

На правах рукописи



Тупикина Надежда Юрьевна

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР ДВУХ
СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
ВЗРЫВООПАСНОЙ ПЫЛЕГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Бийском технологическом институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Сыпин Евгений Викторович

Официальные оппоненты: **Герасимов Сергей Иванович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Строительная механика»
Карих Владимир Петрович, доктор технических наук, доцент, Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», начальник лаборатории радиационной томографии и цифровой радиометрии

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем химико-энергетических технологий» Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, Алтайский край

Защита состоится «20» июня 2017 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу г. Томск, ул. Белинского, 53а и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Васендина
Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Ряд промышленных предприятий характеризуется наличием взрывоопасной пылегазовой атмосферы. Типичный пример таких предприятий – угольные шахты. В рудничной атмосфере выработки присутствуют метан и угольная пыль, которые в смеси с воздухом образуют взрывчатые системы. Внедрение активных систем пожаротушения является единственной мерой, способной существенно повысить уровень безопасности угольных шахт при сравнительно небольших затратах.

Основным компонентом активных систем пожаротушения является прибор, реагирующий на какое-либо явление, сопровождающее очаг возгорания, и выдающий управляющий сигнал на устройство пожаротушения. Свою перспективность для использования в подобных системах показали оптико-электронные приборы (ОЭП) контроля. Используемый ОЭП должен обладать совокупностью следующих свойств: высокое быстродействие, нечувствительность к запылённости атмосферы и воздействию источников оптического излучения, которые могут быть восприняты прибором как очаг возгорания (ложное срабатывание) или же на фоне которых очаг возгорания не будет обнаружен прибором (пропуск возгорания). Обзор существующих ОЭП контроля выявил, что при проектировании ОЭП контроля рудничной атмосферы недостаточно учитывается фактор внешних оптических помех, в качестве которых выступает любой посторонний источник теплового излучения, будь то источник искусственного освещения или рабочие предприятия. Как следствие, системы безопасности на основе ОЭП контроля, устанавливаемые в настоящее время на горнодобывающих предприятиях, неспособны в должной мере обеспечить обнаружение очага возгорания в присутствии оптических помех. В связи с этим разработка принципов построения и создание быстродействующего ОЭП контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, нечувствительного к запылённости промежуточной атмосферы и имеющего высокую вероятность обнаружения очага возгорания на ранней стадии в присутствии источников внешних оптических помех, является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное экономическое и хозяйственное значение.

Степень разработанности темы. Существенный вклад в проработку методов проектирования ОЭП внесли такие учёные, как Свет Д.Я., Поскачей А.А., Чубаров Е.П., Мирошников М.М., Якушенков Ю.Г. Их работы содержат фундаментальные основы проектирования и расчёта ОЭП для различных областей, в том числе рассматривается возможность построения многоканальных ОЭП и систем. Проблемы борьбы со взрывами пыли и газа на горнодобывающих предприятиях освещены в работах Шевцова Н.Р., Нецепляева М.И., Осипова С.Н. и других учёных, работы которых в значительной мере способствовали изучению вопросов возникновения очага возгорания, процессов его развития и способов локализации. В настоящее время работы в области промышленной безопасности горнодобывающих предприятий ведутся в АО «НЦ ВостНИИ» (г. Кемерово).

Анализ трудов указанных учёных показал, что в них не рассматриваются вопросы создания ОЭП контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, сочетающих в себе высокое быстродействие, нечувствительность к оптическим помехам и наличие пыли в промежуточной среде.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка принципов построения и создание быстродействующего ОЭП двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, имеющего высокую вероятность обнаружения очага возгорания на ранней стадии в присутствии источников внешних оптических помех и нечувствительного к наличию пыли в промежуточной среде.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие частные задачи:

- 1) разработать теоретические принципы построения ОЭП двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы;
- 2) на основе компьютерного моделирования выработать технические решения для построения ОЭП двух спектральных отношений;
- 3) разработать стенд для исследования спроектированного прибора в лабораторных условиях и определить значения основных параметров прибора, разработав соответствующие методики;
- 4) проанализировать возможность использования прибора в промышленных условиях, проведя исследование в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Объектом исследования настоящей диссертационной работы является очаг возгорания метано-пылегазовоздушной смеси на начальной стадии и источники оптических помех в виде лампы накаливания, светодиодных и люминесцентных ламп.

Предметом исследования настоящей диссертационной работы является быстродействующий ОЭП контроля для обнаружения очага возгорания на ранней стадии во взрывоопасной пылегазовой атмосфере, нечувствительный к оптическим помехам и наличию пыли в промежуточной среде.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы пирометрии спектрального отношения, параксиальной оптики, аналитической геометрии, математического анализа, цифровой обработки информации, планирования и постановки эксперимента, статистической обработки и анализа экспериментальных данных.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- 1) предложен новый принцип построения ОЭП контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, основанный на измерении потока теплового излучения в трёх диапазонах спектра, вычислении двух спектральных отношений, на основе которых принимается решение о наличии или отсутствии очага возгорания в поле зрения ОЭП при времени обнаружения очага возгорания не более 5 мс, вероятно-

сти обнаружения не менее 0,95 в условиях запылённой промежуточной атмосферы и присутствии оптических помех;

2) предложена и разработана математическая модель оптической системы ОЭП двух спектральных отношений, позволяющая выполнять энергетический и геометрический расчёты по заданному отношению сигнал-шум и значению углового поля с учётом параметров очага возгорания, источников помех и промежуточной среды;

3) предложены новые конструкционные (измерительный стенд) и методологические (комплекс методик) подходы, позволяющие определять угловое поле прибора, порог чувствительности, вероятность обнаружения очага возгорания и вероятность ложного срабатывания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех;

4) разработаны методики экспериментального определения времени срабатывания, вероятности обнаружения очага возгорания и вероятности ложного срабатывания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех ОЭП двух спектральных отношений в условиях, близких к реальным.

Практическая значимость. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для построения быстродействующих ОЭП контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, нечувствительных к запылённости промежуточной среды с возможностью работы в присутствии внешних оптических помех (источников искусственного освещения и рабочих предприятия). Предложенный в работе стенд для исследования ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания является универсальным средством для проверки параметров ОЭП обнаружения очага возгорания и может использоваться при разработке новых приборов и модификации уже существующих. Основные результаты диссертационной работы использовались при выполнении работ в рамках программ Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере: У.М.Н.И.К. (гос. контракт № 8742p/13987 от 02.12.2010, тема – «Разработка активной системы обнаружения и подавления очага возгорания») и СТАРТ (гос. контракт № 12502p/23958 от 28.02.2014, тема – «Разработка и исследование активной системы раннего обнаружения и подавления очага возгорания»). Материалы диссертационной работы, касающиеся исследования ОЭП контроля в лабораторных условиях и условиях близких к реальным, внедрены в учебный процесс по дисциплине «Основы оптико-электронных приборов и систем» на кафедре методов и средств измерений и автоматизации БТИ АлтГТУ.

Положения, выдвигаемые на защиту:

1) принцип построения ОЭП контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, основанный на вычислении двух спектральных отношений для трёх диапазонов спектра, обеспечивающий время обнаружения очага возгорания не более 5 мс, вероятность обнаружения не менее 0,95 в условиях запылённой промежуточной атмосферы и присутствии оптических помех;

2) математическая модель трёхканальной оптической системы ОЭП двух спектральных отношений на основе отдельных объективов каналов, состоящая из энергетической подмодели функционирования и геометрической подмодели расположения оптических компонентов;

3) стенд для лабораторного исследования ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания;

4) комплекс методик определения технических параметров ОЭП двух спектральных отношений в лабораторных условиях и в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованностью теоретических расчётов и результатов компьютерного моделирования с результатами их экспериментальной проверки в лабораторных условиях и в условиях, близких к реальным; использованием откалиброванной и поверенной измерительной аппаратуры, систематическим характером исследований.

Апробация работы. Основные положения и практические результаты диссертационной работы представлены и обсуждены на XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии» (г. Томск, 2011 г.), Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» (г. Барнаул, 2012 г., 2016 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (г. Бийск, 2010–2014 гг.), International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (г. Новосибирск, 2009–2016 гг.). Автор диссертационной работы в составе коллектива отмечена премией Алтайского края в области науки и техники за работу «Снижение риска и последствий техногенных катастроф на объектах со взрывоопасными газодисперсными средами» (2011 г.).

Личный вклад автора состоит в разработке нового принципа построения ОЭП контроля и математической модели трёхканальной оптической системы с отдельными объективами каналов, создании стенда для лабораторного исследования ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания и разработке комплекса методик для определения параметров прибора как в лабораторных условиях, так и в условиях, близких к реальным. Автор принимала непосредственное участие в создании действующего образца ОЭП двух спектральных отношений, проведении экспериментальных исследований и получении новых экспериментальных данных, характеризующих функциональные возможности разработанного прибора.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 44 научные работы, из них 6 работ опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК, 5 – в свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ, 31 статья в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, методические рекомендации к выполнению лабораторных работ по курсу «Основы оптико-электронных приборов и систем», отчёт о НИОКР.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников из 115 наименований. Общий объем работы составляет 164 страницы машинописного текста. Работа содержит 19 таблиц, 50 рисунков.

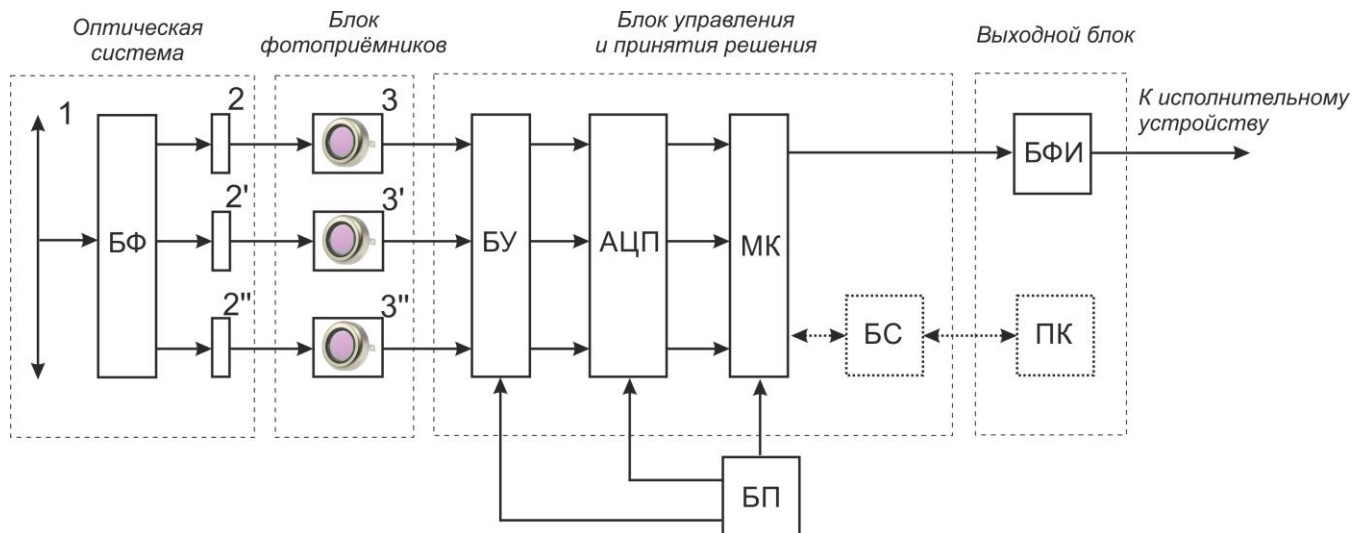
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и показана значимость разработки быстродействующего ОЭП двух спектральных отношений, имеющего высокую вероятность обнаружения очага возгорания на ранней стадии в присутствии источников внешних оптических помех, нечувствительного к наличию пыли в промежуточной среде, предназначенного для использования в активных системах пожаротушения; сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведена краткая характеристика работы.

В первой главе представлен аналитический обзор способов и средств обнаружения очагов возгорания на ранней стадии в газодисперсной системе и факторов, влияющих на их работу, рассмотрено влияние промежуточной среды и внешних оптических помех на достоверность решения, принимаемого ОЭП контроля. Для повышения устойчивости ОЭП контроля к внешним оптическим помехам предложено использовать программную и аппаратную избыточности, а именно включить в традиционный пирометр спектральных отношений дополнительный (третий) спектральный канал, что позволит вычислять два спектральных отношения.

Вторая глава посвящена разработке теоретических принципов и технических решений построения ОЭП двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы. Проведённый обзор параметров контролируемого объекта позволил сформулировать основные технические требования к разрабатываемому прибору. После чего на основе обобщённой схемы построения ОЭП предложена структурная схема ОЭП двух спектральных отношений, приведённая на рис. 1.

Световой поток от источника возгорания и других источников оптического излучения, находящихся в охраняемой зоне, с помощью объектива 1 фокусируется на чувствительных площадках фотоприёмников 3, 3', 3''. Блок формирования информационных сигналов БФ, находящийся между объективом и фотоприёмниками, осуществляет выделение из исходного потока излучения трёх информационных сигналов. В результате образуются три канала в приборе. Затем каждый из трёх световых пучков проходит через светофильтры 2, 2', 2'' с различными спектральными диапазонами пропускания и попадает на фотоприёмники. Выходной сигнал каждого фотоприёмника приходит на соответствующий вход блока усиления.



1 – объектив; 2, 2', 2'' – светофильтры; 3, 3', 3'' – фотоприёмники
 БФ – блок формирования информационных сигналов; БУ – трёхканальный блок усиления; АЦП – трёхканальный блок аналого-цифрового преобразования сигналов; МК – блок микроконтроллера; БФИ – блок формирования управляющего импульса; БС – блок связи с персональным компьютером;
 ПК – персональный компьютер

Рисунок 1 – Структурная схема ОЭП двух спектральных отношений

После усиления сигналы оцифровываются с помощью блока аналого-цифрового преобразования сигналов и обрабатываются посредством микроконтроллерного блока. Обработка сигналов микроконтроллером в простейшем случае состоит в усреднении по времени сигналов каналов и расчёте двух отношений, например U_1/U_2 и U_1/U_3 . Таким образом, реализуется метод двух спектральных отношений для трёх каналов. По результатам сравнения полученных спектральных отношений с заранее заданными значениями микроконтроллерный блок принимает решение о возникновении (или отсутствии) очага возгорания в угловом поле прибора. В случае возникновения возгорания блок формирования управляющего импульса БФИ формирует сигнал активации устройства пожаротушения.

На основе проведённого сравнения оптических систем, используемых в многоканальных ОЭП, для реализации ОЭП двух спектральных отношений выбрана оптическая система с тремя отдельными объективами. Такая оптическая система проста в изготовлении, надёжна в работе и обеспечивает минимальное ослабление оптического сигнала при прохождении через неё. Для того чтобы выбрать рабочие спектральные диапазоны каналов прибора и конструктивные параметры оптической системы, выполнено её моделирование. Математическая модель оптической системы ОЭП двух спектральных отношений представлена в виде схемы на рис. 2. Реализуется математическая модель в виде совокупности компьютерных программ (свидетельства о регистрации программ для ЭВМ № 2011613733, 2011613734, 2011613735).



Рисунок 2 – Схема математической модели оптической системы ОЭП двух спектральных отношений

Модель источника излучения применяется как для определения потока излучения от очага возгорания, так и для определения потока излучения от источников оптических помех. Делая допущение, что источник излучения является серым излучателем, имеет равномерное распределение потока излучения в пространстве и по поверхности источника, а также конечную площадь и занимает часть углового поля оптической системы прибора, для расчёта его потока излучения в спектральном диапазоне $[\lambda_i - \Delta\lambda_i/2; \lambda_i + \Delta\lambda_i/2]$ используется формула

$$\Delta\Phi_e = \varepsilon_T \frac{D \cdot \Delta A}{4l^2} \cdot \cos \alpha \cdot \int_{\lambda_i - \Delta\lambda_i/2}^{\lambda_i + \Delta\lambda_i/2} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = \text{const}, \lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где ε_T – коэффициент излучения, D – диаметр входного зрачка оптической системы, ΔA – видимая площадь источника излучения, l – расстояние до источника излучения, α – угол между нормалью к плоскости расположения источника излучения и направлением излучения, τ_c – коэффициент пропускания промежуточной среды, τ_o – коэффициент пропускания оптической системы, $M_e(T = \text{const}, \lambda)$ – функция Планка.

На первом этапе построения энергетической подмодели функционирования ОЭП двух спектральных отношений составлено основное энергетическое уравнение

$$\mu_{\text{вых}} \geq I_{\text{вых}} / I_{\text{шум}}, \quad (2)$$

где $\mu_{\text{вых}}$ – отношение сигнал-шум на выходе оптико-электронного прибора; $I_{\text{вых}}$ – ток, протекающий через фотоприёмник и соответствующий полезному сигналу; $I_{\text{шум}}$ – ток, протекающий через фотоприёмник и соответствующий сигналу шума.

Значение $\mu_{\text{вых}}$ в формуле (2) выбирается исходя из требований к параметрам качества ОЭП, а значение $I_{\text{шум}}$ в основном определяется темновым током используемых в приборе фотоприёмников.

Одним из критериев качества оптической системы ОЭП двух спектральных отношений является обеспечение отличия спектральных отношений Q_1 и Q_2 при воздействии на входной зрачок прибора различных видов сигналов, при этом Q_1 и Q_2 определяются как

$$Q_1 = I_2/I_1 \text{ и } Q_2 = I_3/I_1,$$

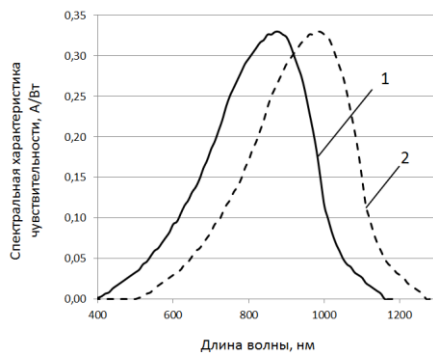
где I – ток через фотоприёмник, подстрочные индексы 1, 2 и 3 относятся к номерам каналов.

Поскольку каждый канал прибора содержит оптический фильтр, имеющий центральную длину волны λ_i и полосу ширины пропускания $\Delta\lambda_i$, и фотоприёмник со спектральной чувствительностью $S_i(\lambda)$, выходные сигналы фотоприёмника будут определяться в соответствии с формулой

$$I_i = \int_{\lambda_i - \Delta\lambda_i/2}^{\lambda_i + \Delta\lambda_i/2} S_i(\lambda) \cdot \Delta\Phi_e(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $S_i(\lambda)$ – функция спектральной чувствительности фотоприёмника, $\Delta\Phi_e(\lambda)$ – поток излучения, приходящий на фотоприёмник, определяемый по выражению (1).

Так как номенклатура выпускаемых фотоприёмников достаточно большая, было принято решение – не использовать в выражении (3) характеристики существующих фотоприёмников, а использовать типичную характеристику чувствительности кремниевого фотодиода со смещённым максимумом чувствительности (кривая 2 на рис. 3).



- 1 – типичная характеристика;
2 – характеристика со смещённым максимумом чувствительности

Рисунок 3 – Спектральная характеристика чувствительности кремниевого фотодиода

На рис. 4 показана блок-схема алгоритма работы программы, позволяющей рассчитать спектральные отношения при различных значениях диаметра входных зрачков и спектральных диапазонов каналов.

С помощью разработанной компьютерной программы получены три трёхмерные таблицы для отношений Q_1 и Q_2 , соответствующие различным сигналам на входном зрачке прибора: очаг возгорания (ОВ), источник помехи (ИП), совместное действие источника очага возгорания и помехи (Σ).

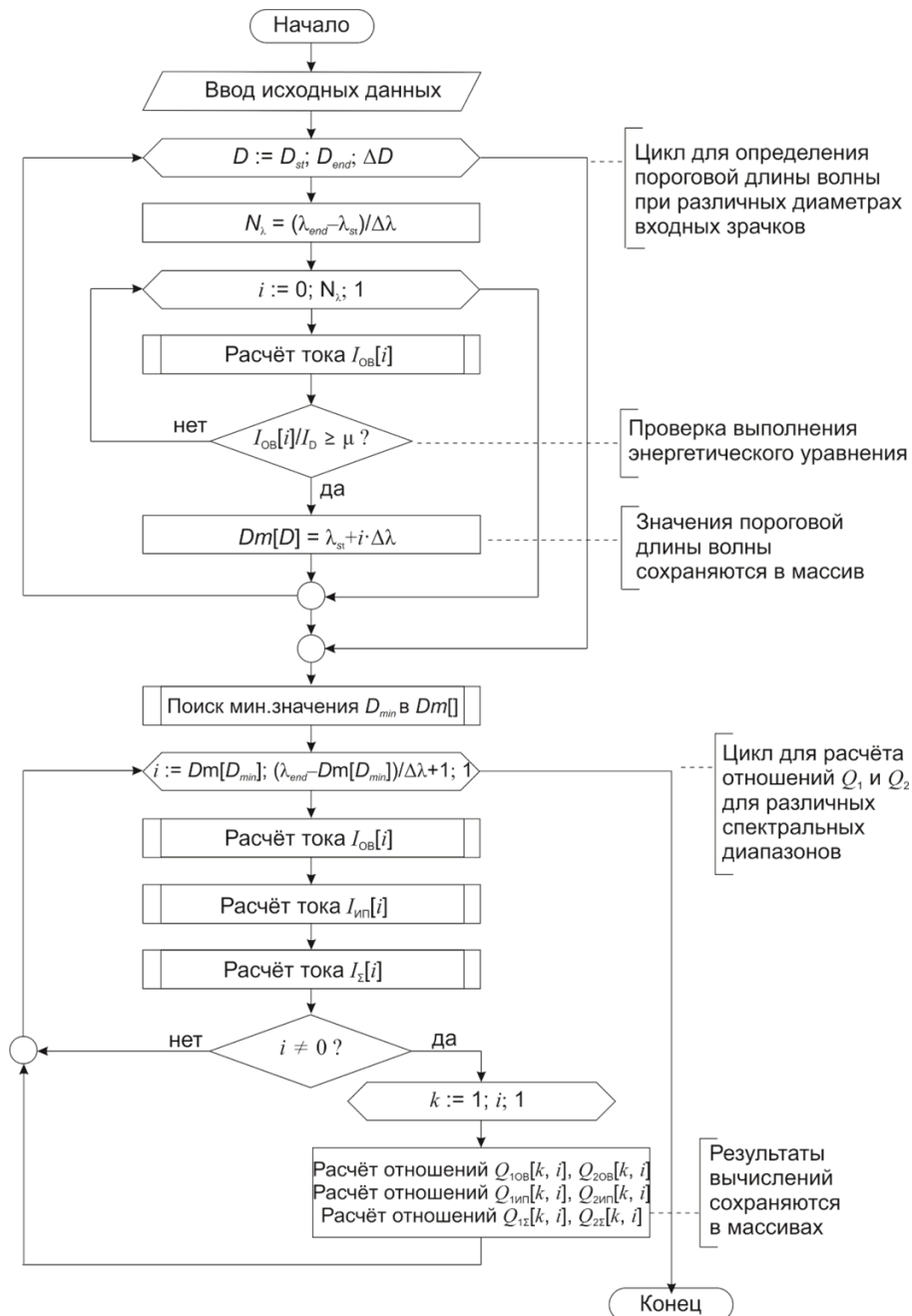


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма работы программы расчёта спектральных отношений

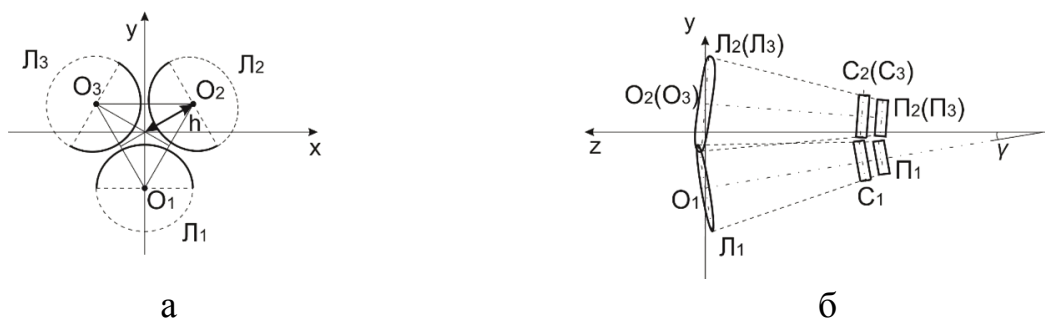
Выбор спектральных рабочих диапазонов осуществлялся исходя из условия:

$$\begin{cases} Q_{1\text{ИП}} \ll Q_{2\text{ИП}} \\ Q_{1\text{ОВ}} \gg Q_{2\text{ОВ}} \\ Q_{1\Sigma} \gg Q_{2\Sigma} \end{cases}.$$

В результате выбраны следующие рабочие спектральные диапазоны каналов: 750 ± 40 (первый канал), 950 ± 40 (второй канал) и 1550 ± 20 нм (третий канал).

После анализа возможного расположения входных зрачков оптической системы для ОЭП двух спектральных отношений выбрано расположение входных зрачков, показанное на рис. 5. Выбранный вариант расположения обладает центральной симметрией и симметрией относительно точки, что позволяет получить

одинаковый поток излучения на всех входных зрачках при нахождении источника излучения на оптической оси системы. Для расположения входных зрачков на рис. 5 угол γ принят условно положительным, если оптическая ось канала пересекает отрицательную часть оси z , и отрицательным – если положительную часть оси z . Расположение входных зрачков на рис. 5 соответствует положительному значению угла γ .



O_1, O_2, O_3 – центры входных зрачков; L_1, L_2, L_3 – входные зрачки объективов каналов прибора; C_1, C_2, C_3 – светофильтры; Π_1, Π_2, Π_3 – приёмники излучения

Рисунок 5 – Расположения входных зрачков объективов каналов прибора в вершинах равностороннего треугольника, оптические оси каналов наклонены:
а – вид с плоскости наблюдателя; б – вид справа

В охраняемой зоне, обеспечиваемой выбранной оптической системой, выделены следующие области (рис. 6, а):

- 1) область I, перекрываемая тремя каналами, возможно вычисление двух спектральных отношений на основе трёх монохроматических каналов;
- 2) область II, перекрываемая двумя каналами, возможно вычисление одного спектрального отношения на основе двух монохроматических каналов;
- 3) область III, перекрываемая одним каналом, расчёт спектральных отношений невозможен, определение температуры возможно на основе одного монохроматического канала;
- 4) область IV вне охраняемой зоны оптической системы.

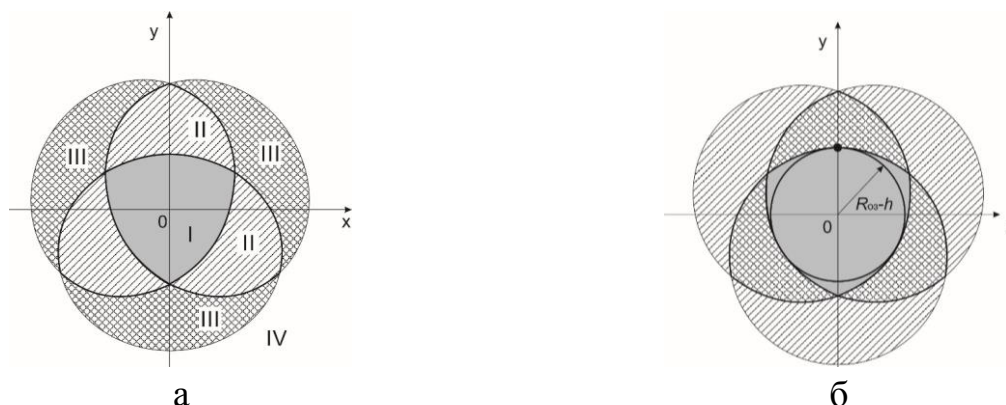


Рисунок 6 – Сечение охраняемой зоны, обеспечиваемой трёхканальной оптической системой с отдельными объективами каналов: а – области в охраняемой зоне; б – упрощённое представление охраняемой зоны в виде круга

Поток излучения от источника, находящегося на оси z в точке с координатой $z = 0$, не будет попадать ни на один входной зрачок. При увеличении координаты z в некоторой точке $z = l_0$, излучение источника придёт на все входные зрачки. Таким образом, в охраняемой зоне прибора будет присутствовать «мёртвая зона», характеризующаяся протяжённостью l_0 .

В таблицах 1 и 2 приведены результаты геометрического моделирования оптической системы для двух случаев, в которых площадь охраняемой зоны будет стремиться к максимальному значению. При моделировании оптической системы исследовались только отрицательные значения углов γ . Очевидно, что с возрастанием положительных значений угла γ площадь охраняемой зоны будет уменьшаться и постепенно станет равной нулю.

Таблица 1 – Параметры оптической системы для случая при расстоянии между центрами эллипсов, ограничивающих сечение охраняемых зон каналов, стремящемся к минимальному значению

Параметры оптической системы	Расстояние от начала координат до центров входных зрачков каналов h , м						
	0,015	0,02	0,025	0,05	0,1	0,25	0,5
Угол наклона оптических осей γ , градусы	–0,09	–1,98	–0,14	–0,29	–0,57	–1,43	–2,86
Протяжённость «мёртвой» зоны l_0 , м	0,00	0,03	0,08	0,27	0,64	1,58	2,79
Площадь охраняемой зоны S_{oz} , м ²	4,853	4,853	4,853	4,853	4,853	4,853	4,854
Угловое поле 2ω , градусы	14,17	14,17	14,17	14,17	14,17	14,17	14,17

Таблица 2 – Параметры оптической системы при площади охраняемой зоны каждого канала стремящейся к максимальному значению (угол наклона оптических осей γ равен нуль градусов, расстояние от входного зрачка прибора до источника возгорания l составляет 10 м)

Параметры оптической системы	Угловое поле одного канала прибора $2\omega_1$, градусы					
	10	20	25	30	35	40
Протяжённость «мёртвой» зоны l_0 , м	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Площадь охраняемой зоны S_{oz} , м ²	2,41	9,77	15,45	22,57	31,24	41,63
Площадь охраняемой зоны $S_{oz \text{ упр.}}$, м ²	2,39	9,74	15,41	22,52	31,19	41,56
Угловое поле прибора 2ω , градусы	10,01	20,01	25,01	30,01	35,01	40,01

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– с увеличением расстояния h (см. рис. 5) увеличивается и протяжённость «мёртвой» зоны l_0 . Поэтому далее принято, что входные зрачки приборов касаются друг друга;

– в случае касания входных зрачков увеличение отрицательных значений угла γ по модулю ведёт к уменьшению протяжённости «мёртвой» зоны l_0 , площадь охраняемой зоны S_{oz} при этом увеличивается, затем, достигнув максимального значения при $\gamma = -0,01$ градусов, значение S_{oz} начинает уменьшаться. Исходя из практических соображений в дальнейшем значение угла γ принято равным 0 градусов;

– при выбранных выше допущениях ($\gamma = 0$ градусов, входные зрачки касаются друг друга) значение площади охраняемой зоны в основном определяется угловым полем одного канала $2\omega_1$;

– для расчёта площади охраняемой зоны допустимо упрощённо рассматривать её в виде круга (рис. 6, б), поскольку в этом случае рассчитанная площадь охраняемой зоны $S_{\text{оз упр}}$ будет отличаться от площади $S_{\text{оз}}$ менее чем на 1 %.

Если очаг возгорания смещён относительно оптической оси системы, поток излучения, приходящий на входные зрачки каналов, будет различен. Поэтому определяемая прибором температура источника возгорания T_i , находящегося в точке с координатами $(x_i; y_i; l)$, будет отличаться от действительной температуры источника возгорания T_0 на величину методической погрешности ΔT

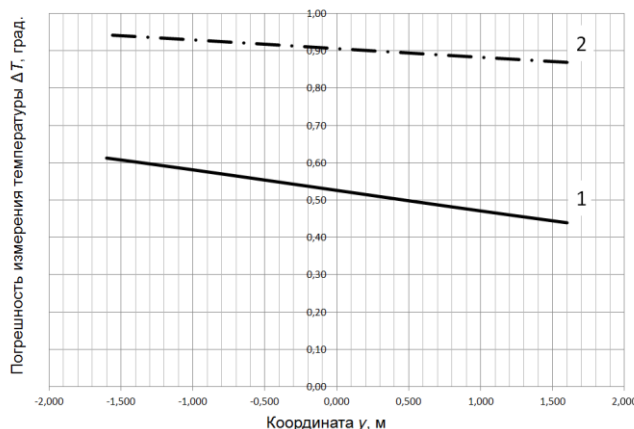
$$\Delta T = \pm |T_0 - T_i|, \quad (4)$$

где T_0 – действительная температура источника возгорания, которая соответствует температуре источника возгорания, находящегося в точке с координатами $(0; 0; l)$.

Расчёт методической погрешности определения температуры для положения очага возгорания в точке с координатами (x_i, y_i, l) сводится к нахождению косинусов углов α_1 и α_2 между направлениями на источник возгорания и оптическими осями каналов и расчёту спектральных отношений

$$Q_1 = \frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \cdot Q_0 \text{ и } Q_2 = \frac{\cos \alpha_3}{\cos \alpha_1} \cdot Q_0, \quad (5)$$

где Q_0 – спектральное отношение, рассчитанное для точки, лежащей на оптической оси системы, подстрочные индексы 1, 2 и 3 относятся к номерам каналов.



1 – для отношения Q_1 ; 2 – для отношения Q_2

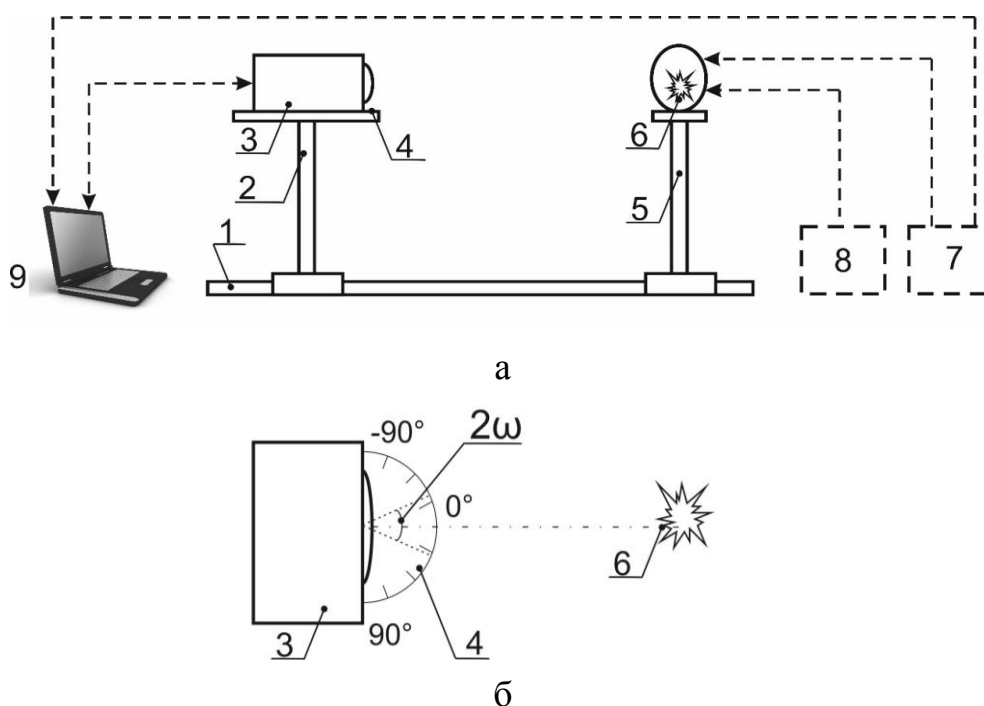
Рисунок 7 – Зависимость методической погрешности определения температуры по спектральным отношениям Q_1 и Q_2 от смещения источника излучения вдоль оси y

Значение температуры T_i , соответствующее спектральному отношению, рассчитанному по формуле (5), определяется по функциональной зависимости $T = f(Q)$, и далее рассчитывается методическая погрешность определения температуры по формуле (4). Аналогичным образом рассчитывается погрешность и для второй пары каналов. На рис. 7 показан результат расчёта погрешности определения температуры T_1 по отношениям Q_1 и Q_2 .

Из приведённых зависимостей видно, что значение абсолютной погрешности измерения температуры вследствие смещения источника излучения относительно оптической оси не превышает 1 градус.

После проведённого моделирования оптической системы проектируемого ОЭП выполнена разработка его электронной части, основным компонентом которой является микроконтроллер. Для прибора разработано программное обеспечение, состоящее из микроконтроллерной программы управления прибором и компьютерной программы управления лабораторным образцом прибора. Назначение компьютерной программы состоит в настройке параметров прибора, получении и обработке данных при его лабораторном исследовании. В конце главы приведена разработанная конструктивная схема ОЭП двух спектральных отношений и выбранные оптические и электронные компоненты.

В третьей главе приведены результаты экспериментального определения параметров разработанного ОЭП двух спектральных отношений в лабораторных условиях, для чего был разработан стенд для исследования ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания (рис. 8). В качестве источника-имитатора очага возгорания (поз. 6 на рис. 8) в зависимости от цели эксперимента используются различные источники – образцовый излучатель в виде модели абсолютно чёрного тела АЧТ-45/100/1000, газовая горелка. Также на штатив 5 крепятся источники возможных оптических помех в виде ламп накаливания и люминесцентных ламп.



- 1 – оптическая скамья; 2, 5 – штативы; 3 – исследуемый прибор; 4 – транспортер;
6 – источник-имитатор очага возгорания; 7 – блок управления; 8 – блок питания;
9 – персональный компьютер

Рисунок 8 – Устройство лабораторного стенда: а – общий вид, б – вид сверху

Для спроектированного стенда разработаны следующие методики: методика определения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех, методика определения вероятности ложного срабатывания, методика определения порога чувствительности по температуре, методика определения углового поля.

Методики определения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех $p_{по}$ и вероятности ложного срабатывания $p_{л}$ сводятся к непосредственному подсчёту количества срабатываний (или несрабатываний) прибора при воздействии на его входной зрачок источника-имитатора очага возгорания и (или) источников внешних оптических помех. В качестве источника-имитатора очага возгорания используется газовая горелка, а в качестве источников помех – лампы накаливания мощностью 60 и 100 Вт и люминесцентные лампы мощностью 20 и 40 Вт¹.

Порог чувствительности согласно разработанной методике определяется по результатам серии измерения напряжений (количество измерений в серии $N = 30$) на выходах каналов прибора при различной температуре излучателя АЧТ-45/100/1000. Сначала находится канал, для которого температура $T_{пор}$, соответствующая порогу чувствительности по напряжению $U_{пор}$, имеет наибольшее значение, где $U_{пор}$ определяется как

$$U_{пор} = \max \left\{ \mu(\bar{U}_{1пор} + \Delta_{\bar{U}_{1пор}}), \mu(\bar{U}_{2пор} + \Delta_{\bar{U}_{2пор}}), \mu(\bar{U}_{3пор} + \Delta_{\bar{U}_{3пор}}) \right\},$$

где μ – заданное отношение сигнал-шум; $\bar{U}_{1пор}$, $\bar{U}_{2пор}$, $\bar{U}_{3пор}$ – значение напряжения шума, полученное при отсутствующем сигнале на входных зрачках каналов прибора.

Затем выполняется переход по формуле (1) от экспериментально полученной зависимости $U = f(T)$ к зависимости вида $U = f(\Phi)$, где Φ – поток излучения на входном зрачке прибора. Подставив значение $U = U_{пор}$ в функцию $U = f(\Phi)$, находится значение энергетической пороговой чувствительности $\Phi_{пор}$. После чего выполняется расчёт температуры очага возгорания $T_{ОВ}$ (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2011613733) при видимой площади очага возгорания $\Delta A_{ОВ} = 1$ м и расстоянии до входного зрачка прибора $l_{ОВ} = 10$ м. При нахождении температуры $T_{ОВ}$ используется формула (1).

Методика определения углового поля ОЭП двух спектральных отношений заключается в построении угловой диаграммы чувствительности на основе экспериментальных данных и последующему определению по ней углового поля. Поскольку оптическая система прибора состоит из трёх каналов, каждый из которых имеет отдельный входной зрачок, и соответственно обеспечивает собственное угловое поле, угловое поле прибора будет определяться наложением угловых полей его каналов.

¹ ГОСТ Р 53325-2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования. Методы испытаний.

По результатам серии экспериментов ($N = 100$) по определению вероятности обнаружения очага возгорания при отношении сигнал-шум равном двум получено неудовлетворительное значение ($p_{\text{по}} = 0,7$). Поэтому заданное отношение сигнал-шум было увеличено до трёх, при этом вероятность обнаружения составила 0,96. В случае одновременного действия на входные зрачки каналов прибора внешней оптической помехи (лампа накаливания мощностью 60 Вт) и источника-имитатора очага возгорания вероятность обнаружения составила 0,95. Вероятность ложного срабатывания для различных источников помех составила не более 0,1. Для разработанного ОЭП двух спектральных отношений $U_{\text{пор}}$ соответствует каналу с рабочей длиной волны 750 нм. В результате получено, что порог чувствительности по температуре разработанного прибора $T_{\text{пор}}$ составляет 688 °С при площади очага возгорания $\Delta A_{\text{ОВ}} = 1 \text{ м}^2$ и расстоянии до входного зрачка прибора $l_{\text{ОВ}} = 10 \text{ м}$. Полученное значение $T_{\text{пор}}$ превышает требуемое на 58 °С, что объясняется повышением значения отношения сигнал-шум до трёх. Вместе с тем на практике разработанный прибор допускает превышение $T_{\text{пор}}$ до 100 °С². Исследование углового поля ОЭП двух спектральных отношений показало, что его оптическая система обеспечивает угловое поле 10 градусов (рис. 9), что вполне приемлемо на практике.

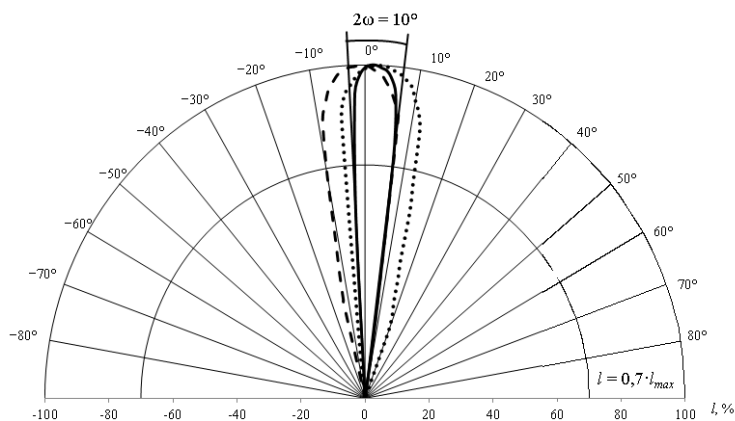


Рисунок 9 – Диаграмма чувствительности ОЭП двух спектральных отношений (размер чувствительной площадки двух фотоприёмников 10×10 мм, третьего фотоприёмника – 5×5 мм)

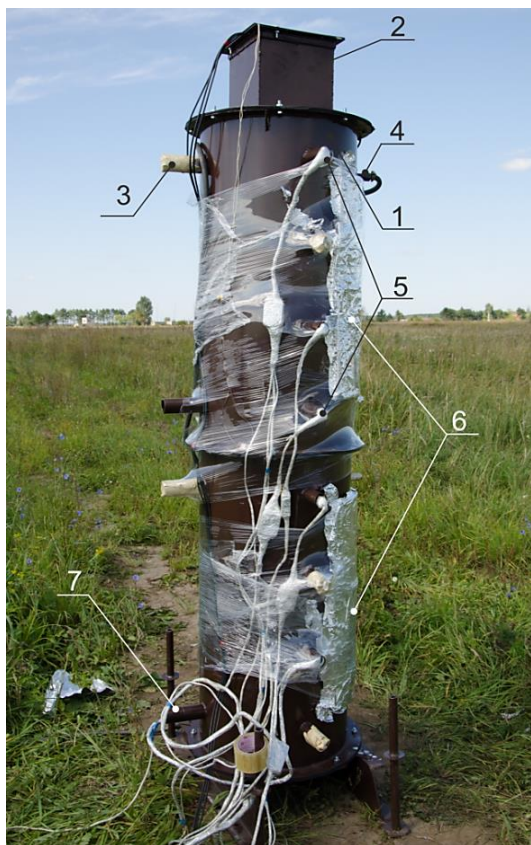
В четвёртой главе приведены методики и результаты экспериментального исследования ОЭП двух спектральных отношений в условиях, близких к реальным³:

- температура окружающего воздуха – от 12 до 16 °С;
- относительная влажность – 67 %;
- атмосферное давление – 742 мм рт. ст.

² Сыпин, Е. В. Оптико-электронный прибор обнаружения начальной стадии развития взрыва в газодисперсных системах [Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.11.13 / Сыпин Евгений Викторович. – Барнаул: 2007. –144 с.

³ Айруни, А.Т. Взрывоопасность угольных шахт / А.Т. Айруни, Ф.С. Клебанов, О.В. Смирнов. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 264 с.: ил., табл. – (Серия «Библиотека горного инженера». Т. 9 «Рудничная аэрология». Кн. 2).

- концентрация горючего газа (пропан) – 5,0–5,5 %;
- концентрация угольной пыли – 35–45 г/м³.



- 1 – реакционный сосуд; 2 – крышка для установки исследуемого оптико-электронного прибора;
- 3 – патрубок для впуска пыли;
- 4 – патрубок для впуска газа;
- 5 – восемь патрубков для установки измерительных датчиков;
- 6 – окна для сброса давления;
- 7 – патрубок для ввода поджигателя

Рисунок 10 – Фотография экспериментальной установки для исследования параметров ОЭП для обнаружения взрыва



Рисунок 11 – Фотография разработанного ОЭП двух спектральных отношений

Для проведения испытаний разработанного ОЭП использовалась установка, представляющая собой реакционный сосуд, располагаемый вертикально и имеющий длину 2 м и внутренний диаметр 0,5 м. Подача газа, горючей пыли и ввод поджигателя осуществляется через патрубки, расположенные в корпусе сосуда. В конструкции сосуда предусмотрены окна сброса избыточного давления с установленными предохранительными мембранами, наличие которых предотвращает разрушение реакционного сосуда при взрыве (рис. 10). Исследуемый оптико-электронный прибор (рис. 11) устанавливался в полость крышки реакционного сосуда, при этом объектив направлялся в сторону дна реакционного сосуда. Для контроля параметров горения газопылевоздушной смеси в конструкции сосуда предусмотрены патрубки для ввода измерительных датчиков, патрубки расположены вдоль по высоте сосуда.

В условиях, близких к реальным, исследовались два параметра – вероятность обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех и время обнаружения очага возгорания. Для их определения были разработаны соответствующие методики.

Методика определения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех $p_{по}$ в условиях близких к реальным сводится к сборке экспериментальной установки и её подготовке к проведению взрывов, после чего выполняется серия взрывов, в каждом из которых фиксируется срабатывание прибора или пропуск возгорания с

помощью компьютерной программы управления экспериментальной установкой. В остальном данная методика аналогична методике определения вероятности $p_{\text{по}}$ в лабораторных условиях.

Время обнаружения очага возгорания определяется на основе регистрации сигналов каналов прибора и сигнала активации устройства взрывоподавления. Время появления очага возгорания с параметрами, соответствующими пороговой чувствительности, t_1 фиксируется с помощью фотоприёмников прибора. Для этого к выходам блока АЦП исследуемого ОЭП (см. рис. 1) подключается модуль аналого-цифрового преобразования крейтовой системы сбора данных LTR-U-1, используемой в экспериментальной установке. Момент времени t_2 определяется по значению 0,9 амплитуды сигнала активации. После чего находится разность t_2 и t_1 , полученное значение будет соответствовать времени обнаружения очага возгорания.

В результате серии экспериментов ($N = 30$) по определению вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех получено, что вероятность обнаружения составила 0,95 в обоих случаях. Значение времени обнаружения очага возгорания составило $2,9 \pm 0,7$ мс при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Предложен новый принцип построения быстродействующего ОЭП контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, обеспечивающий высокую вероятность обнаружения очага возгорания на ранней стадии в присутствии источников внешних оптических помех и нечувствительность к наличию пыли в промежуточной среде. Принцип основан на измерении потока теплового излучения в трёх диапазонах спектра, вычислении двух спектральных отношений, на основе которых принимается решение о наличии или отсутствии очага возгорания в поле зрения ОЭП.

2) Для оптической системы предложенного ОЭП двух спектральных отношений разработана математическая модель, позволяющая выполнять энергетический и геометрический расчёты по заданному отношению сигнал-шум и значению углового поля с учётом параметров очага возгорания, источников помех и промежуточной среды. Математическая модель реализована в виде совокупности компьютерных программ. В результате компьютерного моделирования были определены рабочие спектральные диапазоны каналов прибора, конструктивные параметры компонентов оптической системы и их взаимное расположение, что позволило выбрать конкретные оптические компоненты.

3) Проведено исследование спроектированного и изготовленного ОЭП двух спектральных отношений в лабораторных условиях, для чего был разработан

стенд для исследования ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания и разработаны следующие методики:

- методика определения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех;
- методика определения вероятности ложного срабатывания;
- методика определения порога чувствительности по температуре;
- методика определения углового поля.

4) Проведены испытания созданного ОЭП двух спектральных отношений в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации. Для проведения испытаний разработана методика определения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех и методика определения времени обнаружения очага возгорания.

5) Проведённые исследования в лабораторных условиях и условиях близких к реальным показали, что разработанный прибор имеет следующие параметры:

- угловое поле, градусы 10 ± 1 ;
- дальность действия, м 10;
- порог чувствительности по температуре, °C 688;
- время обнаружения очага возгорания, мс $2,9 \pm 0,7$;
- вероятность обнаружения очага возгорания в присутствии внешних оптических помех (источник помехи – лампа накаливания) 0,95;
- вероятность ложного срабатывания (источник помехи – лампа накаливания) 0,05.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Трёхканальный оптико-электронный прибор обнаружения очага возгорания на ранней стадии в газодисперсной среде / Н.Ю. Тупикина [и др.] // Ползуновский вестник. – 2012. – № 3/2. – С. 152–157.
2. Лабораторный образец быстродействующего многопорогового прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций во взрывоопасной атмосфере / Е.С. Повернов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 172–178.
3. Тупикина, Н.Ю. Разработка стенда для исследования параметров оптико-электронных приборов обнаружения начальной стадии возгорания / Н.Ю. Тупикина, Е.В. Сыпин // Датчики и системы. – 2013. – № 10 (173). – С. 32–35.
4. Тупикина Н.Ю. Методика расчёта параметров оптической системы трёхканального пирометрического прибора с отдельными объективами каналов // Н.Ю. Тупикина, Е.В. Сыпин, Е.Я. Кулявцев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 1. – С. 36–42.
5. Экспериментальная проверка эксплуатационных параметров оптико-электронного прибора двух спектральных отношений / Н.Ю. Тупикина [и др.] //

Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 4. – С. 66–71.

6. Трёхканальный оптико-электронный прибор двух спектральных отношений / Н.Ю. Тупикина [и др.] // Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 109–113.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

7. Программа поиска оптимальной центральной длины волны и полуширины полосы пропускания светофильтров для пирометра двойного спектрального отношения (разные типы фотоприёмников для каналов) / Н.Ю. Тупикина [и др.] // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2011613733, 2011.

8. Программа поиска оптимальной центральной длины волны и полуширины полосы пропускания светофильтров для пирометра двойного спектрального отношения (один тип фотоприёмника для каналов) / Н.Ю. Тупикина [и др.] // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2011613734, 2011.

9. Программа расчёта выходных сигналов различных фотоприёмников пирометра двойного спектрального отношения с учётом влияния оптических помех / Н.Ю. Тупикина [и др.] // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2011613735, 2011.

10. Управляющая программа микроконтроллера оптико-электронного прибора двух спектральных отношений / Н.Ю. Тупикина [и др.] // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2015662757, 2015.

11. Компьютерная программа управления оптико-электронным прибором двух спектральных отношений / Н.Ю. Тупикина [и др.] // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2015662758, 2015.

Публикации в других научных изданиях

12. Способы повышения достоверности принятия решения оптико-электронным прибором обнаружения очага возгорания на ранней стадии / Н.Ю. Тупикина [и др.] // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – Т. 3. – С. 266–267.

13. Тупикина, Н.Ю. Использование аппаратной и программной избыточности при проектировании оптико-электронного прибора обнаружения очага возгорания / Н.Ю. Тупикина, Е.В. Сыпин // 15-й Юбилейный Международный молодёжный форум «Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке»: сб. материалов форума. – Харьков: ХНУРЭ, 2011. – Т. 2. – С. 300–301.

14. Research of general parameters and characteristics of three-channel pyrometric system / N.Y. Tupikina [etc.] // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2012: conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P. 269–274.

15. Тупикина, Н.Ю. Разработка методики выбора рабочих спектральных диапазонов для трёхканального пирометрического прибора двух спектральных отношений / Н.Ю. Тупикина, Е.В. Сыпин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2012. – № 1. – С. 167–171. – Режим доступа: http://www.s-sibsb.ru/images/articles/2012/1/Section2/44_167-171.pdf.
16. Тупикина, Н.Ю. Оптическая система трёхканального оптико-электронного прибора двух спектральных отношений с отдельными объективами каналов / Н.Ю. Тупикина, Е.В. Сыпин // Южно-Сибирский научный вестник, 2013. – № 1. – С. 104–108. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2013/1/6_25-30.pdf.
17. Tupikina, N.Y. Research of the three-channel optical system with a separate entrance pupils of channels lenses at different arrangements of entrance pupils // N.Y. Tupikina, E.V. Sypin // 15th International Conference of Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: conference proceedings. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2014. – P. 295–300.
18. Development of Testing Technique of Main Parameters for Two Spectral Ratios Optical-Electronic Device / N.Y. Tupikina [etc.] // 16th International Conference of Young Specialist on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU Printing Office, 2015. – P. 359–364.
19. Three-Channel Optical-electronic Device of Two Spectral Ratios // Nadezhda Y. Tupikina [etc.] // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference Proceedings, 2016. – Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016. – P. 352–357.
20. Трёхканальный оптико-электронный прибор двух спектральных отношений / Н.Ю. Тупикина [и др.] // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVII международной научно-технической конференции. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – С. 118–121.

Подписано в печать 12.04.2017 г.

Типография Аквамарин, г. Томск, Московский тракт, 2г

Формат А4/2. Ризография

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 120417/1