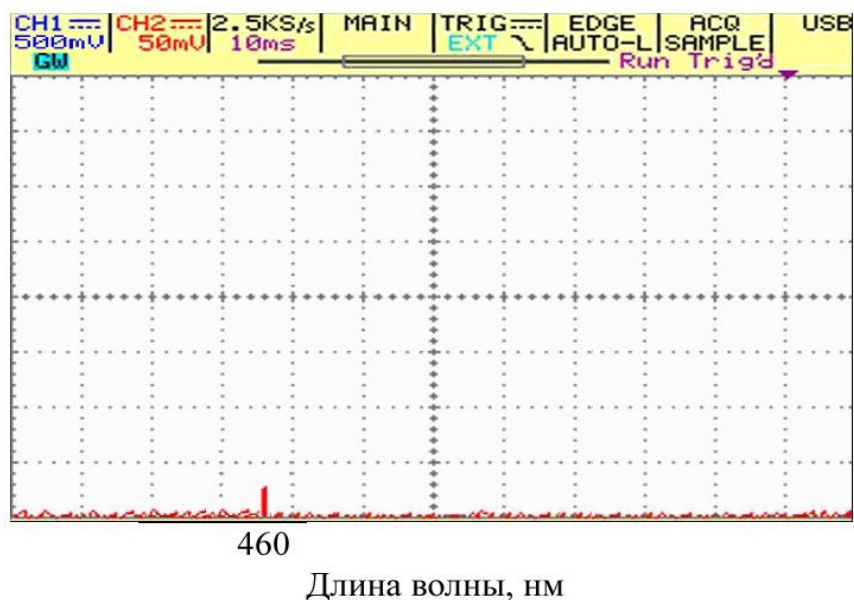


Рисунок 43 – Спектральная диаграмма вольфрамовой галогенной лампы при просвечивании оптического стекла СС-15

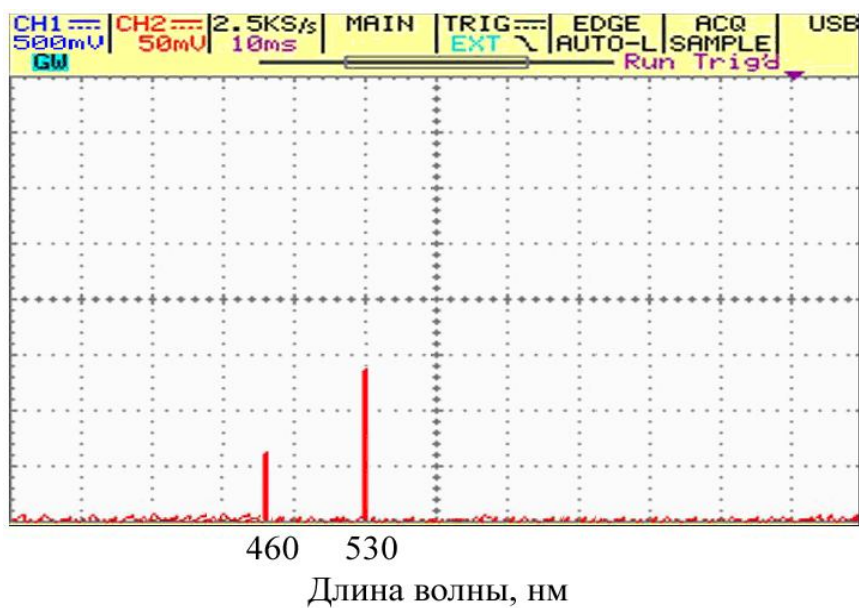


Рисунок 44 – Спектральная диаграмма вольфрамовой галогенной лампы при просвечивании оптического стекла ЗС-8

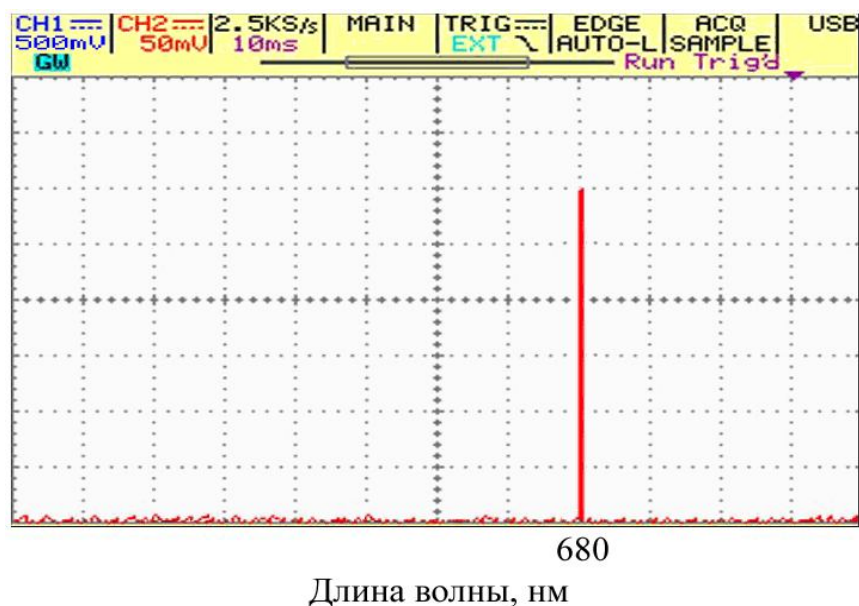


Рисунок 45 – Спектральная диаграмма вольфрамовой галогенной лампы при просвечивании оптического стекла КС-10

Как видно из эксперимента, полученные спектральные диаграммы вольфрамовой галогенной лампы соответствуют спектрам пропускания оптических стекол. Так, при просвечивании оптического стекла СС-15 сигнал поступал только с одного канала спектрометра, в котором был установлен резонатор со средней длиной волны 460 нм, попадающий в полосу пропускания оптического стекла, в других каналах сигнал отсутствовал (рисунок 43). Причем наблюдалось ослабление сигнала с выхода резонаторного блока примерно на -4,8 дБ, что согласуется со спектром пропускания оптического стекла. При просвечивании оптического стекла ЗС-8 сигнал наблюдался в двух каналах, в которых были установлены резонаторы со средними длинами волн: 460 и 530 нм, уровни сигналов также были снижены на -0,7 дБ и соответствовали спектру пропускания оптического стекла (рисунок 44). Резонатор со средней длиной волны равной 680 нм попадал в полосу блокировки, и сигнал с этого канала отсутствовал. При просвечивании оптического стекла КС-10, в его полосу пропускания попадал только один резонатор со средней длиной волны – 680 нм, уровень сигнала был ослаблен на -0,45 дБ (рисунок 45).

Полученные результаты экспериментальных исследований являются обнадеживающими, доказывают работоспособность этого устройства и подтверждают новый метод бесконтактного анализа оптических спектров, основанный на явлении резонанса в n параллельных каналах.

Полученные результаты являются основой при разработке технических средств бесконтактной оптической спектроскопии такого типа для решения задач контроля процессов горения.

4.3 Области возможного применения многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона

4.3.1 Многоканальный спектрометр для решения задач контроля процессов горения

Одним из важных направлений химико-физических исследований является изучение процессов горения, где спектроскопические методы признаны наиболее информативными [102]. Изучение процессов горения является актуальным в деле решения глобальной проблемы пожарной и экологической безопасности, в двигателестроении (двигатели внутреннего сгорания, ракетные двигатели) и в теплоэнергетике для оптимизации процессов горения. Экспериментальные исследования процессов горения позволяют установить в рамках решения проблемы пожарной безопасности достоверные модели сигналов, генерируемых очагами горения, и помех, на фоне которых эти сигналы действуют, что открывает путь для создания более совершенной аппаратуры раннего и достоверного обнаружения очагов пожара [102]. Поскольку крупные пожары могут приводить к появлению зон экологического бедствия, то исследования процессов горения лежат в русле решения задач экологической безопасности.

К числу задач контроля процессов горения можно отнести проблему ранней диагностики аварийных состояний жидкостных ракетных двигателей [103, 104]. Для обеспечения безопасного вывода грузов и экипажей на

околоземную орбиту и решения других задач, связанных с применением ракетной техники, ракетные двигатели должны обладать максимальной отказоустойчивостью в работе. Проведение такой диагностики ракетного двигателя необходимо во время наземных испытаний для предупреждения различных неисправностей в узлах и агрегатах двигателей, которые могут привести к нарушению работоспособности или полному отказу двигателя [103].

Необходимость раннего обнаружения неисправности в двигателе обуславливается тем, что своевременное предупреждение развития аварийных ситуаций позволяет сохранить не только сам двигатель, но и предотвратить разрушения стендовых сооружений, пусковых установок или носителя в целом [103].

Данная диагностика основана на слежении за появлением и динамикой свечения в факеле ракетного двигателя спектральных линий конструкционных материалов. Появление или изменение динамики свечения таких спектральных линий служит сигналом начала нештатной работы ракетного двигателя и разрушения его или его агрегатов [104].

Спектральный состав излучения факела ракетного двигателя обусловлен наличием трех составляющих [104]:

- сплошного спектра, излучаемого в основном частицами сажи;
- молекулярных полос, излучаемых молекулами и радикалами – продуктами сгорания и молекулами, образующимися из продуктов разрушения двигателя;
- атомарных линий химических элементов – продуктов разрушения двигателя;

Сплошное излучение факела ракетного двигателя сосредоточено, в основном, в области $\lambda > 500$ нм.

Молекулярные полосы в спектре излучения факела ракетного двигателя обусловлены продуктами сгорания CO_2 , H_2O , CO , OH , CH , C_2 . В тех случаях, когда в состав горючего или окислителя входит связанный азот,

в спектрах излучения факела двигателя могут присутствовать полосы молекул NO, NH, CN. При разрушении конструкционных материалов двигателя в спектре могут появляться полосы излучения молекул FeO, NiO, CuOH и т.п.

Атомарные линии в спектре излучения факела жидкостного ракетного двигателя соответствуют, в основном, электронным переходам атомов химических элементов, являющиеся продуктами разрушения конструкционных материалов двигателя: Fe, Cr, Al, Mg и др. Большинство наиболее интенсивных линий этих атомов лежит в коротковолновой области спектра 250 – 500 нм, и представлены в таблице 3 [103].

Таблица 3 Атомарные линии химических элементов продуктов разрушения конструкционных материалов

Элемент	Длина волны, нм
Al	308.22, 309.27, 394.4, 396.15
Ca	393.37, 396.85, 422.67, 443.5, 445.48, 445.58, 534.95, 558.88, 559.45, 585.75, 610.26, 612.22, 616.22, 616.95, 643.91, 644.98, 646.26, 647.17, 649.38, 649.97, 671.77, 714.81, 720.22, 732.62
Cr	357.87, 359.35, 360.53, 396.34, 425.44, 427.48, 428.97, 434.45, 435.18, 520.45, 520.6, 520.84
Cu	301.08, 303.61, 306.34, 310.86, 324.75, 327.4, 330.8, 353.04, 406.26, 465.11, 510.55, 515.32, 521.82, 570.02, 578.21, 793.31, 809.26
Fe	344.06, 358.12, 371.99, 373.49, 373.71, 374.56, 374.83, 374.95, 385.99, 388.63, 404.58, 438.35
Mn	403.08, 403.31, 403.45, 404.14
Ni	341.48, 344.63, 345.85, 346.17, 349.3, 351.51, 352.45, 356.64, 361.94

В данной диссертационной работе разработан прибор контроля в форме многоканального спектрометра, реализующего резонансный метод бесконтактного анализа оптических спектров, и, следовательно, способный

решить поставленную задачу диагностики жидкостного ракетного двигателя. Применяемый волоконно-оптический жгут позволяет удалить прибор на безопасное для него расстояние от ракетного двигателя [10, 105].

Для диагностики ракетного двигателя с целью предотвращения его возможного разрушения достаточно анализировать определенные участки спектра излучения факела двигателя, в которых лежат атомарные линии металлов, входящих в состав конструкционных материалов двигателя. Таким образом, количество каналов анализа спектра определяется количеством выделяемых участков спектра излучения факела.

Проблемой бесконтактной диагностики ракетного двигателя спектроскопическими методами активно занимаются в ЦНИИМАШ и в Исследовательском центре имени М.В. Келдыша [103, 104]. Но способ бесконтактного спектрального анализ факела жидкостного ракетного двигателя, рассмотренный в работах [103, 104], кардинально отличается от способа бесконтактного анализа, предлагаемого в рамках данной диссертационной работы [105]. Суть бесконтактного анализа в работах [103, 104] заключалась в том, что используемый спектрометр не имел прямого контакта с двигателем, а был смонтирован на юстировочном столике и находился на некотором расстоянии от него. При этом излучение факела двигателя непосредственно падало на вход спектрометра, в результате чего появлялся целый ряд негативных последствий, например акустическое воздействие двигателя во время его пуска и работы на прибор, приводящее к ухудшению его разрешающей способности [103]. Более того, при проведении экспериментов использовались спектрометры на основе дифракционной решетки, имеющие ряд недостатков, освещенных в обзоре данной диссертационной работы.

Принцип построения разработанного многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона с применением волоконно-оптического жгута позволяет расположить прибор контроля вдали от двигателя и тем самым устранить негативное воздействие работы двигателя на результаты

спектральных измерений. К тому же данный прибор не требует жесткой конструкции и точной юстировки, в отличие от спектрометров, рассматриваемых в работах [103, 104].

Из таблицы 3 видно, что наибольшее число линий сосредоточено в диапазоне 350-410 нм. Для того чтобы по спектру отождествить химический элемент, из указанных в таблице, достаточным является спектральное разрешение 1 нм [103], и для успешного решения поставленной задачи достаточно иметь 30 каналов анализа спектра многоканального спектрометра.

Разработанный многоканальный резонаторный спектрометр позволяет проводить спектральные измерения в реальном масштабе времени и может быть эффективно использован не только в системах диагностики, но и в системах аварийной защиты для предотвращения возгорания жидкостного ракетного двигателя или развития интенсивных эрозионных процессов.

Другой задачей контроля процессов горения является раннее и достоверное обнаружение очагов горения и в связи с этим создание приборов контроля – совершенных пожарных извещателей.

Разработанный многоканальный спектрометр может быть использован в качестве составной части абсолютно взрывобезопасного пламенного извещателя для раннего и достоверного обнаружения очагов горения по спектру излучения пламени.

В отличие практически от всех других типов пожарных извещателей, которые предназначены только для внутренней установки, извещатели пламени позволяют защищать наружные зоны большой площади, установки и хранилища, в том числе и во взрывоопасных зонах [106].

В настоящее время существуют целый ряд пламенных извещателей, действие которых основано на принципе спектральной фильтрации оптического излучения, исходящего от его источника – очага горения.

По спектру электромагнитного излучения, воспринимаемого чувствительным элементом, пожарные извещатели пламени делятся на следующие группы [106]:

- Пламенные извещатели видимого диапазона.
- Ультрафиолетовые (УФ) пламенные извещатели.
- Пламенные извещатели ИК - диапазона.
- Многоспектральные пламенные извещатели.

Пламенные извещатели видимого диапазона не находят широкого применения, поскольку в видимом диапазоне создается огромное количество помех различными осветительными приборами.

Ультрафиолетовые пламенные извещатели. Извещатели этого типа работают в диапазоне от 185 до 280 нм - область жесткого ультрафиолета. Земная атмосфера Земли защищает нас от жестких солнечных ультрафиолетовых лучей, в результате до земной поверхности никогда не доходят лучи с длиной волны меньше 286 нм [106]. Именно поэтому ультрафиолетовые извещатели не реагируют на солнечное излучение, которое является мощным источником оптических помех. Кроме того извещатели этого диапазона довольно помехоустойчивы к нагретым телам и частям оборудования, таким как лампы накаливания, галогенные и люминесцентные лампы, печи и т.п. Ультрафиолетовое излучение интенсивно поглощается дымом, газами и парами многих горючих веществ, например, аммиака, нитробензола, ацетона, бензола, фенола, этанола, сероводорода и т.п. Ложное срабатывание ультрафиолетовых пламенных извещателей могут вызвать рентгеновские лучи, гамма-излучение, а также излучение, возникающее при электродуговой сварке, разряде молнии и высоковольтной дуге [106]. Ультрафиолетовые извещатели чувствительны к запыленности помещения, поэтому требуют постоянного ухода за чувствительным оптическим элементом. Нецелесообразно использовать их в помещениях, где в процессе производства выделяется пыль и горючие газы, в зонах резки металла, а также в покрасочных камерах и зонах В-I, В-II [106].

В качестве основного оптического элемента у ультрафиолетовых извещателей применяются современные высокотехнологичные индикаторы фотонов, которые способны из всей ультрафиолетовой составляющей спектра света выделить только тот диапазон волн, который присутствует именно в открытом пламени.

Инфракрасные пламенные извещатели. Энергия в спектре у различных горючих веществ распределяется неравномерно - более 80% ее приходится на инфракрасную часть - самую большую часть спектра излучения. Все тела без исключения, твердые и жидкие, нагретые до определенной температуры, излучают энергию в инфракрасном спектре [106]. Мощным источником ИК-излучения является солнце, поэтому однодиапазонные инфракрасные извещатели пламени могут выдать ложный сигнал о пожаре из-за воздействия солнечных лучей. Такие извещатели применяют только в простых условиях - там, где нет мощных источников помех: теневых зонах помещения или на складах хранения различных материалов [106]. Использование в одном устройстве двух или трех ИК-каналов, работающих в разных диапазонах, решает проблему с мощными оптическими помехами. ИК-излучение хорошо проникает сквозь дым, пыль, гарь, копоть, загрязнения чувствительного элемента - такой тип извещателей незаменим в производственных цехах, ремонтных депо, на промышленных и особо ответственных объектах, в зонах В-I, В-II [106].

В инфракрасных пламенных извещателях используются ИК - фотоприемники или набор оптических фильтров ИК-диапазона.

Многоспектральные извещатели. Чтобы свести к минимуму количество ложных срабатываний, часть производителей выпускают извещатели, реагирующие на два или три спектра излучения – ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный. Здесь используется принцип спектральной селекции. Для реализации этого метода выбираются несколько приемников (или один матричный многодиапазонный), способных реагировать на излучение в различных участках спектра излучения источника. Как правило,

такие извещатели имеют высокую степень защиты оболочки, взрывобезопасное исполнение и используются на особо ответственных объектах нефтегазового комплекса [106].

В многоспектральных извещателях в качестве основного оптического элемента применяется многоспектральный фотоприемник – быстродействующий фотогальванический приемник излучения, преобразующий электромагнитное излучение пламени и посторонних источников излучения в электрический сигнал. Фотогальванический приемник реагирует в общем случае на электромагнитное излучение в нескольких спектральных поддиапазонах: 0,3-1,2 мкм, 2,5-2,9 мкм и 4,0-4,4 мкм. Первый поддиапазон реагирует на фоновые помехи (солнце, искусственные источники излучения, нагревательные приборы, разряды молнии и пр.). Второй и третий поддиапазоны соответствуют селективным полосам излучения продуктов горения: H_2O и CO_2 [106].

Разработанный в данной диссертационной работе многоканальный спектрометр предлагается использовать в качестве составной части многоспектрального абсолютно взрывобезопасного пламенного извещателя. Достоинство этого пламенного извещателя заключается в применении волоконно-оптического жгута для передачи анализируемого оптического сигнала, который позволит разместить анализирующую часть извещателя вне контролируемого объекта (помещения). В данном случае необходимо иметь 5 каналов пламенного извещателя, в которых будут установлены оптические резонаторы с полосами пропускания следующих диапазонов: 0,185 – 0,245 мкм; 0,8 – 1,1 мкм; 2,5 – 2,9 мкм; 4,0 – 4,4 мкм и 4,3 – 4,7 мкм.

- Спектральный диапазон 0,185 - 0,245 соответствует УФ – излучению.
- Спектральный диапазон 0,8-1,1 мкм - оптическим помехам, таким как солнце, искусственные источники освещения, разряды молний и электросварки.
- Спектральные диапазоны 2,5 - 2,9 мкм соответствует продуктам горения – воды.

- Спектральные диапазоны 4.0 - 4.4 мкм и 4.3 - 4.7 мкм соответствует продуктам горения – углекислого газа.

Задача блока обработки спектроскопической информации – выделить и сравнить сигнал от пламени и фоновых оптических помех.

При необходимости контролировать определенные диапазоны с целью обнаружения в очаге горения конкретных веществ или материалов количество каналов можно увеличить, и установить в них оптические резонаторы со средними длинами волн соответствующие этим веществам.

Выполненные на основе разработанного спектрометра абсолютно взрывобезопасные пламенные извещатели могут быть применены для контроля объектов, находящихся в условиях повышенного уровня взрывоопасности, повышенной влажности, температуры и агрессивной химической среды.

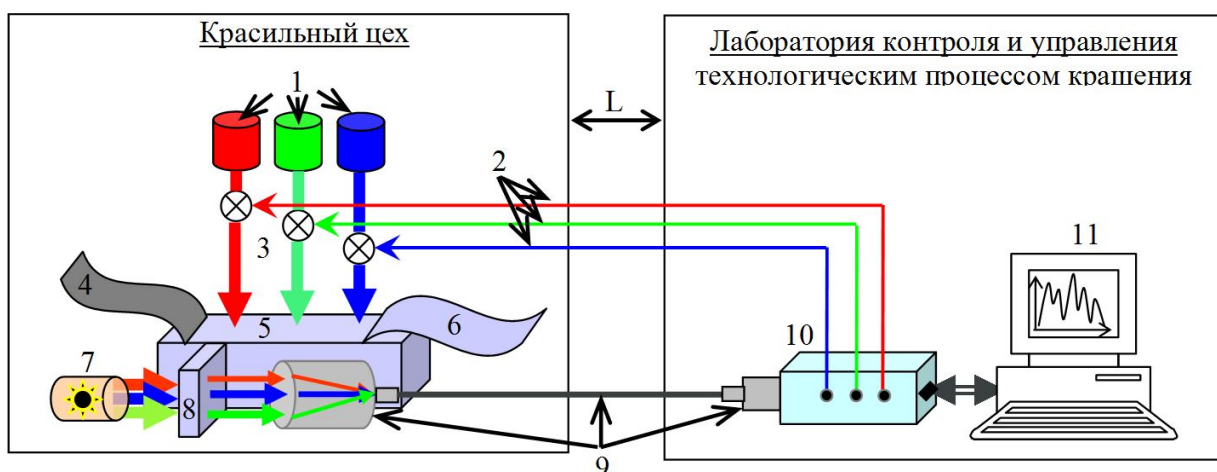
4.3.2 Многоканальный спектрометр для решения задач контроля технологических процессов

Разработанный в рамках данной диссертационной работы многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона может быть использован не только для контроля процессов горения, но и для контроля любых объектов, излучающих в оптическом диапазоне, особенно в таких случаях, где получение спектроскопической информации невозможно при непосредственном контакте прибора контроля с полем излучения источников оптического излучения. К числу таких объектов можно отнести технологические процессы, протекающие в условиях повышенной температуры, влажности, агрессивной химической среды, повышенного уровня взрывоопасности.

Примерами названных технологических процессов являются: процесс крашения текстильных материалов [107], процессы высокотемпературного синтеза, процессы в металлургическом производстве, например выплавка стали, и пр.

Так, в отечественной текстильной промышленности до настоящего времени сведений о непрерывном контроле процесса крашения текстильных материалов во время работы технологического оборудования не обнаружено. На предприятиях текстильной промышленности используется специальное лабораторное оборудование для разработки рецептуры красителей в небольших масштабах [107].

Для решения задачи контроля технологического процесса крашения текстильных материалов система автоматического контроля, выполненная на основе многоканального спектрометра оптического диапазона, может иметь вид, представленный на рисунке 46.



1 – емкости с красным, зеленым и синим красителями; 2 – управляющие сигналы для каждого вида красителя (сигналы ошибок); 3 – исполнительные механизмы системы автоматического управления (открыто / закрыто); 4 – ткань подлежащая окраске в заданный цвет; 5 – ванна с необходимым по технологии раствором красителей; 6 – ткань после окраски в заданный цвет; 7 – опорный источник оптического излучения; 8 – кювета с тем же раствором красителей, что и в основной ванне; 9 – оптическая система передачи оптического излучения по волоконно-оптическому жгуту к многоканальному спектрометру; 10 – многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона; 11 – персональный компьютер.

Рисунок 46 – Система автоматического контроля крашения текстильных материалов

Получение цвета любого оттенка может происходить путем смешивания трех цветов – красного, зеленого и синего. Поэтому для решения поставленной задачи, а именно контроля процесса крашения текстильных материалов, в многоканальном спектрометре достаточно иметь три канала анализа спектра, в которых будут установлены оптические резонаторы со средними длинами волн соответствующие красному, зеленому и синему цветам. Волоконно-оптический жгут позволяет разместить прибор контроля, включающий в себя многоканальный спектрометр и персональный компьютер вне красильного цеха, тем самым устранить влияние окружающей агрессивной химической среды на прибор. Персональный компьютер предназначен для обработки данных, формирования сигнала ошибки и управления спектрометром и исполнительными механизмами системы автоматического контроля. При просвечивании кюветы с раствором красителей опорным источником оптического излучения, спектр которого известен заранее, происходит поглощения излучения на длинах волн соответствующих красному, зеленому и синему цветам. Измеряя значение интенсивности оптического излучения в трех каналах, можно определить уровень поглощения на соответствующих длинах волн, тем самым определить концентрацию красителей красного, зеленого и синего цветов в растворе. Сравнивая полученную непосредственно во время процесса крашения спектральную диаграмму с опорной спектральной диаграммой, соответствующей определенному цветовому оттенку, в системе автоматического контроля формируется сигнал ошибки, и на исполнительные механизмы системы поступает сигнал – изменения концентрации красителя.

В металлургическом производстве контроль состава стали происходит путем взятия пробы и ее спектрального анализа, проводимого традиционным методом. Сущность этого метода состоит в следующем. Участок испытуемого изделия (заготовки, отливки, готовой детали) очищают от грязи, окалины, краски, приближают к нему электрод до возникновения

электрической дуги. Химические элементы исследуемой стали под воздействием высокой температуры электрической дуги испаряются. И в спектре излучения дуги появляются атомарные линии соответствующие, в основном, электронным переходам атомов химических элементов (молибдена, хрома и пр.), входящих в состав сплава.

Традиционный спектральный анализ выполняется в специальной заводской лаборатории, что требует значительного времени и не позволяет оперативно в режиме реального времени контролировать процесс выплавки стали и, тем более, его автоматизировать.

Разработанный прибор контроля (спектрометр) в данной работе будет проводить бесконтактный спектральный анализ стали непосредственно в процессе ее плавления в мартеновской печи. Волоконно-оптический жгут позволит разместить сам прибор контроля вне цеха, а анализируемый сигнал от мартеновской печи до анализирующей части прибора будет передаваться по волоконно-оптическому жгуту. Это позволит автоматизировать процесс плавления, что значительно упростит этот технологический процесс.

В таблице 4 представлены длины волн спектральных линий химических элементов, которые могут входить в состав стали. Данные взяты из ГОСТ 18895-97, устанавливающий фотоэлектрический спектральный метод определения в стали массовой доли элементов [108].

Таблица 4 – Длины волн спектральных линий химических элементов

Определяемый элемент	Длина волны, нм
Углерод	193.09; 229.69; 426,73
Сера	180.73; 182.04; 481.55; 545.39
Фосфор	177.50; 178.29; 214.91
Кремний	181,69; 185.07; 198.84; 212.41; 243.52; 250.69; 251.61; 288.16; 390,55
Марганец	192,13; 263.82; 293.31; 294.92; 478.34; 482,35

Хром	205.56; 206,55; 267,72; 275,29; 279,22; 298,92; 314.72; 425.43; 462.62; 520,60; 534.58
Никель	218.55; 225.39; 227.02; 231.60; 231.72; 309.71; 341.48; 351.51; 376.95; 385,83; 388.97; 390.71; 471,44
Медь	200.04; 211.21; 219.23; 223,01; 224.26; 282.44; 324.75; 327.40; 510.55
Алюминий	186,28; 199,05; 257,51; 308,22; 394.40; 396,15
Мышьяк	189.04; 193.76; 197.26; 234.98; 286,05
Молибден	202.03; 281.62; 317.04; 386.41; 476,02; 553.31; 603,07
Вольфрам	202.92; 207,91; 209,86; 220.45; 239,71; 258.69; 330.00; 364.65; 400.88; 465.99; 484.35
Ванадий	214.01; 266,33; 271.57; 290,82; 311.07; 311.84; 312.29; 313.03; 411.18; 437.92
Титан	190.80; 316.85; 324.20; 334.94; 337.28; 363.55; 453.32
Ниобий	212.65; 295.09; 309.42; 319.50; 320.64; 351.54; 358.03; 372.05; 410.09; 534.42
Бор	182.59; 208.96; 249.68
Цирконий	257.13; 339.19; 343.82; 360.12
Кобальт	228.62; 248.34; 340.51; 341.23; 345.35; 346.28; 373,59; 374.99; 384,55
Железо	187,75; 241.33; 249,33; 262.83; 271.44; 272.02; 281.33; 282,33; 297.01; 300.96; 309.16; 438,35; 440.48; 447.60

Анализируя представленные в таблице 4 спектральные линии химических элементов, с последующим определением массовых долей элементов, можно выполнять качественное обнаружение отдельных компонентов анализируемой пробы и количественное определение концентраций каждого из них, тем самым устанавливая качество выплавляемой стали.

4.4 Выводы

1. Разработан лабораторный макет многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона, и проведены его экспериментальные исследования.

2. Экспериментально доказано, что применение многомодового волоконно-оптического жгута в качестве линии передачи анализируемого сигнала значительно увеличивает чувствительность прибора и не ведет к ухудшению его разрешающей способности по сравнению с существующими спектральными приборами, что повышает чувствительность контроля процессов горения на основе предложенного метода.

3. В результате проведенных экспериментальных исследований было получены отсчетные значения спектра излучений лампы накаливания и вольфрамовой галогенной лампы.

4. Приведены сопоставленные эталонная спектральная характеристика вольфрамовой галогенной лампы, данная производителем, и отсчетные значения спектра излучения этой лампы, полученные экспериментально разработанным прибором и установлено отклонение значений, полученных в результате эксперимента от эталонных значений.

5. Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают новый метод бесконтактного анализа оптических спектров, основанный на явлении резонанса в n параллельных каналах, доказывают работоспособность многоканального спектрометра, реализующего этот метод, и являются основой при разработке технических средств бесконтактной оптической спектроскопии такого типа для решения задач контроля процессов горения.

6. Приведенные выше области возможного использования результатов разработки подчеркивают актуальность, проводимых научных исследований в рамках данной диссертационной работы.

7. Основные результаты данной главы опубликованы в работах [20], [21], [33], [59], [67], [97], [98], [105], [109] – [112].

Приложение А. Номенклатура узкополосных интерференционных оптических фильтров видимого диапазона, выпускаемых фирмой Omega Optical, Inc

На рисунках А.1 – А.4 представлены скан-копии страниц из каталога оптических фильтров фирмы Omega Optical, Inc [101].

Bandpass Filters - UV					
Center Wavelength (nm)	FWHM	Peak T%	Minimum Optical Density	Product SKU	Description
185	20	12%	4	XB32	185BP20
190	20	12%	4	XB33	190BP20
200	20	12%	4	XB34	200BP20
200	25	12%	3	XB35	200BP25
200	10	12%	3	XB36	200BP10
210	10	12%	3	XB37	210BP10
214	10	12%	3	XB38	214BP10
220	10	12%	3	XB39	220BP10
228	10	12%	3	XB40	228BP10
232	10	12%	3	XB41	232BP10
239	10	12%	3	XB42	239BP10
250	10	12%	3	XB43	250BP10
253.7	10	12%	3	XB44	253.7BP10
260	10	12%	3	XB45	260BP10
265	25	20%	3	XB46	265BP25
265	10	12%	3	XB47	265BP10
270	10	12%	3	XB48	270BP10
280	25	20%	3	XB49	280BP25
280	10	12%	3	XB50	280BP10
289	10	12%	3	XB51	289BP10
296.7	10	12%	3	XB52	296.7BP10
300	10	12%	3	XB53	300BP10
310	10	12%	3	XB54	310BP10
313	10	12%	3	XB55	313BP10
334	10	25%	3	XB56	334BP10
337	10	25%	3	XB57	337BP10
340	10	25%	3	XB58	340BP10
350	10	25%	3	XB59	350BP10
360	10	25%	3	XB60	360BP10
370	10	25%	3	XB61	370BP10
380	10	25%	3	XB62	380BP10
390	10	25%	3	XB63	390BP10

Bandpass Filters - Visible					
Center Wavelength (nm)	FWHM	Peak T%	Minimum Optical Density	Product SKU	Description
400	50	40%	4	XB64	400DF50
400	25	40%	4	XB65	400DF25
400	10	35%	4	XB66	400BP10
405	10	35%	4	XB67	405BP10
405.4	3	30%	4	XB68	405.4NB3
410	10	50%	4	XB69	410DF10
420	10	50%	4	XB70	420DF10
430	10	50%	4	XB71	430DF10
435.8	10	50%	4	XB72	435.8BP10
440	10	60%	4	XB73	440DF10

For current product listings, specifications, and pricing:
www.omegafilters.com • sales@omegafilters.com
 1.866.488.1064 (toll free within USA only) • +1.802.254.2690 (outside USA)



Рисунок А.1 – Номенклатура узкополосных интерференционных оптических фильтров УФ и видимого диапазонов

Bandpass Filters - Visible *Continued*

Center Wavelength (nm)	FWHM	Peak T%	Minimum Optical Density	Product SKU	Description
450	50	60%	4	XB74	450DF50
450	25	60%	4	XB75	450DF25
450	10	60%	4	XB76	450DF10
460	10	60%	4	XB77	460DF10
470	10	60%	4	XB78	470DF10
480	10	70%	4	XB79	480DF10
486.1	10	70%	4	XB80	486.1DF10
488	10	70%	4	XB81	488DF10
490	10	70%	4	XB82	490DF10
500	50	70%	4	XB83	500DF50
500	25	70%	4	XB84	500DF25
500	10	70%	4	XB85	500DF10
510	10	70%	4	XB86	510BP10
514.5	10	70%	4	XB87	514.5DF10
520	10	70%	4	XB88	520BP10
530	10	70%	4	XB89	530BP10
532	10	70%	4	XB90	532BP10
540	10	70%	4	XB91	540BP10
546.1	10	70%	4	XB92	546.1BP10
546.1	3	70%	4	XB93	546.1NB3
550	50	65%	4	XB94	550DF50
550	25	65%	4	XB95	550DF25
550	10	65%	4	XB96	550DF10
560	10	65%	4	XB97	560BP10
568.2	3	65%	4	XB98	568.2NB3
570	10	65%	4	XB99	570DF10
577	10	65%	4	XB100	577DF10
580	10	65%	4	XB101	580DF10
590	10	65%	4	XB102	590DF10
600	50	65%	4	XB103	600DF50
600	25	65%	4	XB104	600DF25
600	10	65%	4	XB105	600DF10
610	10	65%	4	XB106	610DF10
620	10	65%	4	XB107	620DF10
630	10	65%	4	XB108	630DF10
640	10	65%	4	XB109	640DF10
650	50	65%	4	XB110	650DF50
650	25	65%	4	XB111	650DF25
650	10	65%	4	XB112	650DF10
660	10	65%	4	XB113	660DF10
670	10	65%	4	XB114	670DF10
680	10	65%	4	XB115	680DF10
690	10	65%	4	XB116	690DF10
700	50	75%	4	XB117	700DF50
700	25	75%	4	XB118	700DF25
700	10	75%	4	XB119	700DF10
710	10	75%	4	XB120	710DF10



For current product listings, specifications, and pricing:
www.omegafilters.com • sales@omegafilters.com
1.866.488.1064 (toll free within USA only) • **+1.802.254.2690** (outside USA)

Рисунок А.2 - Номенклатура узкополосных интерференционных оптических фильтров видимого диапазона

Bandpass Filters - Visible *Continued*

Center Wavelength (nm)	FWHM	Peak T%	Minimum Optical Density	Product SKU	Description
720	10	75%	4	XB121	720DF10
730	10	75%	4	XB122	730DF10
740	10	75%	4	XB123	740DF10
750	50	75%	4	XB124	750DF50
750	25	75%	4	XB125	750DF25
750	10	75%	4	XB126	750DF10

Bandpass Filters - IR

Center Wavelength (nm)	FWHM	Peak T%	Minimum Optical Density	Product SKU	Description
760	10	75%	4	XB127	760DF10
765	10	75%	4	XB128	765DF10
770	10	75%	4	XB129	770DF10
780	10	75%	4	XB130	780DF10
790	10	75%	4	XB131	790DF10
794.7	10	75%	4	XB132	794.7DF10
794.7	3	75%	4	XB133	794.7DF3
794.7	1.5	75%	4	XB134	794.7DF1.5
800	50	75%	4	XB135	800DF50
800	25	75%	4	XB136	800DF25
800	10	75%	4	XB137	800DF10
810	10	75%	4	XB138	810DF10
820	10	75%	4	XB139	820DF10
830	10	75%	4	XB140	830DF10
840	10	75%	4	XB141	840DF10
850	50	75%	4	XB142	850DF50
850	25	75%	4	XB143	850DF25
850	10	75%	4	XB144	850DF10
860	10	75%	4	XB145	860DF10
870	10	75%	4	XB146	870DF10
880	10	75%	4	XB147	880DF10
890	10	75%	4	XB148	890DF10
900	50	75%	4	XB149	900DF50
900	25	75%	4	XB150	900DF25
900	10	75%	4	XB151	900DF10
910	10	75%	4	XB152	910DF10
920	10	75%	4	XB153	920DF10
930	10	75%	4	XB154	930DF10
940	10	75%	4	XB155	940DF10
950	50	75%	4	XB156	950DF50
950	25	75%	4	XB157	950DF25
950	10	75%	4	XB158	950DF10
960	10	75%	4	XB159	960DF10
970	10	75%	4	XB160	970DF10
980	10	75%	4	XB161	980DF10
990	10	75%	4	XB162	990DF10

For current product listings, specifications, and pricing:

www.omegafilters.com • sales@omegafilters.com
 1.866.488.1064 (toll free within USA only) • +1.802.254.2690 (outside USA)



Рисунок А.3 - Номенклатура узкополосных интерференционных
 оптических фильтров видимого и ИК диапазонов

Laser Line Filters - Fully blocked

The Transmission (Peak) is a value of an unblocked filter. The addition of a blocking component will reduce the Transmission (Peak) by 20%.

Laser Line	CWL	CWL Tolerance	FWHM	FWHM Tolerance	Transmission (Peak)	Blocking Range	Product SKU	Description
HeCd	325	+3,-2 nm	2	± .4 nm	≥ 25%	UV - 2500 nm	XLK02	325NB2
N2	337	+4,-3 nm	3	± .6 nm	≥ 40%	UV - 2500 nm	XLK30	337NB3
Argon-Ion	351	+4,-3 nm	3	± .6 nm	≥ 60%	UV - 2500 nm	XLK31	351NB3
3rd Nd Yag	355	+4,-3 nm	3	± .6 nm	≥ 60%	UV - 2500 nm	XLK03	355NB3
Argon	364	+6,-4 nm	4	± .8 nm	≥ 60%	UV - 2500 nm	XLK32	364NB4
Blue Diode/DPSS	405	+6,-4 nm	5	± .8 nm	≥ 60%	UV - 2500 nm	XLK33	405NB5
Blue Diode/DPSS	430	+3,-2 nm	5	± .4 nm	≥ 60%	UV - 2500 nm	XLK34	430NB2
HeCd	442	+3,-2 nm	2	± .4 nm	≥ 60%	UV - 2500 nm	XLK04	442NB2
Argon	457	+3,-2 nm	2	± .4 nm	≥ 60%	UV - 2500 nm	XLK05	457NB2
Argon	473	+1.2,-.8 nm	8	± 1.6 nm	≥ 70%	UV - 2500 nm	XLK35	473NB8
Argon	488	+4,-3 nm	3	± .6 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK06	488NB3
Argon	515	+4,-3 nm	3	± .6 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK07	515NB3
2nd Nd Yag	532	+4,-3 nm	3	± .6 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK08	532NB3
HeNe Green	543	+4,-3 nm	3	± .6 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK09	543NB3
Argon/Argon Krypton	568	+4,-3 nm	3	± .6 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK36	568NB3
HeNe Yellow	594	+4,-3 nm	3	± .6 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK10	594NB3
HeNe Yellow	612	+4,-3 nm	3	± .6 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK11	612NB3
HeNe Red	633	+6,-4 nm	4	± .8 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK12	633NB4
Red Diode	635	+6,-4 nm	4	± .8 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK37	635NB4
Krypton	647	+6,-4 nm	4	± .8 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK13	647NB4
Red Diode	650	+6,-4 nm	5	± .8 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK38	650NB5
Krypton	676	+6,-4 nm	4	± .8 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK14	676NB4
AlGaAs	665	+3.7,-2.5 nm	25	± 5 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK15	665WB25
RUBY	694	+6,-4 nm	4	± .8 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK16	694NB4
AlGaAs	775	+3.7,-2.5 nm	25	± 5 nm	≥ 85%	UV - 2500 nm	XLK17	775WB25
Sapphire	785	+0.7, -0.6 nm	4	± 1 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK29	785NB4
Diode	808	+3.7,-2.5 nm	25	± 5 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK39	808WB25
AlGaAs	825	+3.7,-2.5 nm	25	± 5 nm	≥ 85%	UV - 2500 nm	XLK18	825WB25
GaAlAs	830	+3.7,-2.5 nm	25	± 5 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK40	830WB25
AlGaAs	850	+3.7,-2.5 nm	25	± 5 nm	≥ 85%	UV - 2500 nm	XLK19	850WB25
AlGaAs	875	+3.7,-2.5 nm	25	± 5 nm	≥ 85%	UV - 2500 nm	XLK20	875WB25
InGaAs	980	+3.7,-2.5 nm	25	± 5 nm	≥ 80%	UV - 2500 nm	XLK41	980WB25
1st Nd Yag	1060	+1.2,-.8 nm	8	± 1.6 nm	≥ 85%	UV - 1500 nm	XLK21	1060NB8
1st Nd Yag	1064	+1.2,-.8 nm	8	± 1.6 nm	≥ 80%	UV - 1500 nm	XLK22	1064NB8
HeNe IR	1152	+1.5,-1 nm	10	± 2 nm	≥ 80%	UV - 1350 nm	XLK23	1152NB10
InGaAsP	1310	+6,-4 nm	40	± 8 nm	≥ 80%	UV - 1800 nm	XLK24	1310WB40
Nd Yag	1320	+1.5,-1 nm	10	± 2 nm	≥ 80%	UV - 1800 nm	XLK25	1320NB10
Diode	1350	+3.7,-2.5 nm	40	± 5 nm	≥ 80%	UV - 1800 nm	XLK42	1350WB40
HeNe IR	1523	+1.5,-1 nm	10	± 2 nm	≥ 80%	UV - 1800 nm	XLK26	1523NB10
InGaAsP	1550	+7.5,-5 nm	50	± 10 nm	≥ 80%	UV - 1800 nm	XLK27	1550WB50
InGaAsP	1550	+1.5,-1 nm	10	± 2 nm	≥ 80%	UV - 1800 nm	XLK28	1550NB10

► CUSTOM CONFIGURATIONS AVAILABLE UPON REQUEST



For current product listings, specifications, and pricing:

www.omegafilters.com • sales@omegafilters.com

1.866.488.1064 (toll free within USA only) • +1.802.254.2690 (outside USA)

Рисунок А.4 - Номенклатура лазерных узкополосных интерференционных оптических фильтров

Данные из приведенных скан-копий подтверждают возможность создания многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона, выполняющего анализ спектра оптического излучения в широком

диапазоне с помощью набора резонаторов (узкополосных интерференционных оптических фильтров).

Как видно из скан-копий, выпускаемые для широкого пользования узкополосные интерференционные оптические фильтры имеют полосу пропускания от 1 до 10 нм со средними длинами волн в широком диапазоне. При необходимости можно разработать резонатор с шириной пропускания 1 нм для любой длины волны в этом диапазоне.

Заключение

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие основные результаты:

- 1) Разработан новый метод бесконтактного параллельного анализа оптических спектров для решения задач контроля процессов горения и схема построения прибора контроля в форме многоканального спектрометра, реализующего этот метод.
- 2) По сравнению с существующими оптическими спектральными приборами, которые последовательно анализируют спектр оптического излучения, многоканальный спектрометр оптического диапазона выполняет анализ спектра параллельным методом, что значительно увеличивает его быстродействие и исключает возможность пропуска редко повторяющихся и одиночных импульсов.
- 3) Разработан теоретический подход к описанию анализа оптических спектров предложенным прибором контроля, опирающийся на общие положения теории сигналов, теории многомерных линейных систем, методы теоретической радиотехники, методы матричного исчисления и принципы детектирования оптических сигналов. Этот подход отражает одно из направлений радиооптики и одинаково пригоден для описания параллельных анализаторов спектра, как радио-, так и оптического диапазонов.
- 4) Разработанный теоретический подход дает последовательное описание прохождения анализируемого оптического сигнала через все узлы спектрального прибора и получения энергетического спектра, несущего информацию о состоянии контролируемого процесса горения.
- 5) При теоретическом описании процесс анализа спектра оптических сигналов был разделен на два этапа: анализ комплексного спектра с помощью анализатора комплексного спектра, являющегося резонаторной системой многоканального спектрометра, и последующая обработка

полученного комплексного спектра детектирующей системой спектрометра для получения энергетического спектра.

- 6) Получено основное соотношение теории спектральных измерений в матричной форме, которое устанавливает связь между истинным распределением энергии по спектру, отражающим состояние контролируемого процесса горения, и спектральным распределением энергии по спектру, полученным экспериментально с помощью многоканального спектрометра и дающим информацию получателю о состоянии этого процесса.
- 7) Разработан лабораторный макет многоканального резонаторного спектрометра с передачей анализируемых сигналов по волоконно-оптическому жгуту, и проведены его экспериментальные исследования.
- 8) Экспериментально доказано, что применение многомодового волоконно-оптического жгута в качестве линии передачи анализируемого сигнала значительно увеличивает чувствительность прибора и не ведет к ухудшению его разрешающей способности по сравнению с существующими спектральными приборами, что повышает чувствительность контроля процессов горения на основе предложенного метода.
- 9) Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают новый метод бесконтактного анализа оптических спектров, основанный на явлении резонанса в n параллельных каналах, доказывают работоспособность прибора контроля, реализующего этот метод, и являются основой при разработке технических средств бесконтактной оптической спектроскопии такого типа для решения задач контроля процессов горения.
- 10) Новизна разработанного спектрометра подтверждается полученным на него патентом РФ № 86734, а практическая ценность – положительным внедрением результатов работы и полученными положительными

оценками инновационного центра «Сколково» и Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Основные научные положения и результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на международных и Всероссийских конференциях, симпозиумах и семинарах. Результаты практической реализации диссертационной работы подтверждены актами внедрения.

В заключении автор выражает огромную благодарность научному руководителю кандидату технических наук О. Д. Москальцу, под руководством которого была выполнена работа, заведующему кафедрой «Электроники и оптической связи» ГУАП профессору С. В. Кулакову за поддержку и критику на протяжении выполнения всей диссертационной работы, а также всем сотрудникам кафедры, принимавшим активное участие в обсуждении результатов работы.

Список использованных источников

1. Корольченко, А.Я. Процессы горения и взрыва / А.Я. Корольченко // М.: Пожнаука, 2007. 266 с.
2. Похил, П.Ф., Мальцев В.М., Зайцев В.М. Методы исследования процессов горения и детонации / П.Ф. Похил, В.М. Мальцев, В.М. Зайцев. М.: Наука, 1969. 301 с.
3. Малышев, В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию / В. И. Малышев. М.: Наука, 1979. 480 с.
4. Тарасов, К. И. Спектральные приборы/ К.И. Тарасов, 2-е изд. Л.: Машиностроение. Ленинградское отд., 1977. 367 с.
5. Калинин, В. А. Спектральные измерения в оптическом диапазоне с передачей анализируемых сигналов по оптическому волокну: дис. канд. тех. наук: Спец. 05.13.01: защищена 30.05.2006: утв. 13.10.2006 / Калинин Владимир Анатольевич. СПб., 2006. 133 с.
6. Климчук, А.Ю. Проект гетеродинного спектрометра сверхвысокого разрешения ближнего ИК-диапазона: результаты и перспективы / А.Ю. Климчук, А.И. Надеждинский, А.В. Родин, Я.Я. Понуровский, Г.Н. Гольцман, М.Л. Городецкий, Ю.В. Лобанов, Ю.П. Шаповалов, О.В. Бендеров // Труды 54 - й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» т.8, «Проблемы современной физики». 2011. с. 16-17.
7. Спектрально-корреляционный анализ динамических сигналов оптического диапазона: отчет о НИР (промежуточ.) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; рук. С. В. Кулаков; Инв. № 02201155181. СПб., 2011. 63 с.
8. Спектральные измерения в оптическом диапазоне с передачей анализируемых сигналов по оптическому волокну: отчет о НИР (промежуточ.) / Санкт-Петербургский государственный университет

- аэрокосмического приборостроения; рук. О. Д. Москалец; Инв. № 02201258377. СПб., 2012. 50 с.
9. Спектрально-корреляционный анализ динамических сигналов оптического диапазона: отчет о НИР (промежуточ.) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; рук. С. В. Кулаков; Инв. № 02201258376. СПб., 2012. 26 с.
 10. Пат. 86734 РФ, МПК⁸ G 01 J 3/26. Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона / И. Н. Архипов, М. А. Ваганов, С. В. Кулаков, Е. Н. Котликов, О. Д. Москалец, Л. Н. Пресленев, В. Н. Прокашев (РФ). № 2009116195/22 // Изобретения и полезные модели. 2009. № 25. 2 с.
 11. Титчмарш, Е. Введение в теорию интегралов Фурье/ Е. Титчмарш; М.: ОГИЗ, 1948. 480 с.
 12. Солодов, А.В. Линейные автоматические системы с переменными параметрами/ А. В. Солодов, Ф. С. Петров; М.: Наука, 1971. 325 с.
 13. Заде, Л. Теория линейных систем: пер. с англ./ Л. Заде, Ч. Дезоер; М.: Наука, 1970. 704 с.
 14. Гарднер, М. Ф. Переходные процессы в линейных системах с сосредоточенными постоянными: пер. с англ. / М. Ф. Гарднер, Дж. Л. Бэрнс; М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1961. 552 с.
 15. Д' Анжелло, Г. Линейные системы с переменными параметрами. Анализ и синтез / Г. Д' Анжелло; М.: Машиностроение, 1974. 288 с.
 16. Зиновьев, А. Л. Введение в теорию сигналов и цепей: учебное пособие для вузов/ А. Л. Зиновьев, Л. И. Филиппов; М.: Высшая школа, 1975. 264 с.
 17. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов / И. С. Гоноровский, 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.

18. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц. / Ф. Р. Гантмахер, 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1966. 576с.
19. Зверев, В. А. Предисловие редакторов// Сб. науч. статей Экспериментальная радиооптика // В.А. Зверев, Н.С. Степанов -М.: Наука, 1979. с. 6-10
20. Размахнин, М. К. Функции с двойной ортогональностью в радиоэлектронике и оптике / Перевод и научная обработка М. К. Размахнина и В. П. Яковлева // М.: Советское радио. 1971. 245 с.
21. Хургин, Я. И. Фinitные функции в физике и технике/Я. И. Хургин, В. П. Яковлев, М.: Наука. 1971. 408 с.
22. Исследование и разработка приемно-регистрирующего блока системы диагностики сплава: отчет о НИОКР (промежуточ.) / ООО "ФАНТОМ"; рук. О. Д. Москалец; Инв. № 2.21311572. СПб., 2013. 11 с.
23. Пат. 100241 РФ, МПК⁸ G 01 J 3/26. Оптический анализатор спектра сигналов / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец, Л. Н. Пресленев, (РФ). № 2010127591/28// Изобретения и полезные модели. 2010. № 34. 2 с.
24. Ocean Optics: Малогабаритный оптоволоконный спектрометр USB4000, <http://oceanoptics.ru/spectrometers/223-usb4000.html>
25. ASD Inc.: FieldSpec 4 Standard-Res Spectroradiometer, <http://www.asdi.com/products/fieldspec-3-portable-spectroradiometer>
26. Avantes: AvaSpec-1024 Fiber Optic Spectrometer, <http://www.avantes.com/Food-Technology/AvaSpec-1024-Fiber-Optic-Spectrometer/Detailed-product-flyer.html>
27. Клудзин, В. В. Акустооптические устройства обработки сигналов / В. В. Клудзин; СПб. БГТУ, 1997. 62 с.
28. Ахманов, С. А. Введение в статистическую радиофизику и оптику / С. А. Ахманов, Ю. Е. Дьяков, А.С. Чиркин; М.: Наука, 1981. 640 с.
29. Ланге, Ф. Корреляционная электроника / Ф. Ланге; Л.: Судпромгиз, 1963. 448 с.

30. Раутиан, С. Г. Реальные спектральные приборы / С. Г. Раутиан // Успехи физических наук. 1958. Т. 66. №3. С. 475-517.
31. Кульчин, Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические датчики и измерительные сети/ Ю.Н. Кульчин; Владивосток: Дальнаука, 1999. 283 с.
32. Vaganov, M. A. Spectrum analysis of optical signals is based on the resonance phenomenon / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz// Proceedings of SPIE Optics + Photonics 2011. Optics and Photonics for Information Processing IV, edited by Abdul A.S. Awwal, Khan M. Iftekharuddin, Scott C. Burkhart, Vol. 8134. - Bellingham, WA, 2011. – P. 81340C-1 - 81340C-10.
33. Физическая энциклопедия Т. 4 / М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 1994. 704 с.
34. Харкевич, А. А. Теоретические основы радиосвязи/ А. А. Харкевич; М.: ГИТТЛ, 1957. 348 с.
35. Лебедева, В. В. Техника оптической спектроскопии/ В. В. Лебедева; 2-е изд., перераб. и доп., Изд-во Московского ун-та, 1992. 352 с.
36. Нагибина, И. М. Фотографические и фотоэлектрические спектральные приборы и техника эмиссионной спектроскопии/ И. М. Нагибина, Ю. К. Михайловский; Л.: Машиностроение, 1981.
37. Скоков, И. В. Оптические спектральные приборы: учебное пособие для оптических специальностей вузов / И. В. Скоков; М.: Машиностроение, 1984. 240 с.
38. Беляков, Ю.М. Спектральные приборы: учебное пособие / Ю.М. Беляков, Н.К. Павлычева; Казань: Изд-во Казань. гос. техн. ун-та, 2007. 203 с.
39. Зорич, В. А. Математический анализ 2 часть / В. А. Зорич; М.: Наука, 1984. 640 с.

40. Турбович, И.Т. Динамические частотные характеристики избирательных систем/ И. Т. Турбович // Радиотехника. 1957. Т. 12. №11. С. 39-49.
41. Седякин, Н. М. К анализу переходных процессов при панарамном радиоприеме / Н. М. Седякин, Г. А. Шикин // Вопросы радиоэлектроники сер. Общетеchnическая. 1960. Вып. 12. С. 3 – 16.
42. Хлытчиев, С. М. Воздействие напряжения с линейно изменяющейся частотой на линейные системы / С. М. Хлытчиев // Радиотехника. 1956. Т. 11. №1. С. 61-72.
43. Содин, Л. Г. Расчет динамических частотных характеристик линейных пассивных схем / Л. Г. Содин // Радиотехника. 1959. Т. 14. №7. С. 8-16.
44. Быкова, Н. О. Воздействие напряжения меняющейся частоты на резонансные системы / Н. О. Быкова // Труды М.А.П. СССР, 1948. № 48.
45. Седякин, Н. М. Реакция колебательной системы с линейно-меняющейся собственной частотой / Н. М. Седякин // Радиотехника и электроника. 1959. №3. С. 457-462.
46. Москалец, О.Д. К теории спектрального анализа радиосигнала/ О.Д. Москалец // Тезисы докладов к XXI Научно-технической конференции, 1968, с.25
47. Кирюхин, А. М. Дисперсионный анализ спектров видео- и радиоимпульсов/ А. М. Кирюхин, О. Д. Москалец, Г.К. Ульянов// Труды ЛИАП. 1969. Вып. 64. С. 40 – 53.
48. Кулаков, С. В. Некоторые вопросы теории оптико-акустического анализатора спектра / С. В. Кулаков, О. Д. Москалец, Б. П. Разживин // Труды ЛИАП. 1969. Вып. 64. С. 96 – 108.
49. Кулаков, С. В. Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов / С. В. Кулаков; Л.: Наука, 1978. 144 с.

- 50.Харкевич, А. А. Спектры и анализ/А. А. Харкевич; 5-е Изд., М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 240 с.
- 51.Мартынов, В. А. Панорамные приемники и анализаторы спектра / В. А. Мартынов, Ю. И. Селихов; 2-е изд., перераб. и доп., М.: Советское радио, 1980. 352 с.
- 52.Берсон, З.Г. Разрешающая способность и динамические частотные характеристики селективных систем при постоянной настройке относительно воздействующего сигнала / З. Г. Берсон // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая. 1964. С. 75-79.
- 53.Стейн, С. Принципы современной теории связи и их применение к передачи дискретных сообщений/ С. Стейн, Дж. Джонс; М.: Связь, 1971. 376 с.
- 54.Обратные задачи в оптике / под. ред. Г. П. Болтса: пер. с англ., М.: Машиностроение. 1984. 199 с.
- 55.Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; М.: Наука, 1970. 720 с.
- 56.Горелик, Г. С. Колебания и волны / Г. С. Горелик; 2-е изд., перераб. и доп., М.: ГИФМЛ, 1959. 572с.
- 57.Пихтин, А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники/ А.Н. Пихтин; М.: Высшая школа, 1983. 304 с.
- 58.Цапенко, М. П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование: учебное пособие для вузов / М. П. Цапенко; 2-е изд., М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
- 59.Ваганов, М.А. Параллельный анализ спектра динамических сигналов/ М.А. Ваганов, О.Д. Москалец// Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 15-22.
- 60.Зверев, В. А. Радиооптика / В. А. Зверев; М.: Советское радио, 1975. 304 с.
- 61.Литвиненко, О. Н. Основы радиооптики / О. Н. Литвиненко; Киев: Техніка, 1974. 208 с.

- 62.Строук, Дж. Введение в когерентную оптику и голографию: пер. с англ./ Дж. Строук; М.: Мир, 1967. 348 с.
- 63.Папулис, А. Теория систем и преобразований в оптике: пер. с англ./А. Папулис; М.: Мир, 1971. 495с.
- 64.Железнов, Н. А. О принципиальных вопросах теории сигналов и задачах ее дальнейшего развития на основе новой стохастической модели /Н. А. Железнов // Радиотехника. 1957. №11. С. 3-12.
- 65.Железнов, Н. А. Некоторые вопросы спектрально корреляционной теории нестационарных сигналов / Н. А. Железнов // Радиотехника и электроника. 1959. Т.4. №3. С. 359-373.
- 66.Москалец, О.Д. Соотношение «вход-выход» спектрального прибора при воздействии случайного процесса / О. Д. Москалец // Известия вузов. Приборостроение. 1995. Т. 38. № 9-10. С. 35-38.
- 67.Ваганов, М. А. Анализ спектров в оптическом диапазоне. Резонаторный анализ / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец // Информационно-управляющие системы. 2012. №6. С. 21 – 27.
- 68.Яглом, А. М. Корреляционная теория стационарных случайных функций/ А. М. Яглом; Л.: Гидрометеиздат, 1981. 280 с.
- 69.Сороко, Л. М. Основы голографии и когерентной оптики / Л. М. Сороко; М.: Наука, 1971. 616 с.
- 70.Директор, С. Введение в теорию систем / С. Директор, Р. Рорер; М.: Мир, 1974. 464 с.
- 71.Коротков, В.Б. Интегральные операторы/ В.Б. Коротков; Новосибирск: Наука, 1983. 224 с.
- 72.Москалец, О.Д. Линейность и интеграл суперпозиции / О. Д. Москалец // Оптические и оптико-электронные средства обработки информации. Сб. науч. трудов. Л.: АН СССР, ФТИ им А.Ф. Иоффе. 1989. С. 279-285.
- 73.Moskaletz, O. D. Classical and quantum approaches to power spectrum measurement by diffractive methods / O. D. Moskaletz // Proceedings SPIE. 1999. V. 3900. PP. 297-308.

74. Зельдович, Я. Б. Высшая математика для начинающих физиков и техников / Я. Б. Зельдович, И. М. Яглом; М.: Наука, 1982. 512 с.
75. Зельдович, Я. Б. Элементы математической физики. Среда из невзаимодействующих частиц / Я. Б. Зельдович, А. Д. Мышкис; М.: Наука, 1973. 352 с.
76. Владимиров, В. С. Обобщенные функции в математической физике / В. С. Владимиров; М.: Наука, 1979. 320 с.
77. Колмогоров, А. Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А. Н. Колмогоров, С. В. Фомин; 4-е изд., перераб. и доп., М.: Наука, 1976. 544 с.
78. Moskaletz, O. D. Physical signal theory as a part of quantum laser theory / O. D. Moskaletz // Proceedings SPIE. 2002. Vol. 5066. PP. 213-224.
79. Тверской, В. И. Дисперсионно-временные методы измерения спектров радиосигналов / В. И. Тверской; М.: Советское радио, 1974. 240 с.
80. Kazakov, V. I. Complex and power spectra of optical signals using time-dispersion spectral analysis / V. I. Kazakov, O. D. Moskaletz, A. Yu. Zhdanov // Proceedings of SPIE Optics + Photonics 2012. Optics and Photonics for Information Processing VI. Bellingham, WA, 2012. Vol. 8498. PP 84981111-84981119.
81. Kazakov, V. I. 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.
82. Lambert, L. B. Wide-Band Instantaneous Spectrum Analyzers Employing Delay-Line Light Modulators / L. B. Lambert // IRE Intl. Conu. Rec., 1962. Pt.6. P. 69–78.
83. Vaganov, M. A. The parallel spectrum analyzer of optical signals/ M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz, L. N. Preslnev, I. N. Arkhipov // Proceedings of SPIE Optics + Photonics 2010. Optics and Photonics for Information

- Processing IV, edited by Abdul A.S. Awwal, Khan M. Iftekharuddin, Scott C. Burkhart, Bellingham, WA, 2010. Vol. 7797. P. 77970X-1 - 77970X-12.
84. Vaganov, M. A. System approach the description of optical spectrum measurements by spectrum device with the transfer of analyzed signals by optical fiber/ M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of XI International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2008. P. 23.
85. Ваганов, М. А. Матричный анализ многоканального спектрального прибора оптического диапазона/ О. Д. Москалец, М. А. Ваганов // Сб. докл. 22-й Международной конференции «ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ». Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2012. Т. 1. С. 117 - 130.
86. Ланда, П. С. Автоколебания в распределенных системах/ П. С. Ланда; 2-е изд., М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2010. 320 с.
87. Крылова, Т.Н. Интерференционные покрытия / Т. Н. Крылова; Л.: Машиностроение, 1973. 224с.
88. Мирошник, И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы / И.В. Мирошник; СПб.: Питер, 2005. 336 с.
89. Москалец, О.Д. Теоретическое исследование некоторых вопросов анализа комплексного и энергетического спектров акустооптическим устройством / О.Д. Москалец // Методы и устройства радио- и акустической голографии. Сб. науч. статей. Л.: Наука, Л.О. 1983. С 102-109.
90. Голдман, С. Теория информации: пер. с англ. / С. Голдман; М.: Изд-во ИИЛ, 1957. 446 с.
91. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ./ Дж. Бендат, А. Пирсол; М.: Мир, 1989. 540 с.
92. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций/ А. А. Свешников; 2-е изд., М.: Наука. 1968. 448 с.

93. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов; 2-е изд., перераб. и доп., М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
94. Vaganov, M. A. Parallel measurement method of spectrum of signal / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of XII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2009. P. 26.
95. Vaganov, M. A. The optical spectrum analyzer of the parallel type / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz, L. N. Preslnev // Proc. of XIII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2010. P. 22.
96. Vaganov, M. A. Estimation of an energy spectrum of optical radiation in multi - channel resonator system / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of XII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2011. P. 13.
97. Ваганов, М. А. Анализатор спектра на базе оптических резонаторов / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец, Л. Н. Пресленев // Сборник материалов X Всероссийской научной конференции студентов и аспирантов. Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления. Таганрог, 2010. С. 21-22.
98. Ваганов, М. А. Многоканальный анализатор спектра оптических сигналов / М. А. Ваганов, И. Н. Архипов, О. Д. Москалец // Сборник докладов 21 Международной конференции “ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ-2011”. Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2011. С. 110-125.
99. Ваганов, М. А. Оценка энергетического спектра оптического излучения резонансным методом / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец // Материалы VI Международной научно-технической конференции. Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2011». Казань, КНИТУ-КАИ, 2011. С. 343-351.

100. Vaganov, M. A. The optical spectral device as multidimensional linear system / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of XV International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2012. P. 29.
101. Optical interference filters: Catalog 2012 : Omega Optical. Inc. 2012. PP. 49 – 55, 60.
102. Гиль, В. В. Оптические методы исследования процессов горения / В. В. Гиль, О. Г. Мартыненко; АН БССР, Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова; Минск : Наука и техника, 1984. 128 с.
103. Мошкин, К. Б. Экспериментально - расчетное определение концентрации атомов металлов в факеле ЖРД спектрометрическим методом в интересах диагностики ЖРД при проведении наземных испытаний: дис. канд. тех. наук: Спец. 01.04.14; Спец. 05.07.05: защищена 20.05.2004: утв. 25.11.2005 / Мошкин Константин Борисович. М.: 2004. 100 с.
104. Алехин, А. А. Исследование спектральных характеристик свечения факела двигателя 11Д58М / А. А. Алехин, В. А. Баринов, Ф. Н. Любченко // Теоретические и экспериментальные исследования вопросов общей физики. Сб. науч. трудов ЦНИИ Маш. 2003. С.6-14.
105. Ваганов, М. А. Многоканальный спектральный прибор для диагностики жидкостного ракетного двигателя / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец, С. В. Кулаков // Информационно-управляющие системы. 2013. №1. С. 2 – 6.
106. Информационный портал центра информационных технологий "ОРБИТА-СОЮЗ": Пожарные извещатели пламени, <http://os-info.ru/pozharnaya-signalizaciya/pozharnye-izveshhateli-plameni.html>
107. Методы спектроскопии в задачах исследования физико-химических свойств, испытания и контроля качества текстильных материалов. Методы спектроскопии и спектральные приборы в задачах

- автоматического управления процессом крашения текстильных материалов. Отчет о НИР (заключительный)/Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; рук. О.Д. Москалец; № ГР. 01200103825. СПб., 2004. 23 с.
108. ГОСТ 18895-97. Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа. М.: Изд-во стандартов, 2002. 15 с.
109. Arkhipov, I. N. The device of reading, processing and indication of spectrometric information / I. N. Arkhipov, M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of XIII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2010. P. 50.
110. Arkhipov, I. N. Multi-channel parallel optical spectrum analyzer / I. N. Arkhipov, M. A. Vaganov // Proc. of XII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2011. P. 15.
111. Ваганов, М. А. Аппаратура для одновременного анализа спектра сигналов в оптическом диапазоне / М. А. Ваганов // Сб. докл. научной сессии ГУАП. СПГУАП. СПб, 2011. С. 3-5.
112. Архипов, И. Н. Устройство считывания спектроскопической информации для многоканального анализатора спектра оптических сигналов / И. Н. Архипов, М. А. Ваганов, О. Д. Москалец // Сборник трудов VII международной конференции молодых ученых и специалистов «ОПТИКА – 2011», СПб: НИУИТМО, 2011. С. 407-408.