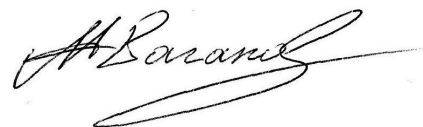


На правах рукописи



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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель: Кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Москалец Олег Дмитриевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, академик
РАЕ, заместитель генерального
директора ЗАО «НПЦ «Аквамарин»
Рудинский Александр Вадимович
Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики колебаний
физического факультета «МГУ им. М. В.
Ломоносова»
Волошинов Виталий Борисович

Ведущая организация: ОАО НИИ «Вектор», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «26» марта 2014 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.233.01 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, д. 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «ГУАП». Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://guap.ru>

Автореферат разослан «___» февраля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета:

доктор технических наук, профессор

 Д.К. Шелест

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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. 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, теневые, интерференционные, спектроскопические и методы измерения температуры пламени или скорости потока газа, возникающего при горении.

К числу наиболее информативных оптических методов контроля относятся спектроскопические, где прибором контроля является спектрометр, который исследует электромагнитное излучение как сигнал, несущий спектроскопическую информацию о процессе горения. Основные преимущества спектроскопических методов:

- 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, так как они не обладают малой инерционностью;
- зачастую являются единственно возможными, например, при изучении весьма удаленных или труднодоступных объектов;
- обладают высокой информативностью.

Большая роль спектроскопических методов при решении задач контроля процессов горения требует дальнейшего совершенствования известных и разработки новых методов анализа спектра оптических сигналов, расширения 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 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 пламени. При бесконтактном анализе оптический сигнал падает не на вход прибора, а сначала передается на безопасное для него расстояние от очага с помощью оптического волокна. В настоящее время существуют спектральные приборы, в которых для передачи излучений 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. 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 его разрешающей способности.

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.

Разработка и исследование 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, а новизна разработанного спектрометра подтверждается полученным на него патентом РФ № 86734.

Цель и задачи исследований

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 объекта.
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 исследования

Для решения поставленных в работе задач использовались следующие теории и методы:

- теории линейных систем, в том числе, многомерных линейных систем;
- теории сигналов;
- теории и методов обработки оптической информации;
- теории оптических спектральных приборов;
- методов спектрометрии;
- методы теоретической радиотехники;
- теории матриц;
- теории вытянутых волновых сфероидальных функций.

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.

Практическая значимость работы подтверждается следующим:

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 № 11572р/20938, проводимой при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.
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.
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 объекта.
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, двух приложений. Общий объем – 152 страницы, включая 50 рисунков и 4 таблицы. Список используемой литературы содержит 112 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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, в частности построенного на базе акустооптического перестраиваемого фильтра. 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.

Поэтому известные спектральные приборы не способны решать обозначенные выше задачи контроля процессов горения, где требуется применение волоконно-оптической системы для передачи анализируемого оптического излучения.

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

Многоканальный резонаторный спектрометр оптического диапазона разработан в рамках данной диссертационной работы.

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. Эта связь является базой всей теории спектральных измерений, независимо от диапазона анализируемых частот и принципов действия спектрального прибора.

Понятие математического спектра дается в рамках теории рядов и интегралов Фурье, где аргументами спектральных функций являются частоты. При этом из двух форм представления динамического сигнала – в виде колебания и в виде спектра, выбрана вторая форма, т.е. представление в виде комплексного спектра.

При проведении теоретического описания процесс анализа спектра оптических сигналов разработанным многоканальным спектрометром был разделен на два этапа. Сначала вычислялся комплексный спектр анализируемого сигнала с помощью анализатора комплексного спектра, который входит в состав многоканального спектрометра и представляет собой его анализирующую часть (резонаторную систему). Второй этап заключался в дальнейшей обработке комплексного спектра детектирующей системой спектрометра для получения энергетического спектра, который является результатом спектрального анализа в оптическом диапазоне и отражает состояние контролируемого процесса горения.

Такой подход дает последовательное описание прохождения анализируемого оптического сигнала через все узлы спектрального прибора, что, в конечном счете, дает решение основной задачи теории спектральных измерений.

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.

Математическая теория гармонического (спектрального) анализа рассматривается в классе линейных преобразований. Поэтому анализатор комплексного спектра, являющийся резонаторной системой многоканального спектрометра оптического диапазона, был рассмотрен как линейная система.

В общем случае связь между входом и выходом линейной системы устанавливается на основе определения ее исчерпывающей характеристики, под которой в теории линейных систем понимается отклик системы на соответствующее δ – воздействие. И отмечается ее специфический характер в теории спектральных измерений.

Исходя из основной концепции теории линейных систем, обосновано, что в случае анализа спектра в оптическом диапазоне аппаратная функция спектрального прибора определяется как его реакция на однородную

плоскую монохроматическую волну, и аппаратная функция анализатора комплексного спектра была введена следующим образом:

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

где \widehat{S}_w – линейный ограниченный оператор, описывающий действие анализатора комплексного спектра; \widehat{V} – линейный ограниченный оператор перехода от колебательного процесса к волне; \widehat{F}^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье.

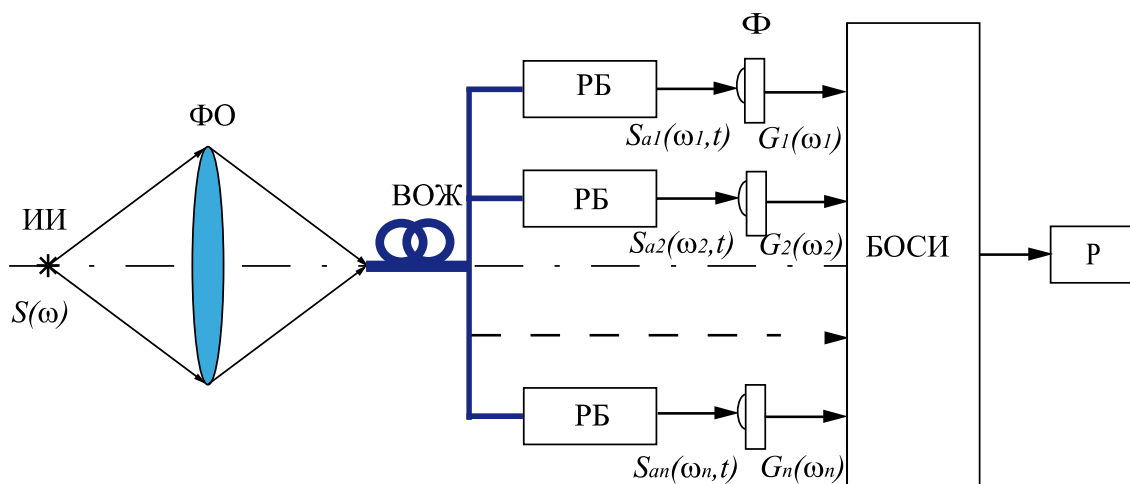
Учитывая специфику реального процесса анализа спектра, показано, что аппаратная функция зависит не только от частоты, но и от времени, а связь вход-выход анализатора комплексного спектра была определена в форме

$$S_a(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega, \omega', t) \cdot S(\omega') d\omega', \quad (2)$$

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. истинный (математический) спектр.

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 (2) на случай параллельного анализа, т.е. преобразовать его к матричной форме.

В третьем разделе выполнено теоретическое исследование работы прибора контроля в форме многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона, реализующего разработанный метод. Новизна спектрометра подтверждается полученным на него патентом РФ № 86734. Этот прибор выполняет параллельный анализ спектра, и его структурная схема приведена на рисунке 1.



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 анализируемого сигнала на входе спектрометра, т.е. математический спектр; $S_a(\omega, t)$ – комплексный аппаратный (физический) спектр; $G_k(\omega_k)$ – энергетический спектр оптического сигнала получаемый спектрометром

Рисунок 1 - Структурная схема многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона

В этом приборе спектральное разложение оптических сигналов основано на явлении резонанса, т.е. путем использования набора резонаторов оптического диапазона. Согласно терминологии принятой в оптике, резонатор оптического диапазона называется узкополосным интерференционным оптическим фильтром. Для ввода оптического излучения в резонаторные блоки, каждый из которых содержит резонатор, настроенный на определенную частоту (длину волны), предназначен волоконно-оптический жгут, что позволяет перенести спектрометр на безопасное для него расстояние от очага горения.

Совокупность оптических волокон и резонаторных блоков образуют анализатор комплексного спектра, т.е. резонаторную систему многоканального спектрометра, которая представляет собой анализирующую часть спектрометра и вычисляет комплексный спектр анализируемого сигнала. Набор фотоприемников образует детектирующую систему спектрометра, которая обрабатывает комплексный спектр для получения энергетического спектра, являющегося результатом анализа спектра в оптическом диапазоне и несущего информацию о состоянии контролируемого процесса горения.

Резонаторная система спектрометра является многомерной линейной системой, без перекрестных связей между каналами, и ее свойства описываются диагональной матрицей. Поэтому аппаратная функция резонаторной системы имеет матричную форму, а спектральная обработка оптического сигнала этой системой определяется следующим соотношением

$$\|S_{ak}(\omega, t)\| = \int_{-\infty}^{\infty} \text{diag}\{A_{kk}(\omega_k, \omega', t)\} \cdot \|S(\omega')\| d\omega', \quad (3)$$

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

Разработанный прибор дает отсчетные значения непрерывной спектральной функции, и связь между этими значениями и непрерывной функцией устанавливается с помощью интерполяционной теоремы Уиттекера, которая позволяет определить частоты настройки резонаторов.

Поскольку принцип действия всех каналов резонаторной системы одинаков, дальнейший теоретический анализ выполнялся для одного канала.

Преобразование спектра в k -ом канале дается выражением

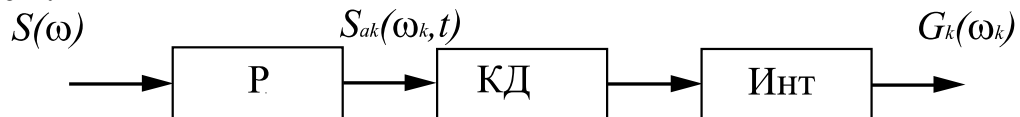
$$S_{ak}(\omega_k, t) = \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot B_{kk}(\omega') \cdot S(\omega') e^{i\omega' t} d\omega', \quad (4)$$

где $\Delta\omega_k$ – полоса пропускания резонатора в k -ом канале спектрометра, $B_{kk}(\omega')$ – передаточная функция отрезка оптического волокна, $K_{kk}(\omega_k, \omega')$ – передаточная функция k -го резонатора.

Это соотношение представляет комплексный текущий спектр, получаемый на выходе k -го канала резонаторной системы.

Полученный на выходе резонаторной системы комплексный спектр подлежит дальнейшей обработке для получения энергетического спектра оптического сигнала, который является результатом анализа спектра в оптическом диапазоне, поскольку все детекторы в оптическом диапазоне являются квадратичными.

При регистрации спектра оптического излучения нужно учесть значительную инерционность фотоприемника по отношению к периоду оптических колебаний. Процедура фотодетектирования инерционным фотоприемником описывается безинерционным квадратичным детектированием с последующим временным интегрированием фототока. Поэтому процесс анализа энергетического спектра оптического сигнала в одном канале можно представить функциональной схемой, изображенной на рисунке 2.



P – 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 2 – Функциональная схема вычисления энергетического спектра оптического сигнала

Учитывая, что комплексный спектр пропорционален напряженности электрической компоненты оптического излучения, математическая форма последовательности операций, представленных на рисунке 2, имеет вид

$$G_k(\omega) = \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} i_k(t) dt \approx P_k(\omega_k) \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} |S_{ak}(\omega, t)|^2 dt \approx \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} S_{ak}(\omega, t) S_{ak}^*(\omega, t) dt, \quad (5)$$

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

Дальнейшее преобразование выражения (5) и переход к матричной форме записи дало соотношение, описывающее получение энергетического спектра оптического сигнала многоканальным спектрометром, в следующей форме

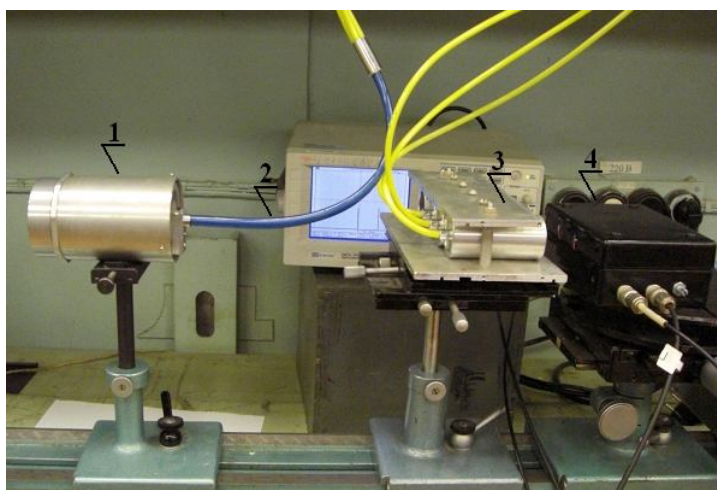
$$\|G_{ak}(\omega, t)\| = \int_{-\infty}^{\infty} \text{diag}\{W_{kk}(\omega_k, \omega')\} \cdot \|G(\omega')\| d\omega', \quad (6)$$

где $\|G_{ak}(\omega_k, t)\|$ – матрица-столбец, описывающий отсчетные значения энергетического спектра оптического сигнала, получаемого спектрометром; $G(\omega')$ – энергетический спектр анализируемого сигнала (математический спектр); $\text{diag}\{W_{kk}(\omega_k, \omega')\}$ – энергетическая аппаратная функция спектрометра.

Соотношение (6) 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.

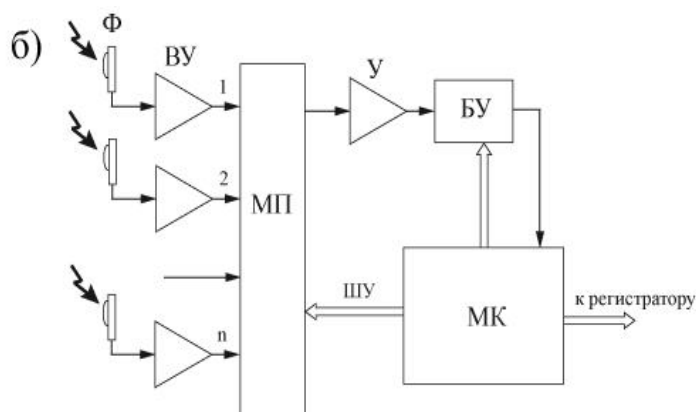
Полученное соотношение определяет оценку энергетического спектра оптического сигнала излучения пламени, полученную с помощью многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона. Такая оценка в теории статистических измерений считается хорошей и адекватно отражает состояние контролируемого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

В четвертом разделе приводятся результаты экспериментального исследования разработанного лабораторного макета многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона с передачей анализируемого сигнала по волоконно-оптическому жгуту. Фотография этого макета приведена на рисунке 3.



1 – формирующая оптика, 2 – волоконно-оптический жгут, 3 – три резонаторных блока, 4 – приемно-регистрирующий блок
 Рисунок 3 – Лабораторный макет многоканального резонаторного спектрометра оптического диапазона

Фотография приемно-регистрирующего блока и его структурная схема приведены на рисунке 4.



а) – фотография блока; б) – структурная схема блока, где Φ – фотоприемники, ВУ – входные усилители, МП – мультиплексор, У – усилитель, БУ – блок усиления, МК – микроконтроллер, ШУ – шина управления мультиплексором

Рисунок 4 – Приемно-регистрирующий блок

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

В данном блоке для каждого канала предусмотрена регулировка коэффициента усиления с целью компенсации искажений уровней сигналов, поступающих с фотоприемников. 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 соотношениях (4) и (5).

В качестве тестовых источников оптического излучения использовались лампа накаливания и вольфрамовая галогенная лампа.

В лабораторном макете использовался волоконно-оптический жгут, состоящий из 66 волокон и разделенный 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 5.

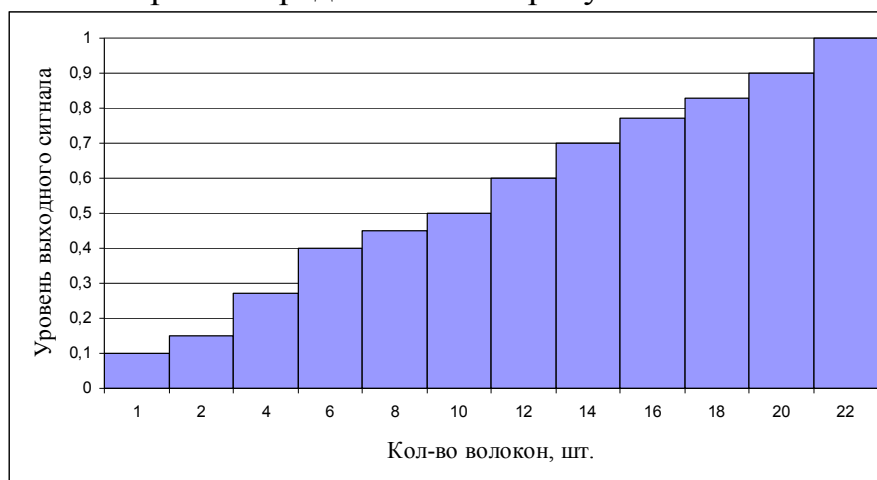


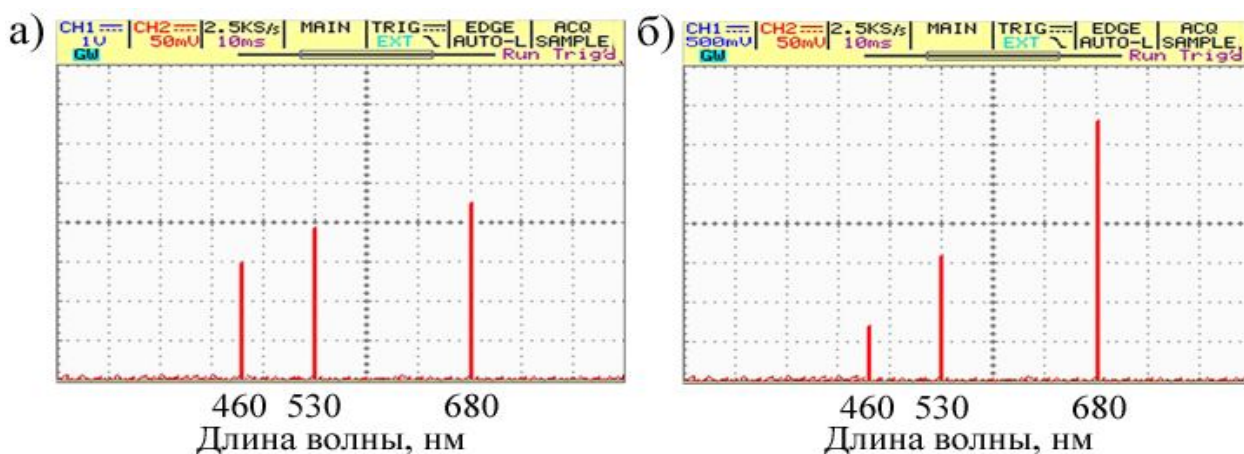
Рисунок 5 – Зависимость уровня выходного сигнала от количества оптических волокон в жгуте

Были определены значения мощности оптического излучения на выходе функциональных узлов лабораторного макета. Результаты эксперимента позволили установить, что по волоконно-оптическому жгуту (одного канала) передано 17% анализируемого излучения, поступившего на общий входной торец жгута, что значительно превышает значение, приведенное в известной работе, где говорится всего лишь о нескольких процентах введенного излучения в оптическое волокно.

Полученная гистограмма на рисунке 5 и результаты, описанные выше, 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.

В лабораторном макете используются резонаторы оптического диапазона со средними длинами волн равными 460 нм, 530 нм и 680 нм.

Отсчетные значения спектра излучений лампы накаливания и вольфрамовой галогенной лампы, полученные в результате проведенного эксперимента, приведены на рисунке 6.



а) – отсчетные значения спектра излучения лампы накаливания; б) – отсчетные значения спектра излучения вольфрамовой галогенной лампы

Рисунок 6 – Отсчетные значения спектра

На рисунке 7 приведены сопоставленные спектральная характеристика вольфрамовой галогенной лампы, данная производителем, и отсчетные значения спектра излучения этой лампы, полученные экспериментально разработанным прибором.

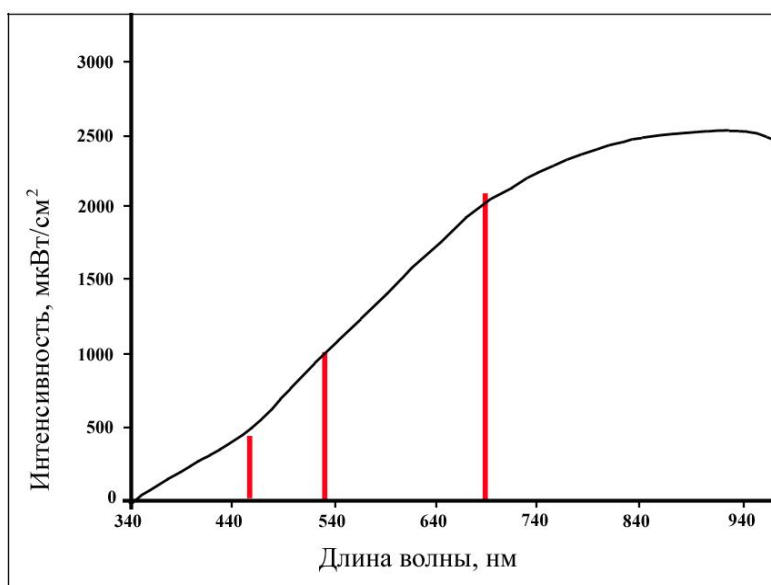


Рисунок 7 - Спектральные диаграммы вольфрамовой галогенной лампы

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. Приведены полученные отсчетные значения спектра.

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. К таким задачам относятся изучение процессов горения, например, в двигателях внутреннего сгорания и ракетных двигателях, а также изучение динамики пожаров в корабельных отсеках и оптимизация процессов горения в теплоэнергетических установках. Разработанный прибор также может применяться для контроля и управления различными технологическими процессами, протекающими в условиях повышенной температуры, влажности, агрессивной химической среды, повышенного уровня взрывоопасности.

Рассмотрен вопрос применения разработанного прибора для диагностики жидкостного ракетного двигателя по спектру излучения его факела. Данная диагностика двигателя основана на слежении за появлением и динамикой свечения в факеле ракетного двигателя спектральных линий химических элементов, являющихся продуктами разрушения конструкционных материалов двигателя: Fe, Cr, Al, Mg, Ni, Ti, Mn, W, Mo, Cu, V и др. Приведены значения длин волн атомарных линий химических элементов продуктов разрушения конструкционных материалов, которые необходимо анализировать для решения поставленной задачи. Для того чтобы по спектру отождествить химический элемент достаточным является количество каналов анализа спектра многоканального спектрометра - 30 и спектральное разрешение - 1 нм.

Рассмотрен вопрос по применению разработанного спектрометра в качестве составной части абсолютно взрывобезопасного пламенного пожарного извещателя для раннего и достоверного обнаружения очагов горения по спектру излучения пламени.

Рассмотрен вопрос о применении разработанного спектрометра для контроля процесса выплавки стали. В настоящее время малое инновационное предприятие ООО «ФАНТОМ» при ГУАП проводит НИОКР по контракту № 11572р/20938 по теме «Анализатор спектра факела пламени мартеновской печи», в основу которой легли результаты данной диссертационной работы.

Обосновано, что для решения задачи контроля и управления процесса крашения текстильных материалов достаточно иметь три канала анализа спектра многоканального спектрометра.

Приложение А. Приведены скан-копии страниц из каталога оптических фильтров фирмы Omega Optical, Inc, содержащих информацию об основных характеристиках узкополосных оптических фильтров.

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.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. 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. 15 с.
2. 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. 14 с.
3. Ваганов, М.А. Параллельный анализ спектра динамических сигналов/ М.А. Ваганов, О.Д. Москалец// Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 15-22.
4. Ваганов, М. А. Анализ спектров в оптическом диапазоне. Резонаторный анализ / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец // Информационно-управляющие системы. 2012. №6. С. 21 – 27.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. 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.
9. 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, Bellingham, WA, 2010. Vol. 7797. P. 77970X-1 - 77970X-12.
10. Ваганов, М. А. Анализатор спектра на базе оптических резонаторов / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец, Л. Н. Пресленев // Сборник материалов X Всероссийской научной конференции. Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления. Таганрог, 2010. С. 21-22.
11. 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 Int. conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2010. P. 50.
12. 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.
13. Ваганов, М. А. Аппаратура для одновременного анализа спектра сигналов в оптическом диапазоне / М. А. Ваганов // Сб. докл. научной сессии ГУАП. СПбГУАП. СПб, 2011. С. 3-5.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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 Int. conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2011. P. 13.
18. Moskalev, A.V. The standard wideband source of white light radiation for adjustment of optical spectrum analyzer/ A.V. Moskalev, M.A. Vaganov// Proc. of XII Int. conference for young researchers. Wave electronics and Its

- Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, p.17, 2011.
19. Vaganov, M. A. Spectrum analysis of optical signals is based on the resonance phenomenon / M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of SPIE Optics and Photonics for Information Processing IV, Vol. 8134. - Bellingham, WA, 2011. – P. 81340C-1 - 81340C-10.
 20. 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 // Proc. of SPIE. Optics and Photonics for Information Processing VI. Bellingham, WA, 2012. Vol. 8498. P 849812-1 - 849812-8.
 21. 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.
 22. 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.
 23. Sal'nikov, M.V. The computer simulation of characteristics of the optical spectral device's units/ M.V. Sal'nikov, M.A. Vaganov //Proc. of XV Int. conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, p.58, 2012.
 24. Vaganov, M. A. The multichannel spectral device with transmitting analyzed optical signals by the optical fiber for the liquid propellant rocket engine diagnostics/ M. A. Vaganov, O. D. Moskaletz // Proc. of SPIE Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIV, Vol. 8841. - Bellingham, WA, 2013. – P. 884114 -1 - 884114 -8.