

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

Казакова Василия Ивановича

«Система оптического спектрального контроля с высокопорядковой  
дифракционной решеткой»,

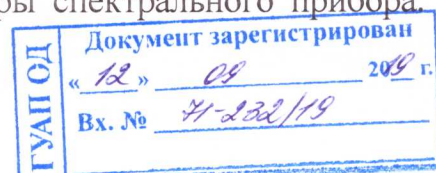
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий»

Актуальность темы исследования. Широкое распространение спектральных приборов в различных областях науки и техники обусловлено важностью и разнообразием получаемой с их помощью информации, как в фундаментальных исследованиях, так и при решении прикладных задач, в особенности, задач контроля физических и технологических процессов. Отсюда следует необходимость дальнейшего развития теории спектральных измерений и разработки новых и совершенствования существующих технических средств оптической спектроскопии с целью улучшения их метрологических характеристик.

Диссертационная работа, представленная В.И. Казаковым, посвящена актуальной проблеме улучшения разрешающей способности оптических спектральных приборов, которые могут быть использованы в задачах контроля различных физических и технологических процессов.

Системы контроля, базирующиеся на принципах оптической спектроскопии, являются особенно востребованными, например, для таких задач, как контроль процессов горения в теплоэнергетических установках, контроль процессов выплавки металлов в металлургии и т.д. Все эти задачи неразрывно связаны с исследованием и анализом оптических спектров излучений, сопровождающих протекание этих процессов, которые однозначно позволяют судить о состоянии контролируемого процесса или объекта.

В отмеченных выше областях применения возникает ряд задач контроля, которые требуют применения систем дистанционного мониторинга, поскольку контролируемый процесс протекает в экстремальных условиях. Техническую реализацию системы дистанционного контроля для таких объектов автор диссертационной работы предлагает реализовать на основе «бесконтактного» метода оптической спектроскопии. Ее суть заключается в применении оптического волокна, которое используется для передачи анализируемого излучения от объекта контроля до входной апертуры спектрального прибора.



Оптическое волокно и системы формирующей оптики способны выдерживать воздействие экстремальных условий, например, достаточно высокой температуры, механических вибраций, воздействий агрессивной химической среды, в то время как спектральный прибор находится вне зоны негативного их воздействия, и, таким образом, исключается непосредственный контакт спектральной аппаратуры с объектом контроля.

Одним из наиболее перспективных направлений развития систем контроля на базе методов оптической спектроскопии является использование спектральных приборов с дифракционными решетками. Такие приборы обладают высоким быстродействием и достаточно высокой чувствительностью, однако их разрешающая способность ограничена работой в низких порядках. Высшие дифракционные порядки представляют большой интерес, поскольку в них спектральное разрешение прибора значительно улучшается,

Тема диссертации, посвященная разработке системы оптического «бесконтактного» спектрального контроля с высокопорядковой дифракционной решеткой, является актуальной.

Актуальность темы исследования подтверждается еще и тем, что разработка систем контроля процессов, протекающих в экстремальных условиях, выход из-под контроля которых может стать причиной экологической катастрофы или привести к большим человеческим жертвам, соответствует Приоритетным направлениям научно-технологического развития Российской Федерации.

Научная новизна работы. Для достижения цели исследования была предложена и разработана новая математическая модель процесса спектрального преобразования в приборе с дифракционной решеткой, предложена топология высокопорядковой дифракционной решетки, установлено влияние передачи сигнала по ВОСП на результат измерения спектра, разработан лабораторный макет системы контроля для экспериментального подтверждения выполненных теоретических научных исследований. Новизна и приоритет предложенной автором топологии высокопорядковой дифракционной решетки и ее применение в спектральном приборе с волоконно-оптической системой передачи подтверждена патентом Российской Федерации.

Достоверность полученных результатов подтверждена корректным использованием математического аппарата, методов компьютерного моделирования, результатами экспериментальных исследований и положительными результатами внедрения.

Полученные научные результаты в ходе разработки альтернативной математической модели спектрального преобразования находятся не в противоречии с положениями, полученными традиционным описанием действия спектрального прибора с дифракционной решеткой, а наоборот, дополняют и уточняют их.

Практическая значимость диссертационной работы. Предложенная система оптического спектрального контроля может найти применение в системах промышленного контроля процессов горения, выплавки металлов, теплоэнергетических установках. Высокопорядковые дифракционные решетки с измененной топологией штрихов представляют интерес для разработчиков оптических спектральных приборов.

Нельзя не отметить, что результаты нашли свое применение и внедрение в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, а также в большом количестве НИР, проводимых ВУЗом

Апробация работы. В.И. Казаков неоднократно выступал с докладами на ведущих российских и международных конференциях по оптике, волновой электронике, дистанционному контролю. Результаты исследования собраны в 25 печатных работах, из них 4 статьи опубликованы в периодических изданиях, входящих в список ВАК РФ, 10 - в изданиях, учитываемых зарубежными базами данных по научным публикациям (SCOPUS, Web of Science), получен 1 патент на полезную модель.

Структура и состав работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и двух приложений. Список используемой литературы - 129 наименований, объем - 150 страниц.

Первый раздел диссертации носит обзорный характер, рассматриваются различные методы оптического спектрального контроля и типы спектральных приборов, даны их сравнительные характеристики. Сделаны выводы о целесообразности применения в системах контроля оптического спектроанализатора с дифракционной решеткой и возможности повышения его разрешающей способности.

Во втором разделе предложена новая модель спектрального преобразования в приборе с дифракционной решеткой. в рамках которой установлены комплексная и энергетическая функции - основные характеристики спектрального прибора. Модель позволила определить основные свойства

спектров в различных порядках дифракции и пути повышения разрешающей способности анализатора.

В третьем разделе диссертации исследовано влияние передачи сигнала от объекта к спектральному прибору по оптоволокну на результат измерения спектра. Получены количественные оценки потерь разрешения.

В четвертом разделе представлены результаты исследований, выполненных на экспериментальном макете системы бесконтактного контроля на основе оптического спектрального прибора с высокопорядковой дифракционной решеткой и с детектором - линейным ПЗС. Результаты экспериментов подтверждают перспективность практического использования таких систем для контроля процессов горения и выплавки металлов.

К основным результатам диссертационной работы В.И. Казакова можно отнести следующее:

1. Предложено альтернативное традиционным представлениям оптической спектрометрии описание обработки оптических сигналов дифракционным решеточным прибором, опирающееся на основные положения теории сигналов и теории линейных систем, что, в свою очередь, потребовало привлечения сложного математического аппарата. На основе этой модели описано получение комплексного и энергетического спектров анализируемого сигнала, базирующееся на последовательном рассмотрении прохождения сигнала через все узлы прибора и позволяющее установить связь вход-выход в виде линейного интегрального оператора. Такой подход позволил установить свойства формируемых дифракционных спектров в различных порядках и путь дальнейшего улучшения разрешающей способности прибора при работе в высоких дифракционных порядках.

2. Предложена топология высокопорядковой дифракционной решетки, которая заключается в неэквидистантном расположении прозрачных и непрозрачных полос. Теоретически и экспериментально показано улучшение разрешающей способности прибора с такой решеткой при его работе в +4 дифракционном порядке. Улучшение разрешающей способности составляет порядка 15 %.

3. Проанализировано влияние передачи сигнала по волоконно-оптической системе на результат спектральных измерений решеточным спектральным прибором. Показано, что при передаче сигнала по одномодовому волокну происходит уширение аппаратной функции в 1,2 раза. Установлены энергетические потери в системе вывода излучения из волокна и предложена методика расчета этих потерь.

4. Рассмотрен процесс считывания спектрометрической информации с помощью многоэлементных фотоприемных устройств – линейных ПЗС. Показано, что при таком считывании результат измерения спектра выдается в форме отсчетных значений энергетического спектра анализируемого сигнала. Предложен алгоритм коррекции этих измерений с учетом установленных свойств формируемых спектров.

Вышеуказанные результаты исследования В.И. Казакова соответствуют поставленным задачам исследования, а тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.11.13.

#### Замечания по работе.

1. В первом разделе автор в качестве применения системы контроля рассматривает контроль качества лекарственных средств. Считаю, что эта область применения никак не связана с экстремальными условиями протекающих процессов, собственно, ради которых и разрабатывалась система контроля с волоконно-оптической системой передачи, поэтому этот подраздел следовало исключить из диссертационной работы.

2. В своей работе автор совершенно не касается рассмотрения других видов дифракционных решеток, например, отражательных. В связи с этим возникают вопросы, почему для исследования и применения в системе контроля были выбраны пропускающие дифракционные решетки.

3. В третьем разделе, при исследовании влияния передачи анализируемых сигналов по волокну автор не касается вопроса выбора оптических элементов систем формирующей оптики, которые будут непосредственно контактировать с излучением контролируемого процесса в экстремальных условиях. Жаропрочные линзы и оптические волокна имеют специфические характеристики затухания, поэтому будут оказывать влияние на результат спектральных измерений. Считаю, что этот вопрос необходимо было отразить в диссертационной работе.

4. В диссертационной работе показано, что предложенная топология решетки при работе в +4 порядке позволяет улучшить спектральное разрешение на 15%. Однако, во втором разделе автором установлены основные свойства формируемых спектров в различных дифракционных порядках, и на основании этих свойств говорится, что спектральное разрешение улучшается кратно номеру дифракционного порядка. В связи с этим требуются особые пояснения этого противоречия, что не отражено в диссертационной работе.

Следует отметить, что высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

### Заключение

Диссертационная работа В.И. Казакова представляет собой оригинальное исследование, выполненное на высоком научном и техническом уровне.

Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертационной работы.

Оформление работы соответствует требованиям к оформлению диссертаций.

Считаю, что диссертационная работа В.И. Казакова удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, изложенным в Постановлении Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства от 21 апреля 2016 г. № 335) «О порядке присуждения ученых степеней» (пункты 9-14), а её автор Казаков Василий Иванович достоин присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»

Официальный оппонент:  
старший научный сотрудник  
лаборатории оптоэлектроники и голографии  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН  
к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.

Г.А. Гаврилов

