

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

На правах рукописи

В. Казаков

Казаков Василий Иванович

СИСТЕМА ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ С
ВЫСОКОПОРЯДКОВОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

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 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Методы оптической спектроскопии в задачах контроля.....	17
1.1 Вводные замечания.....	17
1.2 Контактный и бесконтактный методы спектроскопии в задачах контроля.....	18
1.3 Эмиссионный и абсорбционный методы оптического спектрального контроля.....	21
1.4 Области применения оптической спектроскопии в задачах контроля.....	23
1.4.1 Оптический спектральный метод контроля в металлургии.....	23
1.4.2 Контроль процессов горения методами оптической спектроскопии.....	31
1.4.3 Контроль производства лекарственных форм и сырья.....	32
1.4.4 Контроль и качественный анализ в нефтехимии.....	34
1.5 Оптические спектральные приборы.....	37
1.5.1 Классификация спектральных приборов.....	37
1.5.2 Дифракционные спектральные приборы.....	37
1.5.3 Спектральный прибор на базе акустооптического перестраиваемого фильтра.....	40
1.5.4 Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона.....	42
1.5.5 Фурье-спектрометр.....	44
1.5.6 Сопоставление характеристик спектральных приборов.....	46
1.6 Выводы по разделу.....	51
2 Теоретический анализ работы спектрального прибора с дифракционной решеткой.....	53
2.1 Постановка задачи.....	53

2.2	Комплексные спектры оптических сигналов.....	57
2.3	Радиооптический анализ работы спектрального прибора с дифракционной решеткой.....	63
2.4	Оптический когерентный Фурье-процессор.....	65
2.5	Функция пропускания дифракционной решетки.....	67
2.6	Комплексная аппаратная функция спектрального прибора с дифракционной решеткой.....	74
2.7	Оценка энергетического спектра.....	77
2.8	Частотная фильтрация и считывание спектрометрической информации.....	79
2.9	Выводы по разделу.....	85
3	Бесконтактное измерение оптических спектров спектральным прибором с дифракционной решеткой с применением ВОСП.....	87
3.1	Математическая модель влияния ВОСП на аппаратную функцию спектрального прибора с дифракционной решеткой.....	87
3.2	Экспериментальные исследования по установлению влияния ВОСП на аппаратную функцию спектрального прибора с дифракционной решеткой.....	90
3.3	Расчет энергетических потерь в системе вывода излучения из волокна.....	94
3.4	Выводы по разделу.....	101
4	Разработка лабораторного макета системы оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой и экспериментальные исследования.....	102
4.1	Спектральный прибор с высокопорядковой дифракционной решеткой.....	102
4.2	Разработка системы оптического спектрального контроля с ВОСП.....	106

4.3	Коррекция результатов спектроскопических измерений в системе контроля.....	113
4.4	Улучшение разрешающей способности системы контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой.....	115
4.5	Выводы по разделу.....	120
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	121
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. «Духи» при дифракции на решетке.....	139
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Экспериментальные исследования процессов горения с использованием системы оптического спектрального контроля на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой.....	142
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. Скан-копии актов о внедрении.....	146
	Благодарности.....	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Применение методов оптического неразрушающего контроля [1] чрезвычайно широко распространено в различных областях науки, техники и промышленности. Среди различных видов оптического контроля следует выделить спектральный метод [2, 3], который базируется на принципах оптической спектроскопии и связан с изучением спектральных характеристик эмиссионного, отраженного или прошедшего объект контроля оптического излучения и исследованием по полученному спектру информации о его состоянии.

Спектральный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами оптического контроля.

- Метод позволяет осуществлять контроль в режиме реального времени. Это особо актуально, когда требуется минимальное время для получения информации в режиме реального времени об изменении состояния контролируемого процесса или объекта.

- В ряде случаев метод является единственно возможным, например, при изучении и контроле удаленных или труднодоступных объектов.

- Технические средства контроля оптическим спектральным методом обладают высоким быстродействием и малой инерционностью, что весьма актуально при контроле быстропротекающих процессов или в случае, когда необходимо очень быстрое срабатывание аппаратуры защиты для предотвращения критических ситуаций на опасных объектах.

- Метод позволяет не нарушать физических и химических условий на контролируемом объекте, т.е. не вносить возмущений в исследуемую среду.

К числу процессов и объектов, контроль которых возможен оптическим спектральным методом, можно отнести, например, следующие: процессы горения в топках теплоэнергетических установок и

двигателях [4-7], процесс выплавки металлов и сплавов в металлургии [8-10], крашение материалов в текстильной промышленности [11], контроль экологической обстановки и окружающей среды [12] и др. Протекающие при этом на объектах контроля физико-химические процессы связаны с эмиссией электромагнитного излучения в достаточно широком диапазоне частот, в том числе в оптическом. В результате анализа спектра эмиссионного излучения удастся получить чрезвычайно разнообразную информацию о протекающем процессе или состоянии объекта, а также выделить ряд информационных признаков, на основании которых возможно осуществление процедуры контроля и управления этими процессами [13].

В развитие методов оптической спектроскопии и спектрального приборостроения внесли значительный научный вклад К.И. Тарасов, В.И. Малышев, И.В. Скоков, В.В. Лебедева, Н.К. Павлычева, Ю.М. Беляков, И.В. Пейсахсон, С.Г. Раутиан, О.Д. Москалец, J. Hebling, Z. Marton и др.

Среди технических средств оптического контроля следует выделить спектральный прибор с дифракционной решеткой, который является одним из самых распространенных типов оптических спектральных приборов, применяемых в различных областях научных исследований. Прибор этого типа позволяет осуществлять мульти- и гиперспектральный контроль [3], т.е. имеет возможность контроля множества очень узких спектров излучения или поглощения (например, спектральных линий атомов и молекул) в широком диапазоне анализируемых частот (длин волн).

Среди работ, посвященных развитию дифракционных решеток и спектральных приборов на их базе следует выделить труды российских ученых: Сойфера В.А., Соколовой Е.А., Боброва С.Т., Туркевич Ю.Г., а также зарубежных ученых N. Gao, C. Xie, E. Loewen, C. Palmer и др.

Одной из основных характеристик аппаратуры оптического спектрального контроля является разрешающая способность [2, 3], поэтому задача улучшения и совершенствования этой характеристики является

актуальной и непреходящей. К сожалению, разрешающая способность прибора с дифракционной решеткой ограничивается работой в первом или, в лучшем случае, втором дифракционном порядке [14, 15], т.к. интенсивность дифрагированного света в более высокие порядки значительно убывает. Таким образом, в настоящее время существует проблема, заключающаяся в необходимости разработки дифракционных решеток нового типа, позволяющих успешно выполнять спектральные измерения в высоких дифракционных порядках (третьем или даже четвертом), где разрешающая способность прибора значительно лучше.

В ряде случаев процедура контроля требует размещения прибора в неблагоприятных для него условиях. Под такими условиями понимаются: повышенная температура или влажность, наличие агрессивной химической среды, высокий уровень вибраций и т.д. Негативное воздействие этих условий на спектральный прибор неизбежно ведет к ухудшению его метрологических характеристик, а значит, теряется часть получаемой информации о состоянии контролируемого процесса или объекта. Устранение негативного влияния на прибор возможно за счет выполнения бесконтактного измерения спектра [16], когда прибор помещен вне зоны действия неблагоприятных условий, а излучение от контролируемого объекта на вход прибора передается по волоконно-оптической системе передачи (ВОСП) [17].

В этом случае нельзя игнорировать появление частотных и пространственных искажений, вызванных передачей сигнала по ВОСП, на результат спектральных измерений, что требует введения дополнительной их коррекции. Кроме того, не решен вопрос оценки энергетических потерь в системе вывода излучения из ВОСП, а также не разработана методика расчета параметров оптических элементов системы вывода излучения из ВОСП для минимизации этих потерь. Эти вопросы также требуют обсуждения и дальнейшей разработки. Ухудшение разрешающей способности спектрального прибора вследствие передачи оптического

сигнала по ВОСП также актуализирует задачу разработки приборов с улучшенной разрешающей способностью.

В диссертационной работе предложено, исследовано и обосновано использование спектрального прибора с высокопорядковой дифракционной решеткой в системе бесконтактного спектрального контроля с ВОСП, решающее указанные проблемные задачи.

Цель работы: повышение разрешающей способности бесконтактного оптического спектрального метода контроля за счет измерения спектров в высоких дифракционных порядках.

Объектом исследования является система бесконтактного оптического контроля на базе спектрального прибора с высокопорядковой дифракционной решеткой.

Предмет исследования – метод формирования дифракционных спектров высоких порядков в системе оптического спектрального контроля.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи.

- Аналитический обзор современного состояния методов и аппаратуры контроля на базе измерения оптических спектров и их сопоставление по основным характеристикам.
- Разработка новой математической модели спектрального преобразования и детектирования, реализованных в спектральном приборе с дифракционной решеткой, и определение пути дальнейшего повышения разрешающей способности прибора.

- Исследование и разработка методики формирования топологии дифракционной решетки, позволяющей выполнять анализ спектра в высоких дифракционных порядках.
- Установление влияния искажений анализируемого оптического сигнала при передаче по ВОСП на результат спектральных измерений. Определение энергетических потерь в ВОСП.
- Разработка лабораторного макета системы бесконтактного контроля на базе спектрального прибора с высокопорядковой дифракционной решеткой и экспериментальные исследования по измерению спектров тестовых источников этой системой.

Методы решения задач

Основной методологией исследования является перенос в оптический диапазон хорошо развитых методов радиофизики, радиотехники и электроники. Такой научный подход получил название радиооптики [18-22]. При разработке новой математической модели спектрального преобразования в приборе с дифракционной решеткой из радиотехники были заимствованы и успешно применены методы теории сигналов и линейные и нелинейные преобразования последних.

Система контроля рассматривается на базе методов системного подхода в виде двух подсистем: ВОСП и спектрального прибора с дифракционной решеткой.

Рассмотрение ВОСП, установление искажений и энергетических потерь в ней потребовало привлечения методов волоконно-оптических технологий [23] и формирования оптических пучков с использованием методов волновой оптики [24].

В свою очередь, спектральный прибор рассматривается как система, также состоящая из двух подсистем: анализирующей (линейная подсистема)

и регистрирующей, включающей нелинейную операцию фотодетектирования.

Анализирующая часть спектрального прибора с дифракционной решеткой рассматривается в виде оптического когерентного Фурье-процессора с помещенной на его входе пропускающей дифракционной решеткой, и анализ её действия потребовал привлечения методов когерентной оптики [18, 25, 26], теории интегралов Фурье [27] и теории линейных систем [28].

Рассмотрение операции считывания спектрометрической информации с помощью ПЗС-линейки базируется на методах классической электродинамики [29] и квантовой электроники [30, 31].

Анализируемое оптическое излучение, в первую очередь, рассматривается как сигнал, несущий информацию о состоянии контролируемого объекта, что требует применения к нему методов теории сигналов [32, 33] и методов теории интегралов Фурье [27], оперирующих с комплексными спектрами.

Методы теории функций [34, 35] и функционального анализа [36] используются при установлении связи вход-выход линейной анализирующей подсистемы и результатов считывания спектрометрической информации.

Применение методов компьютерного моделирования с использованием систем MathCad и MatLab объясняется необходимостью наглядного представления полученных математических зависимостей, а также выполнения ряда численных расчетов параметров систем.

Для подтверждения корректности разработанных теоретических изысканий в форме математических и компьютерных моделей были использованы методы физического эксперимента, которые потребовали разработки лабораторного макета системы бесконтактного контроля на базе дифракционного решеточного спектрального прибора, а также проведения ряда натуральных лабораторных экспериментов.

Научная новизна работы

- Предложена математическая модель процесса спектрального преобразования, реализованного в спектральном приборе с дифракционной решеткой, на основе ранее не применявшегося в оптической спектрометрии математического аппарата (теория сигналов, теория линейных систем, теория функций с двойной ортогональностью), что позволило установить связь между оптическим сигналом, падающим на вход прибора и представленного в виде комплексного спектра, и его энергетическим аппаратурным спектром, регистрируемым спектральным прибором.

- На базе разработанной математической модели и представления функции пропускания дифракционной решетки в виде разложения в экспоненциальный ряд Фурье на ее апертуре установлены важнейшие свойства комплексных спектров в различных дифракционных порядках и способ повышения разрешающей способности прибора путем введения пространственной модуляции функции пропускания дифракционной решетки.

- Предложена методика формирования топологии дифракционной решетки, заключающаяся в периодическом неэквидистантном расположении прозрачных и непрозрачных полос дифракционной решетки разной ширины, что позволило увеличить интенсивность дифрагированного света в третий и четвертый дифракционные порядки и, тем самым, повысить разрешающую способность прибора. Новизна предложенной реализации топологии решетки подтверждена полученным Патентом РФ №181375 [37].

- Разработана математическая модель распространения излучения в оптической системе вывода излучения из ВОСП на основе ее представления в виде оптического когерентного Фурье-процессора и преобразовании гауссова распределения поля от торца волокна этой системой, что позволило оценить уширение аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой в случае использования ВОСП.

- Предложена методика расчета параметров оптических элементов системы вывода излучения из ВОСП, учитывающая дифракционную расходимость оптического излучения от торца волокна, и проведены экспериментальные исследования, позволяющие минимизировать энергетические потери.

- Процедура считывания спектрометрической информации с помощью ПЗС-линейки впервые рассмотрена как операция пространственной частотной фильтрации каждым элементом (пикселем) с дальнейшим квадратичным детектированием и временным интегрированием, что позволило установить результат считывания в форме отсчетных значений энергетического спектра.

- Предложен алгоритм последетекторной обработки результатов считывания оптического спектра, заключающийся в пересчете пространственной шкалы в частотную в виде нелинейного преобразования, а также учитывающий неравномерность спектральной чувствительности ПЗС-линейки и частотной характеристики ВОСП, что позволяет производить коррекцию результатов спектроскопических измерений.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается их непротиворечивостью ранее известным положениям, применением в процессе исследований адекватных физических и математических моделей, корректным использованием современных методов компьютерного моделирования и физического эксперимента, а также экспериментальным подтверждением полученных теоретических результатов и положительными результатами внедрения.

Практическая значимость диссертационной работы

- Результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при разработке технических средств контроля оптическим спектральным методом на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой с улучшенной разрешающей способностью. Результаты диссертации могут быть также полезны как для специалистов, занимающихся расчетом, проектированием и изготовлением спектральных приборов, так и для широкого круга пользователей спектральной аппаратуры.

- Разработанная методика формирования топологии расположения штрихов дифракционной решетки позволяет получить ранее недостижимую возможность работы в высоких (третьем и четвертом) дифракционных порядках. Применение таких решеток в спектральных приборах позволяет существенно улучшить их разрешающую способность.

- Разработанный лабораторный макет системы бесконтактного контроля использован при проведении лабораторных работ по дисциплине «Оптическая обработка информации», «Основы оптики», «Основы квантовой электроники» для изучения оптических спектров различных источников излучения. Полученные результаты теоретических исследований используются при выполнении курсового проекта по дисциплине «Основы оптики» на кафедре №23 «Конструирования и технологий электронных и лазерных средств» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Результаты теоретических исследований включены в материалы курса лекций по дисциплинам «Основы оптики», «Когерентная оптика». Использование полученных научных результатов в учебном процессе подтверждено актом о внедрении.

- Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований послужили основой выполнения НИР «Исследование и разработка нового поколения устройств спектрально-корреляционного

анализа сигналов оптического диапазона для экстремальных условий эксплуатации» в рамках выполнения государственных заданий высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности, проект № 8.9203.2017/8.9 (2017-2019) [38]. Результатом этого проекта должны явиться действующие экспериментальные образцы устройств анализа спектров сигналов оптического диапазона.

- Научные исследования, выполненные в рамках данной диссертационной работы, являются составной частью поддержанных грантами РФФИ продолжающихся НИР № 17-07-00826, № 17-07-00554, № 16-07-00549 и завершенных НИР №13-07-00238 [39], №15-37-20446 [40]. Использование полученных научных результатов при выполнении НИР подтверждено актом о внедрении.

Основные положения, выносимые на защиту

- Математическая модель спектрального преобразования и детектирования, реализованных в оптическом спектральном приборе с дифракционной решеткой.

- Способ повышения разрешающей способности спектрального прибора путем применения дифракционной решетки с периодическим неэквидистантным расположением штрихов разной ширины, позволяющей работать в высоких дифракционных порядках.

- Результаты теоретических и экспериментальных исследований искажений и энергетических потерь в ВОСП и их влияние на результаты измерений спектральным прибором с дифракционной решеткой.

- Результаты лабораторных экспериментальных исследований по бесконтактному измерению оптических спектров тестовых источников спектральным прибором с улучшенной разрешающей способностью.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах в период с 2014 по 2018 гг.

- Научная сессия ГУАП, 2015, 2018 гг., г. Санкт-Петербург, Россия.
- Международная молодежная научная конференция «Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах», 2014-2018 гг., ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия.
- Международная конференция «Оптика-2015», Университет ИТМО, 2015 г., г. Санкт-Петербург, Россия.
- Международная конференция «Saint-Petersburg OPEN 2018 по Оптоэлектронике, Фотонике, Нано- и Нанобиотехнологиям», 2018 г., г. Санкт-Петербург, Россия.
- Международная конференция «SPIE Optics and Photonics», 2015 – 2017 гг., г. Сан-Диего, Калифорния, США.
- Международная конференция «SPIE Photonics Europe-2016», 2016 г., г. Брюссель, Бельгия.
- Международная конференция «OSA Frontiers in Optics», 2016 г., г. Рочестер, Нью-Йорк, США.
- Международная конференция «SPIE Photonics Europe-2018», 2018 г., г. Страсбург, Франция.

Публикации

Материалы, отражающие основное содержание и результаты диссертационной работы, опубликованы в 25 печатных работах. Из них 1 – патент РФ, 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 10 – в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, а также 10 работ опубликованы в материалах российских и международных научных конференций, входящих в РИНЦ.

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, трех приложений. Общий объем – 150 страниц, включая 68 рисунков и 4 таблицы. Список используемой литературы содержит 129 наименований.

Область исследования соответствует положениям 1, 2, 3, 6, 7 специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

1 Методы оптической спектроскопии в задачах контроля

1.1 Вводные замечания

Методы оптической спектроскопии и приборы, реализующие эти методы, являются наиболее распространенными в качестве инструмента исследований различных физических, технологических, химических и других процессов, а также строения материи и т.д. Методы оптической спектроскопии также находят широкое применение в системах контроля и мониторинга, поскольку являются наиболее информативными и удобными.

Оптический спектральный метод контроля, который базируется на методах оптической спектроскопии, является единственно возможным при изучении весьма удаленных или труднодоступных объектов. Отличительное качество этого метода состоит в том, что исследование и контроль объекта по его спектру не нарушает физических условий, существующих в этом объекте [16]. При этом измерительным средством является оптический спектральный прибор, который исследует электромагнитное излучение как сигнал, несущий спектроскопическую информацию об объекте.

Использование методов спектроскопии возможно практически во всем диапазоне электромагнитных волн. Однако методы оптической спектроскопии (начиная от ультрафиолетового (УФ) и заканчивая инфракрасным (ИК) диапазоном) выделяются особняком в силу особенностей этого диапазона частот, а также является наиболее распространенным средством для исследования и контроля в самых различных задачах науки и техники.

Процедура выполнения неразрушающего контроля главным образом заключается в выполнении измерения той или иной физической величины и операции ее сопоставления с эталонным/пороговым значением, определяемым критерием контроля. Для оптического спектрального контроля в рассмотренных в этом разделе задачах таким критерием служит наличие или отсутствие спектральных линий, полос поглощения или

излучения на заданных частотах (длинах волн). При этом, в конечном счете, физической величиной, которая подвергается сопоставлению, является значение фототока при считывании спектрометрической информации в соответствующем канале (пикселе) детектора.

И если процедура сопоставления и выдачи информации о состоянии контролируемого объекта является достаточно простой и вполне решенной задачей с учетом современных возможностей и достижений в области обработки сигналов и цифровой техники, то задача измерения оптического спектра является трудоемкой задачей с массой нерешенных на данный момент проблем.

1.2 Контактный и бесконтактный методы спектроскопии в задачах контроля

Существует два способа проведения спектроскопических измерений: контактный и бесконтактный. В зависимости от способа проведения измерений возникает ряд проблем и задач, которые необходимо решить для получения качественных и достоверных результатов о состоянии контролируемого объекта, что показано на рисунке 1.

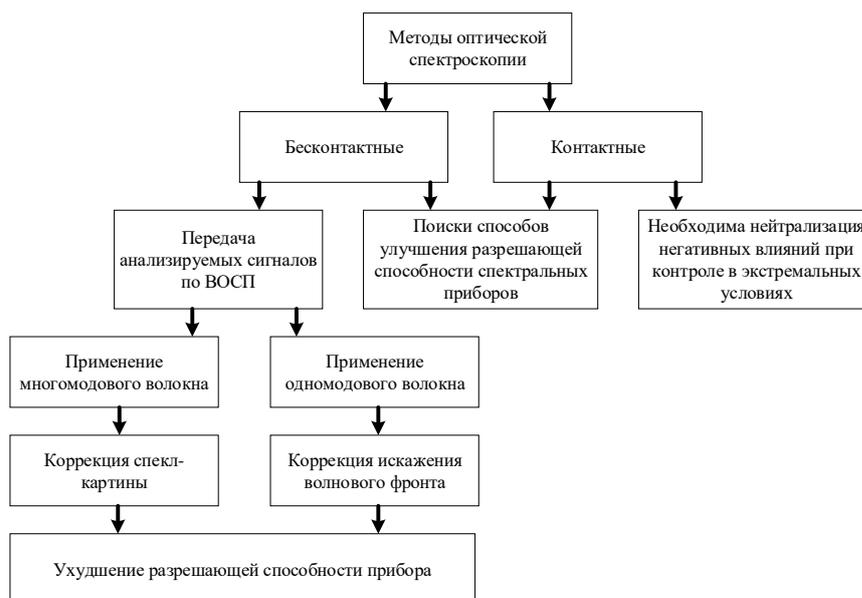


Рисунок 1 – Проблемы и задачи контактного и бесконтактного методов оптической спектроскопии

- Контактный метод оптической спектроскопии подразумевает непосредственный контакт спектрального прибора с анализируемым излучением (рисунок 2а). Следует отметить, что в случае проведения спектроскопических измерений в экстремальных условиях (повышенной температуры, влажности, агрессивной химической среды, повышенных уровнях вибраций и механических воздействий и т.д.) спектральный прибор подвергается воздействию вышеуказанных негативных факторов. Это неизбежно приводит к тем или иным потерям информации о состоянии контролируемого объекта, главным образом, вследствие ухудшения разрешающей способности прибора, его динамического диапазона и других метрологических характеристик.

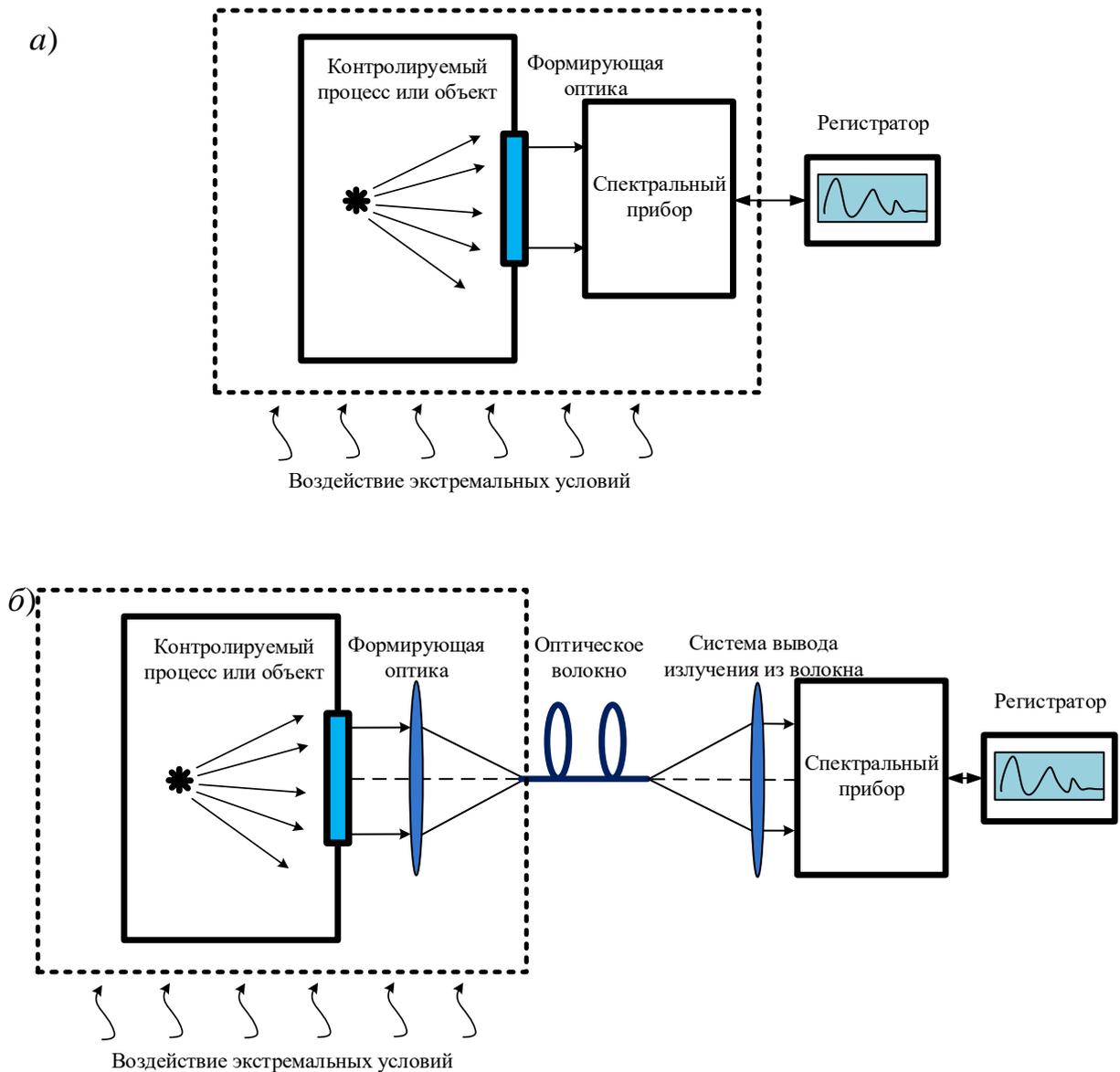
- Бесконтактный способ означает, что измерения или контроль выполняются при отсутствии контакта разрешающей системы спектрального прибора с полем излучения контролируемого объекта (рисунок 2б). В этом случае анализируемый оптический сигнал падает не на вход прибора, а сначала передается на безопасное для него расстояние от источника излучения, например, с помощью ВОСП [41]. Спектральные системы контроля, реализующие бесконтактный метод оптической спектроскопии, были предложены, например, в работах [42, 43].

Одной из важнейших задач при бесконтактном способе измерения спектра является передача анализируемых оптических сигналов по ВОСП.

Эта задача имеет несколько аспектов.

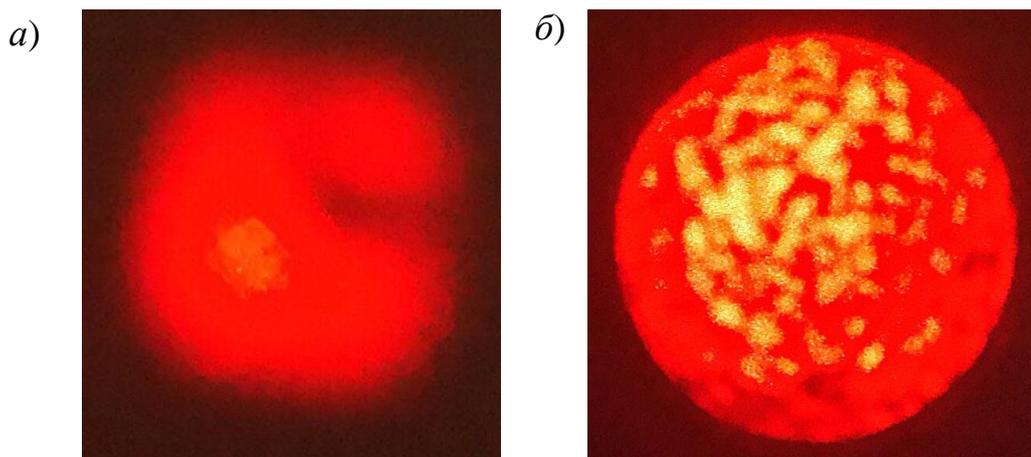
- При использовании одномодового волокна возникает проблема эффективного ввода излучения в волокно. Кроме того, передача сигнала по одномодовому волокну приводит к тому, что падающий на вход спектрального прибора фронт волны становится неоднородным и не плоским (рисунок 3а), что приводит к ухудшению разрешающей способности прибора.

• При использовании многомодового волокна на его выходном торце возникает спекл-картина (рисунок 3б) – требуемый однородный плоский фронт волны полностью разрушается и представляет собой пятнистую структуру, поэтому требуется серьезная коррекция спекл-картины для обеспечения корректного измерения спектра [46].



а) контактный способ; б) бесконтактный способ

Рисунок 2 – Способы спектроскопических измерений в задачах контроля



а) одномодовое волокно; б) многомодовое волокно

Рисунок 3 – Излучение, прошедшее волоконно-оптическую систему с одномодовым и многомодовым волокном

Помимо отмеченного выше, оптическое волокно имеет неравномерную характеристику затухания по диапазону анализируемых частот (длин волн). При передаче на небольшие расстояния (несколько метров) этот фактор практически не оказывает влияния на результат измерений, однако в случае, когда анализируемое излучение передается на значительные расстояния (несколько десятков километров) в достаточно широком диапазоне анализируемых частот (длин волн) этот фактор необходимо учитывать путем введения программной частотной коррекции результатов измерения спектра.

1.3 Эмиссионный и абсорбционный методы оптического спектрального контроля

Существует два вида контроля, различающиеся по характеру взаимодействия оптического излучения с контролируемым объектом: эмиссионный и абсорбционный методы [2].

Эмиссионный спектральный метод контроля предполагает, что ведется регистрация спектра, излученного объектом электромагнитного излучения. При этом возбуждение объекта с целью получения характеристического

оптического излучения, подлежащего последующему спектральному анализу, может осуществляться различными способами (в результате нагрева, пропускания электрического тока, путем воздействия лазерным или другим излучением и т.д.), либо процесс излучения протекает самостоятельно (например, при контроле процессов горения, выплавки металлов, изучении спектров излучения звезд и т.д.).

Схема проведения процедуры контроля эмиссионным спектральным методом показана на рисунке 4.

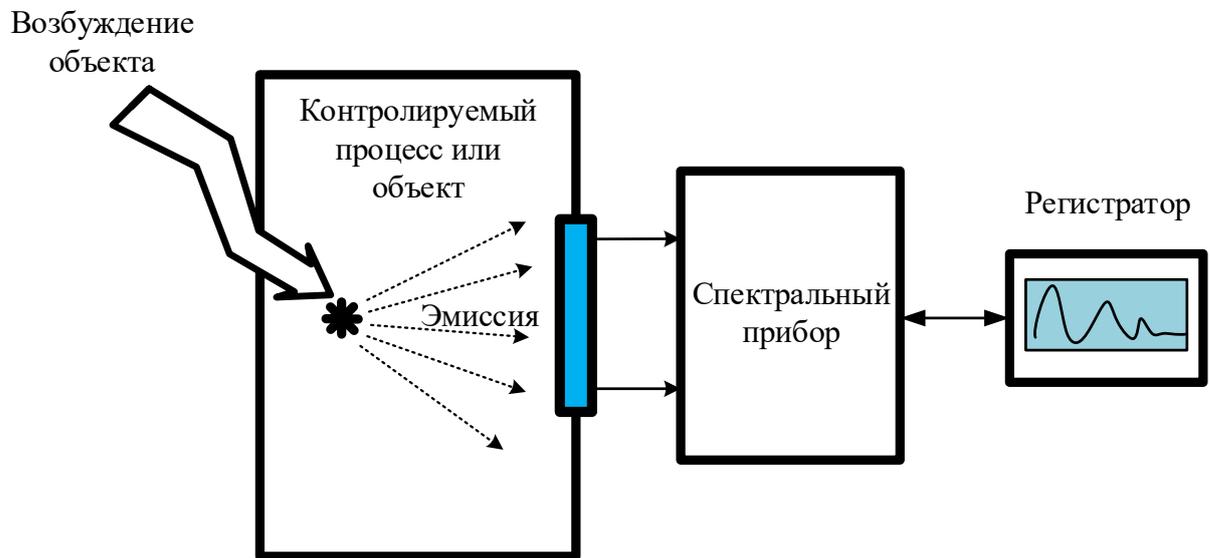


Рисунок 4 – Схема контроля эмиссионным спектральным методом

В случае абсорбционного спектрального метода измеряется спектр поглощения анализируемого объекта. Методика измерения спектра поглощения довольно проста и может быть проиллюстрирована рисунком 5.

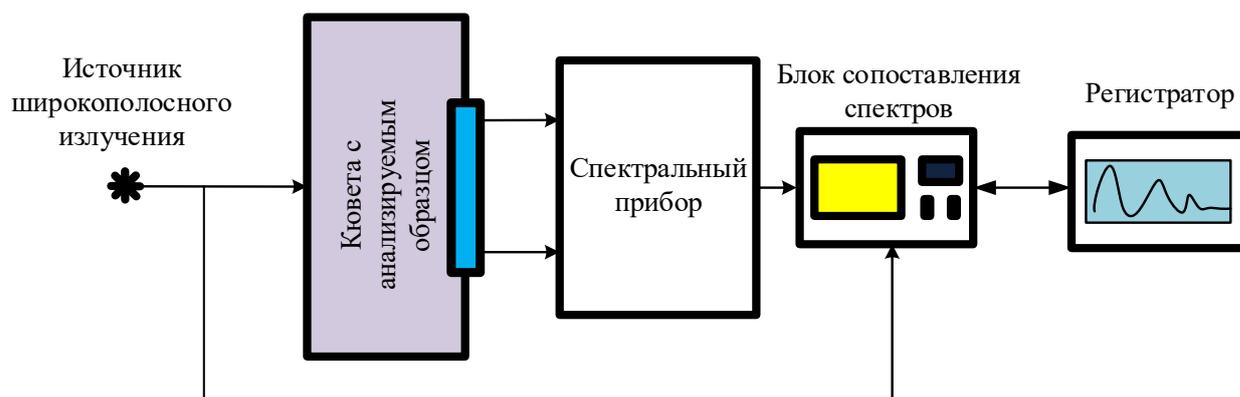


Рисунок 5 – Схема контроля абсорбционным спектральным методом

Исследуемый образец помещается в кювету, которая освещается светом от широкополосного источника оптического излучения, спектр которого заранее известен. Пройденный через кювету с образцом свет подается на вход спектрального прибора. В результате сопоставления спектра источника и измеренного спектра, прошедшего через исследуемый образец, на экране регистратора формируется спектр поглощения и делается вывод о состоянии контролируемого объекта.

1.4 Области применения оптической спектроскопии в задачах контроля

1.4.1 Оптический спектральный метод контроля в металлургии

1.4.1.1 Контроль состава выплавляемых металлов и сплавов

Контроль состава выплавляемых металлов и сплавов является важной процедурой, на основании которой определяется процентное содержание примесей и легирующих добавок в металле, а также элементный химический состав сплавов. Процесс контроля химического состава имеет чрезвычайно важное значение в металлургии, поскольку знание чистоты металла и содержащихся в нем примесей определяет и позволяет прогнозировать технические характеристики деталей, которые будут произведены из этого металла или сплава.

В настоящее время существует несколько методик контроля состава выплавляемых металлов.

- Рентгенофлуоресцентный анализ [45, 46], основанный на возбуждении рентгеновским излучением исследуемого образца и последующем анализе спектра характеристического рентгеновского излучения, возбуждаемого в исследуемом образце. Метод позволяет производить как качественный (определение химического состава сплава), так и количественный (определение процентного содержания элементов в сплаве) анализ.

- Пробирный анализ [47, 48], основанный на физико-химических особенностях восстановления металлов, шлакообразования и смачивания расплавленными веществами.

- Спектральный анализ [49, 50]. Этот метод заключается в возбуждении исследуемого образца электрическим разрядом или высокой температурой и регистрации спектра эмиссионного излучения спектральным прибором. Большинство спектральных линий металлов лежит в диапазоне 200-520 нм, что отображено в таблице 1. По наличию или отсутствию соответствующих спектральных линий делается вывод о составе сплава или металла.

Таблица 1 – Спектральные линии металлов

Элемент		Длины волн аналитических линий, нм	Относительный коэффициент ослабления чувствительности
1	2	3	4
Al	Алюминий	309,27 дублет	1
		309,28	
		396,15	1,5
		237,31 дублет	5,1
		237,34	
		257,41 дублет	10,8
		257,44	
B	Бор	249,77 дублет	1,0
		249,68	
		208,89 дублет	2,3
		208,65	
Be	Бериллий	234,86	1,0
Cr	Хром	357,87	1,0
		428,97	7,5
		520,84	200
		520,45	500
Cu	Медь	324,75	1,0
		217,89	8,3
		218,17	11
		222,57	38
		244,16	280
		510,89	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Fe	Железо	248,33	1,0
		371,99	9,0
		385,99	15
		392,03	270
Hf	Гафний	307,29	1,0
		368,22	5,7
Mg	Магний	285,21	1,0
		202,50	30
Mo	Молибден	313,26	1,0
		320,88	13
Nb	Ниобий	334,91	1,0
		358,03	1,1
		407,97	1,2
		405,89	1,2
Ni	Никель	232,00	1,0
		362,45	5,1
		351,50	11
		362,47	540
Rb	Рубидий	780,2	1,0
		794,76	2,8
		420,18	100
Th	Торий	371,94	
		380,31	
		330,42	
Ti	Титан	364,27	1,0
		365,35	1,1
		398,98	2,4

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
V	Ванадий	348,94	2,9
		318,54	1,0
		318,40	1,4
		306,64	3,9
		439,00	7,8
W	Вольфрам	255,14	1,0
		400,88	3,8
		407,44	8,3

Основываясь на данных таблицы 1 можно сделать вывод, что для получения исчерпывающей спектрометрической информации при непосредственном измерении спектра, разрешающая способность прибора должна быть порядка 0,01 - 0,05 нм, чтобы спектрограммы спектральных линий не перекрывали друг друга. Этот факт еще раз указывает на необходимость разработки и совершенствования спектральной аппаратуры контроля в оптическом диапазоне.

В таблице 2 выполнено сопоставление рассмотренных методик.

Таблица 2 – Сравнение методик контроля состава металлов и сплавов

Характеристика	Методика контроля		
	Рентгенофлуоресцентный анализ	Пробирный анализ	Спектральный анализ
Время измерения	Быстро (<1 мин.)	Занимает определенное время (>1 часа) на проведение химических реакций	Быстро (<1 мин.)
Точность измерения	Высокая точность	Очень высокая точность	Высокая точность

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Неразрушающий контроль	Да	Нет	Нет
Безопасность	Нежелательное облучение рентгеновским излучением	Необходимость соблюдения мер безопасности в лаборатории	Требуется размещение аппаратуры вблизи возбужденного образца (небезопасно)
Необходимое количество материала для анализа	Требуется большая площадь для облучения. Анализ образцов малого объема невозможен	Возможен анализ образцов малого объема	Возможен анализ образцов малого объема
Стоимость контроля	Очень дорогостоящее оборудование	Требуется специализированная лаборатория с высокоточными приборами	Сравнительно недорогой метод контроля

У всех рассмотренных выше методов контроля состава металлов и сплавов имеется существенный недостаток – отсутствие возможности выполнения процедуры контроля в режиме реального времени.

Оптический спектральный метод может быть успешно применен для контроля технологического процесса выплавки металлов в режиме реального времени. Речь идет об отмеченном выше бесконтактном способе измерения спектра [6, 41-43].

На основании выполненного сопоставления можно сделать вывод, что оптический спектральный метод контроля состава металлов и сплавов является наиболее предпочтительным, т.к. сочетает в себе высокую скорость и точность измерения с возможностью неразрушающего контроля

технологического процесса в режиме реального времени в случае применения методов бесконтактной оптической спектроскопии.

1.4.1.2 Контроль процесса выплавки тугоплавких металлов в вакуумно-дуговых печах

Применение оптического спектрального метода контроля возможно также в вакуумно-дуговом плавении, и в особенности, в процессах получения слитков тугоплавких металлов.

Известно [51], что для получения монокристаллического слитка металла необходимо осуществить его переплавку. Для предупреждения образования пористой структуры переплавку осуществляют в вакуумно-дуговых печах при давлении в камере менее 1 Па. При этом в процессе переплавки возможно выполнение операции легирования. Процентное содержание легирующих добавок в выплавляемом слитке напрямую влияет на качество и свойства получаемого слитка.

Поскольку тугоплавкие металлы, к числу которых относится титан, вольфрам, молибден, никель и др. плавятся при температуре выше 2000°C, процесс контроля выплавки протекает в экстремальных условиях – повышенной температуры. Отсюда вытекает задача бесконтактного контроля процесса выплавки. В работе [52] обозначены следующие проблемы контроля процесса вакуумно-дуговой выплавки металлов.

- Проблема контроля межэлектродного промежутка между расплавленным металлом и электродом.
- Проблема поддержания постоянной температуры плавления за счет управления величиной электрического тока.
- Проблема управления электрической дугой и предотвращения прожигания кристаллизатора в результате переброса на него дуги с расплавленного металла.

Одним из возможных решений вышеуказанных проблем контроля высокотемпературной вакуумной дуговой переплавки является оптический спектральный метод контроля.

В работе [10] показано применение оптического спектрометра в качестве прибора контроля спектральных линий металлов исследуемого сплава в процессе переплавки.

В вакуумно-дуговой печи имеется смотровое окно с закаленным кварцевым стеклом, выдерживающем высокую температуру при плавлении тугоплавких металлов. С этим окном был оптически согласован через систему зеркал спектральный прибор на базе дифракционной решетки. В результате выполненного эксперимента были измерены спектральные линии атомов входящих в сплав металлов, возбужденных электрической дугой в процессе переплавки и получены «средние» температуры дуги по измеренным длинам волн.

Таким образом, есть основания утверждать, что оптический спектральный метод контроля и технические средства, его реализующие, могут быть успешно использованы для решения задач контроля параметров электрической дуги при переплавке, а также поддержания оптимальной ее температуры. Кроме того, спектральный прибор может быть использован в качестве прибора контроля в системе безопасности плавильной печи и защиты кристаллизатора от прожога [53]. Появление в спектре контролируемого процесса переплавки спектральных линий меди (или другого материала, из которого изготовлен кристаллизатор) служит сигналом нештатного состояния установки и незамедлительного прекращения работы. При этом к прибору контроля предъявляются жесткие требования по условиям эксплуатации и техническим характеристикам:

– высокое быстродействие (время обнаружения спектральных линий меди не должно превышать 0,1 с);

– высокое спектральное разрешение (спектральную линию меди необходимо достоверно обнаружить среди сплошного и достаточного интенсивного излучения электрической дуги);

– способность прибора контроля работать в экстремальных условиях (повышенных температур, вибрации, а также воздействия электрических полей).

Задача контроля процесса выплавки тугоплавких металлов в экстремальных условиях может быть решена за счет применения метода бесконтактной оптической спектроскопии, основой которой является передача анализируемого излучения на безопасное расстояние с помощью ВОСП. При этом среди рассмотренных выше различных классов спектральных приборов предпочтение следует отдать спектральному прибору с дифракционной решеткой, поскольку он обладает более высокой разрешающей способностью и имеет возможность выполнять спектроскопические измерения в широком диапазоне анализируемых длин волн (частот), что является значительным преимуществом по сравнению, например, с параллельным анализатором спектра сигналов оптического диапазона [42].

1.4.2 Контроль процессов горения методами оптической спектроскопии

Одним из важных направлений химико-физических исследований является изучение процессов горения, где спектроскопические методы признаны наиболее информативными [4]. Сплошное излучение пламени сосредоточено, в основном, в области $\lambda > 500$ нм. Молекулярные полосы в спектре излучения пламени 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 .

По спектральным линиям химических элементов и соединений в спектре пламени возможно судить о не только о составе веществ, образующихся в результате процесса горения, но и управлять этим процессом, например, изменяя соотношение кислорода и топлива.

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, содержащий спектроскопическую информацию о состоянии контролируемого процесса, т.е. о процессе горения. При этом, как и во всех описанных выше областях применения, для определения спектральных линий прибор должен обладать высокой разрешающей способностью.

Сам процесс горения протекает при высокой температуре, что автоматически подразумевает выполнение процедуры контроля процесса горения в экстремальных условиях. Контроль процесса горения можно также осуществлять с помощью бесконтактного метода, т.е. с применением ВОСП для передачи излучения пламени от источника на вход спектрального прибора.

1.4.3 Контроль производства лекарственных форм и сырья

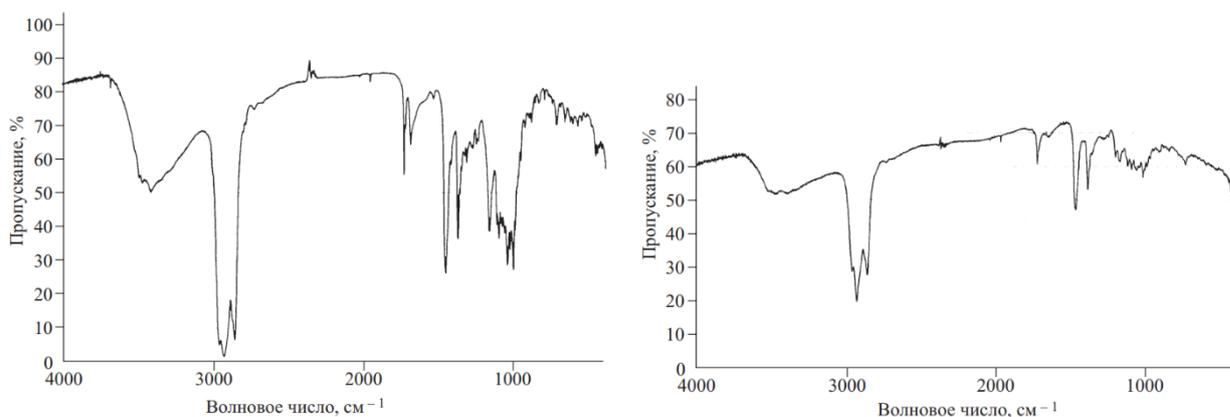
Проблема установления фальсифицированной продукции, а также контроля производства лекарственных форм и сырья имеет чрезвычайно важное значение. По сведениям из различных источников [54, 55] до 10-12%

фармацевтической продукции в России в настоящее время является фальсификатом. Несмотря на ужесточение законодательной базы в области фармации, актуальной остается задача контроля производства лекарственных форм и сырья для своевременного выявления фальсифицированной продукции.

На данный момент самым достоверным методом контроля лекарственных средств остается ИК-спектроскопия [56]. ИК-спектры поглощения веществ, используемых для производства лекарств, приведены в основном нормативном документе, определяющем показатели качества выпускаемых в РФ лекарственных субстанций и изготовленных из них препаратов – государственной фармакопее [57].

При анализе веществ измеренный спектр должен находиться в полном соответствии с эталонным, приведенным в фармакопее. Полосы поглощения должны совпадать как по положению на шкале частот (длин волн), так и по интенсивности. Несовпадение по длине волн говорит о замене вещества на более дешевое или об отсутствии действующего вещества вовсе. Несовпадение по интенсивности свидетельствует о недостаточной концентрации действующего вещества в препарате.

Для наглядного примера на рисунке 6 приведены спектры оригинального и поддельного лекарственного препарата – клацид [58].



а) оригинальный препарат; б) поддельный препарат

Рисунок 6 – Спектр оригинального и поддельного лекарственного препарата

Из приведенных спектрограмм можно сделать вывод, что для определения поддельного вещества необходимо иметь прибор с хорошей разрешающей способностью. Таким образом, для достоверного контроля лекарственных препаратов и сырья должна быть решена задача измерения оптического спектра с высоким спектральным разрешением.

1.4.4 Контроль и качественный анализ в нефтехимии

Нефть и ее производные нефтепродукты находят широкое применение в жизни человека. Для изучения состава нефти, а также контроля производимых из нее продуктов широко применяются два вида анализа: лабораторный химический (хроматография) и спектральный анализ в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной области спектра.

Хроматографический метод анализа очень трудоемок, а расчетные методы имеют определенные недостатки, связанные с необходимостью определения ряда физико-химических констант исследуемых нефтепродуктов. Кроме того, методы хроматографии не позволяют выполнять экспресс-анализ и контроль состава нефтепродуктов, поскольку анализ каждой пробы занимает от нескольких минут до часа и более. Этим недостатком лишены спектрофотометрические методы, основанные на измерении интенсивностей полос поглощения проб нефтепродуктов в ИК и УФ-области спектра [59]

Методы ИК-спектроскопии позволяют идентифицировать как чистые вещества, входящие в состав нефтепродуктов, так и смеси углеводородов.

Метод УФ-спектроскопии очень перспективен для анализа и контроля качества нефтепродуктов: внедрение его дает возможность вести контроль за изменением состава в процессах переработки, определять содержание аренов в отдельных фракциях нефтей, оценивать качество нефтепродуктов, идентифицировать сырые нефти, контролировать загрязнение окружающей среды нефтепродуктами.

Контроль качества нефти и производимых из нее производных в ряде задач необходимо осуществлять в режиме реального времени. В работе [60] указывается на тот факт, что при переработке нефти продукт отхода на очередной стадии является сырьем для производства нового продукта на следующей стадии. Отсюда вытекает задача контроля производства нефтепродуктов в режиме реального времени с целью оптимизации производства.

Авторы предлагают проводить контроль качества сырья и нефтепродуктов с помощью применения ИК-спектроскопии и волоконно-оптического тракта передачи анализируемых сигналов. Современные достижения волоконно-оптических технологий позволяют передавать оптические сигналы на расстояния, измеряемые километрами, поэтому контроль можно производить удаленно.

В работе также рассмотрена конструкция проточного модуля (рисунок 7), позволяющего измерять спектр пропускаемого через него образца углеводорода и в режиме реального времени контролировать и оптимизировать процесс переработки нефти.



Рисунок 7 – Конструкция модуля для измерения спектра поглощения углеводородами с применением ВОСП

Схема измерения в этом случае принимает вид, изображенный на рисунке 8 [60].

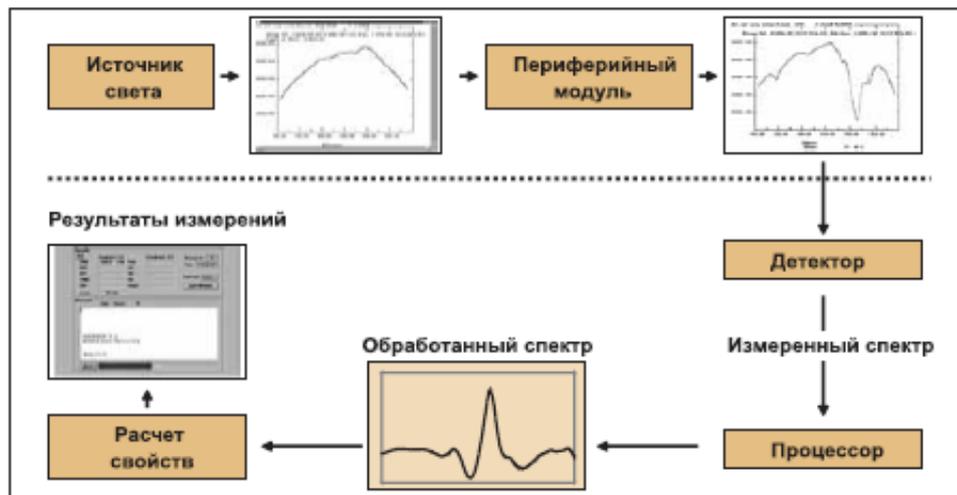


Рисунок 8 – Схема измерения спектра

Излучение от широкополосного источника света вводится в волоконно-оптический тракт и подается на измерительный проточный модуль. Спектр поглощения возвращается по волоконно-оптическому тракту обратно на детектор, после которого осуществляется обработка спектрограммы и вычисление исследуемых свойств нефтепродукта или сырья. Такой подход позволяет производить контроль в режиме реального времени. Вместе с тем, возникает ряд проблем с измерением спектра: разрешающая способность прибора должна быть достаточно высокой для получения качественной оценки о составе нефтепродукта. Передача измерительного и анализируемого сигналов происходит по волоконному тракту, а значит, неизбежны энергетические потери оптического сигнала в нем. Это приводит к тому, что оптический спектральный прибор должен обладать высокой чувствительностью и большим динамическим диапазоном.

1.5 Оптические спектральные приборы

1.5.1 Классификация спектральных приборов

Широкую номенклатуру оптических спектральных приборов по принципу действия можно условно разделить на несколько подклассов, что поясняется рисунком 9.

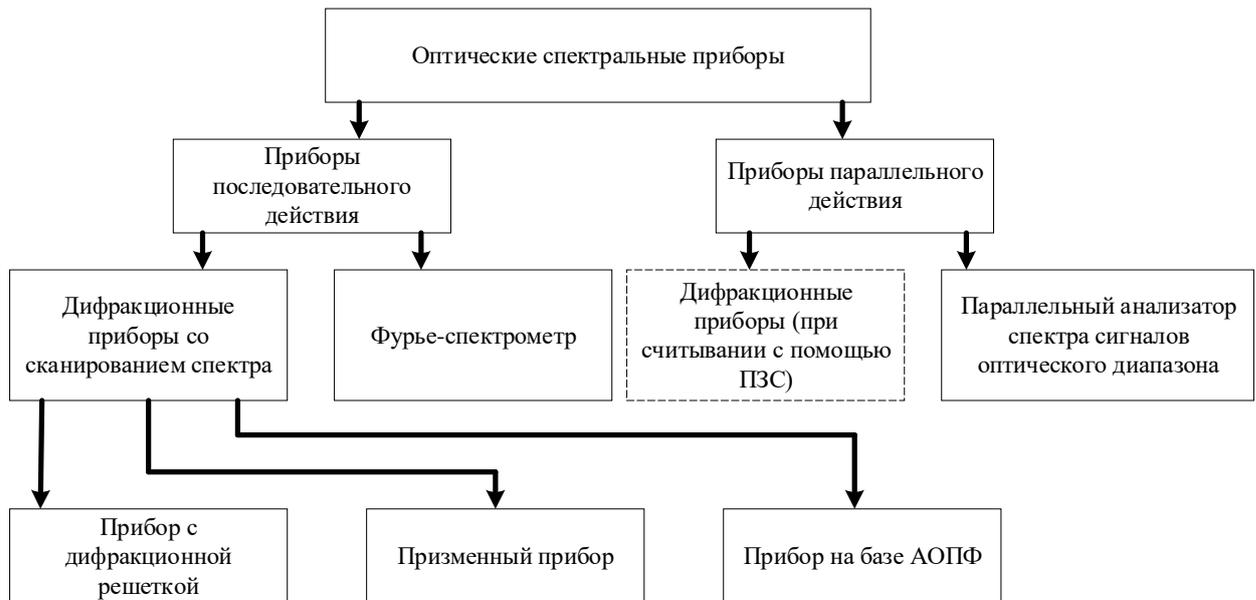


Рисунок 9 – Классификация оптических спектральных приборов

В приборах последовательного действия считывание (регистрация) спектра производится путем последовательного сканирования по всему диапазону анализируемых частот, при этом регистрация производится с помощью единственного фотодетектора.

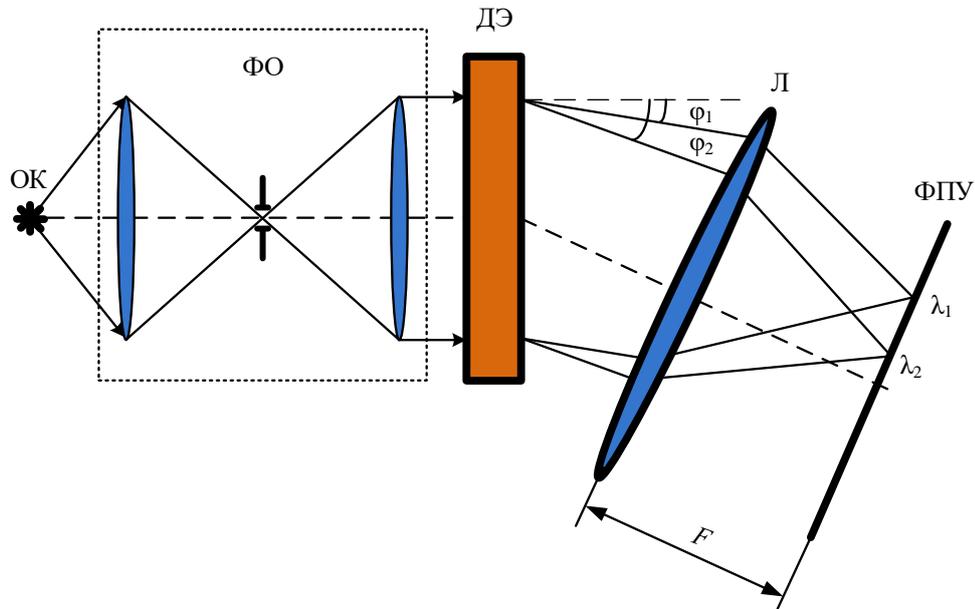
Для приборов параллельного действия характерно одновременное считывание спектра с помощью ПЗС-линейки или нескольких фотодетекторов в каналах прибора.

1.5.2 Дифракционные спектральные приборы

Описанию устройства и принципа работы дифракционных спектральных приборов посвящена многочисленная литература [15, 61-68]. В приборах этого класса спектральное разделение осуществляется за счет

применения диспергирующего элемента: дифракционной решетки, призмы или акустооптического перестраиваемого фильтра.

В общем случае оптическая схема дифракционного спектрального прибора может быть проиллюстрирована рисунком 10.



ОК – объект контроля, ФО – система формирующей оптики,
ДЭ – диспергирующий элемент, ФПУ – фотоприемники, Л – линза,

F – фокусное расстояние линзы

Рисунок 10 – Оптическая схема дифракционного спектрального прибора

Дифракционный оптический спектральный прибор включает в себя четыре основных звена: систему формирующей оптики (ФО), диспергирующий элемент (дифракционная решетка, призма или акустооптический перестраиваемый фильтр), линзу и устройство считывания спектрометрической информации (точечный фотоприемник или ПЗС-линейка). Совокупность диспергирующего элемента, линзы, окруженной двумя слоями свободного пространства с протяженностью F , принято называть разрешающей системой спектрального прибора.

Система формирующей оптики (ФО) предназначена для создания однородного плоского фронта волны, падающей на диспергирующий элемент.

Диспергирующий элемент (ДЭ) выполняет пространственное разделение спектральных составляющих анализируемого оптического излучения.

Согласно широко распространенной точке зрения в классической оптической спектрометрии [61, 62, 65, 66], расположенная далее линза фокусирует разделенные по пространству спектральные составляющие в задней фокальной плоскости в различных точках пространства.

Последовательный анализ оптического спектра осуществляется при помощи периодического качания диспергирующего элемента. При этом считывание спектрометрической информации осуществляется с помощью узкой щели и единственного фотоприемника.

В случае применения многоэлементных фотоприемных устройств (ФПУ), например, ПЗС-линеек, возможно параллельное считывание и отображение спектрометрической информации без необходимости поворота диспергирующего элемента.

Сопоставление достоинств и недостатков призмного и спектрального прибора с дифракционной решеткой целесообразно выполнить совместно. Работа спектрального прибора на базе акустооптического перестраиваемого фильтра требует специального рассмотрения.

Главным достоинством призмных спектральных приборов можно считать [61, 62, 65, 66] отсутствие перекрывающих друг друга дифракционных порядков, что расширяет диапазон анализируемых частот.

Тем не менее, призмные приборы в последнее время вытесняются приборами с дифракционной решеткой в силу своих существенных недостатков

- Призмные приборы имеют недостаточно хорошее спектральное разрешение по сравнению с приборами с дифракционной решеткой, что напрямую влияет на информативность оптического спектрального метода контроля.

- Требуется изготовление призмы из материала, оптически прозрачного в широком диапазоне анализируемых частот (длин волн). К сожалению, изготовить призму для всего диапазона анализируемых длин волн не удастся, поэтому в современных анализаторах применяется набор призм, предназначенных для конкретного диапазона длин волн.

Спектральные приборы с дифракционной решеткой имеют следующие достоинства:

- Обладают гораздо лучшим спектральным разрешением.
- Имеют лучшие массогабаритные характеристики по сравнению с призмными.

К недостаткам решеточных спектральных приборов можно отнести перекрытие дифракционных порядков, что может быть устранено путем применения широкополосных светофильтров для работы в конкретном дифракционном порядке.

1.5.3 Спектральный прибор на базе акустооптического перестраиваемого фильтра

На рисунке 11 представлена схема оптического спектрального прибора на базе акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ). Принцип работы оптических спектральных приборов на базе АОПФ заключается в том, что оптическое излучение дифрагирует на перестраиваемой решеткоподобной структуре в форме акустооптического (АО) модулятора, которая формируется акустической волной, распространяющейся в среде акустооптического взаимодействия [69] и, таким образом, является решеткоподобной структурой.

Эта структура, обеспечивающая спектральную селекцию оптического излучения, формируется под действием периодического электрического управляющего колебания непосредственно в процессе работы акустооптического перестраиваемого фильтра [41]. Причем электрическое управляющее колебание представляет собой периодическую последовательность электрических импульсов (радиоимпульсов) с линейным изменением мгновенной частоты. Создаваемая решеткоподобная структура с переменным шагом позволяет последовательно обнаруживать спектральные компоненты оптического сигнала. При этом существенно упрощается процедура считывания спектрометрической информации с помощью узкой щели и единственного фотодетектора.

Характеристики этой решеткоподобной структуры могут быть контролируемым способом изменены быстро и в значительных пределах.

На базе прибора с АОПФ может быть реализован бесконтактный метод измерения оптического спектра. В отчете [40] рассмотрен спектральный прибор на базе АОПФ с применением ВОСП, а также выполнены экспериментальные исследования по установлению влияния передачи анализируемого сигнала по ВОСП на метрологические характеристики прибора.

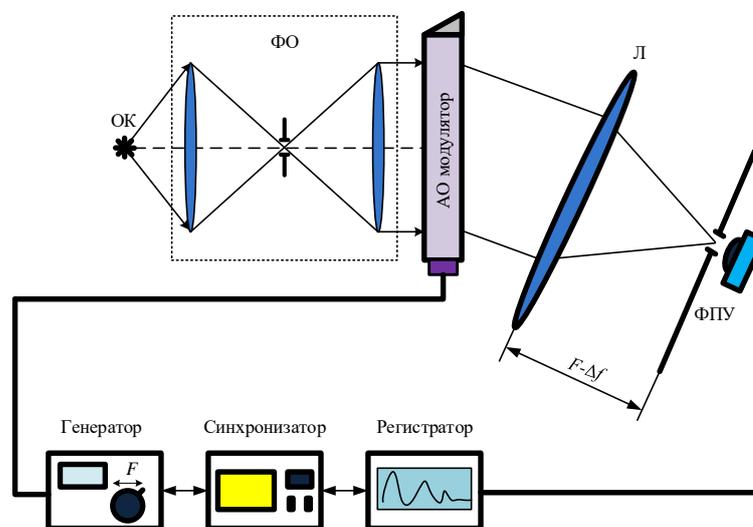


Рисунок 11 – Схема оптического спектрального прибора на базе АОПФ

Приборы такого типа обладают некоторыми достоинствами по сравнению с призменными и приборами с дифракционной решеткой. Так, оптические спектральные приборы на базе АОПФ не содержат механических движущихся частей при считывании спектрометрической информации единственным фотоприемником.

Еще одним достоинством спектральных приборов этого типа является возможность додетекторной коррекции частотной характеристики акустооптического взаимодействия, и, следовательно, всего тракта измерительной системы за счет изменения мощности подводимого управляющего колебания [41].

Разрешающая способность оптического спектрального прибора на базе АОПФ может быть одного порядка, что и у спектральных приборов с дифракционной решеткой при выполнении определенных требований к качеству акустооптического модулятора, правильной настройке его режима работы, юстировке.

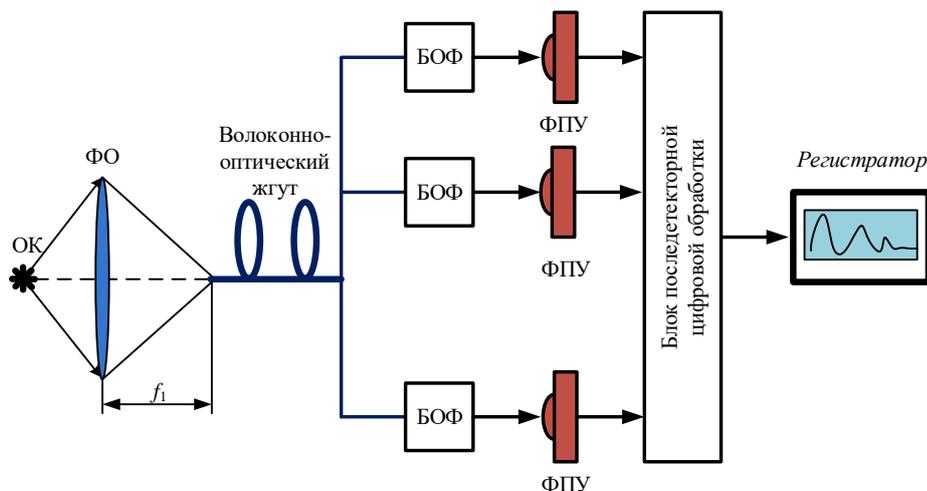
Вместе с тем, следует также отметить ряд недостатков прибора на базе АОПФ.

- Устройство и принцип действия прибора требует в своем составе блок генерации сигнала с линейно изменяющейся мгновенной частотой, а также устройства синхронизации, что напрямую влияет на стоимость прибора.
- Дифракция и затухание акустических волн в модуляторе напрямую влияют на метрологические характеристики прибора.

1.5.4 Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона

Рассматривая и выполняя сравнительный анализ приборов, выполняющих спектральные измерения в оптическом диапазоне, нельзя не рассмотреть прибор нового класса – параллельный анализатор спектра

сигналов оптического диапазона [42]. Функциональная схема этого прибора приведена на рисунке 12 [70].



БОФ – блок оптической фильтрации

Рисунок 12 – Структурная схема параллельного анализатора спектра сигналов оптического диапазона

Принцип построения прибора контроля в форме параллельного анализатора спектра сигналов оптического диапазона впервые был предложен в патенте РФ [42], а его применение в задачах контроля процессов горения подробно рассмотрено в диссертации [6].

Параллельный анализатор спектра сигналов оптического диапазона работает следующим образом: оптическое излучение от объекта контроля поступает на формирующую оптику. Для ввода оптического излучения в блоки оптической фильтрации, используется волоконно-оптический жгут, что позволяет перенести прибор на безопасное для него расстояние от контролируемого объекта, находящегося в условиях повышенной температуры, влажности, агрессивной химической среды и других негативных условий, что позволяет отнести этот прибор к средствам бесконтактной оптической спектроскопии.

Блоки узкополосной оптической фильтрации выполняют спектральное разложение с помощью оптических интерференционных фильтров, каждый из которых настроен на определенную частоту (длину волны). Считывание

спектрометрической информации в параллельном анализаторе спектра сигналов осуществляется фотоприемником, установленном в каждом канале.

Достоинством параллельного анализатора спектра сигналов является отсутствие влияния формы фронта падающего оптического излучения на результат измерений. Таким образом, передача анализируемого излучения по волокну никак не влияет на разрешающую способность прибора.

Недостатки у прибора этого класса следующие.

- Разрешающая способность прибора определяется полосой пропускания интерференционных фильтров. Современные технологии позволяют производить интерференционные фильтры с полосой пропускания вплоть до сотых долей нанометра, но стоимость таких фильтров чрезвычайно высока. Полоса пропускания коммерчески доступных фильтров составляет несколько нанометров, что критично при выполнении спектральных измерений с высоким разрешением.

- Для анализа широкой полосы частот с высоким разрешением необходимо создание большого числа каналов (вплоть до нескольких тысяч), что значительно ухудшает массогабаритные и стоимостные характеристики прибора.

1.5.5 Фурье-спектрометр

Альтернативным вариантом для целей спектрального анализа в оптическом диапазоне является применение приборов, основанных на принципах Фурье-спектроскопии [71-74].

Согласно теореме Бохнера [75], энергетический спектр $G(\omega)$ финитной реализации дается в виде:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cdot e^{-i\omega\tau} d\tau, \quad (1)$$

где $R(\tau)$ – корреляционная функция.

На базе теоремы Бохнера возможно получение энергетического спектра как в радиодиапазоне, так и в оптическом диапазоне. В оптическом диапазоне этот метод реализуется с помощью Фурье-спектрометров [76], где временная корреляционная функция оптического сигнала $R(\tau)$, называемая интерферограммой в Фурье-спектроскопии, вычисляется с помощью интерферометра Майкельсона.

Таким образом, алгоритм действия Фурье-спектрометра, схема которого приведена на рисунке 13, заключается в следующем.

- Получение временной корреляционной функции анализируемого оптического излучения.
- Детектирование корреляционной функции и ее преобразование в цифровой вид.
- Выполнение операции быстрого преобразования Фурье.

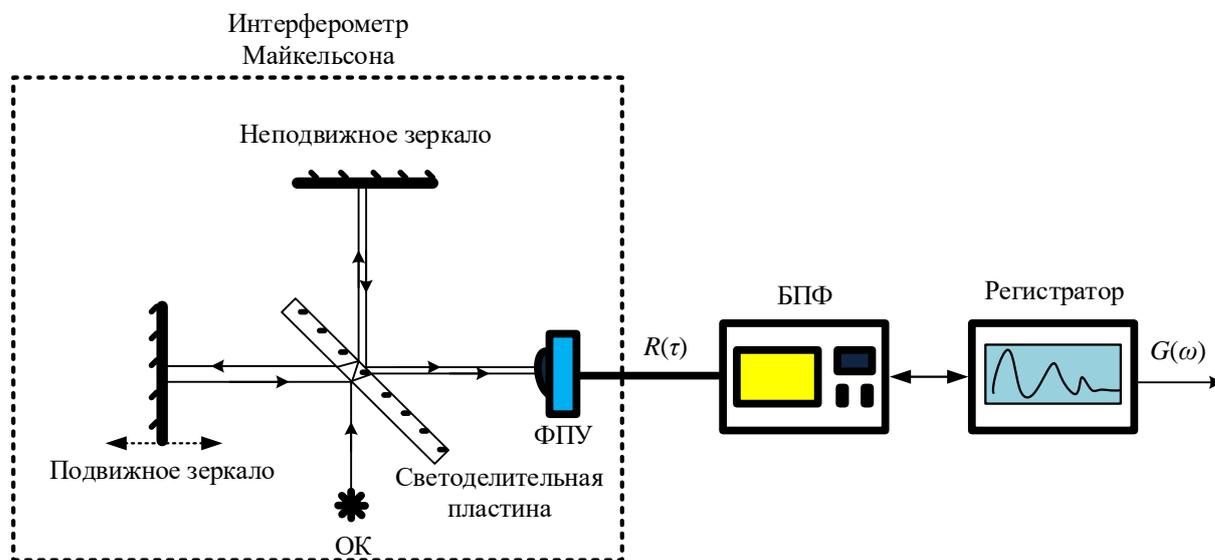


Рисунок 13 – Схема Фурье-спектрометра

Получение корреляционной функции в интерферометре Майкельсона выглядит следующим образом. Пучок света от источника оптического излучения направляется на светоделительную пластину, где делится на два пучка – прошедший и отраженный, примерно одинаковой интенсивности.

Пройдя некоторые расстояния, эти пучки попадают на зеркала, отражаются ими в обратных направлениях и вновь падают на светоделительную пластину. Пластина снова частично отражает и частично пропускает свет, в результате чего образуется пучок света, представляющий собой смесь пучков, прошедших через разные плечи интерферометра Майкельсона. Этот пучок света попадает на фотоприемное устройство. Двигая одно из зеркал интерферометра в направлении падающего на него светового пучка, можно изменять оптическую разность хода лучей, добиваясь тем самым различное время задержки τ при определении корреляционной функции в выражении (1).

Дальнейшее вычисление энергетического спектра осуществляется с помощью БПФ на ЭВМ.

Достоинством Фурье-спектрометров является их очень высокая разрешающая способность.

К недостаткам Фурье-спектрометра можно отнести наличие высокопрецизионной механической части для перемещения зеркала, а также массогабаритные характеристики.

Несмотря на широкое применение, в Фурье-спектрометрах имеются целый ряд серьезных проблем. Например, требуется очень точное перемещение зеркал, что требует соответствующей механики и сложных систем управления зеркалами с использованием опорного лазерного канала. Для получения качественных интерферограмм оптические элементы должны быть высокого качества. Все это приводит к тому, что Фурье-спектрометры являются достаточно дорогостоящими.

1.5.6 Сопоставление характеристик спектральных приборов

Совокупность достоинств и недостатков спектральных приборов, рассмотренных в этом разделе, можно отобразить в сравнительной таблице 3.

Таблица 3 – Сопоставление спектральных приборов

Порядковый номер	Характеристика	Оптический спектральный прибор				
		Спектральный прибор с дифракционной решеткой	Призмный спектральный прибор	Прибор на базе АОПФ	Фурье-спектрометр	Параллельный анализатор спектра сигналов
1	2	3	4	5	6	7
1	Разрешающая способность	Высокая (~0,01 нм)	Невысокая (~0,1 нм)	Высокая (~0,01 нм)	Очень высокая (~0,001 нм)	Определяется полосой пропускания фильтра (до 0,1 нм)
2	Анализируемый диапазон	Определяется параметрами оптической системы (периодом и апертурой решетки и фокусным расстоянием линзы)	Широкий	Определяется перестройкой фильтра (обычно широкий)	Определяется ходом зеркала	Определяется количеством фильтров

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
3	Влияние передачи излучения по ВОСП	Влияет, ухудшает разрешающую способность	Влияет, ухудшает разрешающую способность	Влияет, ухудшает разрешающую способность	Не влияет	Не влияет
4	Время измерения спектра	Малое (определяется быстродействием ПЗС-линейки и временем интегрирования)	Малое (определяется быстродействием ПЗС-линейки и временем интегрирования)	Достаточно большое (определяется скоростью перестройки частоты)	Достаточно большое (определяется скоростью перемещения зеркала)	Малое (определяется быстродействием фотодетекторов и временем интегрирования)
5	Динамический диапазон	Большой	Большой	Большой	Очень большой	Небольшой (большие потери сигнала в каждом канале)

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
6	Быстродействие	Высокое	Высокое	Самое высокое	Низкое, т.к. требуется время на перемещение зеркала	Высокое
7	Массогабаритные характеристики	Очень компактный, небольшой вес	Компактный	Очень компактный, небольшой вес	Громоздкая конструкция, большой вес	Громоздкая конструкция, большой вес вследствие применения большого набора каналов

Таким образом, среди всех приборов, которые могут быть использованы для задач контроля различных физических и технологических процессов, спектральный прибор с дифракционной решеткой является наиболее предпочтительным, поскольку сочетает в себе превосходные технические характеристики (разрешающая способность, диапазон анализируемых частот (длин волн), время измерения, динамический диапазон и т.д.).

Недостатком спектрального прибора с дифракционной решеткой является влияние на результат спектральных измерений передачи анализируемого излучения по ВОСП, которая формирует фронт волны, падающей на вход спектрального прибора, отличный от требуемого однородного и плоского. Это вызывает появление специфических искажений при выполнении спектроскопических измерений бесконтактным методом.

1.6 Выводы по разделу

- Оптические спектральные приборы находят широкое применение в задачах контроля различных процессов и объектов. В рассмотренных в этом разделе областях применения критерием контроля является появление или отсутствие спектральных линий или полос поглощения в спектре оптического излучения контролируемого объекта. Показано, что для контроля таких объектов требуется оптический спектральный прибор, работающий в широком диапазоне анализируемых длин волн (частот) с высокой разрешающей способностью.

- Оптический спектральный метод контроля чаще всего является наиболее предпочтительным по сравнению с другими методами неразрушающего контроля, поскольку позволяет производить измерения и контроль, не нарушая физических условий, существующих на объекте контроля. Кроме того, оптический спектральный метод контроля является наиболее информативным и может быть использован для изучения физических и оптимизации технологических процессов.

- Выполнение неразрушающего контроля оптическим спектральным методом в экстремальных условиях, когда непосредственный контакт прибора с анализируемым излучением либо невозможен, либо нежелателен, требует бесконтактного измерения спектра, что можно реализовать путем применения ВОСП для передачи анализируемых сигналов на безопасное для прибора контроля расстояние.

- Среди широкой номенклатуры оптических спектральных приборов следует выделить спектральный прибор с дифракционной решеткой как наиболее широко распространенный и обладающий рядом преимущественных характеристик для применения в рассмотренных в этом разделе задачах контроля.

- Передача анализируемого оптического излучения от источника до входной апертуры спектрального прибора по ВОСП приводит к тому, что

фронт падающей на вход спектрального прибора волны становится неоднородным и не плоским, а также к возникновению энергетических потерь в системе. Это вызывает ухудшение метрологических характеристик спектрального прибора с дифракционной решеткой, что порождает необходимость установления влияния передачи анализируемого оптического излучения по ВОСП на результат спектральных измерений.

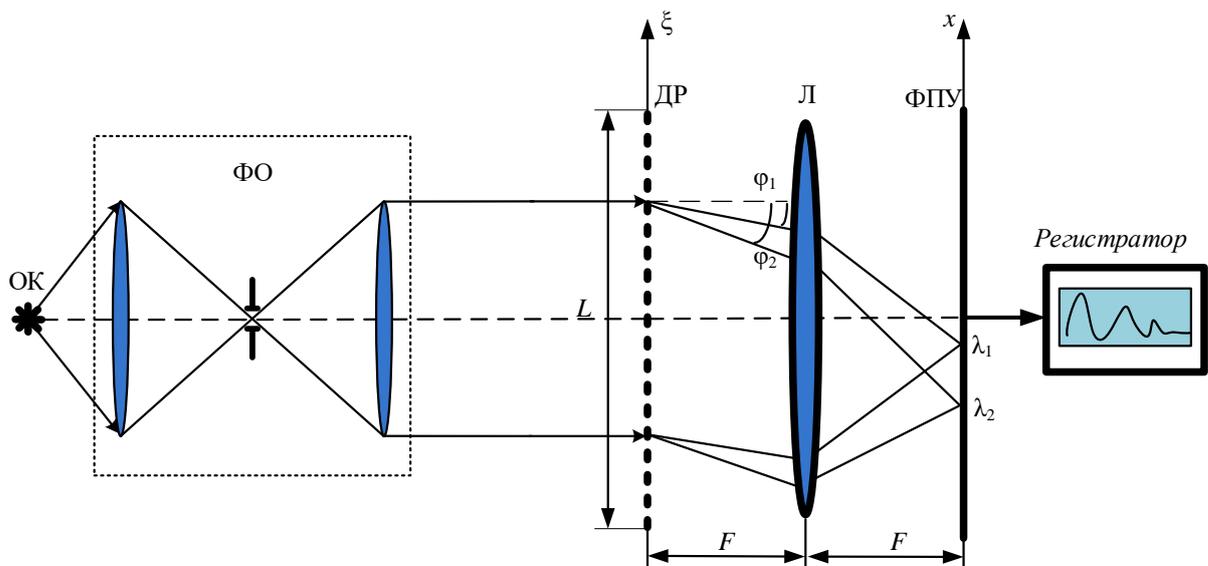
- Широкая область применения оптического спектрального метода в задачах контроля различных процессов и объектов требует дальнейшего улучшения метрологических характеристик аппаратуры контроля на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой.

2 Теоретический анализ работы спектрального прибора с дифракционной решеткой

2.1 Постановка задачи

Улучшение метрологических характеристик спектральной аппаратуры невозможно без обстоятельного теоретического анализа ее работы. Несмотря на большую историю развития методов и спектральной аппаратуры оптического диапазона, существующая теоретическая база оптической спектроскопии вообще, и спектрального прибора с дифракционной решеткой в частности, требует обсуждения.

Оптическая схема спектрального прибора с дифракционной решеткой приведена на рисунке 14.



ДР – дифракционная решетка; L – размер апертуры решетки; Л – линза с фокусным расстоянием F

Рисунок 14 – Оптическая схема спектрального прибора с дифракционной решеткой

Существующая теория дифракционных спектральных приборов, изложенная в работах [61, 62, 65], исходит из принципов геометрической оптики. Согласно этой теории, параллельный пучок лучей, сформированный системой формирующей оптики от источника анализируемого излучения (объекта контроля), падает на дифракционную решетку, которая разделяет по пространству разные спектральные составляющие на углы φ в зависимости от их длины волны λ . Линза Л фокусирует отклоненные под разными углами пучки лучей на разные участки ПЗС-линейки, которая осуществляет детектирование, и в результате последетекторной обработки на регистратор выводится спектрометрическая информация в удобном для оператора виде.

К недостаткам широко распространенной в настоящее время теории спектрального прибора с дифракционной решеткой можно отнести следующие.

- Существующая теория не позволяет математически строго описать получение и свойства спектров в различных дифракционных порядках. Так, в экспериментальной спектроскопии отмечается, что разрешающая способность улучшается с увеличением номера дифракционного порядка. Кроме того, разрешающая способность неодинакова даже в пределах одного дифракционного порядка. Например, в работе [77] указывается, что при изменении длины волны от 500 до 1000 нм ширина аппаратной функции, определяющая разрешающую способность спектрального прибора, изменяется в два раза. На данный момент отсутствует теоретическое обоснование этих явлений.

- При спектроскопических измерениях исследуются характеристики излучений в виде сигналов – переносчиков информации. Теория спектрального прибора, базирующаяся на принципах геометрической оптики, не позволяет описать динамику взаимодействия прибора и анализируемого сигнала. Эта ситуация усугубляется при работе с импульсными оптическими сигналами.

- Установление связи между спектром математическим, который дается в рамках теории интегралов Фурье [27], и физическим, т.е. получаемым с помощью спектрального прибора (аппаратурный спектр), является одной из важнейших задач теории колебаний и волн [78], и, в частности, спектрометрии. Для оптической спектрометрии эта проблема решена на эвристическом уровне, где результатом является соотношение [77]:

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

При этом под функциями $f(x')$, $\varphi(x)$ предлагается рассматривать «распределение энергии по длинам волн, ... частотам, либо координатам в плоскости спектра» [77], что говорит об отсутствии связи с математической теорией гармонического анализа [27], излагаемой в виде рядов и интегралов Фурье, т.е. математическими спектрами колебаний и волн, где аргументами спектральных функций могут являться только частоты. При этом термину «распределение энергии по частотам» не дано разъяснения.

Теоретическое рассмотрение работы спектрального прибора требует учитывать специфику его работы, тогда как переход от геометрических представлений дифракции на решетке к результатам измерения спектра в форме распределения энергии по частотам отсутствует. Таким образом, переход к решению основной задачи спектрометрии, согласно классическим представлениям, т.е. установление распределения энергии излучения по частотам, требует отдельного рассмотрения, поскольку на вход спектрального прибора приходит воздействие в виде колебаний электромагнитного поля, которое описывается в виде мгновенных значений, а не энергетических величин. Поэтому дальнейший переход к энергетическим характеристикам таких полей требует отдельного специального рассмотрения [79], чтобы решить основную задачу спектрометрии.

Кроме того, аппаратная функция устанавливается как результат воздействия монохроматического излучения на спектральный прибор, при этом пространственные характеристики такой волны (излучения) не оговариваются [77]. Поскольку принцип действия спектрального прибора с дифракционной решеткой подразумевает пространственные преобразования анализируемого излучения, то вопрос о пространственных характеристиках волны, используемой для определения аппаратной функции прибора [79], имеет принципиальное значение.

- В рамках существующей теории спектрального прибора с дифракционной решеткой отсутствует последовательный анализ прохождения оптического излучения от входной апертуры до результата фотодетектирования.

Перечисленные недостатки требуют разработки новой более совершенной математической модели спектрального преобразования, реализованного в спектральном приборе с дифракционной решеткой, которая позволяла бы в рамках строгих математических выкладок получить связь вход-выход спектрального прибора, рассматривая прохождение и преобразование оптического излучения от входной апертуры спектрального прибора до результата считывания спектрометрической информации, и была бы лишена вышеуказанных недостатков.

Разработка новой математической модели представляется возможной на основании следующих положений [80].

- Отказ от методов геометрической оптики ввиду их ограниченного применения.
- Анализируемое излучение следует рассматривать как сигнал, а все его преобразования от входной апертуры до чувствительной поверхности фотоприемника (ПЗС-линейки) должны быть описаны в рамках системного подхода [81-83] с применением методов теории сигналов [84] и теории

линейных систем [28] с получением комплексных спектров оптического излучения.

- Анализирующая часть спектрального прибора с дифракционной решеткой и все входящие в нее оптические элементы (линзы, слои свободного пространства, дифракционная решетка) должны быть рассмотрены в рамках радиооптического подхода [18-22], где отмеченные оптические элементы и выполняемые ими преобразования рассматриваются в терминах теории линейных систем с заменой временных аргументов функций на пространственные [79, 85].

Такой подход позволяет дать последовательное аналитическое описание преобразования оптического сигнала от входной апертуры спектрального прибора до чувствительной поверхности фотодетектора. Дальнейшее преобразование полученного комплексного спектра с помощью операции фотодетектирования позволяет удобным образом получить результат последовательного преобразования оптического сигнала от входной апертуры до результата измерения спектра в виде энергетических соотношений [79].

2.2 Комплексные спектры оптических сигналов

В оптическом диапазоне анализируемый сигнал представляет собой волновой процесс, который несет информацию о динамике функций источников и представляется усеченной однородной плоской скалярной волной:

$$s(z, t) = \hat{V}[s(t)] = Q(x, y) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} s(t') \cdot \delta\left(t - \frac{z}{c_0} - t'\right) dt', \quad (3)$$

где \hat{V} – линейный ограниченный оператор перехода от колебаний источника $s(t)$ к волне $s(z, t)$; t – текущее время; $Q(x, y)$ – апертурная диафрагма; c_0 – скорость света.

При измерении комплексных гармонических спектров действие спектрального прибора, согласно общим представлениям теории линейных систем [28], описывается в форме линейного интегрального оператора [85]:

$$S_a(\omega) = \hat{K}[S(\omega)] = \int_{\Delta\Omega} K(\omega, \omega') \cdot S(\omega') d\omega', \quad (4)$$

где $S_a(\cdot)$ – комплексный аппаратный спектр; ω – временная круговая спектральная частота; \hat{K} – линейный ограниченный оператор, устанавливающий связь вход-выход спектрального прибора при измерении комплексного спектра; $K(\cdot)$ – комплексная аппаратная функция; $\Delta\Omega$ – полоса анализируемых частот,

$$S(\omega') = \hat{F}[s(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-i\omega' t} dt$$

– математический комплексный спектр анализируемого сигнала, \hat{F} – оператор прямого преобразования Фурье.

Ядро $K(\cdot)$ в выражении (4) является реакцией линейной системы на соответствующее δ – воздействие [87]. При спектральных измерениях таким δ – воздействием является $\delta(\omega - \omega')$, которому соответствует гармоническое колебание единичной амплитуды с частотой ω'

$$s(t) = \exp(i\omega' t) = 2\pi \cdot \hat{F}^{-1}[\delta(\omega - \omega')], \quad (5)$$

где \hat{F}^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье.

На основании формулы (3) колебанию $\exp(i\omega' t)$ соответствует однородная плоская монохроматическая волна

$$s(z, t) = \exp[i(\omega' t - k' z)] = \exp[i\omega'(t - z/c)] = \hat{V}\hat{F}^{-1}[\delta(\omega - \omega')]. \quad (6)$$

С учетом выражений (4) и (6) комплексная аппаратная функция спектрального прибора – «волнового анализатора» [88] записывается в форме

$$K(\omega, \omega') = \hat{K}\hat{V}\hat{F}^{-1}[\delta(\omega - \omega')] = \hat{L}[\delta(\omega - \omega')], \quad (7)$$

т.е. как действие линейного ограниченного оператора $\widehat{L} = \widehat{K}\widehat{V}\widehat{F}^{-1}$ на функцию $\delta(\omega - \omega')$, что соответствует общему определению аппаратной функции [87], при этом действие линейного ограниченного оператора на δ -функцию требует отдельного рассмотрения, как и математически корректное обоснование соотношения (7) [86].

Спектральный прибор, как реальная информационная система, может оперировать с конечным объемом информации. Это означает, что при спектральных измерениях обрабатываемый сигнал должен иметь конечное число степеней свободы $W = \Delta\Omega \cdot T_a / 2\pi$, где T_a – время анализа. Основные метрологические характеристики спектрального прибора $\Delta\Omega$ и T_a – устанавливаются посредством известных [89, 90] операций усечения.

Первая из этих операций – операция \widehat{B} усечения спектра:

$$\begin{aligned} \widehat{B}s(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0 - \frac{\Delta\Omega}{2}}^{-\omega_0 + \frac{\Delta\Omega}{2}} \exp(i\omega t) S(\omega) d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\Omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\Omega}{2}} \exp(i\omega t) S(\omega) d\omega = \\ &= \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[\int_{\omega_0 - \frac{\Delta\Omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\Omega}{2}} \exp(i\omega t) S(\omega) d\omega \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Вторая операция – это операция \widehat{D} усечения функции времени $\widehat{B}s(t)$:

$$\widehat{D}\widehat{B}[s(t)] = \chi(t)\widehat{B}[s(t)], \quad (9)$$

$$\text{где } \chi(t) = \begin{cases} 1, & t \in [-T_a/2, T_a/2] \\ 0, & t \notin [-T_a/2, T_a/2] \end{cases}$$

Окончательно измерение комплексного аппаратного спектра дается в форме:

$$S_a(\omega) = \widehat{K}\widehat{D}\widehat{B}s(t) = \int_{\Delta\Omega} K(\omega, \omega') \widehat{F}[\chi(t)\widehat{B}s(t)] d\omega' = \int_{\Delta\Omega} K_a(\omega, \omega') S(\omega') d\omega', \quad (10)$$

где $K_a(\cdot)$ – комплексная аппаратная функция реального спектрального прибора:

$$K_a(\omega, \omega') = \int_{\Delta\Omega} K(\omega, \omega'') \frac{\sin((\omega' - \omega'')T_a/2)}{(\omega' - \omega'')} d\omega'', \quad (11)$$

где $\text{sinc}(\cdot)$ – комплексная аппаратная функция «реального спектрального прибора в идеальном исполнении», который выполняет усеченное преобразование Фурье колебания $\widehat{DB}[s(t)]$:

$$K_0(\omega', \omega'') = \int_{-T_a/2}^{T_a/2} \exp(i\omega''t) \cdot \exp(-i\omega't) dt = 2 \frac{\sin((\omega' - \omega'')T_a/2)}{(\omega' - \omega'')}. \quad (12)$$

Выражение (10), как и (4), описывает однократное измерение комплексного спектра, когда начало отсчета времени $t = 0$. В реальных условиях динамика взаимодействия спектрального прибора и анализируемого сигнала такова, что аппаратные спектры являются переменными во времени [88]. Такие спектры вводятся с помощью анализа на нестационарном отрезке, т.е. отрезке, у которого начало и конец или конец являются функциями времени. Целесообразно определить переменные во времени аппаратные спектры с помощью оператора сдвига

$$\widehat{T}[g(\tau)] = g(\tau \pm t), \quad (13)$$

действующего или на функцию $s(t)$, или $\chi(t)$ в выражении (9). Счетное множество $\{t_n\}$ определяет выборочные спектры $S_a(\omega, t_n)$ [89], если множество $\{t\}$ является континуумом, то измеряются комплексные мгновенные спектры $S_a(\omega, t)$. Так, мгновенный спектр в соответствии с определением [88] дается выражением

$$S_a(\omega, t) = \int_{t-(T_a/2)}^{t+(T_a/2)} s(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(\tau - t) s(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau, \quad (14)$$

что соответствует движению временного окна $\chi(t) = \text{rect}(t)$ вдоль анализируемого колебания, что иллюстрируется рисунком 15.

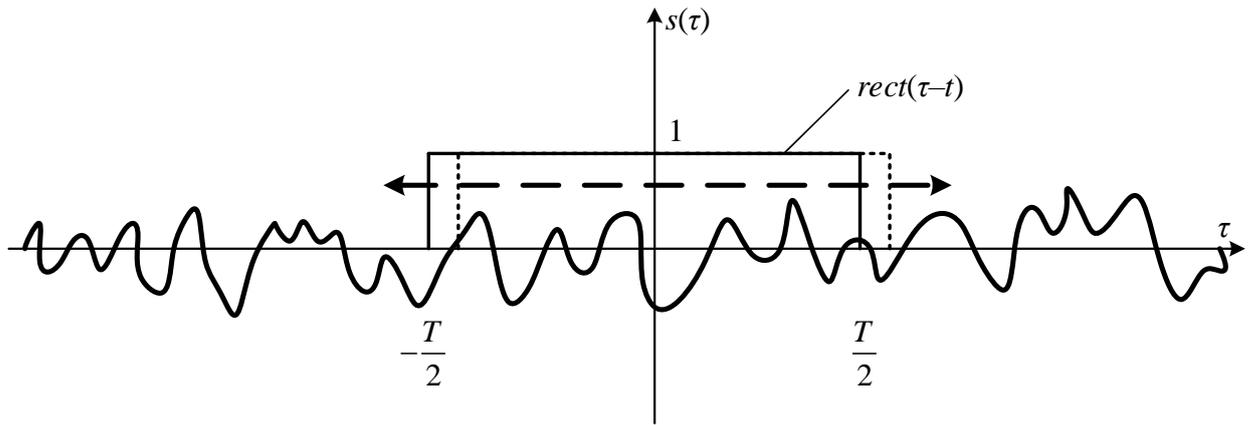


Рисунок 15 – Измерение мгновенного спектра с движущимся временным
ОКНОМ

Возможно иное определение мгновенного спектра, где относительно неподвижного временного окна $\chi(t)$ движется анализируемое колебание [91], что показано на рисунке 16:

$$S_a^{\sim}(\omega, t) = \int_{-T_a/2}^{T_a/2} \text{rect}(\tau) s(\tau - t) \exp(i\omega\tau) d\tau. \quad (15)$$

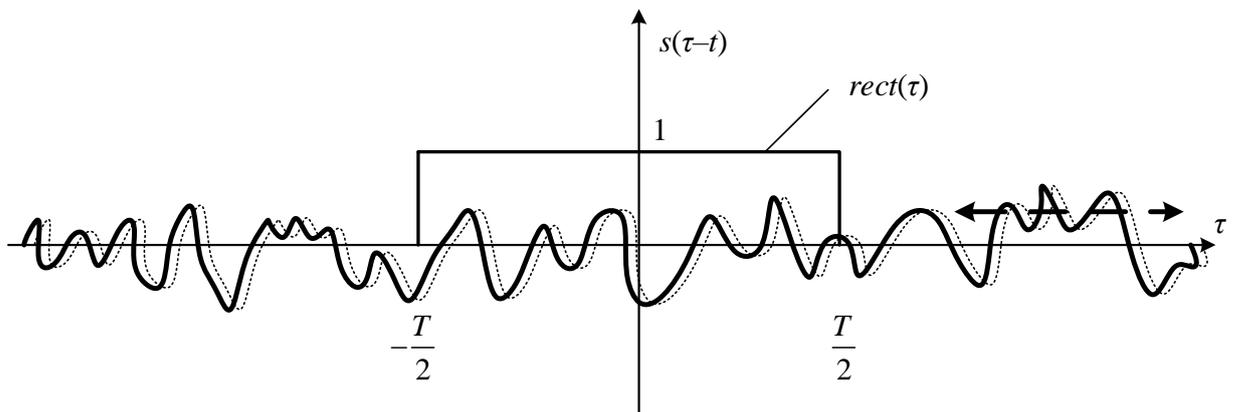


Рисунок 16 – Измерение мгновенного спектра с неподвижным временным
ОКНОМ

Выражение (15) устанавливает новое [91], отличающееся от (14), определение мгновенного спектра, которое адекватно описывает измерение спектров радиосигналов акустооптическими анализаторами [92].

Определения (14) и (15) мгновенных спектров связаны между собой соотношением

$$S_a^{\sim}(\omega, t) = -\exp(-i\omega t) (S_a(\omega, t))^* . \quad (16)$$

Подстановка в формулу (15) колебания $s(t) = \exp(i\omega' t)$ дает комплексную аппаратную функцию «реального спектрального прибора в идеальном исполнении»:

$$K(\omega, \omega', t) = 2 \exp(-i\omega' t) \cdot \frac{\sin((\omega - \omega') T_a / 2)}{\sin(\omega - \omega')} , \quad (17)$$

и измерение мгновенного комплексного спектра описывается выражением:

$$\begin{aligned} S_a^{\sim}(\omega, t) &= \int_{\Delta\Omega} K(\omega, \omega') \exp(-i\omega' t) \cdot S(\omega') d\omega' = \\ &= 2 \int_{\Delta\Omega} \frac{\sin((\omega - \omega') T_a / 2)}{\sin(\omega - \omega')} \exp(-i\omega' t) \cdot S(\omega') d\omega' , \end{aligned} \quad (18)$$

где ядро, т.е. комплексная аппаратная функция, зависит как от частоты, так и от времени.

Сопоставление аппаратных функций (14) и (15) показывает, что движение анализируемого сигнала $s(t)$ относительно неподвижного временного окна учитывается множителем $\exp(-i\omega' t)$. Это позволяет сформулировать утверждение: аппаратная функция (17) является необходимым условием действия анализатора спектра в соответствии с алгоритмом (15); достаточность этого условия устанавливается на основе соотношения (16), с другой стороны, это выражение рассматривается как преобразование Фурье произведения двух функций, применение известной теоремы о преобразовании Фурье произведения двух функций возвращает к соотношению (15) [93].

2.3 Радиооптический анализ работы спектрального прибора с дифракционной решеткой

В рамках радиооптических аналогий, системного подхода, теории линейных систем и теории сигналов предлагается структурная схема спектрального прибора с дифракционной решеткой, изображенная на рисунке 17, которая соответствует оптической схеме прибора, показанной на рисунке 14.

Дифракционная решетка, которая является пространственным транспарантом с функцией пропускания $T(\xi)$, модулирует падающий на нее оптический сигнал $s(t, \xi)$. Расположенный за ней оптический когерентный Фурье-процессор, который состоит из двух слоев свободного пространства протяженностью F и помещенной между ними идеальной тонкой положительной линзы с фокусным расстоянием F , выполняет операцию пространственного преобразования Фурье, действие которого в случае падения однородной плоской монохроматической волны описывается выражением вида [94]:

$$S_a(\omega_x, t) = \hat{F}[T(\xi)] = \sqrt{\frac{\omega'}{2\pi c_0 F}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} T(\xi) e^{-i\omega_x \xi} d\xi, \quad (19)$$

где $S_a(\omega_x)$ – спектр пространственных частот, ξ, x – координатные оси входной и выходной плоскостей, $T(\xi)$ – функция пропускания транспаранта (в данном случае – дифракционной решетки), $\omega_x = \frac{\omega' x}{c_0 F}$ – пространственная частота, ω' – круговая частота падающей на транспарант однородной плоской монохроматической волны, F – фокусное расстояние линзы, L – размер апертуры транспаранта.

В результате в задней фокальной плоскости линзы формируется комплексный спектр $S_a(\omega_x, t)$ оптического излучения, который подвергается детектированию с помощью ПЗС-линейки.

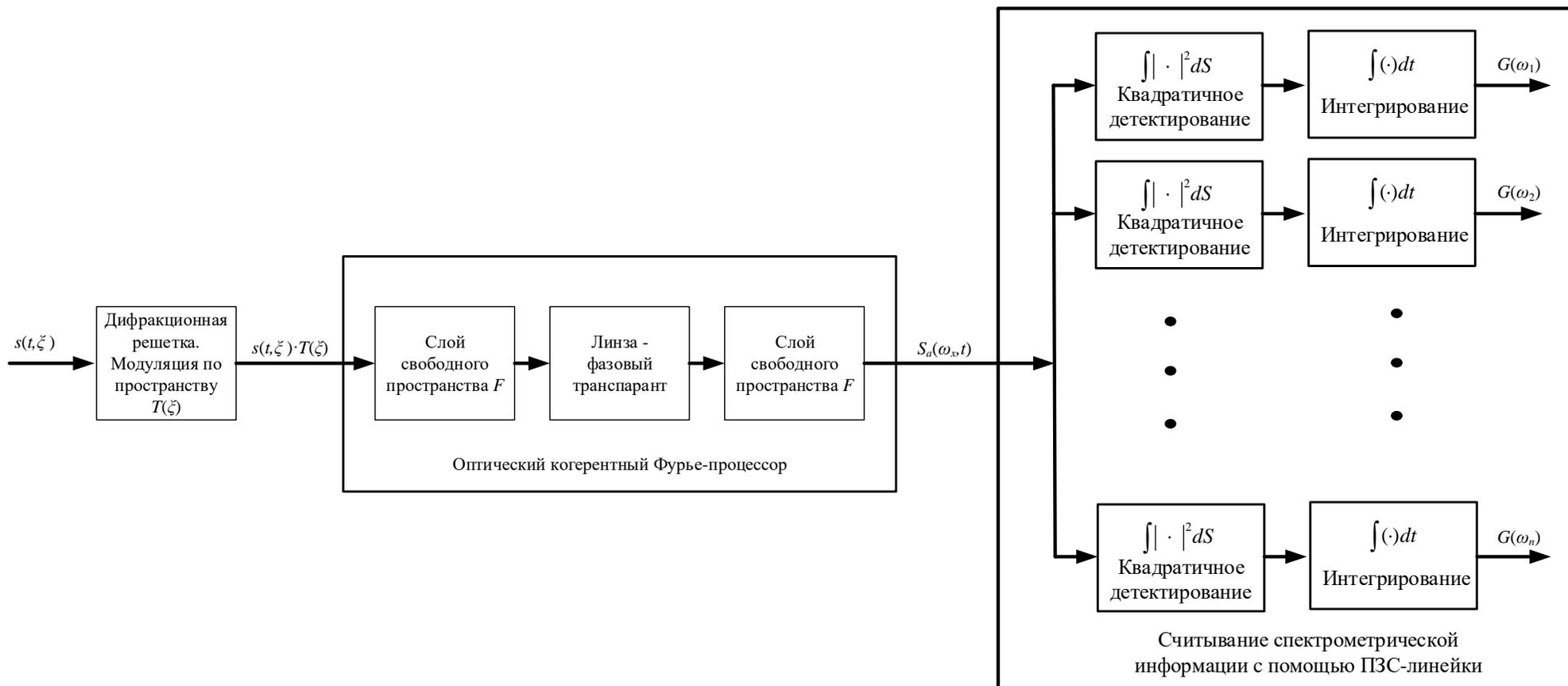


Рисунок 17 – Структурная схема спектрального прибора с дифракционной решеткой

2.4 Оптический когерентный Фурье-процессор

На рисунке 18 приведена оптическая схема оптического когерентного Фурье-процессора [18, 26, 94], который включает апертурную диафрагму размером L , расположенную во входной плоскости $z=0$, два слоя свободного пространства протяженностью F , идеальную тонкую положительную линзу с фокусным расстоянием F и выходную плоскость $z=2F$. Действие этого устройства рассматривается в декартовой двумерной системе координат x, z .

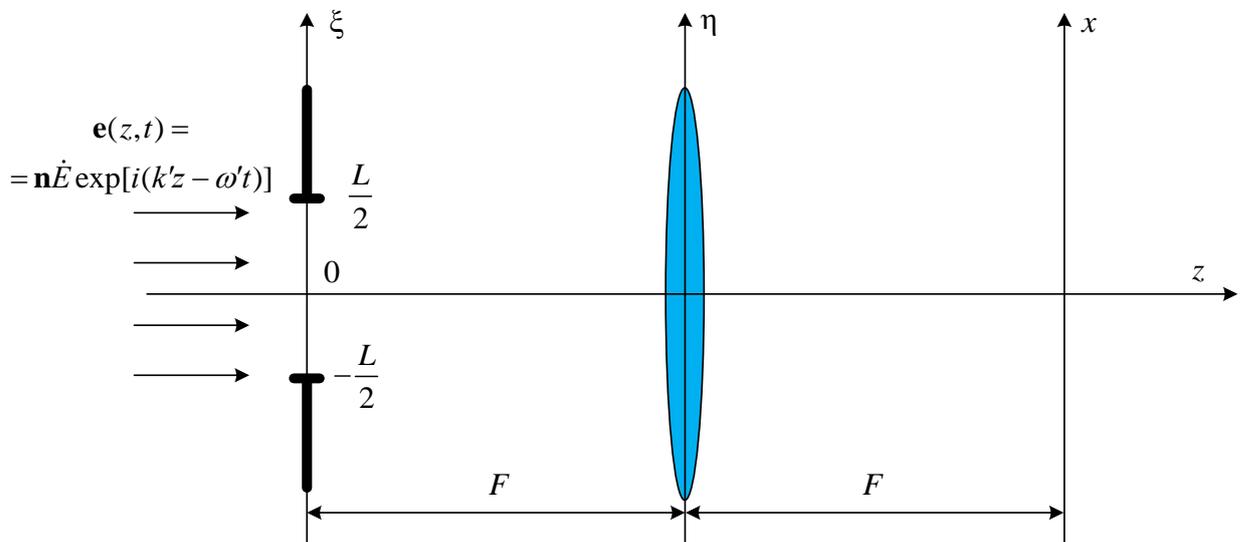


Рисунок 18 – Схема оптического когерентного Фурье-процессора

На апертуру оптического когерентного Фурье-процессора падает однородная плоская монохроматическая волна с круговой частотой ω' и движущаяся вдоль координаты z :

$$\mathbf{e}(z,t) = \mathbf{n}e(z,t) = \mathbf{E} \exp[i(k'z - \omega't)] = \mathbf{n}\dot{E} \exp[i(k'z - \omega't)], \quad (20)$$

где \mathbf{n} – единичный вектор; \dot{E} – комплексная амплитуда; $k' = \omega' / c_0$ – волновое число, c_0 – скорость света.

Входом оптического когерентного Фурье-процессора является пространственно-временной сигнал

$$f(\xi, t) = e(z, t) \cdot T_s(\xi), \quad (21)$$

где $T_s(\xi)$ – функция пропускания статического транспаранта [24].

В терминах радиооптических аналогий [19, 20] слои свободного пространства выполняют свертку с функциями Френеля $\exp(ik'\xi^2 / F)$ и $\exp(ik'\eta^2 / F)$, а линза является фазовым транспарантом с функцией пропускания $\exp(-ik'\eta^2 / F)$.

Для установления аппаратной функции оптического когерентного Фурье-процессора в соотношении (21) следует положить в форме пространственной «гармоники»

$$T_s(\xi) = \exp(i\omega'_x \xi), \quad (22)$$

где ω'_x – пространственная частота пространственной «гармоники».

Математическая форма пространственных операций, выполняемых оптическим когерентным Фурье-процессором, имеет вид:

$$H(x) = \int_{-L/2}^{L/2} \exp(i\omega'_x \xi) d\xi \int_{-\infty}^{\infty} \exp[(ik' / F) \cdot (\eta^2 - 2\eta\xi + \xi^2 - \eta^2 + x^2 - 2\eta\xi + \eta^2)] d\eta, \quad (23)$$

где интегрирование по η сводится к табличному значению интеграла Френеля.

Интегрирование по ξ дает аппаратную функцию оптического когерентного Фурье-процессора:

$$A_x(\omega_x, \omega'_x) = \sqrt{\omega' / 2\pi c_0 F} \cdot L \frac{\sin[(\omega_x - \omega'_x)L / 2]}{(\omega_x - \omega'_x)L / 2}, \quad (24)$$

где $\omega_x = \omega'_x / c_0 F$ – пространственная спектральная частота; $\omega' = \text{const}$.

Аппаратная функция (24) позволяет записать по аналогии с выражением (14) соотношение вход-выход оптического когерентного Фурье-процессора в форме линейного интегрального оператора:

$$S(\omega_x) = \hat{F}_x T_s(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin[(\omega_x - \omega'_x)L / 2]}{(\omega_x - \omega'_x)} \cdot S_0(\omega'_x) d\omega'_x, \quad (25)$$

где \hat{F}_x – оператор пространственного преобразования Фурье; $S_0(\omega'_x)$, $S(\omega_x)$ – спектры пространственных частот в плоскостях $z=0$ и $z=2F$, соответственно.

Применение теоремы о свертке позволяет привести соотношение (25) к традиционной форме:

$$S(\omega_x) = \hat{F}_x T(\xi) = \int_{-L/2}^{L/2} T_s(\xi) \cdot \exp(-i\omega_x \xi) d\xi. \quad (26)$$

Соотношения (20), (21), (25), (26) позволяют записать пространственно-временной сигнал в выходной плоскости оптического когерентного Фурье-процессора в форме:

$$e_x(x, z=2F, t) = \sqrt{\omega' / 2\pi c_0 F} \cdot L \cdot \dot{E} \cdot \exp(i\omega t) \cdot S(\omega_x). \quad (27)$$

Выражение (26) показывает, что спектр пространственных частот $S(\omega_x)$ выступает в форме пространственной модуляции монохроматического излучения $e(z, t)$.

2.5 Функция пропускания дифракционной решетки

Амплитудную пропускающую дифракционную решетку можно рассмотреть в виде транспаранта с функцией пропускания $T(\xi)$, представленной на рисунке 19, которая может быть разложена в экспоненциальный ряд Фурье на промежутке $\xi \in [-\frac{L}{2}; \frac{L}{2}]$ [79, 85, 95-97]:

$$T(\xi) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} C_n \exp(in\Omega_g \xi), \quad (28)$$

где $\Omega_g = 2\pi / L$ пространственная «круговая» частота первой гармоники разложения.

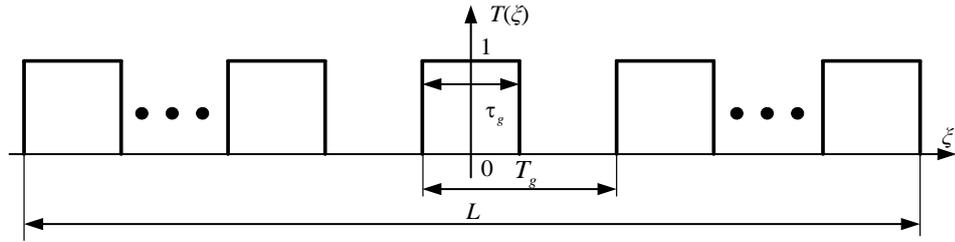


Рисунок 19 – Функция пропускания дифракционной решетки

Определение функции пропускания $T(\xi)$ в форме (2) основывается на известном в теории сигналов [33] соотношении между коэффициентами ряда Фурье C_n и соответствующими значениями ее комплексного спектра $S(\omega_\xi)$, в данном случае – пространственных частот ω_ξ . Эта связь дается в форме [33]:

$$C_n = 2S(n\Omega_g) / L. \quad (29)$$

Вычисление комплексного спектра $S(\omega_\xi)$ базируется на известном в теории сигналов методе определения спектра пачки видеоимпульсов [33]:

$$\begin{aligned} S(\omega_\xi) &= S_0(\omega_\xi) \cdot \left(e^{iN\omega_\xi T_g} + e^{i(N-1)\omega_\xi T_g} + \dots + 1 + e^{-i\omega_\xi T_g} + \dots e^{-iN\omega_\xi T_g} \right) = \\ &= S_0(\omega_\xi) \sum_{n=-N}^N e^{-in\omega_\xi T_g}, \end{aligned} \quad (30)$$

где $S_0(\omega_\xi)$ – комплексный спектр пространственных частот элемента прозрачности дифракционной решетки (в пределах одного периода решетки), $2N$ – число элементов прозрачности в дифракционной решетке.

В свою очередь,

$$S_0(\omega_\xi) = \int_{-\frac{\tau_g}{2}}^{\frac{\tau_g}{2}} \exp(-i\omega_\xi \xi) d\xi = 2 \frac{\sin(\omega_\xi \frac{\tau_g}{2})}{\omega_\xi}. \quad (31)$$

Сумма в выражении (30) – это ядро Дирихле:

$$\sum_{n=-N}^N e^{-in\omega_\xi T_g} = \frac{\sin[(N + \frac{1}{2})\omega_\xi T_g]}{\sin(\omega_\xi T_g / 2)}. \quad (32)$$

Тогда, комплексный спектр пространственных частот функции $T(\xi)$ дается выражением:

$$S(\omega_\xi) = S_0(\omega_\xi) \cdot \frac{\sin[(N + \frac{1}{2})\omega_\xi T_g]}{\sin(\omega_\xi T_g / 2)}. \quad (33)$$

Из соотношений (33) и (29) следует, что коэффициенты ряда (28) можно представить в следующем виде:

$$C_n = 4 \frac{\sin(n\Omega_g \frac{\tau_g}{2})}{n\Omega_g} \cdot \frac{\sin[(N + \frac{1}{2})n\Omega_g T_g]}{L \cdot \sin\left(n\Omega_g \frac{T_g}{2}\right)}. \quad (34)$$

Выражение (28) следует представить в форме:

$$T(\xi) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \exp(ik\omega_g \xi) + \sum_{\substack{m=-\infty \\ m \neq kL/T_g}}^{\infty} C_m \exp(im\Omega_g \xi), \quad (35)$$

где $\omega_g = 2\pi / T_g = 2N\Omega_g$.

В выражении (35) коэффициенты C_k при достаточно большой апертуре решетки L определяются при главных максимальных значениях ядра Дирихле и определяют свойства идеализированной дифракционной решетки, которые рассматриваются в дальнейшем, а коэффициенты C_m во второй сумме (35) в силу свойства ядра Дирихле оказываются несопоставимо малыми по сравнению с коэффициентами C_k . На рисунках 20-22 показаны результаты компьютерного моделирования расчетов коэффициентов разложения функции пропускания для решётки с периодом $T_g=5$ мкм и апертурой $L = 0,01$ мм (рисунок 20) – 2 штриха, укладываемых в пределах апертуры, $L = 0,1$ мм (рисунок 21) – 20 штрихов и $L = 1$ мм (рисунок 22) – 200 штрихов. На рисунках 20-22 дополнительно в виде огибающих показаны: ядро Дирихле $D(n\Omega_g)$ (синяя сплошная линия) и спектр разложения одного элемента прозрачности дифракционной решетки $S(n\Omega_g)$ (зеленая штриховая линия).

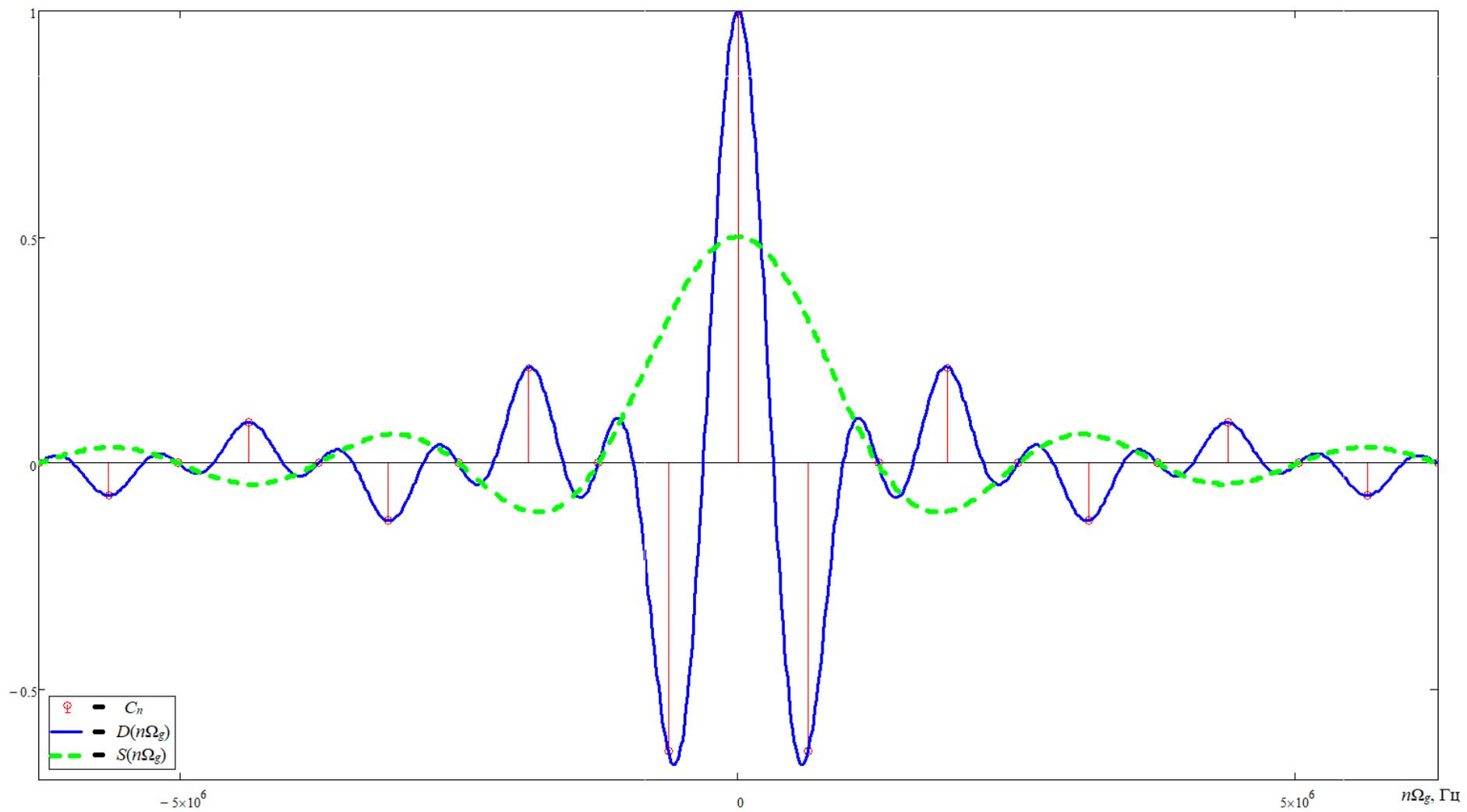


Рисунок 20 – Результат компьютерных расчетов коэффициентов разложения C_n при $L = 0,01$ мм

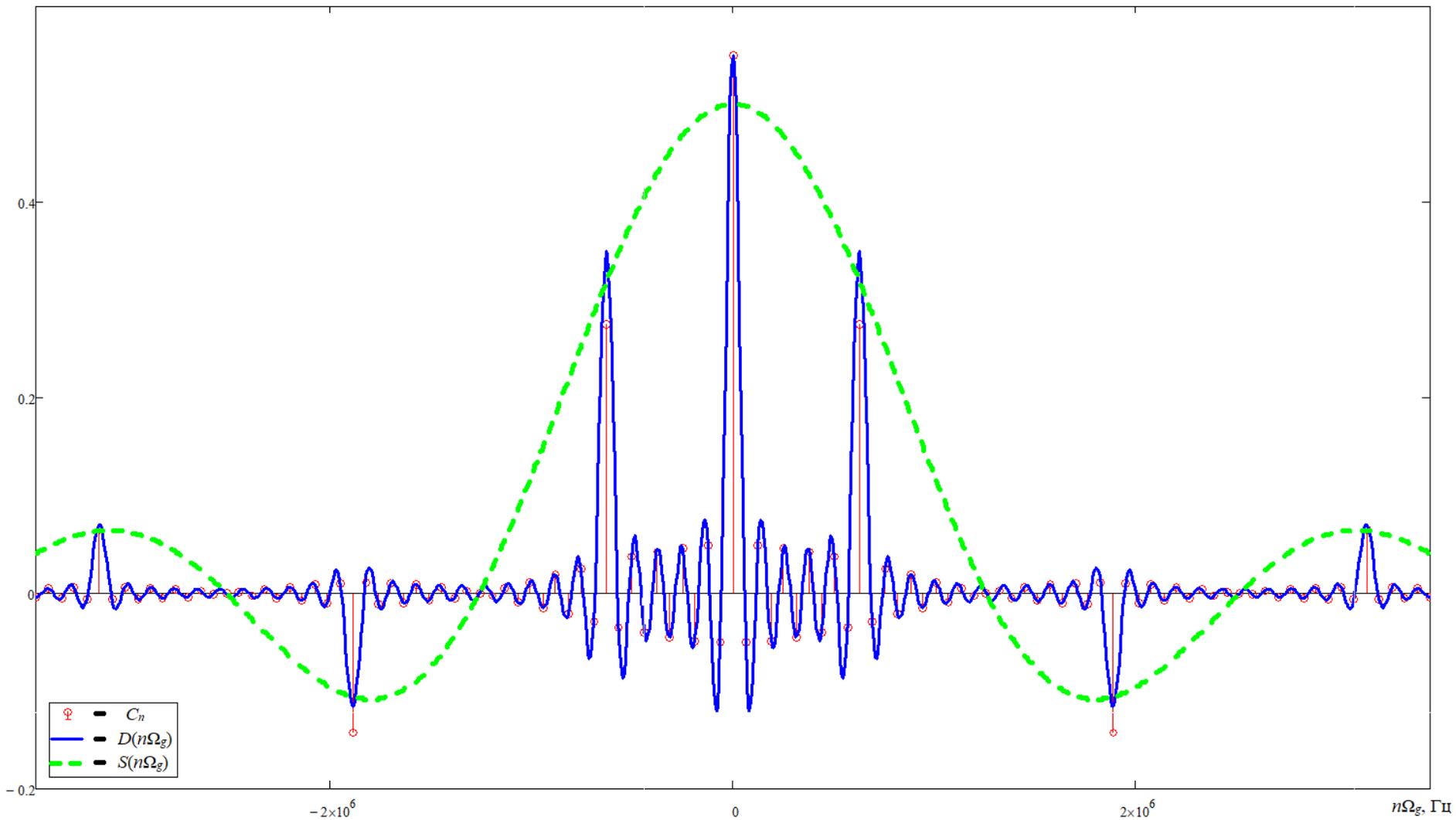


Рисунок 21 – Результат компьютерных расчетов коэффициентов разложения C_n при $L = 0,1$ мм

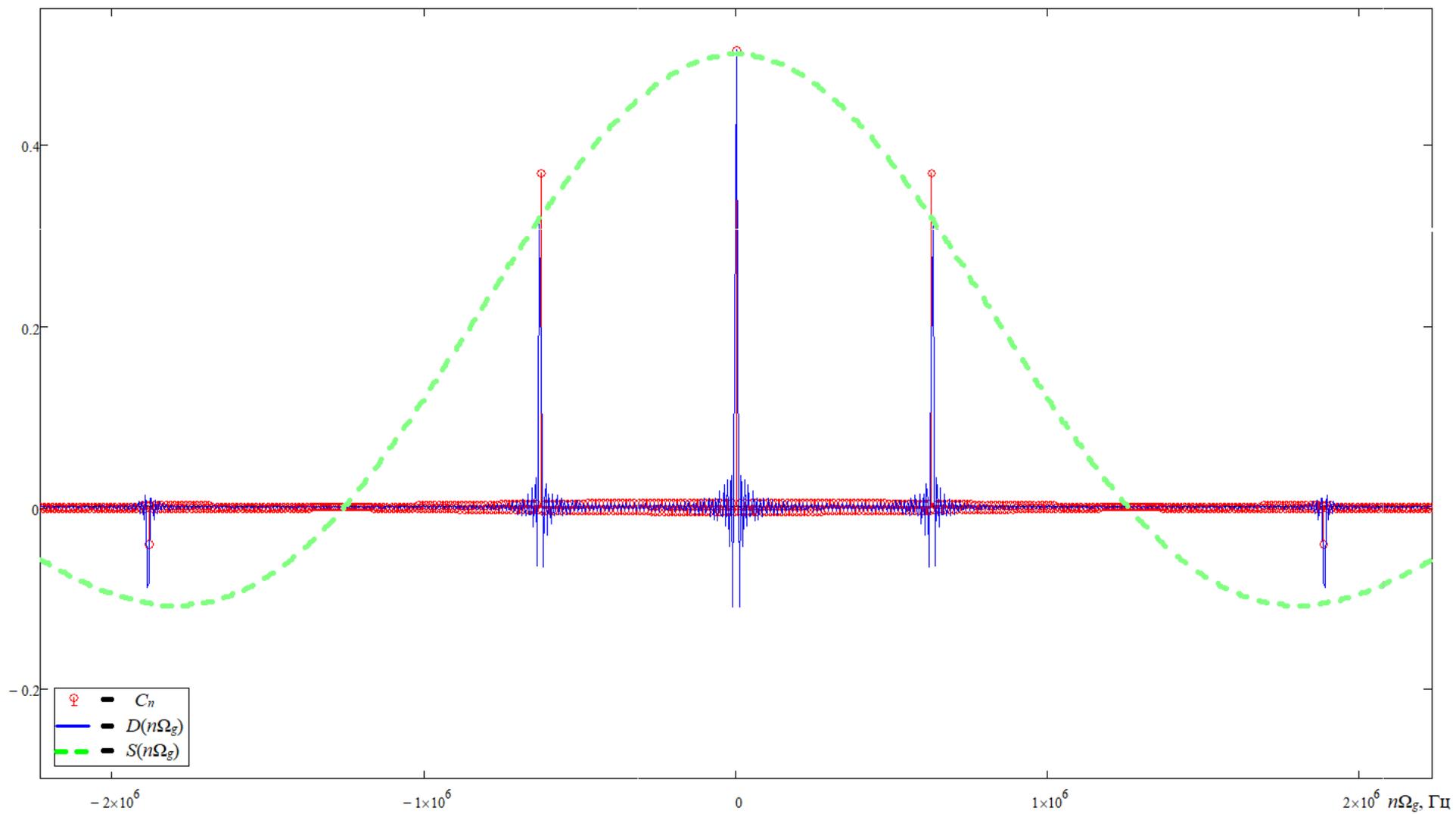


Рисунок 22 – Результат компьютерных расчетов коэффициентов разложения C_n при $L = 1$ мм

Из приведенных рисунков видно, что при апертуре решетки уже в 1 мм промежуточные коэффициенты разложения C_m становятся ничтожно малыми по сравнению с коэффициентами C_k , определяющимися при главных значениях ядра Дирихле, т.е. на частотах, кратных $2\pi/T_g$, поэтому дальнейшее рассмотрение математической модели опирается на первое слагаемое в правой части выражения (35).

Идею получения многопорядкового спектра на выходе спектрального прибора с дифракционной решеткой на основании рассчитанных коэффициентов C_k можно проиллюстрировать с помощью рисунка 23 [85]. Каждый коэффициент C_k с соответствующей ему пространственной частотой формирует в задней фокальной плоскости линзы соответствующий k -ый дифракционный порядок. Таким образом, чем больше дифракционных порядков учитывается при рассмотрении, тем сильнее удастся приблизиться к идеализированному представлению решетки, показанному на рисунке 19.

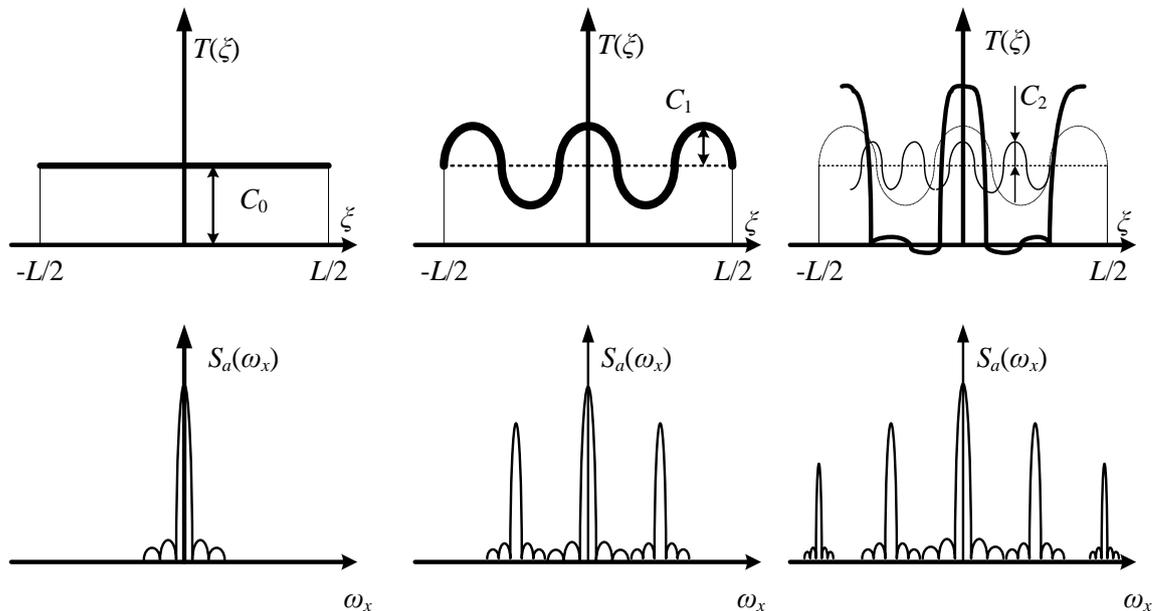


Рисунок 23 – Формирование многопорядкового спектра в спектральном приборе с дифракционной решеткой

2.6 Комплексная аппаратная функция спектрального прибора с дифракционной решеткой

На основании изложенного в разделе 2.1.1 для определения аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой необходимо в качестве входного воздействия использовать однородную плоскую монохроматическую волну $\exp(i\omega't)$ с единичной амплитудой [79, 85]. Подстановка первой суммы выражения (35) в соотношение (27), дает:

$$\begin{aligned} S_a(\omega_x, t) &= \exp(i\omega't) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \exp(ik\Omega_g \xi) \cdot \exp(-i\omega_x \xi) d\xi \right) = \\ &= \exp(i\omega't) \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \exp(ik\Omega_g \xi) \cdot \exp(-i\omega_x \xi) d\xi \end{aligned} \quad (36)$$

Интегрирование в последнем равенстве цепи (36) дает следующий результат:

$$\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \exp(ik\Omega_g \xi) \cdot \exp(-i\omega_x \xi) d\xi = 2 \frac{\sin \left[\left(k\Omega_g - \frac{\omega'x}{c_0 F} \right) \frac{L}{2} \right]}{k\Omega_g - \frac{\omega'x}{c_0 F}}. \quad (37)$$

Правую часть выражения необходимо привести к форме, соответствующей комплексной аппаратной функции реального спектрального прибора в идеальном исполнении [77]:

$$\left(k\Omega_g - \frac{\omega'x}{c_0 F} \right) \frac{L}{2} = \left(\frac{k\Omega_g c_0 F}{x} - \omega' \right) \frac{Lx}{2c_0 F} = (\omega(x) - \omega') \frac{T_a(x)}{2}. \quad (38)$$

В соотношении (38) следует ввести следующие величины:

- Связь пространственной координаты x и спектральной частоты ω дается зависимостью:

$$\omega(x) = (k\Omega_g c_0 F / x). \quad (39)$$

- «Время» анализа, которое соответствует введенному в формуле (9):

$$T_a(x) = Lx / 2c_0 F. \quad (40)$$

Из соотношений (19), (36), (37) следует выражение комплексной аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой:

$$K(\omega, \omega', t) = \exp(i\omega't) \sum_{k=-N}^N 2C_k \frac{\sin[(\omega(x) - \omega')T_a(x) / 2]}{(\omega(x) - \omega')x / c_0 F}, \quad (41)$$

где N – число учитываемых дифракционных порядков.

Таким образом, комплексный аппаратный спектр оптического излучения, формируемый на выходе оптического когерентного Фурье-процессора в задней фокальной плоскости линзы, дается выражением:

$$\begin{aligned} S_a(\omega_x, t) &= \int_{\Delta\Omega} S(\omega') \exp(i\omega't) \sum_{k=-N}^N 2C_k \frac{\sin[(\omega(x) - \omega')T_a(x) / 2]}{(\omega(x) - \omega')x / c_0 F} d\omega' = \\ &= \sum_{k=-N}^N 2C_k \int_{\Delta\Omega} S(\omega') \cdot \exp(i\omega't) \cdot \frac{\sin[(\omega(x) - \omega')T_a(x) / 2]}{(\omega(x) - \omega')x / c_0 F} d\omega'. \end{aligned} \quad (42)$$

Соотношение (42) показывает многопорядковый характер спектра в спектральном приборе с дифракционной решеткой. Каждое слагаемое в последнем равенстве цепи (42) описывает комплексный мгновенный спектр в соответствующем дифракционном порядке. Наличие множителя k в функции $\text{sinc}(\cdot)$ указывает на кратное изменение временной спектральной частоты, это означает, что, например, в ± 2 дифракционных порядках следует ожидать вдвое лучшей разрешающей способности, чем в ± 1 порядках. Однако, с увеличением номера дифракционного порядка ухудшается отношение сигнал/шум в силу убывания коэффициентов ряда Фурье в выражении (42).

Кроме того, из (39) следует вывод о том, что ширина аппаратной функции, а, следовательно, и разрешающая способность прибора будет меняться даже в пределах одного дифракционного порядка, что наглядно иллюстрируют результаты компьютерного моделирования аппаратной функции для +1, +2 и +3 дифракционного порядка для двух длин волн: $\lambda=400$ и 550 нм (рисунок 24).

Из выражения (42) можно вывести соотношение, описывающее ширину аппаратной функции, которое определяет разрешающую способность прибора $R(\omega)$:

$$R(\omega(x)) = \frac{2\pi \cdot c \cdot F}{\omega(x) \cdot L}. \quad (43)$$

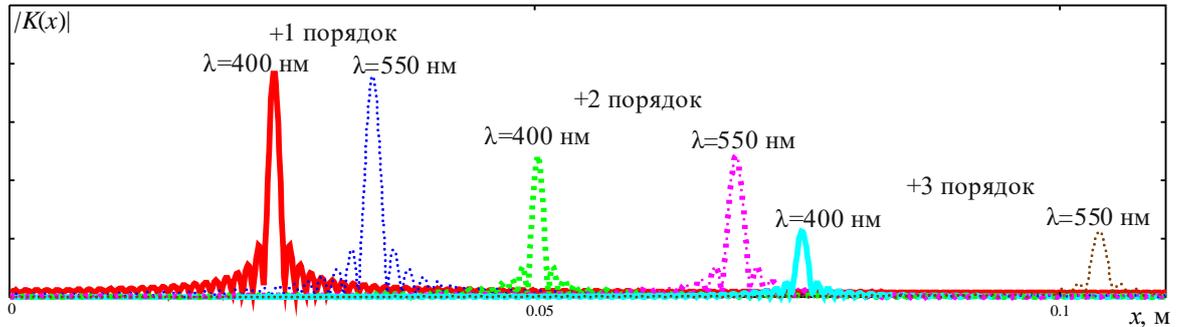


Рисунок 24 – Результаты компьютерного моделирования аппаратной функции

Таким образом, обобщим полученные результаты, из соотношений (39, 41 и 43) вытекают важные свойства спектров в дифракционных порядках:

1. Наличие множителя ω' в знаменателе выражения (43) говорит о нелинейном изменении ширины аппаратной функции в пределах каждого дифракционного порядка.

2. Выражение (39) указывает на нелинейную связь пространственной координаты и спектральной частоты. Это говорит о том, что разрешающая способность прибора меняется по диапазону анализируемых частот (длин волн).

3. Наличие множителя k в числителе в выражениях (39) и (41) указывает на кратное изменение временной спектральной частоты. Это говорит о том, что с увеличением номера дифракционного порядкаратно улучшается разрешающая способность прибора. Вместе с тем, в силу убывания коэффициентов C_k в разложении в ряд Фурье функции

пропускания дифракционной решетки, использование высших порядков для спектрального анализа затруднено.

Следует особо подчеркнуть, что вышеуказанные свойства, хорошо известные в экспериментальной спектрометрии [77], невозможно установить с помощью применения традиционных принципов геометрической оптики к анализу спектрального прибора с дифракционной решеткой. Лишь применение принципов радиооптики, теории линейных систем и системного подхода позволило в рамках строгих математических выкладок установить эти свойства.

2.7 Оценка энергетического спектра

Дальнейшие выкладки основаны на методике, предложенной в [86], и теории вытянутых сфероидальных функций [34]. Измерение энергетического спектра $\bar{G}(\omega)$ включает операцию вычисления функции $|S_a(\omega, t)|^2$ и операцию ее временного усреднения на промежутке $[-T_R, T_R]$, т.е.

$$\bar{G}(\omega) = \frac{1}{2T_R} \int_{-T_R}^{T_R} S_a^{\sim}(\omega, t) [S_a^{\sim}(\omega, t)]^* dt. \quad (44)$$

Подстановка в выражение (44) соотношения (18), переход к безразмерным переменным и интегрирование по времени дает:

$$\bar{G}(\eta) = C \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\sin((\eta - \eta')T_a / 2)}{(\eta - \eta')} \frac{\sin((\eta - \eta'')T_a / 2)}{(\eta - \eta'')} \times \times S(\eta') S^*(\eta'') \text{sinc}[c(\eta' - \eta'')] d\eta' d\eta'' \quad (45)$$

где $C = \text{const}$; $c = \Delta\omega T_R \gg 1$.

Функцию $\frac{\sin((\eta - \eta')T_a / 2)}{(\eta - \eta')} S_a^{\sim}(\cdot)$ можно представить рядом по системе

вытянутых волновых сфероидальных функций [34]:

$$\frac{\sin((\eta - \eta')T_a / 2)}{(\eta - \eta')} S_a^-(\eta') = \sum_{i=0}^N a_i(\eta) \psi_i(\eta'), \quad (46)$$

Подстановка суммы (46) в выражение (45) и применение методов теории волновых сфероидальных функций [34] дает:

$$\begin{aligned} & \int_{-1}^1 \frac{\sin((\eta - \eta')T_a / 2)}{(\eta - \eta')} S(\eta') \operatorname{sinc}[c(\eta' - \eta'')] d\eta' = \\ & = \sum_{i=0}^n a_i(\eta) \int_{-1}^1 \psi_i(\eta') \operatorname{sinc}[c(\eta' - \eta'')] d\eta' = \\ & = \sum_{i=0}^N a_i(\eta) \psi_i(\eta'') \lambda_j \approx \frac{\sin((\eta - \eta'')T_a / 2)}{(\eta - \eta'')} S(\eta''), \end{aligned} \quad (47)$$

где $\lambda_j \approx 1$ при $c \gg 1$, что всегда выполняется в реальных условиях.

Результат (47) позволяет записать выражение (45) как

$$\bar{G}(\eta) = C \int_{-1}^1 \frac{\sin^2((\eta - \eta')T_a / 2)}{(\eta - \eta')^2} |S(\eta')|^2 d\eta', \quad (48)$$

где возвращение к естественным переменным дает линейный интегральный оператор, который устанавливает связь вход-выход спектрального прибора для распределения энергии по частотам:

$$\bar{G}(\omega) = C_R \int_{\Delta\Omega} R(\omega, \omega') G(\omega') d\omega', \quad (49)$$

где $C_R = \text{const}$, $R(\cdot) = \frac{\sin^2((\omega - \omega')T_a / 2)}{(\omega - \omega')^2}$ – энергетическая аппаратная

функция по аналогии с общепринятой в оптической спектрометрии [61, 77], $G(\cdot) = |S(\cdot)|^2$ – энергетический спектр анализируемого сигнала.

Конечный результат (49) был получен путем последовательных математических выкладок, описывающих обработку оптического сигнала от действия на него дифракционной решетки до результата фотодетектирования

в рамках физической оптики, теории сигналов и применения методов теории линейных систем. Полученный результат является строгим обоснованием общепринятых представлений о принципах получения энергетического спектра решеточным прибором с дифракционной решеткой.

2.8 Частотная фильтрация и считывание спектрометрической информации

Соотношение (44) является результатом общетеоретического подхода к вопросу выдачи получателю информации в характерной для оптоэлектронных систем энергетической форме. Практически, выражение (44) может описывать результат спектральных измерений, зафиксированных на фотопластинке при экспозиции в линейном режиме накопления.

Современные устройства считывания спектрометрической информации в оптоэлектронных системах выполняются на основе фотоэффекта. Дальнейшая обработка спектрометрической информации основана на эквивалентной схеме этого процесса, приведенной на рисунке 25.

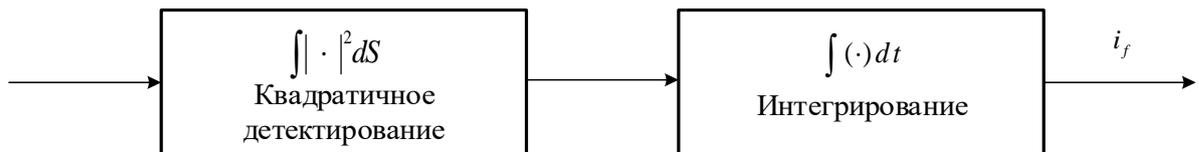


Рисунок 25 – Эквивалентная структурная схема фотодетектора

Фототок i_f в общем случае выражается формулой [31]:

$$i_f = \gamma q_e \frac{P}{\hbar \omega'}, \quad (50)$$

где γ – квантовая эффективность; q_e – заряд электрона; \hbar – постоянная Планка; P – мощность падающего оптического излучения; ω' – круговая частота падающего на фотодетектор оптического излучения.

Мощность p падающего оптического излучения на фотоприемник

$$p = \iint_{S_f} \mathbf{P} ds, \quad (51)$$

где S_f – площадь чувствительной поверхности фотоприемника, $\mathbf{ds} = \mathbf{n} ds$, здесь \mathbf{n} – единичная нормаль к чувствительной поверхности фотоприемника; \mathbf{P} – вектор Пойнтинга, причем,

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = |\mathbf{E} \times \mathbf{H}| \mathbf{s} = \sqrt{\varepsilon / \mu} \cdot |\mathbf{E}|^2 \mathbf{s} = \sqrt{\mu / \varepsilon} |\mathbf{H}|^2 \mathbf{s}, \quad (52)$$

где \mathbf{E} , \mathbf{H} – электрический и магнитный векторы, соответственно, \mathbf{s} – единичный вектор; ε , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости, соответственно.

В общем случае на фотоприемник падает некогерентное излучение с шириной спектра $\Delta\omega$. Поэтому результат квадратичного детектирования и временного накопления следует рассматривать с учетом специфики работы спектрального устройства.

Устройства считывания спектрометрической информации в дифракционных спектральных приборах реализованы на основе ПЗС-линеек, которые устанавливаются в плоскости пространственных частот, связанных с частотами спектральной функции $S_o(\omega)$ [79].

Как отмечалось ранее, под плоскостью пространственных частот (x, y) понимается расположение ПЗС-линейки в задней фокальной плоскости оптического когерентного Фурье-процессора в соответствующем дифракционном порядке.

На рисунке 26 представлен характер изменения спектральной частоты вдоль координаты x в соответствии с выражением (39) для +1 дифракционного порядка.

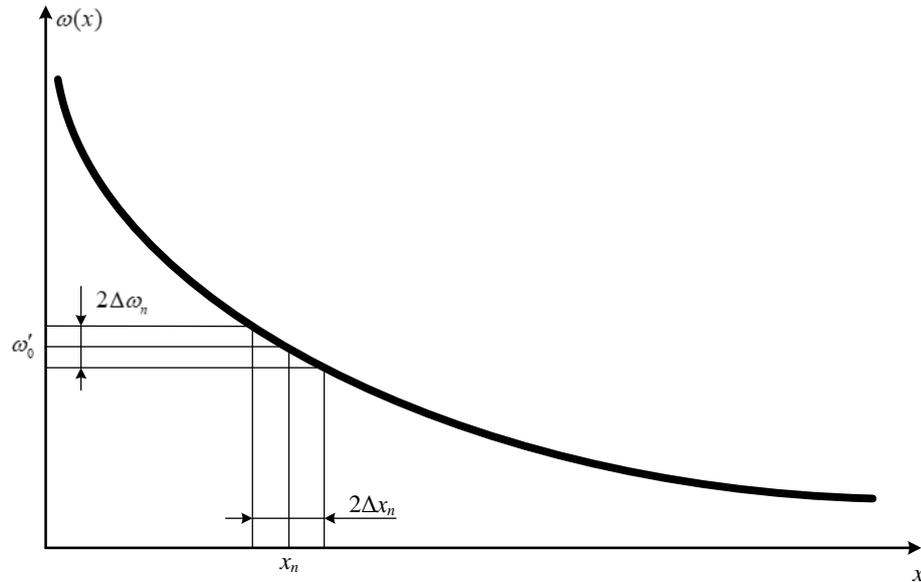


Рисунок 26 – Изменение спектральной частоты вдоль координаты x

Рисунок 26 наглядно показывает, что эта частота изменяется нелинейно. Исходя из того, что каждый элемент ПЗС-линейки (рисунок 27) имеет конечную протяженность $2\Delta x_n \ll x_n$ и, следовательно, выполняет частотную фильтрацию в диапазоне частот $\omega \in \mp(\omega'_0 \pm \Delta\omega)$, где $\omega(x_0) = \omega'_0$. Для n -го элемента ПЗС-линейки справедливо [98, 99]:

$$\omega(x_n \pm \Delta x'_n) = \frac{(2\pi c_0 F)}{\tau_g (x_n \pm \Delta x'_n)} \approx \frac{(2\pi c_0 F)}{\tau_g x_n} \mp \frac{(2\pi c_0 F)\Delta x'_n}{\tau_g x_n^2} + \dots \quad (53)$$

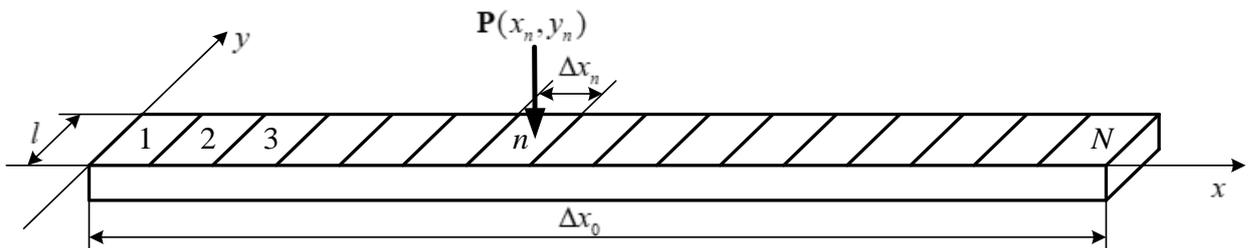


Рисунок 27 – Модель ПЗС-линейки

В терминах спектральных частот, каждый элемент осуществляет частотную фильтрацию в полосе частот $\Delta\omega_n$, равную:

$$\Delta\omega_n = \frac{(2\pi c_0 F)2\Delta x_n}{T_g x_n^2}, \quad (54)$$

или

$$\Delta x_n = \frac{T_g x_n^2 (\Delta\omega_n(x_n))}{4\pi c_0 F}. \quad (55)$$

Следует отметить, что параметр $\Delta\omega_n$ может служить еще одним критерием для определения разрешающей способности прибора наряду с шириной комплексной аппаратной функции $R(\omega)$. При этом критерием для выбора параметра, определяющего разрешающую способность прибора может служить правило:

$$R(\omega) \leq \Delta x_n. \quad (56)$$

Если неравенство выполнено, то следует пользоваться критерием разрешающей способности в виде $\Delta\omega_n$. В реальных условиях при достаточно большом размере апертуры дифракционной решетки это неравенство выполняется почти всегда, поэтому в дальнейшем будет использоваться лишь критерий $\Delta\omega_n$, который определяется размером пикселя ПЗС-линейки.

На рисунке 28 приведены расчетные графики изменения разрешающей способности прибора $\Delta\omega_n$, Гц вдоль протяженности ПЗС-линейки для +1 и +2 дифракционного порядка для диапазона анализируемых длин волн $\lambda=350\dots650$ нм.

В диапазоне частот $\omega' = \omega_0 \pm \Delta\omega$ величина $1/\omega'$ в формуле (50) представима рядом Тейлора:

$$\frac{1}{\omega'} = \frac{1}{\omega_0 \pm \Delta\omega} = \frac{1}{\omega_0} \left(1 \mp \frac{\Delta\omega}{\omega_0} + \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2 \mp \dots \right). \quad (57)$$

Вектор Пойнтинга также можно представить рядом Тейлора:

$$\mathbf{P}(x, y) = \mathbf{P}(x_n, y_n) + \left(x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} \right) \cdot \mathbf{P}(x_n, y_n) + \frac{1}{2!} \left(x \frac{\partial}{\partial x} + y \frac{\partial}{\partial y} \right)^{(2)} \cdot \mathbf{P}(x_n, y_n) + \dots \quad (58)$$

где x_n, y_n – координаты в плоскости чувствительной поверхности n -го элемента ПЗС-линейки.

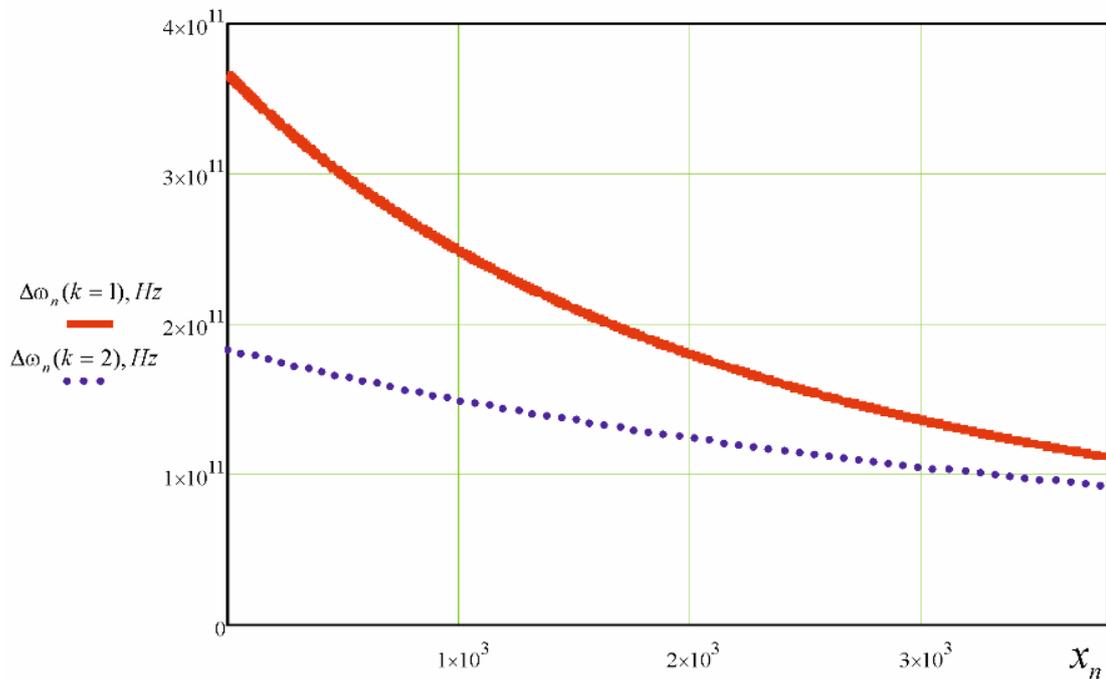


Рисунок 28 – Изменение разрешающей способности прибора в различных порядках

Для каждого чувствительного элемента ПЗС-линейки $\Delta x_n \ll \Delta x_0$, поэтому в разложениях (57) и (58) можно ограничиться нулевым приближением, тогда формула (50) при нормальном падении волны принимает вид:

$$i_n = \gamma q_e \frac{\sqrt{\varepsilon / \mu} \cdot |\mathbf{E}|^2}{\hbar \omega_0} \Delta S_n, \quad (59)$$

где $\Delta S_n = \Delta x_n l$, здесь $\Delta x_n, l$ – протяженности n -го элемента ПЗС-линейки вдоль оси пространственных частот ω_x и в перпендикулярном направлении, соответственно.

В аспекте считывания спектрометрической информации работа спектрального прибора с дифракционной решеткой рассматривается в +1 дифракционном порядке.

Подстановка вместо значений вектора **E** оптического сигнала, представленного в виде комплексного аппаратного спектра, а также выполнение операций пространственного и временного интегрирования, согласно алгоритму, показанному на рисунке 25, позволяет представить результат фотодетектирования в виде:

$$\bar{i}_n = B \int_{\omega_n - \Delta\omega_n}^{\omega_n + \Delta\omega_n} \frac{\sin^2\left[(\omega(x) - \omega') \frac{T_a}{2}\right]}{\left[(\omega(x) - \omega') \frac{T_a}{2}\right]^2} G(\omega') d\omega' = B \int_{\omega_n - \Delta\omega_n}^{\omega_n + \Delta\omega_n} \text{sinc}^2(\cdot) \cdot G(\omega') d\omega'. \quad (60)$$

Полученное выражение для фототока в каждом элементе ПЗС-линейки позволяет записать математическое выражение, описывающее связь вход-выход спектрального прибора в матричной форме для энергетического спектра при детектировании спектра на всех элементах ПЗС-линейки:

$$\|G(\omega_n)\| = B \int_{\omega_n - \Delta\omega_n}^{\omega_n + \Delta\omega_n} \text{diag}\{A_n(\omega, \omega')\} \cdot \|G(\omega')\| d\omega', \quad (61)$$

где $G(\omega')$ – энергетический спектр анализируемого сигнала; $\text{diag}\{A_n(\omega, \omega')\}$ – энергетическая аппаратная функция спектрального прибора с дифракционной решеткой в матричной форме; $A_n(\omega, \omega') = \text{sinc}^2(\cdot)$.

Таким образом, результаты считывания спектрометрической информации выдаются в форме отсчетных значений энергетического спектра, усредненных по размеру чувствительного элемента ПЗС-линейки и по времени интегрирования T_R [100, 101].

2.9 Выводы по разделу

- Критический анализ состояния теории спектральных измерений в оптическом диапазоне показал, что некоторые ее принципиальные вопросы требуют дальнейшей разработки.

- Предложена новая математическая модель спектрального преобразования в приборе с дифракционной решеткой, которая, в отличие от широко распространенного, базирующегося на принципах геометрической оптики, подхода к описанию принципа действия прибора, позволяет описать распространение и преобразование анализируемого оптического сигнала от входной апертуры прибора до результата считывания спектрометрической информации.

- На основании разработанной математической модели установлены важнейшие свойства спектров, формируемых прибором с дифракционной решеткой: нелинейная связь спектральной частоты и пространственной координаты, изменение ширины аппаратной функции в пределах дифракционного порядка, кратное улучшение разрешающей способности прибора с увеличением номера дифракционного порядка, что ранее не удавалось получить в рамках традиционного подхода теории дифракции. Таким образом, ранее известные экспериментальные результаты нашли свое теоретическое обоснование.

- На основании общих положений теории линейных систем показано, что для определения аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой на его вход должна падать однородная плоская монохроматическая волна.

- В рамках методов радиооптики на базе системного подхода и положений теории линейных систем установлены комплексная и энергетическая аппаратные функции спектрального прибора, являющиеся его исчерпывающими характеристиками.

- Показано, что при выполнении анализа спектральным прибором с дифракционной решеткой на чувствительной поверхности фотодетектора (ПЗС-линейки) формируется переменный во времени комплексный мгновенный спектр.

- Анализ процесса считывания спектрометрической информации в спектральном приборе с дифракционной решеткой с помощью ПЗС-линейки показал, что каждый ее элемент (пиксель) осуществляет частотную фильтрацию регистрируемого спектра, а дальнейшее квадратичное детектирование и временное интегрирование приводит к получению отсчетных значений энергетического спектра.

Основные результаты данного раздела опубликованы в работах [79-83, 85, 89, 93, 95-101].

3 Бесконтактное измерение оптических спектров спектральным прибором с дифракционной решеткой с применением ВОСП

3.1 Математическая модель влияния ВОСП на аппаратную функцию спектрального прибора с дифракционной решеткой

Применение ВОСП позволяет передавать анализируемое излучение на расстояние, измеряемое километрами и тем самым исключить непосредственный контакт спектрального прибора с источником излучения (объекта контроля).

В случае применения ВОСП оптическая схема системы контроля имеет вид, изображенный на рисунке 29.

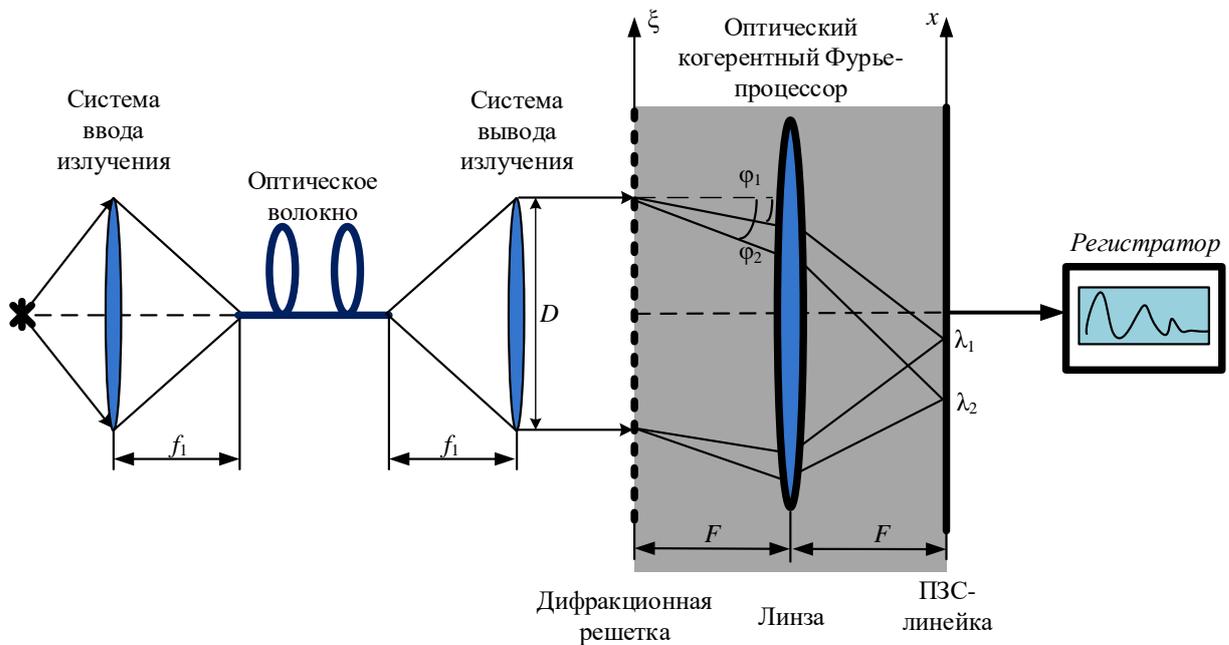


Рисунок 29 – Схема системы контроля на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой и применением ВОСП

ВОСП включает в себя:

- систему ввода излучения, состоящую из положительной линзы и слоя свободного пространства протяженностью f_1 ;
- оптическое волокно;

– систему вывода излучения, состоящую из линзы, окруженной двумя слоями свободного пространства протяженностью f_1 .

Система вывода излучения формирует оптический пучок, падающий на вход спектрального прибора и подвергающийся дальнейшему спектральному преобразованию.

В случае передачи излучения по ВОСП, падающий на дифракционную решетку фронт волны оказывается отличным от требуемого однородного и плоского, что вносит искажения при выполнении спектральных измерений.

Известно [102], что поле на торце одномодового оптического волокна с хорошим приближением можно описать в виде усеченного Гауссова распределения:

$$U(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\zeta^2}{(d/2)^2}\right), \quad (62)$$

где d – диаметр сердцевины волокна.

Для случая многомодового волокна необходимо использовать более сложный вариант распределения, т.к. поле на торце такого волокна имеет сложную спекл-структуру и для его описания необходимо привлечение теории случайных полей, что не является целью данной работы.

Излучение с выходного торца оптоволокна проходит оптическую систему, состоящую из линзы и двух слоев свободного пространства, т.е. подвергается операции пространственного преобразования Фурье [94]:

$$U(\xi) = \frac{1}{\sqrt{\lambda f_1}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} u(\zeta) \cdot \exp\left(-\frac{ik\zeta\xi}{\lambda f_1}\right) dx. \quad (63)$$

Далее, излучение, подвергшееся пространственному преобразованию Фурье, падает на решетку. Очевидно, что фронт волны будет искаженным (неоднородным и не плоским). В этом случае предлагается произвести операцию перемножения функции пропускания решетки и функцию распределения поля. Как отмечалось ранее, дальнейшее преобразование полученного результата перемножения сводится к повторному

пространственному Фурье-преобразованию с помощью линзы и двух слоев свободного пространства [94] F , т.е.:

$$U(x) = \hat{F}[T(\xi) \cdot U(\xi)]. \quad (64)$$

Важно отметить, что предложенный в работе [85] подход позволяет производить расчет дифракционной картины отдельно в каждом дифракционном порядке. Для этого при расчетах берется необходимый член суммы в выражении (41), соответствующий одному конкретному дифракционному порядку. Это значительно упрощает выполнение вычислений при расчете дифракционной картины.

На рисунке 30 представлены компьютерного моделирования аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой в +1 порядке при непосредственном падении излучения на решетку (на основании выражения 41, штриховая линия) и в случае прохождения через систему передачи по оптическому волокну (на основании предложенной методики расчета, сплошная линия).

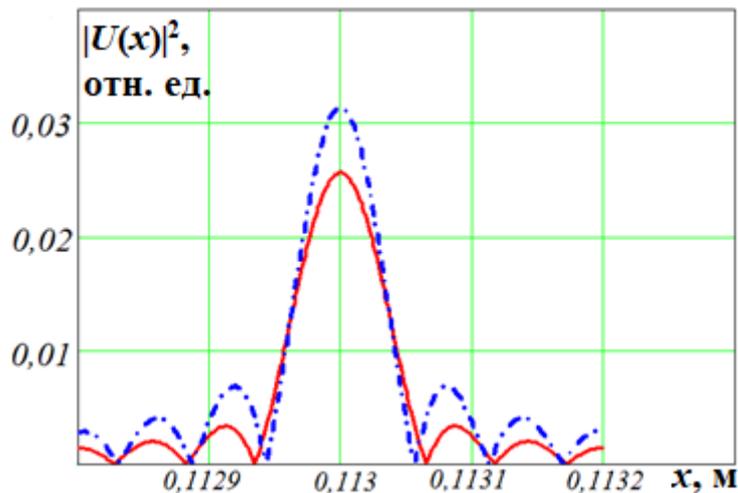


Рисунок 30 – Результаты моделирования аппаратной функции прибора с применением ВОСП и без нее

Параметры системы, использованные при расчете следующие: $\lambda = 632$ нм, период решетки $T_g = 5$ мкм, $F = 90$ см, $L = 1$ см.

Теоретический расчет показывает уширение аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой в 1,2 раза.

3.2 Экспериментальные исследования по установлению влияния ВОСП на аппаратную функцию спектрального прибора с дифракционной решеткой

В работе [42] были выполнены теоретические и экспериментальные исследования влияния оптического волокна на аппаратную функцию спектрального прибора на базе АОПФ. Кроме того, в работе [40] констатирован факт, что передача сигнала по одномодовому волокну ведет к уширению аппаратной функции прибора на базе АОПФ в 1,5 раза, а в случае применения многомодового волокна – в 2 раза.

Применительно к спектральному прибору с дифракционной решеткой были выполнены аналогичные экспериментальные исследования по установлению степени влияния ВОСП для передачи анализируемых сигналов на его аппаратную функцию [103-105]. Для этих целей был реализован лабораторный макет спектрального прибора с ВОСП.

Фотографии лабораторного макета и его отдельных узлов приведены на рисунках 31, 32. Лабораторный макет собран на оптической скамье и включает следующие блоки:

1. Оптическая скамья ОСК-2;
2. *He-Ne* лазер ЛГН-214 мощностью 1 мВт и центральной длиной волны 632 нм;
3. Коллиматор АКТ-15;
4. ВОСП, состоящая из симметричных устройств ввода-вывода оптического излучения со стандартными разъемами для подключения различных типов оптического волокна (рисунок 32а). Система имеет возможность смены типа оптического волокна с одномодового на многомодовое. Кроме того, система оснащена юстировочными винтами и возможностью перемещения линз вдоль оптической оси для достижения

максимальной эффективности ввода и вывода оптического излучения (рисунок 32б).

5. Амплитудная дифракционная решетка, работающая в проходящем свете.

6. Линза с фокусным расстоянием 90 см. Совокупность линзы и двух слоев свободного пространства обеспечивают необходимое пространственное преобразование оптического сигнала, сформированного на выходной плоскости дифракционной решетки [79].

7. Устройство считывания спектрометрической информации на базе ПЗС-линейки.

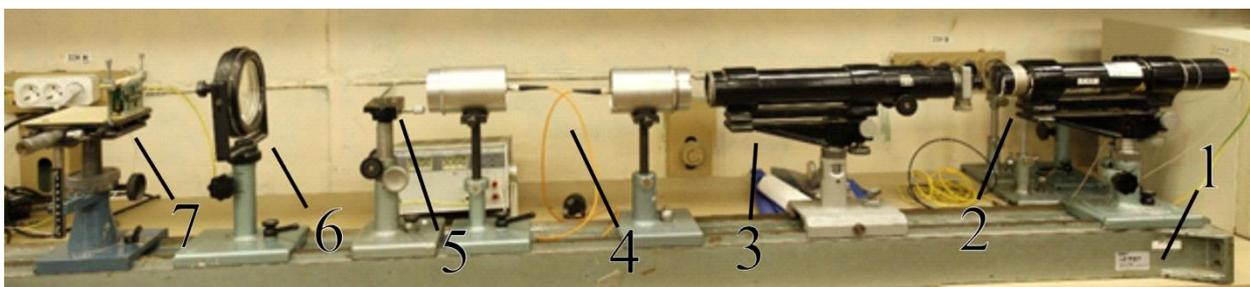


Рисунок 31 – Лабораторный макет



а) система ввода-вывода излучения; б) юстировочные винты

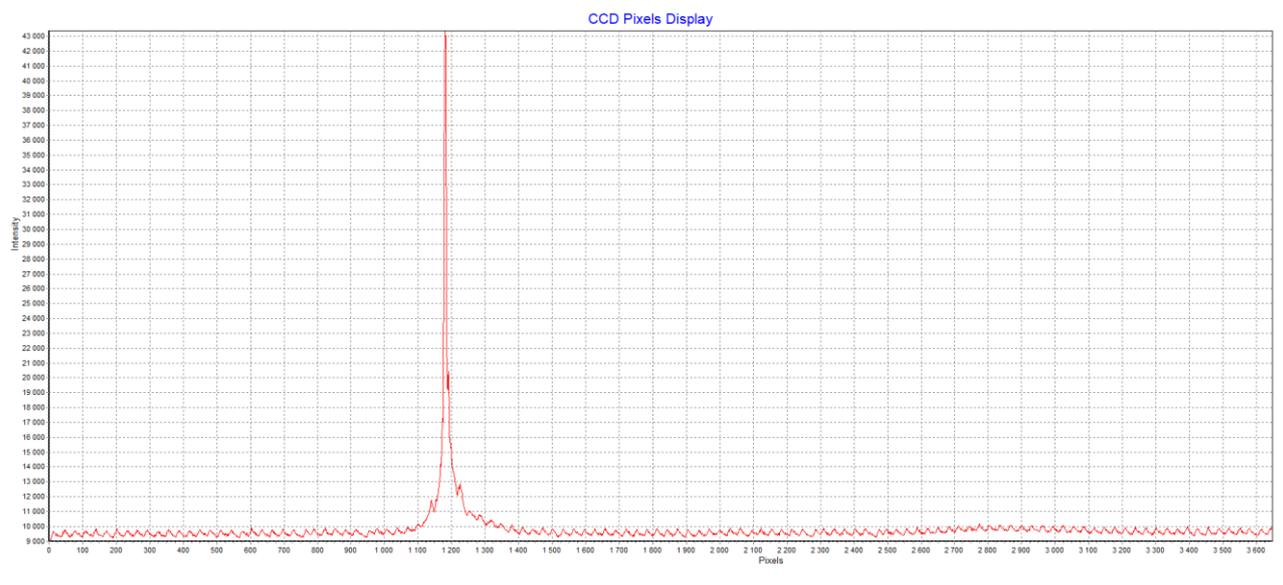
Рисунок 32 – ВОСП с системой фиксации торца волокна с резьбовым наконечником типа «FC»

Было выполнено два эксперимента для демонстрации влияния оптического волокна на аппаратную функцию спектрального прибора с дифракционной решеткой:

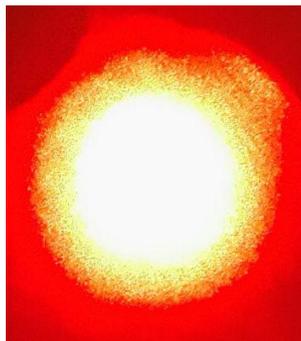
а) при непосредственном воздействии коллимированного лазерного излучения на дифракционную решетку (рисунок 33);

б) с применением системы передачи анализируемых сигналов по одномодовому волокну OFNR 8/125 мкм (рисунок 34);

а)

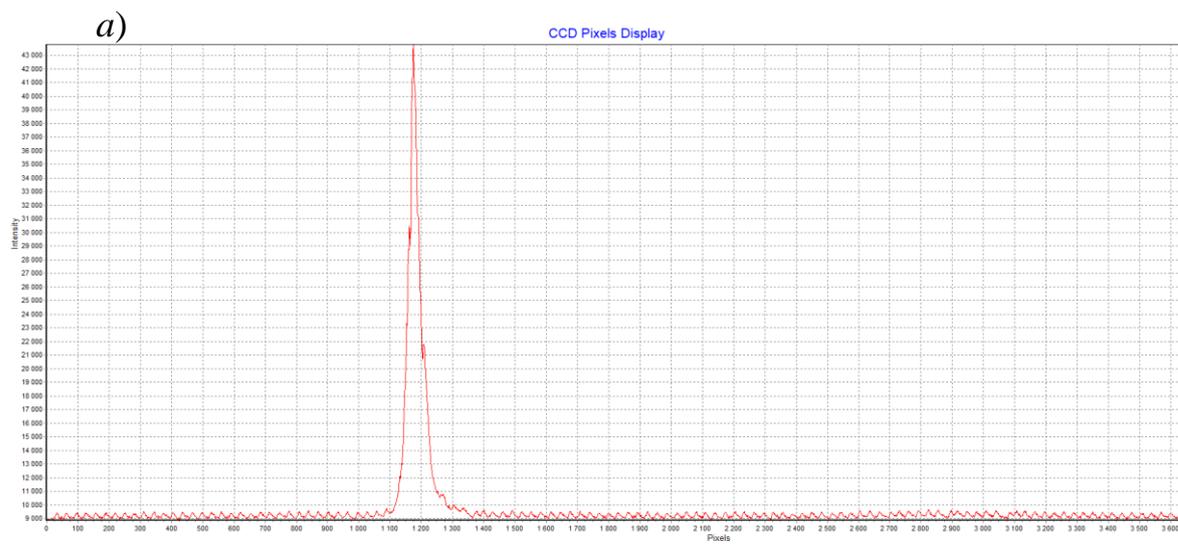


б)

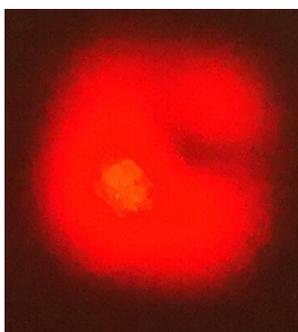


а) аппаратная функция спектрального прибора с дифракционной решеткой без применения ВОСП; б) коллимированное лазерное излучение, падающее на решетку

Рисунок 33 – Результат первого эксперимента



б)



а) аппаратная функция спектрального прибора с дифракционной решеткой с применением одномодового оптического волокна; б) лазерное излучение, прошедшее через систему передачи с одномодовым волокном

Рисунок 34 – Результат второго эксперимента

По результатам проведенного экспериментального исследования можно сделать вывод, что пространственная модуляция оптического излучения, появляющаяся при применении ВОСП в качестве линии передачи анализируемого сигнала, приведет к уширению и искажению формы аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой, и как следствие, к погрешности измерения спектра, ухудшению его разрешающей способности в 1,5 раза – в случае использования одномодового волокна.

3.3 Расчет энергетических потерь в системе вывода излучения из волокна

При распространении оптического сигнала по ВОСП неизбежно возникают энергетические потери, вызванные как проблемой эффективного ввода излучения в оптическое волокно, так и дифракционными потерями, связанными с ограниченностью размеров апертуры линзы в системе вывода излучения из волокна.

Проблема энергетических потерь при вводе излучения в волокно подробно рассмотрена в диссертации [41], и предложена методика расчета энергетических потерь на ввод излучения [41].

В данной работе рассматриваются дифракционные потери, вызванные распространением части оптического излучения вне апертуры линзы при выводе излучения из волокна и приводится оценка величины этих потерь в зависимости от различных параметров: длины волны оптического излучения (λ), расстояния от торца волокна до линзы (z) и апертуры линзы (D).

В состав практически любой оптической системы обработки информации входят линзы, апертуры, ограничивающие волновые пучки по пространству, а также слои свободного пространства. Разработанный на данный момент теоретический анализ оптических систем предполагает бесконечный размер линзы, которая играет роль фазового транспаранта, и не ограничивает волновой пучок по пространству. В реальной же системе, приходится оперировать с ограниченными размерами апертур линз, входящих в оптические системы обработки информации. На рисунке 35 иллюстрируется возникновение дифракционных потерь, вызванных ограниченностью размера апертуры линзы в системе вывода излучения из волокна. Та часть дифрагированного поля, которая не попадает в апертуру линзы, не участвует в дальнейшем преобразовании и является энергетическими потерями в системе [105-109].

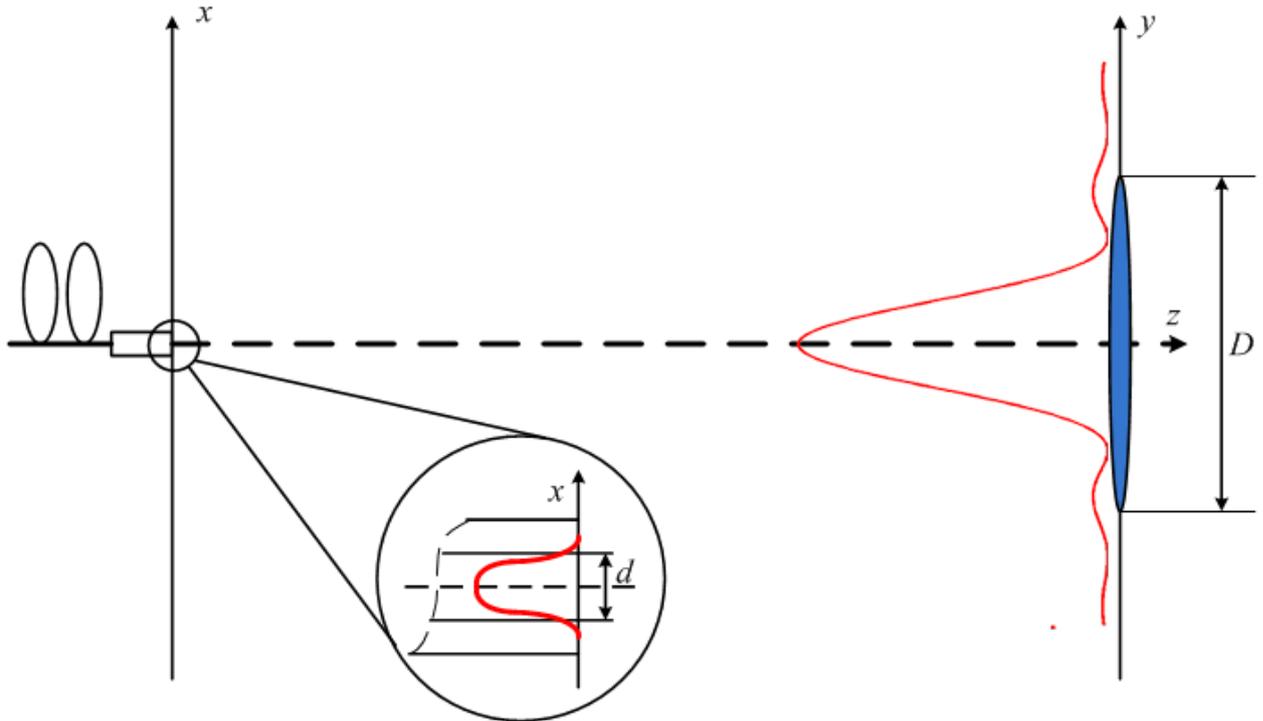


Рисунок 35 – Возникновение дифракционных потерь в оптической системе вывода излучения из ВОСП

Распределение поля в ближней зоне описывается дифракцией Френеля [94]:

$$U(y) = \sqrt{\frac{e^{ikz}}{i\lambda z}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} u(x) \exp(i \frac{k}{2z} (x-y)^2) dx, \quad (65)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, z – расстояние от торца волокна до линзы, λ – длина волны оптического излучения.

Очевидно, что диаметр линзы D должен быть таким, чтобы основная часть дифрагированного поля укладывалась в апертуру линзы, иначе это приведет к энергетическим потерям вследствие распространения волны за пределами апертуры линзы. Однако, вопрос о соотношении параметров d , D и z , при котором потери являются допустимо малыми, до настоящего времени не ставился. Конечные апертуры линз вызывают погрешности передачи сигнала оптической системой. В работе [107] предлагается в

качестве критерия оценки энергетических потерь использовать относительную долю энергии, которая не участвует в дальнейшем преобразовании оптического сигнала, т.е. распространяется за пределами линзовой системы.

Потери оптического излучения, возникающие вследствие ограниченной апертуры линзы, можно записать в виде:

$$\Delta = 1 - \frac{\left(\int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} I(y) dy \right)}{\left(\int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} I_0(x) dx \right)} \quad (66)$$

где $I_0(x) = |u(x)|^2$, $I(y) = |U(y)|^2$ – распределения интенсивности оптического поля на оси x и y соответственно.

Из выражений (65), (66) следует, что потери дифрагированного оптического поля в явном виде зависят от следующих параметров: длины волны, расстояния между входной апертурой и линзой, а также от апертуры линзы, что позволяет оценить энергетические потери передаваемого сигнала в зависимости от этих параметров. В системе Matlab была создана программа, позволяющая вычислять энергетические потери оптического излучения в рассматриваемой системе [106]. Код программы приведен на рисунке 36. Результаты расчетов приведены на рисунках 37 и 38 соответственно.

```

clc;
clear all;

Lambda = 600*10-9;
k = 2*pi/Lambda;
r = 0.01;
z = 0.3;
dz = 0.05;
dx = 10-5;
Rmax = 0.015;
x = -Rmax/2 : dx : Rmax/2;
nfig = 1;
figure(nfig); nfig = nfig + 1;
clf;
I0 = 1;

X1 = -sqrt(k/pi/z)*(r/2+x);
X2 = sqrt(k/pi/z)*(r/2-x);
C1 = mfun('FresnelC',X1);
S1 = mfun('FresnelS',X1);
C2 = mfun('FresnelC',X2);
S2 = mfun('FresnelS',X2);
T = (C2-C1).^2 + (S2-S1).^2;
I = (I0/2)*T;
plot(x,I);
xlabel('y, m');
ylabel('I(y)');
title('Intensity of Diffracted Wave');
grid on;
figure(nfig); nfig = nfig + 1;
clf;

i = 0;
t = 0;
Rmax = 0.01;
x = -Rmax/2 : dx : Rmax/2;
for Lambda= 0.1*10-6:0.5*10-6:1.6*10-6;
    i = 0;
    k = 2*pi/Lambda;
for z=0.01:dz:1;
    X1 = -sqrt(k/pi/z)*(r/2+x);
    X2 = sqrt(k/pi/z)*(r/2-x);
    C1 = mfun('FresnelC',X1);
    S1 = mfun('FresnelS',X1);
    C2 = mfun('FresnelC',X2);
    S2 = mfun('FresnelS',X2);
    T = (C2-C1).^2 + (S2-S1).^2;
    I = (I0/2)*T;
    R(t+1,i+1) = 1 - trapz(x,I)/I0/r;
    i = i+1;
end;
t=t+1;
end

z = 0.01:dz:1;
hold on;
plot(z, R(1, :), 'r');
plot(z, R(2, :), 'y');
plot(z, R(3, :), 'g');
plot(z, R(4, :), 'b');
Legend('100 nm', '600 nm', '1100 nm', '1600 nm');
xlabel('z, m');
ylabel('\Delta');
grid on
title('Dependence from z (d = D = 1 cm)');
hold off;

figure(nfig); nfig = nfig + 1;
clf;
L = 1;
R1 = 0.01;
Rmax = 0.015;
t = 0;
dx = 10-4;

for Lambda= 0.1*10-6:0.5*10-6:1.6*10-6;
    i = 0;
    k = 2*pi/Lambda;
for a = 0.004:dx:Rmax/2;
    m = -a:dx:a;
    X11 = -sqrt(k/pi/L)*(R1/2+m);
    X22 = sqrt(k/pi/L)*(R1/2-m);
    C11 = mfun('FresnelC',X11);
    S11 = mfun('FresnelS',X11);
    C22 = mfun('FresnelC',X22);
    S22 = mfun('FresnelS',X22);
    T1 = (C22-C11).^2 + (S22-S11).^2;
    U1 = (I0/2)*T1;
    Q(t+1, i+1) = 1-trapz(m,U1)/I0/0.01;
    i = i+1;
end;
t=t+1;
end;

a = 0.004:dx:Rmax/2;
hold on;
plot(a, Q(1, :), 'r');
plot(a, Q(2, :), 'y');
plot(a, Q(3, :), 'g');
plot(a, Q(4, :), 'b');
Legend('100 nm', '600 nm', '1100 nm', '1600 nm');
xlabel('D, m');
ylabel('\Delta');
grid on
title('Dependence from D (d = 1 cm, z = 1 m)');
hold off;

```

Рисунок 36 – Код программы для расчета энергетических потерь

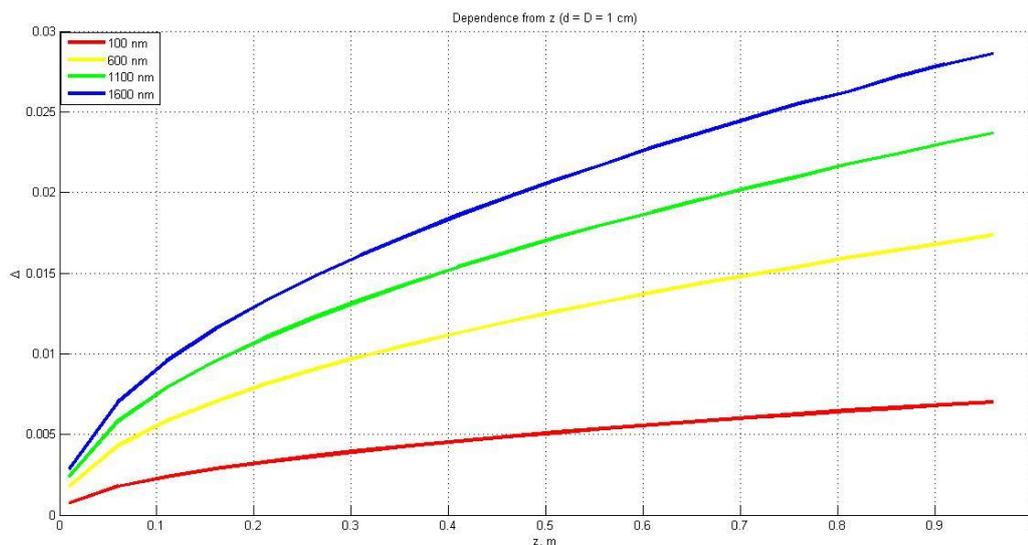


Рисунок 37 – Зависимость энергетических потерь от z

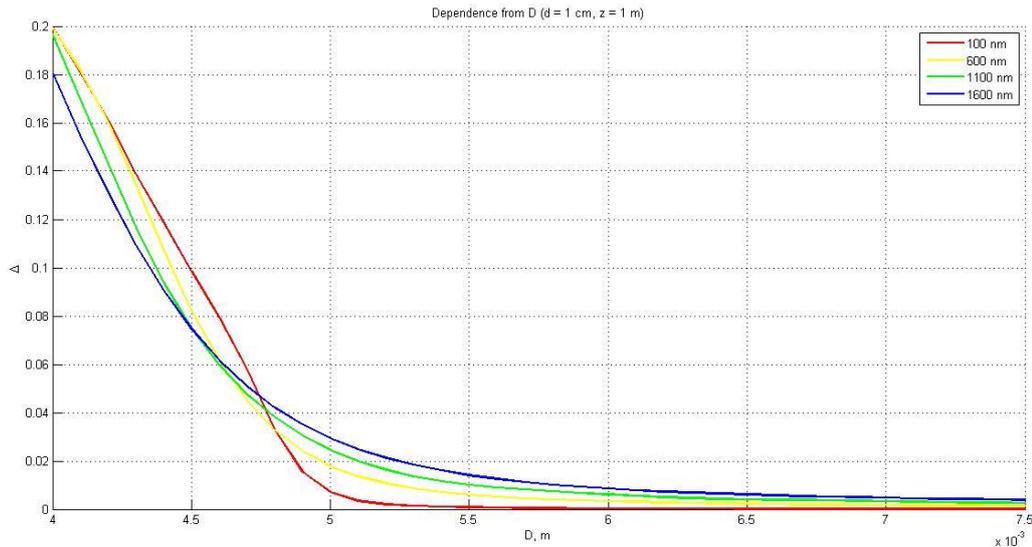


Рисунок 38 – Зависимость энергетических потерь от D

Полученные графические зависимости позволяют определить оптимальные параметры оптической системы «волокно-линза» (диаметр D и фокусное расстояние f_1 линзы) при допустимом уровне энергетических потерь в этой системе.

Для подтверждения предложенной методики расчета дифракционных потерь, был проведен натурный лабораторный эксперимент с помощью установки, приведенной на рисунке 39 [109].

Лабораторная установка включает в себя *He-Ne* лазер, коллиматор, устройство ввода излучения в оптическое волокно 1, линза с ирисовой диафрагмой, устройство фокусировки излучения во второе оптическое волокно и измеритель оптической мощности. Методика измерения дифракционных потерь заключалась в следующем. Поскольку измерить мощность оптического излучения непосредственно на торце оптического волокна 1 не представлялось возможным в силу особенностей лабораторной установки, то вместо этого за начальный уровень отсчета было принято показание мощности $P_{\max} = -31,5$ дБм при максимально раскрытой диафрагме (60 мм). Расстояние от торца волокна до линзы было равно ее фокусному расстоянию (94 мм). Рабочая длина волны лазера $\lambda = 632$ нм. Тип

оптического волокна – одномодовое с диаметром сердцевины 8 мкм. Далее в ходе эксперимента менялся размер диафрагмы с шагом 5 мм и фиксировалось значение оптической мощности на измерителе.

Результаты эксперимента и их дальнейшая математическая обработка приведены в таблице 4.



Рисунок 39 – Экспериментальная установка для определения энергетических потерь

Таблица 4 – Результаты эксперимента

D , мм	P , дБм	P , нВт	P/P_{\max}	$\Delta = (1 - P/P_{\max}) \cdot 100\%$
5	-50	10	0,014	98,6
10	-36,9	204	0,288	71,2
15	-33,4	457	0,645	35,5
20	-33	501	0,707	29,3
25	-33	501	0,707	29,3
30	-32,8	524	0,74	26
35	-32,6	549	0,775	22,5
40	-32,6	549	0,775	22,5
45	-32,4	575	0,812	18,8
50	-31,9	645	0,911	8,9

Графические результаты компьютерного моделирования и эксперимента сопоставлены и приведены на рисунке 40.

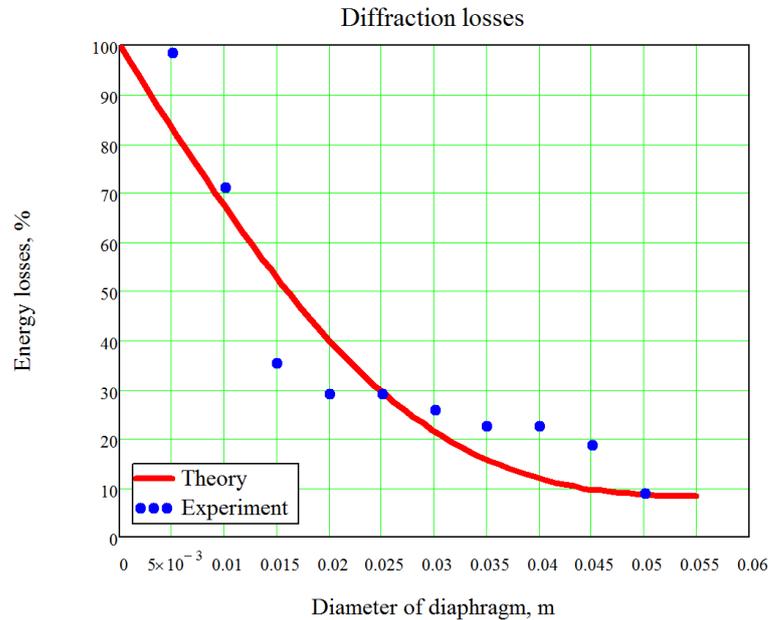


Рисунок 40 – Экспериментальные и теоретические расчеты энергетических потерь

Можно говорить о том, что предложенная методика расчета дифракционных потерь нашла подтверждение в ходе эксперимента и может быть применена к более сложным оптическим системам. Удобное графическое представление полученных зависимостей позволяет производить выбор оптических элементов для системы с наиболее подходящими параметрами с точки зрения минимизации энергетических потерь.

3.4 Выводы по разделу

- Разработана математическая модель распространения излучения в системе вывода излучения из ВОСП, позволяющая оценить уширение аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой при передаче анализируемого излучения по ВОСП.

- Компьютерное моделирование показало, что при передаче оптического излучения по одномодовой ВОСП аппаратная функция спектрального прибора с дифракционной решеткой уширяется в 1,2 раза.

- Экспериментальное исследование аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой в +1 дифракционном порядке при передаче оптического излучения по одномодовой ВОСП показало ее уширение в 1,5 раза.

- Исследованы энергетические потери оптического излучения при передаче по ВОСП: предложена математическая модель и на ее основе выполнено компьютерное моделирование, что позволило установить энергетические потери и оптимальные параметры системы вывода излучения из ВОСП (фокусное расстояние и размер апертуры линзы) для минимизации этих потерь.

- Предложенные теоретические модели и результаты выполненных расчетов были подтверждены при выполнении лабораторных экспериментов.

Основные результаты данного раздела опубликованы в работах [103-109].

4 Разработка лабораторного макета системы оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой и экспериментальные исследования

4.1 Спектральный прибор с высокопорядковой дифракционной решеткой

Разработанная математическая модель, которая объясняет формирование комплексного спектра анализируемого оптического сигнала в спектральном приборе с дифракционной решеткой, а также изучение свойств спектров высоких дифракционных порядках показывает возможность улучшения разрешающей способности прибора в случае увеличения интенсивности дифрагированного света в более высокие порядки.

Несмотря на многочисленное количество работ [112-122], посвященным исследованию дифракционных решеток, эффективное использование высоких дифракционных порядков для целей спектрального анализа до настоящего времени оставалось нерешенной задачей. В части встречающихся работ [117, 119-121] эффективность работы пропускающей дифракционной решетки повышается путем подавления более высоких порядков, т.е. просто расширяется диапазон рабочих частот (длин волн), в других работах [112, 115, 116, 118] дифракционная решетка с введенной пространственной модуляцией функции пропускания используется как делитель пучка на несколько частей с одинаковой интенсивностью. Ни первое, ни второе не приводит к улучшению разрешающей способности спектрального прибора с дифракционной решеткой.

Перераспределение интенсивности света в более высокие дифракционные порядки возможно в случае применения дифракционной решетки с такой функцией пропускания, в которой коэффициенты разложения C_n в экспоненциальный ряд Фурье при $n=2,3,4$ оказываются больше, чем при $n=1$.

Синтез высокопорядковой дифракционной решетки основывался на поиске топологии расположения штрихов, которая позволяет перераспределить энергию в ± 3 и ± 4 дифракционные порядки, где существенно лучше спектральное разрешение. Топология и фотография под микроскопом дифракционной решетки с особым расположением штрихов и периодом 35 мкм приведены на рисунках 41-43.

Результаты этого синтеза нашли свое воплощение в патенте РФ [37] на спектральный прибор с высокопорядковой дифракционной решеткой.

Дифракционная решетка выполнена на оптически прозрачной подложке с нанесенными на нее штрихами в виде чередующихся параллельных друг другу прозрачных полос с шириной a и непрозрачных полос с шириной b и c , образующих в пределах одного периода решетки T_g последовательность по формуле:

$$T_g = b + a + b + a + c + a, \text{ причем } a \leq b < c. \quad (67)$$

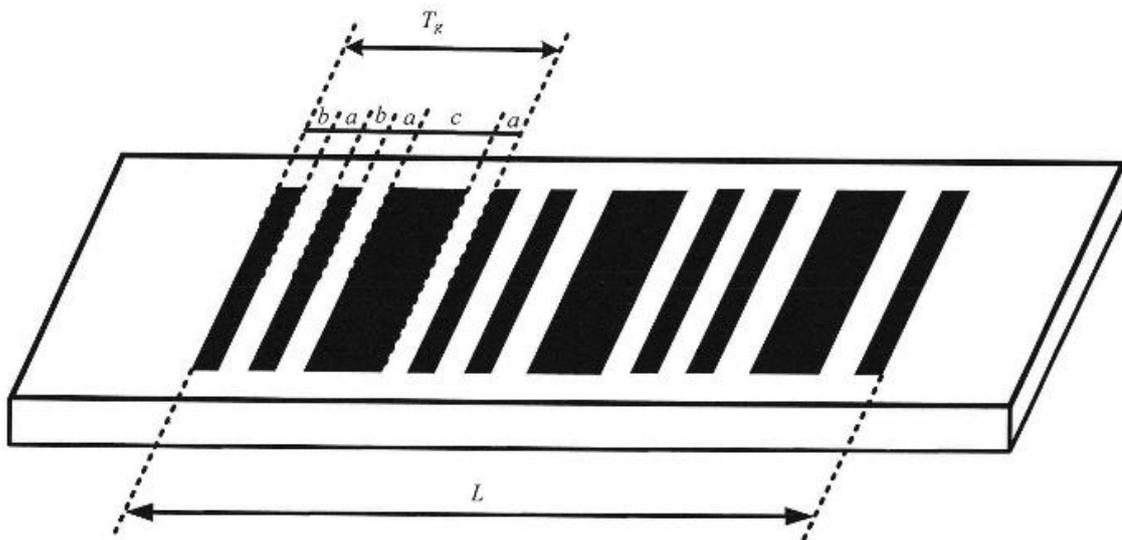


Рисунок 41 – Топология дифракционной решетки

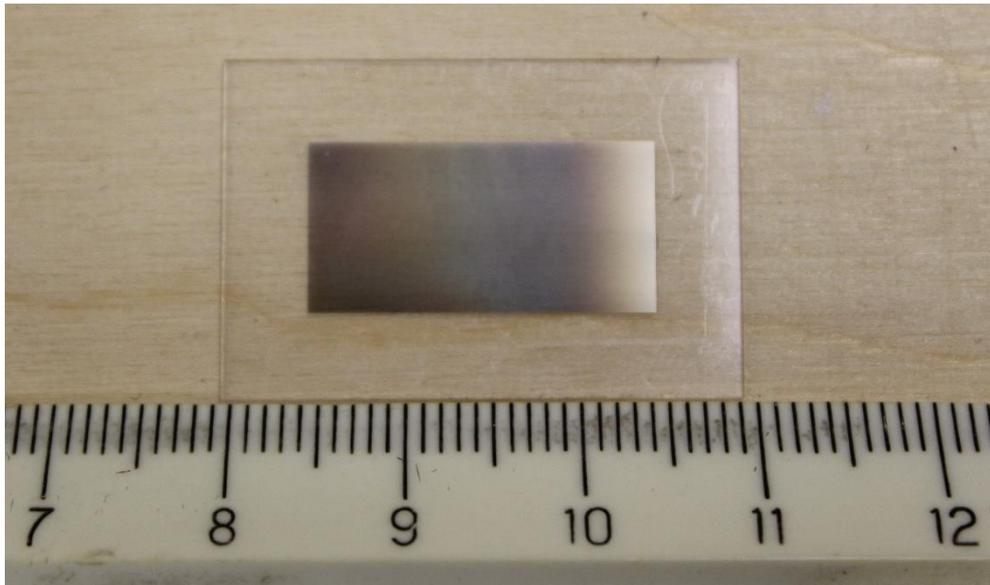


Рисунок 42 – Фотография высокопорядковой дифракционной решетки

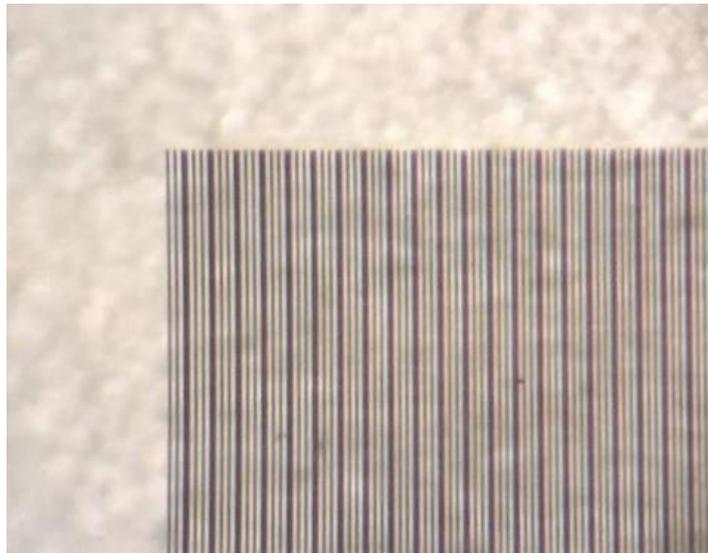


Рисунок 43 – Фотография высокопорядковой дифракционной решетки под микроскопом

Результаты расчета коэффициентов в разложении функции пропускания дифракционной решетки приведены на рисунке 44.

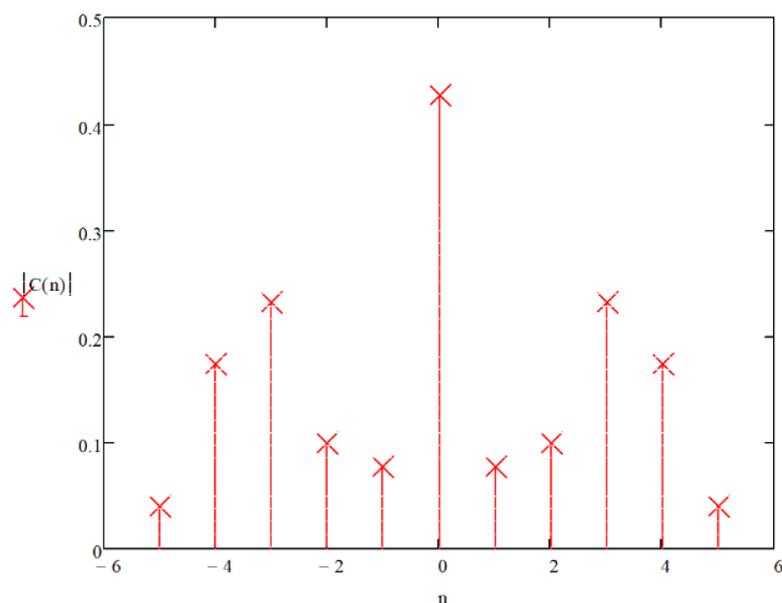


Рисунок 44 – Коэффициенты разложения функции пропускания высокопорядковой дифракционной решетки

Результаты экспериментального исследования аппаратной функции спектрального прибора с дифракционной решеткой с топологией, представленной на рисунках 41-43, при освещении излучением от гелий-неонового лазера с длиной волны 632 нм приведены на рисунках 45 и 46 [110, 111]. Рисунок 45 – результат измерения аппаратной функции при считывании с помощью ПЗС-линейки Toshiba TCD1304. Рисунок 46 – фотография дифракционной картины от решетки.

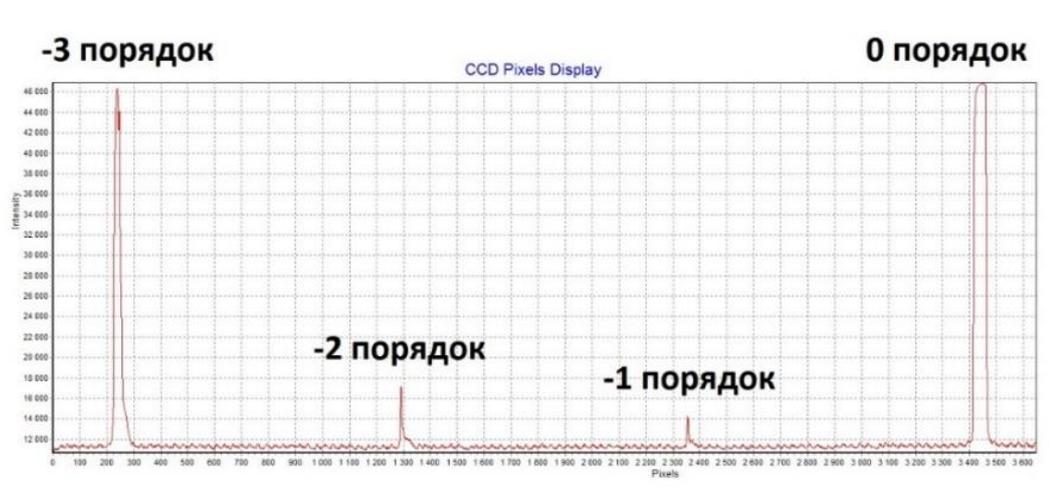


Рисунок 45 – Результат считывания аппаратной функции в различных дифракционных порядках



Рисунок 46 – Дифракционная картина от высокопорядковой решетки

Рисунки 45-46 показывают, что введение пространственной модуляции позволяет перераспределить интенсивность дифракционного света между дифракционными порядками, и, тем самым, подтверждает корректность предложенных математических моделей.

4.2 Разработка системы оптического спектрального контроля с ВОСП

Приведённые в разделах 1-3 результаты теоретических исследований потребовали экспериментального подтверждения практического применения спектрального прибора с дифракционной решеткой в качестве прибора контроля в экстремальных условиях.

В связи с этим в лаборатории «Акустооптической обработки информации» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения был разработан лабораторный макет системы оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой. Система контроля реализована на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой с применением ВОСП для передачи анализируемых сигналов. Фотография лабораторного макета приведена на рисунке 47.

На рисунке 47 введены следующие обозначения:

- 1 – Набор оптических аттенюаторов;
- 2 – ВОСП;

- 3 – Высокопорядковая дифракционная решетка в корпусе;
- 4 – Линза с фокусным расстоянием 75 мм;
- 5 – Устройство считывания спектрометрической информации;
- 6 – Персональный компьютер для наблюдения результатов измерений (регистратор).

Лабораторный макет позволяет производить спектроскопические измерения в диапазоне длин волн 350-700 нм. При этом спектральное разрешение прибора составляет порядка 1 нм.

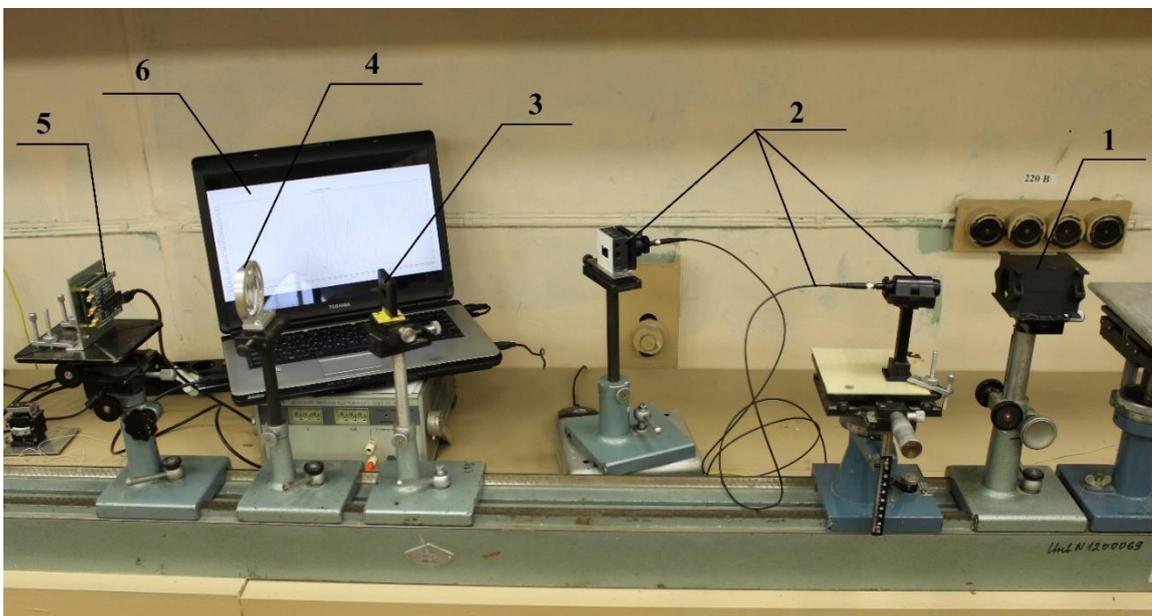
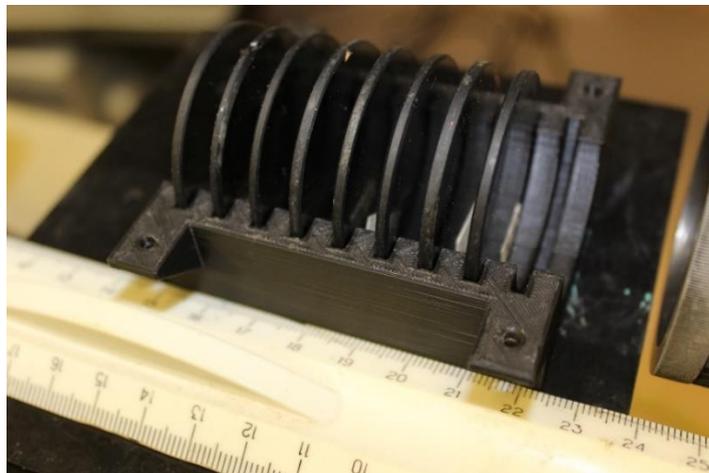


Рисунок 47 – Лабораторный макет системы контроля на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой

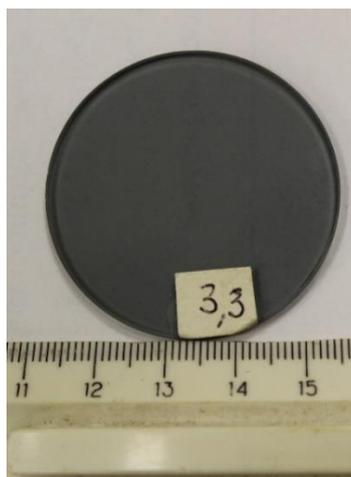
Набор оптических аттенюаторов, помещенный в кассету (рисунок 48а), использовался для измерения высокоинтенсивных оптических излучений для избегания насыщения пикселей ПЗС-линейки. Набор оптических аттенюаторов представляет собой разъемный блок, изготовленный на 3D-принтере, с пазами для установки в общей сложности до 9 оптических аттенюаторов (рисунок 48б). Имеющиеся в распоряжении лаборатории аттенюаторы позволяли уменьшить интенсивность оптического излучения в общей сложности на 25 дБ. Таким образом разработанный макет имеет

возможность для коррекции чувствительности и динамического диапазона путем изменения количества аттенюаторов в блоке в случае измерения излучений с высокой интенсивностью.

а)



б)



а) кассета для аттенюаторов; б) образец аттенюатора

Рисунок 48 – Блок оптических аттенюаторов

Экспериментальная ВОСП включает в себя систему ввода излучения на базе ахроматического конденсора PS-2, оптический кабель с разъемами SMA-905 и систему вывода излучения на базе ахроматического адаптера волокна FA-1.

Фотография конденсора PS-2 и его чертеж, предоставленный производителем [123], приведены на рисунке 49.

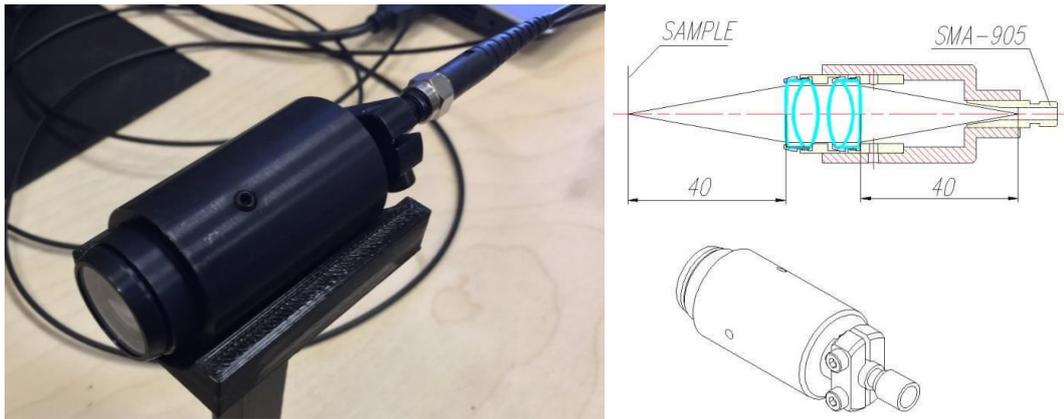


Рисунок 49 – Ахроматический широкоапертурный конденсор PS-2

Ахроматический адаптер волокна FA-1 имеет возможность юстировки в трех плоскостях для обеспечения максимально эффективного ввода-вывода излучения. Фотография адаптера и его чертеж, представленный производителем [123], показаны на рисунке 50.

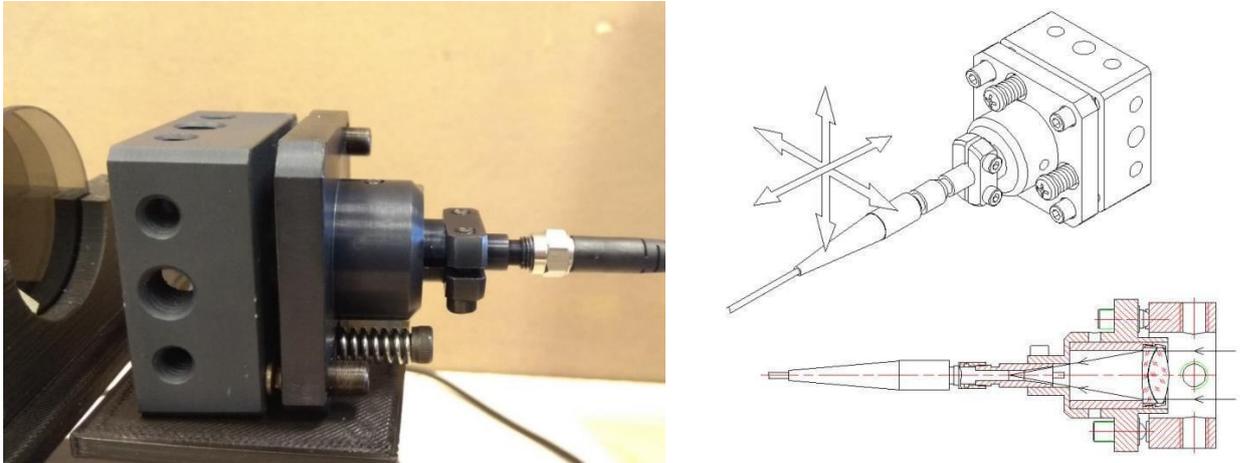


Рисунок 50 – Ахроматический адаптер волокна

В лабораторном макете использовалась пропускающая высокопорядковая дифракционная решетка (рисунок 51) с периодом штрихов $T_g = 35$ мкм, которая помещена в держатель, закреплена на двухкоординатном линейном трансляторе для обеспечения возможности юстировки оптической системы. Существует также дополнительная возможность юстировки путем

вращения решетки в вертикальной плоскости за счет поворота на штоке держателя оптического стола. Размер апертуры дифракционной решетки составляет 2 см.



Рисунок 51 – Дифракционная решетка с двухкоординатным линейным транслятором

Линза (рисунок 52) помещена в дюралюминиевую оправу и закреплена на оптическом столе. Фокусное расстояние линзы составляет 75 мм, размер апертуры линзы – 50 мм.

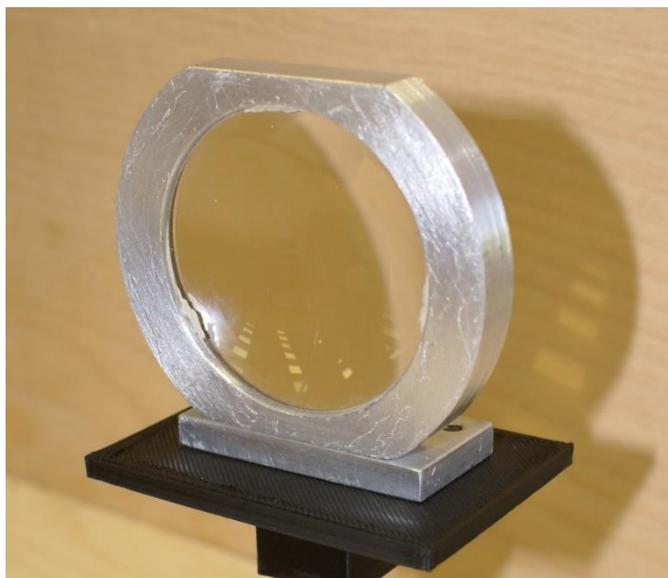


Рисунок 52 – Фокусирующая линза

Для уменьшения массогабаритных показателей макета, а также обеспечения управления регистратора и обработки получаемой спектрометрической информации с помощью персонального компьютера (ПК) было разработано устройство считывания спектрометрической информации на основе ПЗС-линейки.

Устройство считывания спектрометрической информации закреплено на трехкоординатном линейном трансляторе, обеспечивающим расположение ПЗС-линейки строго в задней фокальной плоскости линзы. По кабелю mini-USB осуществляется связь с персональным компьютером для наблюдения результатов измерений.

Устройство считывания спектрометрической информации реализовано на базе программируемой вентильной матрицы Altera Cyclone EP1C3T100C8N. В качестве линейки фотоприемников используется ПЗС-структура Toshiba TCD1304. Принципиальная схема устройства показана на рисунке 53.

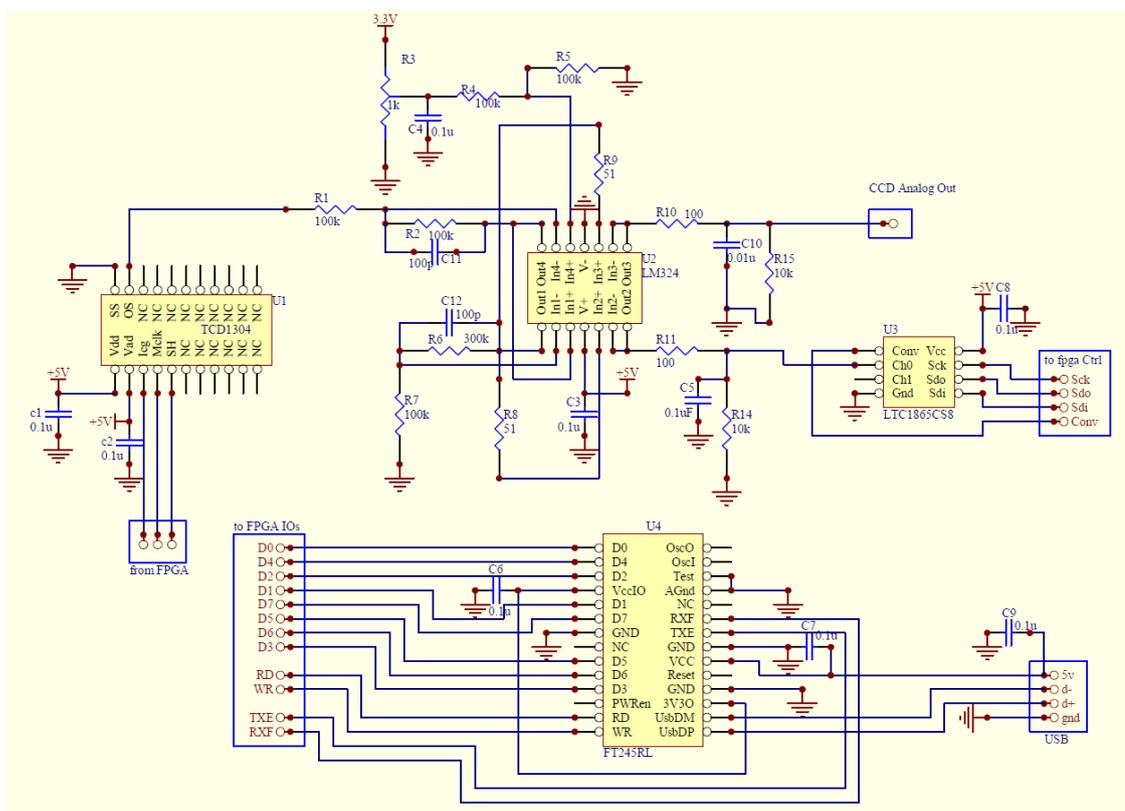


Рисунок 53 – Принципиальная электрическая схема устройства считывания

На рисунке 54 изображена печатная плата с USB выходом и размещенной на ней ПЗС-линейкой. Размер платы: 62 мм X 50 мм. Устройство состоит из двух плат, на верхней из них расположены: ПЗС-линейка TCD1304, преобразователь интерфейса USB на параллельный FIFO (FT245RL), LTC1865CS8 – аналогово-цифровой преобразователь и LM32 – аналоговый усилитель. На задней плате расположена Cyclone FPGA – печатная плата, которая обеспечивает обработку сигнала с ПЗС-линейки, обеспечивает управление и сигнал для АЦП чипа и «USB чипа». Снизу по углам расположены технологические отверстия под стойки для печатных плат. Разъем Mini-USB применяется для подачи питания, а также, через интерфейс USB передаются данные об интенсивности считываемой ПЗС-линейкой отсчетных значений спектра и команды для управления ее параметрами (например, время интегрирования ПЗС-линейки).

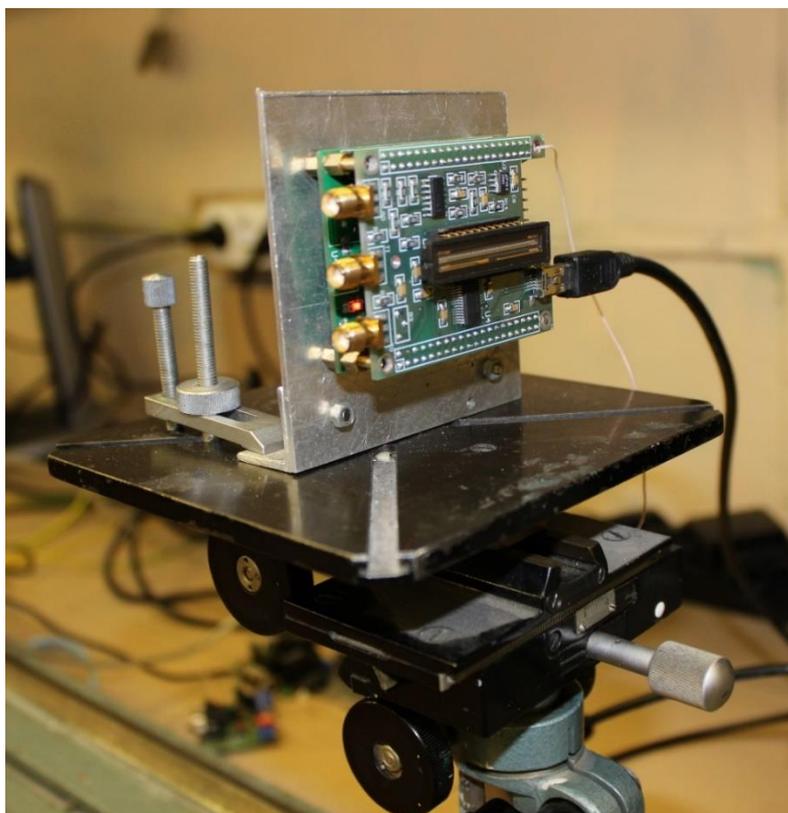


Рисунок 54 – Устройство считывания на трехкоординатном линейном трансляторе

Интерфейс программного обеспечения позволяет менять время интегрирования ПЗС-линейкой от 1 до 100 мс. Результаты измерений выводятся на экран в виде распределения интенсивности от пикселей ПЗС-линейки. Кроме того, интерфейс программы позволяет сохранять результаты измерений не только в растровом формате, т.е. в виде изображений, но и в формате RAW, т.е. с возможностью извлечения информации о попиксельной интенсивности в виде текстового файла. Это дает возможность осуществлять последетекторную коррекцию результатов спектроскопических измерений и производить попиксельный пересчет пространственной шкалы в необходимую шкалу: длин волн или частот.

4.3 Коррекция результатов спектроскопических измерений в системе контроля

Указанные в разделе 2.5 результаты показывают, что при считывании спектрометрической информации частотная шкала изменяется нелинейно, в то время как результаты считывания воспроизводятся «попиксельно», т.е. линейно.

Данный факт приводит к тому, что результат измерения спектра искажается, что требует введения программной коррекции.

Следует также учесть, что чувствительность ПЗС-линейки неравномерна во всем диапазоне анализируемых частот, поэтому при расчете интенсивности требуется дополнительное умножение ее значения на величину, обратную значению чувствительности на этой длине волны (частоты).

Чувствительность ПЗС-линейки TOSHIBA TCD1304 представлена производителем [124] в виде графика, изображенном на рисунке 55а.

Данная зависимость должна быть подвергнута аппроксимации. В качестве аппроксимирующего метода был выбран метод наименьших квадратов для получения аналитической функции, описывающей эту зависимость. Результат аппроксимации представлен на рисунке 55б.

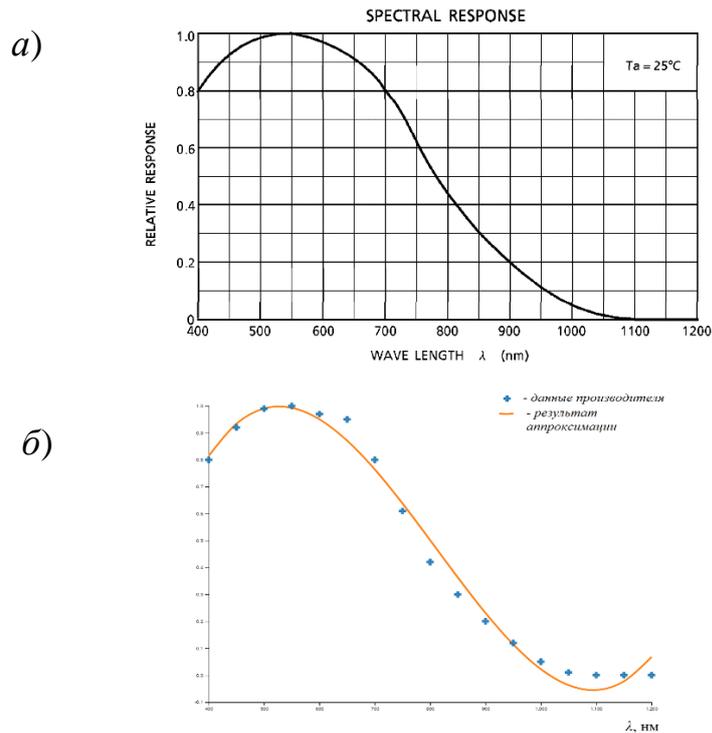


Рисунок 55 – Спектральная чувствительность ПЗС-линейки

Аналитическая запись аппроксимирующей функции имеет вид:

$$W(\lambda) = -0.000028\lambda^2 + 0.020002\lambda - 3.429690. \quad (68)$$

Таким образом, алгоритм коррекции результатов спектроскопических измерений выглядит следующим образом [125]:

1. Преобразование пространственной шкалы в необходимую шкалу длин волн или частот в соответствии с выражением (39).
2. Умножение массива значений результата считывания ПЗС-линейкой на значения чувствительности, рассчитанных по выражению (68).
3. Отображение результата спектроскопических измерений и коррекции в виде зависимости интенсивности I от длины волны.

На рисунке 56 представлен результат непосредственного измерения спектра лампы LS-1 фирмы Ocean Optics и скорректированный результат согласно предложенному выше алгоритму.

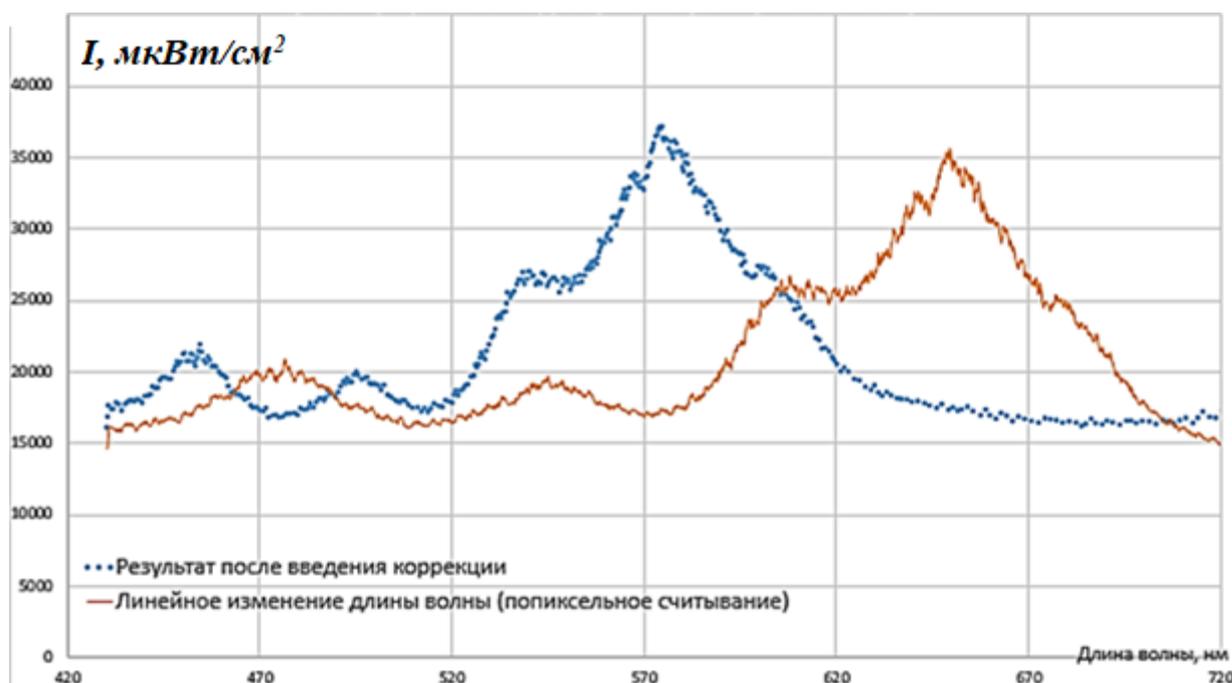


Рисунок 56 – Результат коррекции спектроскопических измерений

Нетрудно заметить, что при измерении достаточно широкополосных источников, коррекция имеет важное значение, т.к. существенно влияет на результат отображения энергетического спектра.

4.4 Улучшение разрешающей способности системы контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой

Для демонстрации улучшения разрешающей способности системы контроля с увеличением номера дифракционного порядка был выполнен эксперимент по измерению спектров двух лазерных источников с близко расположенными длинами волн: 632 и 650 нм.

Схема эксперимента показана на рисунке 57.

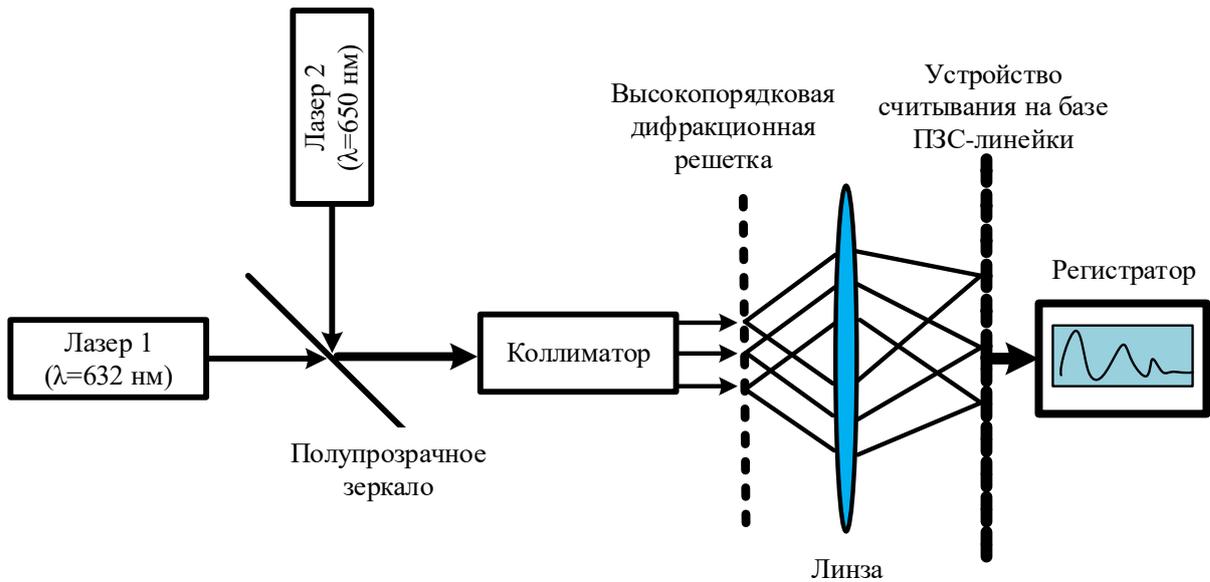


Рисунок 57 – Схема эксперимента по измерению спектров двух лазерных источников

Сведение пучков от двух лазеров реализовано за счет применения полупрозрачного зеркала с дальнейшим коллимированием пучка.

Для одновременного измерения спектра в -4 , -3 , -2 и -1 порядке с помощью устройства считывания на базе ПЗС-линейки фокусирующая линза была заменена на более короткофокусную с $F=40$ мм.

Результаты этого эксперимента приведены на рисунке 58.

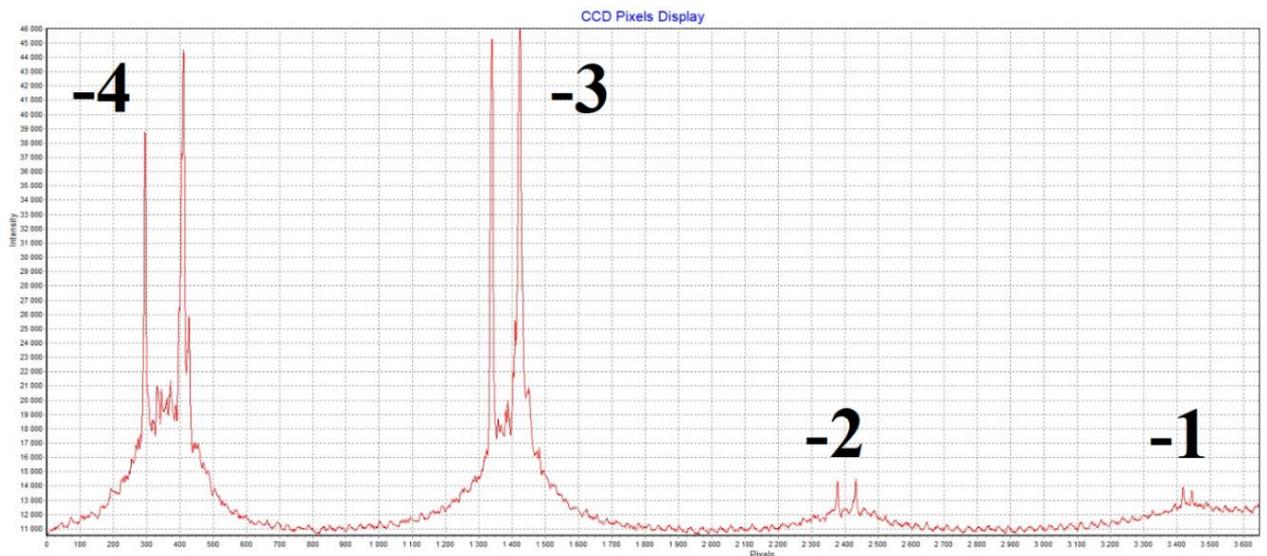


Рисунок 58 – Результаты измерения спектра двух лазерных источников

Из рисунка 58 видно, что с увеличением номера дифракционного порядка расстояние между максимумами спектров лазерных источников увеличивается кратно, что свидетельствует об улучшении разрешающей способности прибора пропорционально номеру дифракционного порядка. Кроме того, интенсивность дифрагированного света в -3 и -4 дифракционный порядок оказалась больше, чем в -1 и -2 .

Следует особо подчеркнуть, что улучшение разрешающей способности прибора за счет простого уменьшения периода дифракционной решетки имеет фундаментальное ограничение, связанное с нарушением принципов современной скалярной теории дифракции при достижении периода решетки, сопоставимой с длиной волны.

В связи с этим, введение пространственной модуляции расположения штрихов является существенной возможностью улучшения разрешающей способности прибора за счет работы в более высоких дифракционных порядках.

Выполняя сопоставление по разрешающей способности высокопорядковой и обычной дифракционных решеток целесообразно рассмотреть работу обычной дифракционной решетки в первом дифракционном порядке с периодом:

$$T_g = a + b = 5 + 5 = 10 \text{ мкм}$$

и работу в 4 порядке высокопорядковой дифракционной решетки с периодом

$$T_g = b + a + b + a + c + a = 5 + 5 + 5 + 5 + 10 + 5 = 35 \text{ мкм.}$$

На рисунке 59 представлены коэффициенты разложения в ряд Фурье функций пропускания таких решеток, отвечающие за интенсивность дифрагированного света в соответствующий порядок.

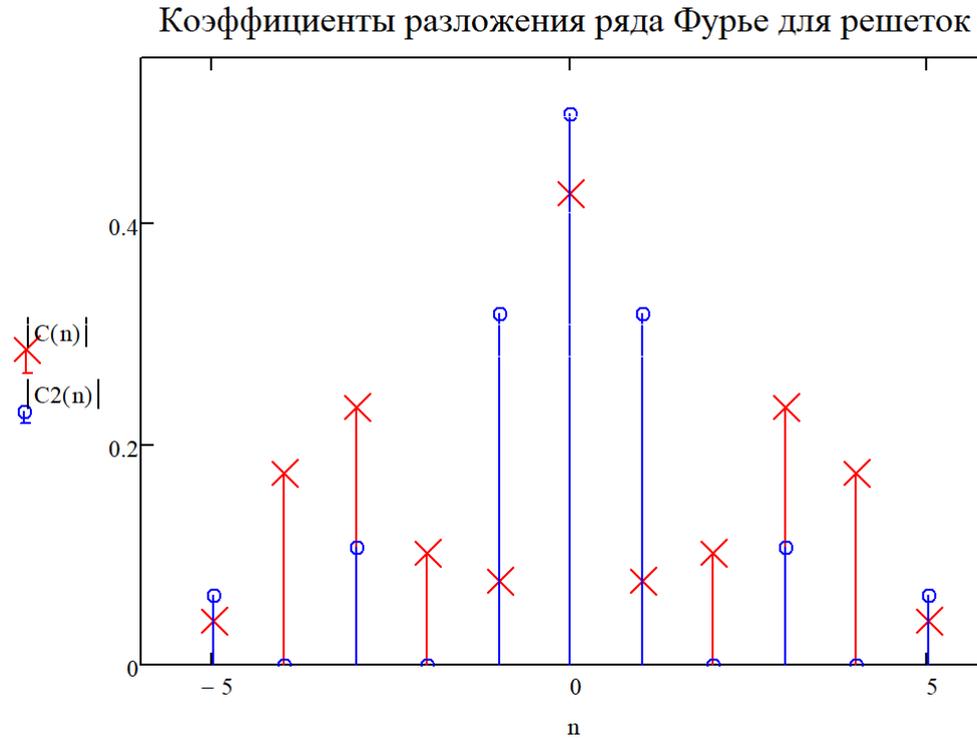


Рисунок 59 – Коэффициенты разложения

На рисунке 60 представлены результаты компьютерного моделирования изменения разрешающей способности прибора, рассчитанные согласно выражению (54) для высокопорядковой и обычной дифракционных решеток с одинаковыми параметрами оптической (фокусное расстояние линзы $F=25$ мм, апертура решетки $L=1$ см) и регистрирующей систем (ПЗС-линейки 3648 пикселей при размере апертуры линейки 29 мм) для диапазона анализируемых длин волн 400 – 600 нм.

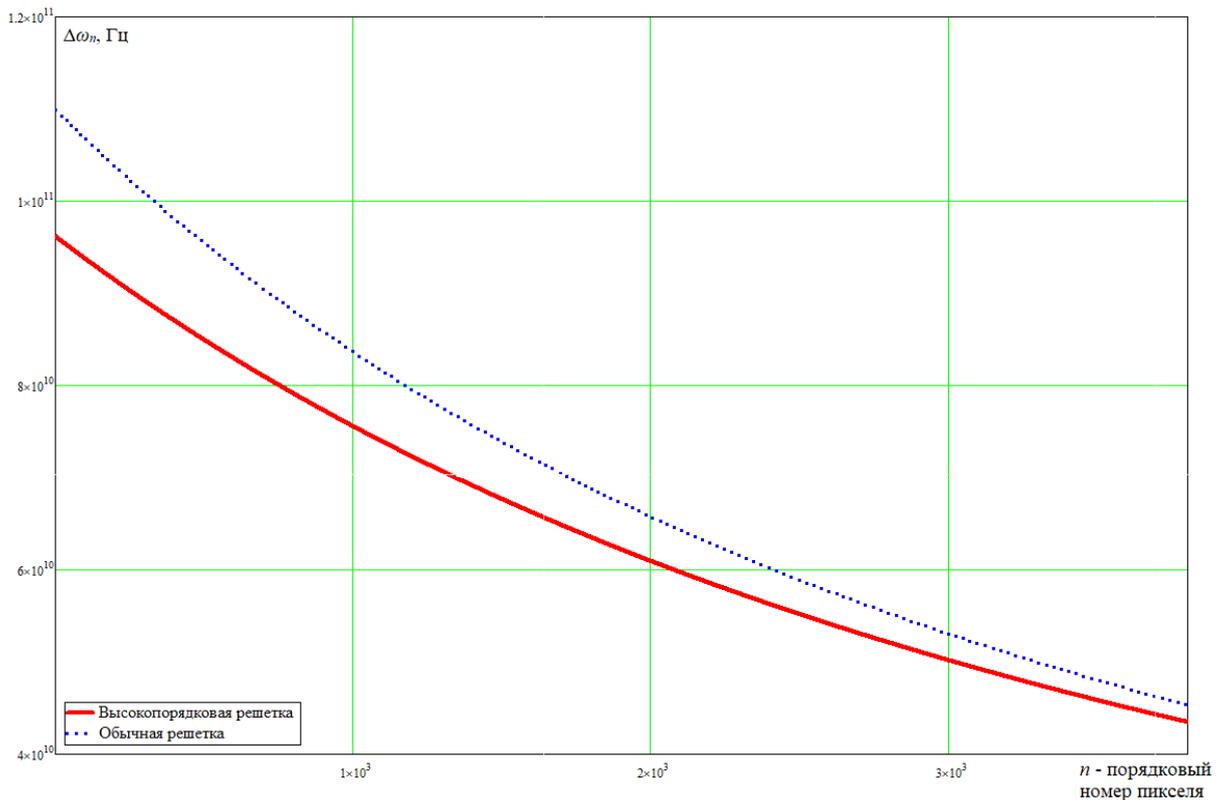


Рисунок 60 – Изменение разрешающей способности для обычной дифракционной решетки в +1 порядке и высокопорядковой решетки в +4 порядке

Из представленных рассчитанных зависимостей можно сделать вывод, что применение высокопорядковой дифракционной решетки и измерения спектра в ± 4 дифракционном порядке позволяет улучшить спектральное разрешение системы контроля на 15% по сравнению с обычной дифракционной решеткой.

Следует отметить, что дальнейшее развитие высокопорядковых дифракционных решеток связывается с поиском более совершенной топологии решетки с учетом технологических возможностей ее изготовления, для которой в разложении функции пропускания будут присутствовать коэффициенты разложения выше ± 3 с полным подавлением промежуточных. Применение такой дифракционной решетки позволит существенно улучшить разрешающую способность системы контроля на базе оптического спектрального метода.

4.5 Выводы по разделу

- Разработан действующий лабораторный макет системы контроля на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой с применением ВОСП, за счет чего реализован бесконтактный метод спектроскопических измерений.
- Предложенный алгоритм коррекции результатов спектроскопических измерений при считывании с помощью ПЗС-линейки позволил учесть нелинейный характер изменения спектральной частоты как функции пространственной координаты, а также неравномерность чувствительности ПЗС-линейки по диапазону анализируемых частот.
- Показано улучшение разрешающей способности системы контроля на 15% за счет применения высокопорядковой дифракционной решетки по сравнению с использованием обычной решетки.
- Выполненные экспериментальные исследования по бесконтактному измерению оптических спектров тестовых источников и полученные спектрограммы показывают возможность регистрации узких спектральных линий химических элементов и определение по этим данным состояния контролируемого физического или технологического процесса в экстремальных условиях.
- Разработка лабораторного макета, а также полученные результаты экспериментальных исследований по измерению оптических спектров тестовых источников являются основой разработки технических средств бесконтактной оптической спектроскопии на базе дифракционного решеточного спектрального прибора для решения задач контроля физических и технологических процессов в экстремальных условиях.

Основные результаты данного раздела опубликованы в работах [80, 111, 111, 125].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Применение спектрального прибора с дифракционной решеткой в рассмотренных задачах оптического спектрального контроля требует улучшения основной его метрологической характеристики – разрешающей способности.

- Анализ современного состояния теории спектральных измерений в оптическом диапазоне вообще, и спектрального прибора с дифракционной решеткой в частности, показал необходимость разработки целого ряда теоретических вопросов, призванных устранить недостатки существующей теоретической базы и указать пути дальнейшего развития и совершенствования спектрального прибора с дифракционной решеткой. Такая постановка вопроса потребовала разработки новой математической модели спектрального преобразования, реализуемого в спектральном приборе с дифракционной решеткой, которая базируется на последовательном рассмотрении преобразования оптического сигнала от входной апертуры до результата считывания спектрометрической информации.

- В рамках разработанной математической модели установлены комплексная и энергетическая аппаратные функции спектрального прибора с дифракционной решеткой, являющиеся его исчерпывающими характеристиками.

- Разработанная математическая модель позволила установить важнейшие свойства спектров в различных дифракционных порядках и, тем самым, был определен путь улучшения основной метрологической характеристики системы контроля – разрешающей способности путем изменения топологии дифракционной решетки и работы в высоких дифракционных порядках.

- Предложена методика формирования топологии расположения штрихов дифракционной решетки, позволяющая успешно выполнять спектральные измерения в третьем и четвертом дифракционных порядках, где разрешающая способность системы контроля значительно лучше.

- Предложена математическая модель, учитывающая влияние ВОСП на аппаратную функцию спектрального прибора с дифракционной решеткой и позволяющая минимизировать энергетические потери в этой системе.

- Предложена процедура коррекции результатов спектроскопических измерений спектральным прибором с дифракционной решеткой, учитывающая нелинейную связь пространственной и частотной координат, а также неравномерность спектральной чувствительности ПЗС-линейки и частотной характеристики оптического волокна.

- Разработан лабораторный макет системы контроля на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой, ВОСП и приемно-регистрирующим устройством на базе ПЗС-линейки, позволяющим выдавать результаты спектроскопических измерений на дисплей, и выполнены экспериментальные исследования по измерению спектров тестовых источников этой системой.

- Доказано улучшение разрешающей способности системы контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой на 15% по сравнению с использованием обычной дифракционной решетки.

- На основании рассмотрения процедуры считывания спектрометрической информации в системе контроля с помощью ПЗС-линейки на базе модели: «пространственная частотная фильтрация каждым элементом (пикселем) – квадратичное детектирование – интегрирование по времени» показано, что результат считывания энергетического спектра дается в форме его отсчетных значений.

- Корректность предложенных теоретических и компьютерных моделей подтверждена экспериментально.

- Практическая значимость выполненных в рамках диссертационной работы исследований заключается в улучшении разрешающей способности системы контроля и возможности выполнения процедуры контроля в неблагоприятных условиях и в режиме реального времени, а также в возможности автоматизации технологических процессов на основе разработанной системы контроля.

- Дальнейшее повышение разрешающей способности системы контроля связывается с поиском более совершенной топологии дифракционной решетки с учетом технологических возможностей ее изготовления, позволяющей подавить дифракцию света в низкие и более эффективно использовать высокие дифракционные порядки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартиформ, 2015, 16 с.
- 2 ГОСТ 23479-79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования. М: Изд-во стандартов, 1984. 13 с.
- 3 ГОСТ Р 53696-2009. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2009, 8 с.
- 4 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.
- 5 Губайдуллин, И. Т. Оптико-электронный спектрометрический комплекс для контроля процессов горения в камере сгорания газотурбинного двигателя / И. Т. Губайдуллин, Т. П. Андреева, А. Р. Гумеров, А. Н. Саженов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2015. № 2 (41). С. 59-71.
- 6 Ваганов, М. А. Резонансный метод бесконтактного анализа оптических спектров и его техническая реализация для решения задач контроля процессов горения: дис. канд. тех. наук: защищена 26.03.2014; утв. 05.10.2014 / Ваганов Михаил Александрович. СПб., 2014. 152 с.
- 7 Похил, П.Ф. Методы исследования процессов горения и детонации / П.Ф. Похил, В.М. Мальцев, В.М. Зайцев. М.: Наука, 1969. 301 с.
- 8 ГОСТ 18895-97. Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа. М.: Изд-во стандартов, 2002. 15 с.
- 9 Williamson, R. Plasma Studies in Vacuum ARC Remelting / R. Williamson, F. Zanner, L. Bertram, H. Peebles // MRS Proceedings, Vol. 98, p.365, 1987.

10 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.

11 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.

12 Laser Spectroscopy Applications for Ecology and Environmental Monitoring / G.Y. Zhao, Z. Duan, M. Lian, et al. / Asia Communications and Photonics Conference 2016, OSA Technical Digest (online), paper AF3K.1, 2016.

13 Ваганов, М.А. Методы оптической спектроскопии в системах автоматического управления процессами горения / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец // Датчики и системы. 2018. № 12. С. 32-36.

14 Могильницкий, Б. С. О разрешении дифракционной решетки / Б. С. Могильницкий, Г.В. Симонова // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 5. № 2. С. 88-92.

15 Зайдель, А. Н. Техника и практика спектроскопии / А. Н. Зайдель, Г. В. Островская, Ю. И. Островский. М.: Наука; ГИФМЛ, 1972. 375 с.

16 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.

17 ГОСТ Р 54417-2011. Компоненты волоконно-оптических систем передачи. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.

18 Строук, Дж. Введение в когерентную оптику и голографию: пер. с англ./ Дж. Строук. М.: Мир, 1967. 348 с.

- 19 Зверев, В. А. Радиооптика. М.: Советское радио, 1975. 304 с.
- 20 Зверев, В. А. Экспериментальная радиооптика / В. А. Зверев, Н. С. Степанов. М.: Наука, Глав. ред. физико-матем. лит-ры, 1979. 254 с.
- 21 Радиооптика: монография / М.Я. Воронин, И.Н. Карманов, И.В. Лесных, Г.С. Садовой, О.К. Ушаков; под общ. ред. М.Я. Воронина. Новосибирск: СГГА, 2011. 218 с.
- 22 Литвиненко, О. Н. Основы радиооптики / О. Н. Литвиненко; Киев: Техніка, 1974. 208 с.
- 23 Чео, П. К. Волоконная оптика. Приборы и системы / П.К. Чео. М.: Энергоатомиздат. 1988. 280 с.
- 24 Born, M. Principles of optics / M. Born, E. Wolf. Second (revised) edition. PERGAMON PRESS. Oxford- London- New York-Paris-Frankfurt. 1964.
- 25 Сороко, Л. М. Основы голографии и когерентной оптики / Л. М. Сороко. М.: Наука, 1971. 616 с.
- 26 Престон, К. Когерентные оптические вычислительные машины: пер. с англ. / К. Престон. М.: Мир, 1974. 399 с.
- 27 Титчмарш, Е. Введение в теорию интегралов Фурье / Е. Титчмарш. М.: ОГИЗ, 1948. 480 с.
- 28 Заде, Л. Теория линейных систем: пер. с англ./ Л. Заде, Ч. Дезоер. М.: Наука, 1970. 704 с.
- 29 Баскаков, С. И. Электродинамика и распространение радиоволн / С. И. Баскаков. М.: Радиотехника, 2017. 416 с.
- 30 Пихтин, А. Н. Оптическая и квантовая электроника / А.Н. Пихтин. М: Высшая школа, 2001. 573 с.
- 31 Салех, Б. Оптика и фотоника. Принципы и применения / Б. Салех, М. Тейх. Долгопрудный: Издательский дом Интеллект, 2012. 760 с.
- 32 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.

33 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.

34 Функции с двойной ортогональностью в радиоэлектронике и оптике / пер. М. К. Размахнина, В. П. Яковлева. М.: Сов. Радио, 1971. 256 с.

35 Владимиров, В. С. Обобщенные функции в математической физике / В. С. Владимиров. М.: Наука, 1979. 320 с.

36 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.

37 Патент 181375 РФ, МПК8 G01J 3/18, G01J 3/24, G02B 5/18. Дифракционный решеточный спектральный прибор / В. И. Казаков, О. Д. Москалец, А. С. Параскун (РФ). № 2018106621 // Изобретения и полезные модели. 2018. № 20. 2с.

38 Исследование и разработка нового поколения устройств спектрально-корреляционного анализа сигналов оптического диапазона для экстремальных условий эксплуатации: отчет о НИР (итоговый) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; рук. О. Д. Москалец; Инв. № АААА-Б18-218021990163-8. СПб., 2016. 29 с.

39 Спектральные и корреляционные измерения в оптическом диапазоне на основе волоконно-оптических технологий: отчет о НИР (итоговый) / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; рук. О. Д. Москалец; Инв. № АААА-Б16-216101860061-8. СПб., 2016. 29 с.

40 Теоретические и экспериментальные основы создания спектрально-селективной аппаратуры оптического диапазона для контроля объектов, находящихся в условиях повышенной температуры, влажности, агрессивной химической среды и повышенного уровня взрывоопасности: отчет о НИР (итоговый) / Санкт-Петербургский государственный

университет аэрокосмического приборостроения; рук. М.А. Ваганов; Инв. № АААА-Б17-217062020050-5. СПб., 2017. 37 с.

41 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.

42 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.

43 Пат. 2239802 РФ, МПК G01J3/00. Анализатор спектра сигналов оптического диапазона / В.А. Калинин, О.Д. Москалец, Л.Н. Пресленев (РФ). № 2003105353/28 // Изобретения и полезные модели. 2004. №31, 2 с.

44 Research of speckle-pictures caused by distribution of optical radiation in a multimode optical fiber and a group of optical fibers / E. E. Dashkevich, R. A. Hansuvarov, V. I. Kazakov, et al. // XII International conference for young researchers. Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems, St. Petersburg, 2009. P.29.

45 Гороховатский, Ю. А. Рентгенофлуоресцентный анализ: возможности метода при исследовании ювелирных товаров в таможенных целях / Ю. А. Гороховатский, В. А. Комаров, И. Н. Петрова // Ученые записки Санкт-Петербургского имени В. Б. Бобкова филиала Российской таможенной академии, 2010, №. 3. С. 209-217.

46 Фесенко, А. В. Определение основных и неосновных компонентов сплавов золота при криминалистическом исследовании / А. В. Фесенко, Н. Г. Миловзоров // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И Менделеева), 2002, Т. 46. №. 4. С. 81-87.

47 Пробоотбирание и анализ благородных металлов / под ред. И.Ф. Барышникова. М.: Металлургия, 1978. 430 с.

48 Жучков, И. А. Пробирный анализ. Методы определения благородных металлов в сухих сыпучих пробах: учебное пособие для студентов очной и заочной форм обучения по спец. 110200 «Металлургия цветных металлов» для изучения дисциплины «Металлургия благородных металлов». Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. 82 с.

49 Введенский, Л. Е. Методы спектрального анализа металлов / Л. Е. Введенский, С. Л. Мандельштам, С. М. Райский. Л.: ГИТТЛ, 1940. 88 с.

50 Буравлев, Ю. М. Фотоэлектрические методы анализа металлов и сплавов / Ю. М. Буравлев. М.: Metallurgia, 1984. 143 с.

51 Глинкин, В. А. Автоматизированная система оптического контроля процесса электронно-лучевой зонной плавки при получении монокристаллов тугоплавких металлов / В. А. Глинкин, А. И. Любимов, С. А. Парамонов // Вестник Казанского технологического университета, 2015. №18 (5). С.137-140.

52 АСУ плавкой расходуемого электрода на ВДП для тугоплавких металлов. URL.: <http://www.chmz.net/press/news-chmz/files/2014-04-15/13/16.pdf> (дата обращения 31.01.2019).

53 Спектральный комплекс для контроля процесса плавки обеспечения взрывобезопасности промышленных вакуумно-дуговых печей СЗП. URL: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-1616-spektralnii-kompleks-dlya-kontrolya-processa-plavki-obespecheniya-vzrivobezopasnosti-promishlennih-vakuumno-dygovih-pechei-szp.htm> (дата обращения 31.01.2019).

54 «Доля некачественных лекарств в России - примерно 10%». URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2607510> (дата обращения 31.01.2019).

55 Аксенова-Сорохтей, Ю. Н. Фармацевтические и юридические аспекты фальсификации лекарственных средств / Ю. Н. Аксенова-Сорохтей, В. Е. Новиков, Е. В. Пожилова и др. // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2016. Т. 15. №2. С. 102-111.

56 Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение / А. Смит; пер. с англ. Б. Н. Тарасевича, под ред. А. А. Мальцева. М.: Мир, 1982. 328 с.

57 Федеральная электронная медицинская библиотека. Фармакопея. URL: <http://www.femb.ru/feml> (дата обращения 31.01.2019).

58 Арзамасцев, А. П. Выявление фальсифицированных лекарственных средств с использованием современных аналитических методов / А.П. Арзамасцев, В. Л. Дорофеев, А. А. Коновалов и др. // Химико-фармацевтический журнал, 2004. Т. 38. №3. С. 48-51.

59 Кузьмина, З. Ф. Исследование нефтяных остатков с помощью ИК-спектроскопии / З.В. Кузьмина, А.А. Байбазаров, С.М. Слуцкая и др. // Труды БАШНИИ НП, 1977. Вып.16. С. 22-29.

60 Кигель, А. Контроль качества сырья и нефтепродуктов в режиме реального времени с использованием корреляционных методов измерения БИК и ЯМР / А. Кигель, И. И. Зильберман. / Автоматизация в промышленности, 2013. С. 17-20.

61 Тарасов, К. И. Спектральные приборы / К. И. Тарасов; 2-е изд. Л.: Машиностроение. Ленинградское отд., 1977. 367 с.

62 Беляков, Ю. М. Спектральные приборы: учебное пособие / Ю.М. Беляков, Н.К. Павлычева; Казань: Изд-во Казань. гос. техн. ун-та, 2007. 203 с.

63 Калитеевский, Н. И. Волновая оптика: Учеб. пособие для вузов / Н.И. Калитеевский; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1995. 463 с.

64 Нагибина, И. М. Фотографические и фотоэлектрические спектральные приборы и техника эмиссионной спектроскопии / И. М. Нагибина, Ю. К. Михайловский; Л.: Машиностроение, 1981.

65 Скоков, И. В. Оптические спектральные приборы: учебное пособие для оптических специальностей вузов / И. В. Скоков; М.: Машиностроение, 1984. 240 с.

- 66 Малышев, В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию / В. И. Малышев; М.: Наука, 1979. 480 с.
- 67 Пейсахсон, И. В. Оптика спектральных приборов / И. В. Пейсахсон. 2-е изд., доп и пераб. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.
- 68 Hebling, J. Theory of spectroscopic devices / J. Hebling, Z. Marton // Journal of the Optical Society of America A, 2006. Vol. 23. P. 966-972.
- 69 Гусев, О. Б. Акустооптические измерения / О. Б. Гусев, В. В. Клудзин. Ленинград. Издательство Ленинградского университета, 1987. 149 с.
- 70 Ваганов, М. А. Анализ спектров в оптическом диапазоне. Резонаторный анализ / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец // Информационно-управляющие системы. 2012. №6. С. 21-27.
- 71 Stuart, B. Infrared Spectroscopy. In Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, Inc (Ed.), 2015.
- 72 Stuart, B. H. Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. Wiley; 2004. 242 p.
- 73 Noda, I. Two-Dimensional Infrared (2D IR) Spectroscopy: Theory and Applications (англ.) // Applied Spectroscopy, 1990. Vol. 44, № 4. P. 550-561.
- 74 Цупрева, В. ИК-Фурье-спектрометры Shimadzu: области применения // М.: АНАЛИТИКА, Рекламно-издательский центр «ТЕХНОСФЕРА», 2014. №3. с. 94-96.
- 75 Бохнер, С. Лекции об интегралах Фурье / С. Бохнер. М.: ГИФМЛ. 1962. 360 с.
- 76 Ахманов, С. А. Введение в статистическую радиофизику и оптику / С. А. Ахманов, Ю. Е. Дьяков, А. С. Чиркин; М.: Наука, 1981. 640 с.
- 77 Раутиан, С. Г. Реальные спектральные приборы // Успехи физических наук. 1958. Т. 66. №. 11. С. 475-517.
- 78 Горелик, Г. С. Колебания и волны: Введение в акустику, радиофизику и оптику: Учебное пособие. Физматгиз, 1959. 572 с.

79 Kazakov, V. I. Alternative theory of diffraction grating spectral device and its application for calculation of convolution and correlation of optical pulse signals. / V. I. Kazakov, D. O. Moskaletz, O. D. Moskaletz // Proc. SPIE. Vol. 9889, Optical Modelling and Design IV, 2016. P. 988924.

80 Казаков, В. И. Измерение оптических спектров решеточным спектральным прибором в высших дифракционных порядках / В. И. Казаков, О. Д. Москалец // Датчики и системы. 2018. №12. С. 22-27.

81 Казаков, В. И. Системный подход в теории спектральных измерений / М. А. Ваганов, В. И. Казаков, О. Д. Москалец // Датчики и системы. 2016. №1. С.10-15.

82 Vaganov, M. A. A system approach in the theory of optical spectral measurements / M. A. Vaganov, V. I. Kazakov, O. D. Moskaletz // Automation and Remote Control. 2017. Vol. 78. Issue 6. P. 1144-1150.

83 Казаков, В. И. Применение системного подхода к описанию оптических спектральных приборов / В. И. Казаков, О. Д. Москалец, М. А. Ваганов // Научная сессия ГУАП. Сборник докладов в 3-х частях, СПб: ГУАП. 2018. С. 26-31.

84 Franks, L. E. Signal theory / L. E. Franks; Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1969. 318 p.

85 Казаков, В. И. Комплексные спектры в дифракционном решеточном спектральном приборе / В. И. Казаков, О. Д. Москалец // Радиопромышленность. 2016. №4. С. 32-37.

86 Moskaletz, O.D. Classical and quantum approach to power spectrum measurement by diffractive methods / O.D. Moskaletz // Proceedings of SPIE. 1999. Vol. 3900. P. 297-308.

87 Хургин, Я. И. Финитные функции в физике и технике / Я. И. Хургин, В. П. Яковлев; 2-е изд., доп. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 416 с.

88 Харкевич, А. А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. Изд. 5-е. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 240 с.

89 Zhdanov, A. Yu. «Sample spectra of optical signals» // A. Yu. Zhdanov, V. I. Kazakov, O. D. Moskaletz. Proc. SPIE 8134. 2011. P. 81340U.

90 Казаков, В. И. Методы теории случайных процессов в задачах спектральных измерений / М.А. Ваганов, В.И. Казаков, С.В. Кулаков, О.Д. Москалец // Радиотехника. 2017. №5. С. 67-72.

91 Москалец, О. Д. Динамические сигналы и спектральные измерения // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 2. С.152-158.

92 Moskaletz, D. O. Expression correlation function through the instantaneous spectrum of pulsed signals / D. O. Moskaletz, O. D. Moskaletz // Proc. of 8-th International Conference «Acoustooptic and radar methods for information measurements and processing». September 20 – 23 / Suzdal, Russia. P. 258-262.

93 Instantaneous spectra in spectral and correlation processing of dynamic signal devices of radio and optical ranges and their linear and nonlinear transformations / V. I. Kazakov, A. S. Kuryleva, D. O. Moskaletz, O. D. Moskaletz // Proc. SPIE 10680, Optical Sensing and Detection V. 2018. P. 1068025

94 Папулис, А. Теория систем и преобразований в оптике / А. Папулис. М.: Мир, 1971. 495 с.

95 Transformation of a harmonized random process by spectral devices that perform instantaneous spectrum analysis / V. I. Kazakov, D. O. Moskaletz, O. D. Moskaletz, M. A. Vaganov // Proc. of SPIE. 2018. Vol. 10680. P. 1068024.

96 Kazakov, V. I. Diffraction on the grating from the view of radiooptics / V. I. Kazakov, O. D. Moskaletz // XIX International conference for young researchers «Wave electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems»: Preliminary program and abstracts. 2016. P. 53-56.

97 Kazakov, V. I. Complex spectra in a diffraction lattice spectral device / V. I. Kazakov, O. D. Moskaletz, M. A. Fadeev // XX International Conference for Young Researchers. Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems: Scientific papers. 26-30 June, 2017, Saint-Petersburg

/ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg. 2017. P. 215-219.

98 Kazakov, V. I. Power spectrum estimation of optical radiation by using CCD-structure / V. I. Kazakov, A. S. Kuryleva, O. D. Moskaletz, A. S. Paraskun // XX International Conference for Young Researchers. Wave Electronics and Its Applications in the Information and Telecommunication Systems: Scientific papers. 26-30 June, 2017, Saint-Petersburg / Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg. 2017. P. 220-224.

99 Казаков, В. И. Считывание, обработка и коррекция спектрометрической информации в дифракционном решеточном спектральном приборе / М. А. Ваганов, В. И. Казаков, А. С. Параскун // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах: Двадцать первая международная молодежная конференция ГУАП: сб. статей. СПб: ГУАП. 2018. С. 172-178.

100 Kazakov, V. I. Comparison of optical spectral devices in the framework of system approach / V. I. Kazakov, O. D. Moskaletz, M. A. Vaganov // 5-th International School and Conference «Saint Petersburg OPEN 2018» on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, St. Petersburg, Russia. 2018. P. 340-341.

101 Kazakov, V. Comparison of optical spectral devices in the framework of system approach. / V. Kazakov, O. Moskaletz, M. Vaganov. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1124. P. 051019.

102 Оптические устройства в радиотехнике / под ред. В. Н. Ушакова; 2-е изд., испр. и доп. М.: Радиотехника, 2009. 264 с.

103 Influence of analyzed signals fiber-optic transmission system on spread function of the diffraction grating spectral device / V. I. Kazakov, O. D. Moskaletz, A. S. Paraskun, A. Y. Zhdanov // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10395. P. 1039514.

104 Kazakov, V. I. Spectral measurements by diffraction grating device with fiber-optics system of signal transmission. / V. I. Kazakov, A. S. Paraskun // XX International Conference for Young Researchers. Wave Electronics and Its

Applications in the Information and Telecommunication Systems: Scientific papers. 26-30 June, 2017, Saint-Petersburg / Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg. 2017. P. 180-184.

105 Kazakov, V. I. Experimental investigation of the optical fiber influence to spread function of the grating spectral device / V. I. Kazakov, A. S. Paraskun // Bulletin of the UNESCO department «Distance education in engineering» of the SUAI: Collection of the papers. St. Petersburg. 2017. Issue 2. P. 54-57.

106 Kazakov, V. I. Influence of aperture lens system on optical information processing / V. I. Kazakov, S. N. Mosentsov, O. D. Moskaletz // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9598. P. 959809.

107 Kazakov, V. I. Optical wave beam propagation in two-lens scheme with arbitrary parameters / V. I. Kazakov // Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9889. P. 98891C.

108 Казаков, В. И. Применение системного подхода к анализу двухлинзовой оптической схемы / В. И. Казаков, О. Д. Москалец // НАУЧНАЯ СЕССИЯ ГУАП. Сборник докладов: в 3 частях / под общей редакцией Ю. А. Антохиной. Часть II. Технические науки. СПб.: ГУАП. 2015. С. 74-79.

109 Kazakov, V. I. Calculation of diffraction losses in the system «optical fiber - lens» / V. I. Kazakov // Известия кафедры UNESCO «Дистанционное инженерное образование» ГУАП. Сборник статей. СПб.: ГУАП. 2016. С. 40-42.

110 Казаков, В. И. Решеточный спектральный прибор с возможностью работы в высших дифракционных порядках / В. И. Казаков, А. С. Параскун // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах: Двадцать первая международная молодежная конференция ГУАП: сб. статей. СПб: ГУАП. 2018. С. 165-171.

111 Kazakov, V. I. Grating spectral device with possibility of working in high diffraction orders / V. I. Kazakov, A. S. Paraskun // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, IEEE

Conference Publication Program, Conference Record №45890. 2018. P. 8604416.

112 Дифракционная компьютерная оптика / под ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2007. 736 с.

113 Loewen, E. G. Diffraction gratings and applications / E. G. Loewen, E. Popov; N. Y.: Dekker, 1997. 601 p.

114 Palmer, C. A. Diffraction grating handbook / C. A. Palmer, E. G. Loewen. N. Y.: Newport Corporation, 2005. 271 p.

115 Бобров, С. Т. Многопорядковые дифракционные решетки с несимметричным профилем периода / С. Т. Бобров, Ю. Г. Туркевич // Компьютерная оптика, №4, 1989. С. 38-45

116 Бобров, С. Т. Дифракционные решетки с порядками одинаковой интенсивности / С. Т. Бобров, Б. Н. Котлецов, В. И. Минаков // Голографические системы. Науч. Тр. НЭТИ, Новосибирск. 1978. Вып. 2. С. 123-129.

117 Gao, N. High-order diffraction suppression using modulated groove position gratings / N. Gao, C. Xie // Optics Letters. 2011. Vol. 36. No. 21. P. 4251-4253.

118 Пальчикова, И. Г. Дифракционные оптические делители пучка / И. Г. Пальчикова, А. М. Рябчун, Г. А. Черков // Компьютерная оптика. 1996. № 16. С. 44-47.

119 Effects of structure parameters on high-order diffraction suppression of quasi-periodic gratings / T. Pu, Z. Liu, L. Shi et al. // Journal of the Optical Society of America B. 2018. Vol. 35. No. 4. P. 711-717.

120 Single-order diffraction grating designed by trapezoidal transmission function / Q. Fan, Y. Liu, C. Wang, etc. // Optics letters. 2015. Vol. 40. No. 11. P. 2657-2660.

121 Focusing single-order diffraction transmission grating with a focusing plane perpendicular to the grating surface / Q. Fan, Y. Liu, Z. Yang, etc. // Opt Express. 2015. Vol. 23(12). P. 16281-8.

122 Соколова, Е.А. Дифракционные решетки нового поколения: Их теория, изготовление и применение в спектральных приборах: диссертация ... доктора технических наук: 05.11.07.- Санкт-Петербург, 2000. 283 с.: ил. РГБ ОД, 71 01-5/307-7.

123 Аксессуары для сбора излучения и ввода в волокно URL: <https://solarlaser.com/devices/light-collecting-fiber-coupling-systems/> (дата обращения 31.01.2019).

124 Electronic Components Datasheet Search. URL: http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Tcd1304ap&gclid=EAIaIQobChMI8eTjzM_U4AIVV6maCh32KgVDEAAAYASAAEgI2nPD_BwE (дата обращения 31.01.2019).

125 Vaganov, M. A. Reading, processing and correction of spectroscopic information in a diffraction grating spectral device / M. A. Vaganov, V. I. Kazakov, A. S. Paraskun // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, IEEE Conference Publication Program, Conference Record №45890. 2018. P. 8604412.

126 Kazakov, V. I. Diffraction at the grating and appearance of “spirits” from the view of radiooptics / V. I. Kazakov, N. Yu. Fironova, O. D. Moskaletz // OSA Technical Digest (online). 2016. P. JW4A.69.

127 Vaganov, M. A. Experimental research of high-temperature burning processes and their spectroscopic measurements / M. A. Vaganov, V. I. Kazakov, A. S. Paraskun // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, IEEE Conference Publication Program, Conference Record №45890. 2018. P. 8604421.

128 Казаков, В. И. Экспериментальные исследования высокотемпературных процессов горения и их спектроскопические измерения / М. А. Ваганов, В. И. Казаков, А. С. Параскун // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах: Двадцать первая международная молодежная конференция ГУАП: сб. статей. СПб: ГУАП. 2018. С. 179-184.

129 Сварочный пост KHWGASEX: комплектация и применение URL: <https://www.providus-plus.ru/articles/svarochnyj-post-khwgasex-komplektatsiya-i-primeneniye/>(дата обращения 31.01.2019).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

«Духи» при дифракции на решетке

Предложенный во разделе 2 радиооптический анализ работы спектрального прибора с дифракционной решеткой позволяет также получить некоторые другие полезные результаты, например, объяснить появление так называемых «духов» при дифракции на решетке [126]. «Духи» проявляются в виде побочных дифракционных максимумов вблизи основных дифракционных порядков и вызваны погрешностями изготовления дифракционных решеток при нарезке штрихов. Эти погрешности заключаются в изменении периода повторения штрихов и в рамках радиооптического подхода могут быть рассмотрены как пространственный аналог частотно-импульсной модуляции, что показано на рисунке б1.

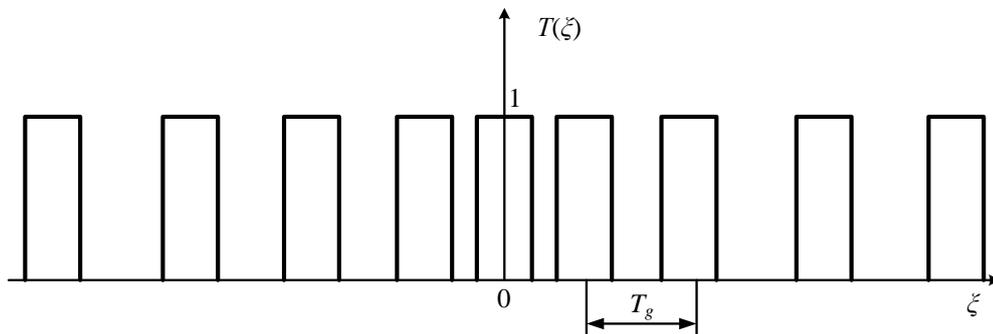


Рисунок б1 – Функция пропускания дифракционной решетки с учетом погрешностей изготовления

Смещение штрихов дифракционной решетки, носящее периодический характер и приводящее к появлению «духов» Роуланда (рисунок б2), может быть рассмотрено как пространственный аналог частотно-модулированного колебания при модуляции по гармоническому закону.

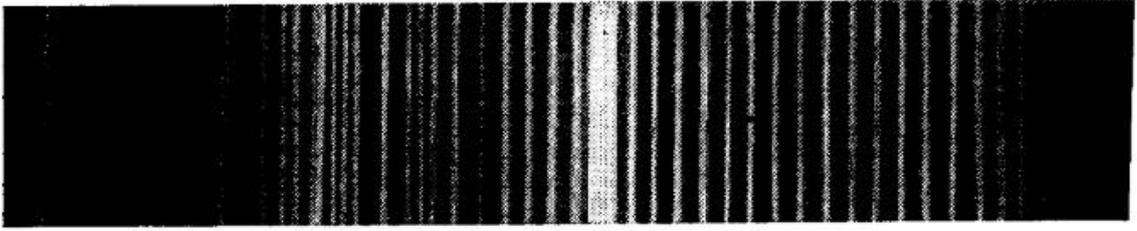


Рисунок 62 – Духи Роуланда вблизи яркой линии ртути при $\lambda=404$ нм.

Действительно, из этой последовательности, согласно теории передачи и приема сигналов с угловой модуляцией [33], может быть выделено колебание:

$$T'(\xi) = C'_0 + C'_1 \cos(\omega_0 \xi + \varphi(\xi)), \quad (69)$$

где $\varphi(\xi)$ – закон пространственной угловой модуляции, причем $\omega(\xi) = \omega_0 + \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi}$ – мгновенная пространственная угловая частота. Смысл коэффициентов C'_0 и C'_1 вполне аналогичен коэффициентам C_0 и C_1 в разложении (28).

Спектр такого колебания, согласно свойствам колебаний с угловой модуляцией, содержит помимо постоянной составляющей и спектральной компоненты на частоте ω_0 большое количество боковых спектральных компонент с достаточно большой амплитудой, что иллюстрируется рисунком 63.

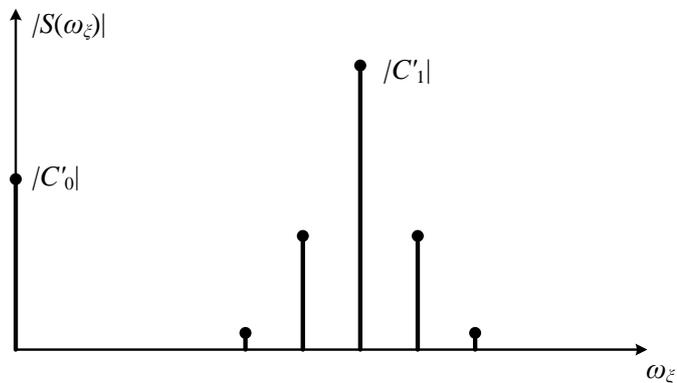


Рисунок 63 – Коэффициенты разложения функции пропускания дифракционной решетки с погрешностями изготовления

Боковые составляющие в разложении функции пропускания решетки с погрешностями изготовления образуют достаточно интенсивные линии вблизи основных порядков дифракции, называемых «духами» Роуланда.

Таким образом, предложенный радиооптический подход позволяет получить соотношения, которые аналитически описывают дифракцию на решетке и появление «духов» при дифракции на решетке.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Экспериментальные исследования процессов горения с использованием системы оптического спектрального контроля на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой

Комплекс лабораторных исследований прибора контроля физических и технологических процессов методом бесконтактной оптической спектроскопии включал также в себя проведение двух экспериментов [127, 128]:

1. Исследование процесса возбуждения спектральной линии Na вблизи 589 нм, путем поджигания поваренной соли NaCl высокотемпературной горелкой и регистрацией спектра пламени.

2. Исследование спектральной линии меди Cu вблизи 510 нм путем поджигания медного порошка высокотемпературной горелкой и регистрацией спектра пламени.

Лабораторный макет для исследования процессов горения показан на рисунке 64.

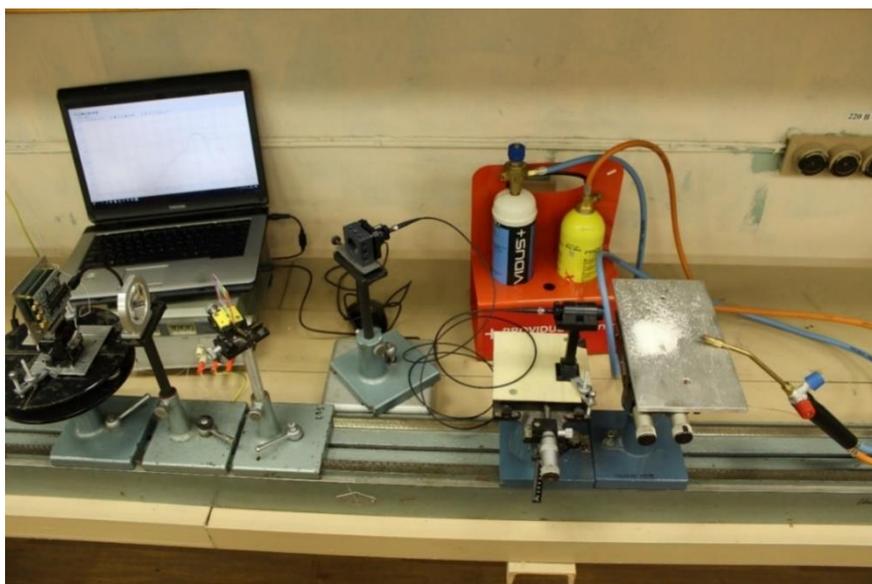


Рисунок 64 – Схема лабораторного макета для исследования процессов горения

В качестве горелки использовался сварочный пост KHWGASEX фирмы «Providus+» [129]. Горелка работает на смеси газов: пропан+ бутан и кислороде. Благодаря отдельным регуляторам интенсивности подачи газов достигается высокотемпературное пламя карандашного типа, достигающее температуры до 3300 градусов Цельсия. Сменные насадки сопла горелки позволяют менять размер факела пламени.

Результат первого эксперимента по возбуждению спектральной линии натрия при поджигании поваренной соли показан на рисунках 65-66. Рисунок 65 – фотография пламени горелки при поджигании поваренной соли. Пламя имеет характерный желтый цвет, соответствующий спектральной линии натрия вблизи 589 нм. Рисунок 66 – измеренный спектр пламени.

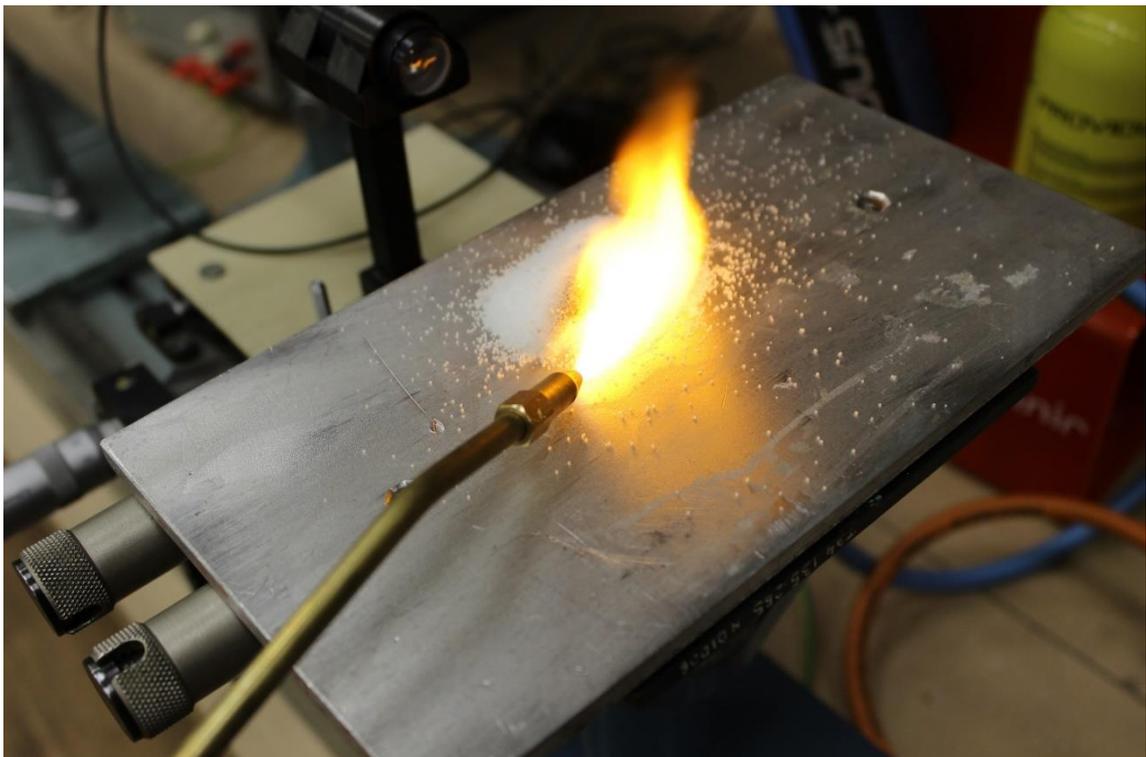


Рисунок 65 – Пламя горелки при поджигании поваренной соли

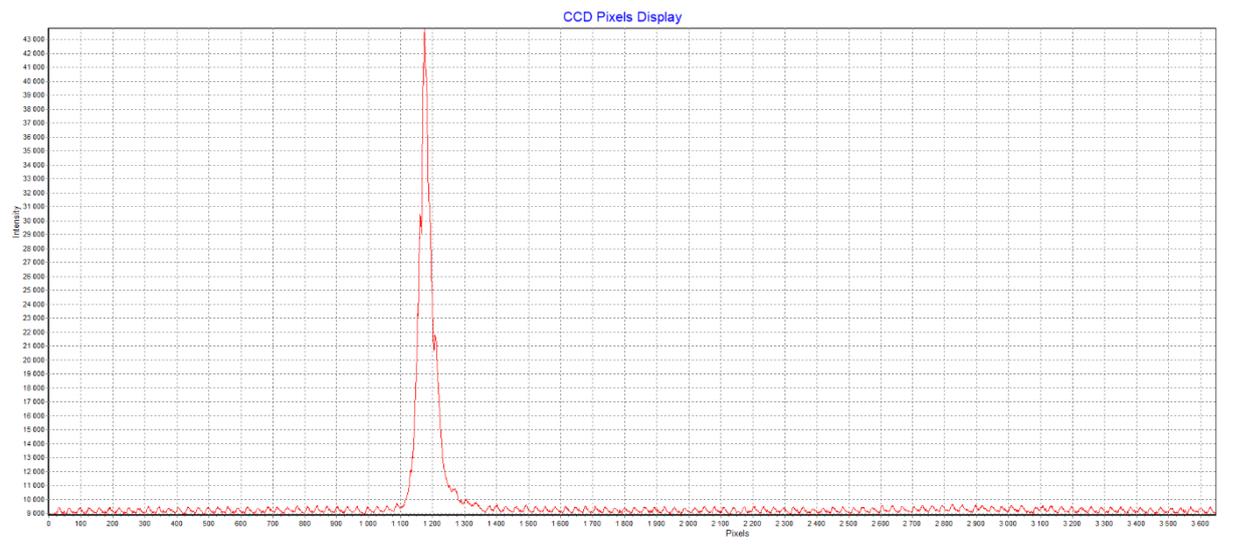


Рисунок 66 – Спектр горения соли

Отчетливо видно, что при поджигании поваренной соли на фоне побочного спектра излучения горелки проявляется интенсивный пик на длине волны 589 нм, что соответствует спектральной линии натрия.

Результатом второго эксперимента является зарегистрированный спектр горения медного порошка. На рисунке 67 приведена фотография пламени при горении медного порошка, имеющая ярко выраженный зеленый оттенок.

Спектр этого пламени показан на рисунке 68 с выраженным пиком на длине волны 510 нм, что соответствует спектральной линии меди.

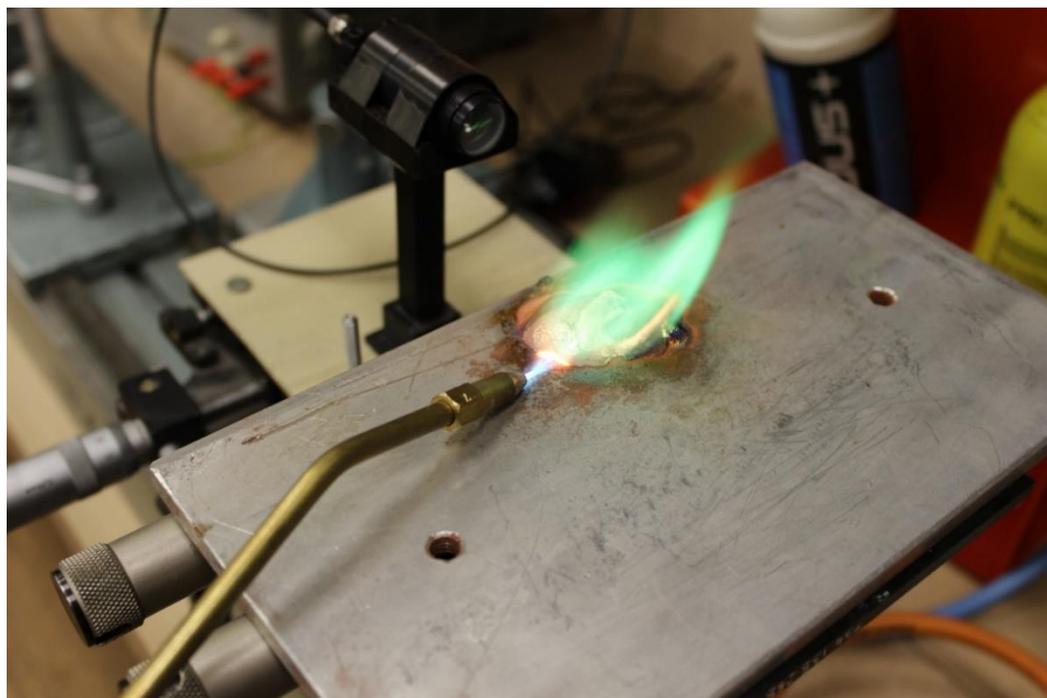


Рисунок 67 – Горение меди

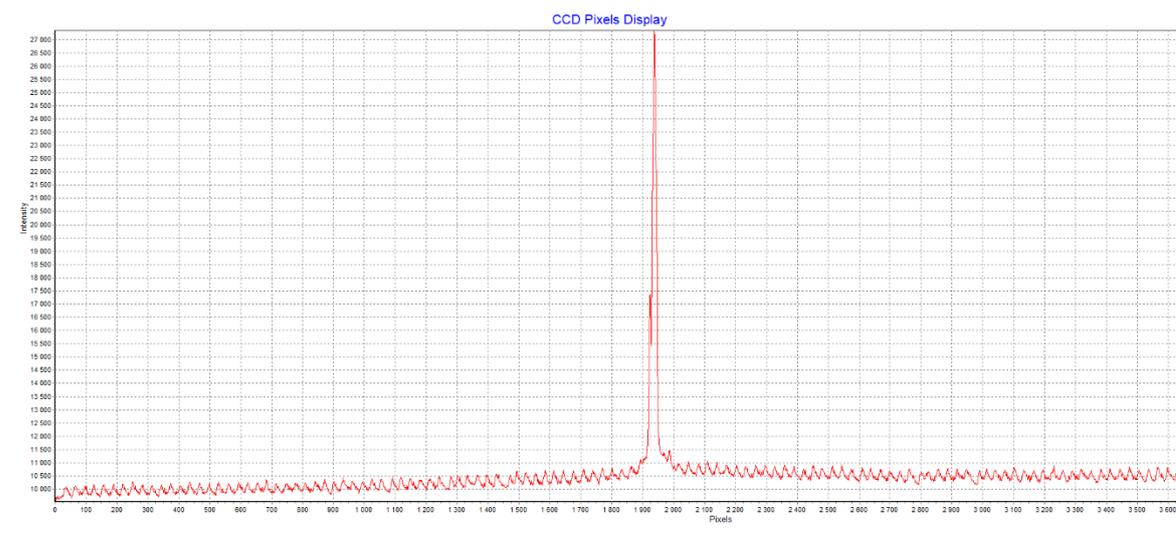


Рисунок 68 – Спектр горения меди

Таким образом, можно констатировать, что полученные результаты экспериментов позволяют сделать вывод о возможности применения спектрального прибора с дифракционной решеткой в качестве прибора контроля в экстремальных условиях. Оба эксперимента подтвердили, что по появлению характерных спектральных линий химических элементов можно судить о состоянии протекающего процесса.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Скан-копии актов о внедрении



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

Большая Морская ул., д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057,
 E-mail: common@aanet.ru; http://www.guap.ru; ОКПО 02068462; ОГРН 1027810232680; ИНН/КПП 7812003110/783801001

№ _____
 На № _____ от _____



«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ГУАП

Ю.А. Антохина

« 25 » 01 2019 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Казакова Василия Ивановича на тему «Система оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой» в учебный процесс федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Комиссия в составе:

- председателя директора института радиотехники, электроники и связи, доктора технических наук, профессора Бестугина Александра Роальдовича,

и членов:

- заместителя заведующего кафедрой конструирования и технологий электронных и лазерных средств, доктора технических наук, профессора Ларина Валерия Павловича,

- ответственного за направление кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств «Лазерная техника и лазерные технологии», кандидата технических наук, доцента Пресленева Леонида Николаевича,

настоящим актом подтверждает, что результаты диссертационной работы Казакова В.И., соискателя ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий», внедрены в учебный процесс в составе дисциплин, проводимых на кафедре конструирования и

технологий электронных и лазерных средств по направлению подготовки «Лазерная техника и лазерные технологии», а именно:

1. Разработанная новая математическая модель спектрального преобразования, реализованная в спектральном приборе с дифракционной решеткой, используется при выполнении курсового проекта по дисциплине «Основы оптики» в качестве базы для выполнения расчета дифракционной картины от решетки.

2. Результаты теоретических исследований внедрены в разделы лекционных курсов дисциплин «Когерентная оптика», «Основы оптики», «Оптическая обработка информации».

3. Разработанный лабораторный макет системы бесконтактного контроля использован при проведении демонстрационных лабораторных работ по дисциплине «Основы квантовой электроники» для изучения оптических спектров различных источников излучения.

Председатель:

Директор института радиотехники,
электроники и связи,
доктор технических наук, профессор



А.Р. Бестугин

Члены комиссии:

Зам. заведующего кафедрой конструирования
и технологий электронных и лазерных средств,
доктор технических наук, профессор

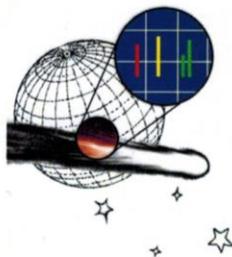


В.П. Ларин

Ответственный за направление
«Лазерная техника и лазерные технологии»
кандидат технических наук, доцент



Л.Н. Прсленев



Малое инновационное предприятие ГУАП
**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
 ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ**

«ФАНТОМ»

*196247, г. Санкт-Петербург, ул. Краснопутиловская,
 дом 56, лит. Б, пом. 1-Н, офис 1.*

Тел.: 8(999)2273757

E-mail: fantom.suai@gmail.com

Исх. № 02/02
 от «02» февраля 2019 г.

АКТ

внедрения результатов научных исследований

Казакова Василия Ивановича

Комиссия в составе:

- генерального директора малого инновационного предприятия ООО «ФАНТОМ» Короля Георгия Игоревича,
- научного консультанта, доктора технических наук, профессора Кулакова Сергея Викторовича,

составили настоящий акт о том, что ряд результатов диссертационного исследования Казакова Василия Ивановича по теме «Система оптического спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой», использованы в разработках малого инновационного предприятия ООО «ФАНТОМ», а именно:

Научно-технический результат	Где внедрен	Результат внедрения
Научно-технический анализ и сопоставление существующих оптических спектральных приборов, используемых в задачах	НИР «Сопоставление и оценка эффективности и качества спектральных приборов при решении спектроскопических задач в экстремальных условиях»	Сформулированы основные требования с приборам контроля на базе оптических спектральных приборов и обосновано использование дифракционного спектрального прибора в задачах

контроля.	(грант РФФИ №17-07-00826).	контроля в экстремальных условиях.
Методика формирования штрихов дифракционной решетки.	НИР «Новые методы спектральной обработки сигналов оптического диапазона» (грант РФФИ №18-07-00636).	Предложен способ улучшения спектрального разрешения прибора контроля за счет измерения спектров в третьем и четвертом дифракционном порядке.
Лабораторный макет системы контроля на базе спектрального прибора с дифракционной решеткой и волоконно-оптической системой передачи.	НИР «Разработка научных основ создания приборов контроля процессов горения на базе методов бесконтактной оптической спектрометрии» (грант РФФИ №17-07-00826).	Измерены оптические спектры горения медного порошка при возбуждении высокотемпературной горелкой. Полученные результаты подтвердили возможность применения системы оптического спектрального контроля в металлургии при переплавке тугоплавких металлов.

Научный консультант,
д.т.н., профессор



С.В. Кулаков

Генеральный директор
ООО «ФАНТОМ»



Г.И. Король

Благодарности

В заключении автор выражает благодарность и глубокую признательность своему научному руководителю доценту кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств ГУАП, старшему научному сотруднику, кандидату технических наук Москальцу Олегу Дмитриевичу за внимательное руководство, безотказную помощь в решении всех возникающих трудностей и проблем при подготовке диссертации и, самое главное, за огромный багаж знаний, полученных за время совместной научной работы в ГУАП, начиная с моего первого курса обучения в бакалавриате.

Автор также благодарит директора института проблем волновой электроники ГУАП профессора, доктора технических наук Кулакова Сергея Викторовича за поддержку и ценные советы на всем пути подготовки диссертации.

Автор выражает признательность и благодарность всем сотрудникам кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств ГУАП за интерес, проявленный к работе, ценную и полезную критику и поддержку при подготовке диссертации к защите.