

На правах рукописи

Сидоренко Антон Игоревич

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ
ОБНАРУЖЕНИЯ ОЧАГОВ ВОЗГОРАНИЯ И
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ДВУМЕРНЫХ КООРДИНАТ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2015

Работа выполнена в Бийском технологическом институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», на кафедре методов и средств измерений и автоматизации.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Сыпин Евгений Викторович

Официальные оппоненты:

Макуха Владимир Карпович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра электронных приборов, заведующий кафедрой

Титов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, учёный секретарь

Ведущая организация: Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Алтай»

Защита состоится 23 июня 2015 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан 07 мая 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Васендина
Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из наиболее опасных проявлений техногенных катастроф являются пожары и взрывы пылегазовых горючих смесей с воздухом. На промышленных объектах с пожаро- и взрывоопасной средой возможно возникновение аварийных ситуаций с человеческими жертвами, материальными потерями и разрушениями. Наиболее типичным профилактическим мероприятием по взрывозащите потенциально опасных техногенных объектов является обеспечение концентрации опасных веществ ниже предельно допустимого уровня. Однако это не позволяет в полной мере снизить риск возникновения аварии. Системы безопасности, устанавливаемые на данный момент на предприятиях, не способны в должной мере обеспечить защиту от взрывов газов и горючих взвесей, что является причиной нередких техногенных катастроф. Для успешного гашения вспышек на ранней стадии развития взрыва необходимо за очень короткое время (приблизительно 15 мс) заполнить объем охраняемого объекта огнетушащим агентом. При таком подходе скорость выброса огнетушащего агента является опасной для жизни и здоровья персонала, находящегося на территории охраняемой зоны. Одним из методов увеличения эффективности локализации взрыва и уменьшения травмоопасности является применение нескольких взрывоподавляющих устройств меньшего объема, образующих пространственно распределенный взрывоподавляющий барьер. Для управления этим барьером необходима информация о пространственном расположении очага взрыва. Для подавления взрыва необходимо активировать лишь одно взрывоподавляющее устройство из соответствующего барьера. Для обеспечения высокого быстродействия автоматических систем взрывоподавления перспективны оптические методы измерения температуры контролируемого объекта, основанные на законах теплового излучения. При этом, для обеспечения работы оптико-электронного прибора контроля в условиях запыленности, эффективным является использование метода спектрального отношения. Таким образом, разработка оптико-электронных устройств обнаружения очага взрыва в газодисперсных системах и определения его пространственного расположения является актуальной и перспективной задачей для повышения безопасности техногенных объектов.

Цель работы. Разработка и создание помехоустойчивого оптико-электронного прибора контроля (ОЭПК) для обнаружения очага возгорания на начальной стадии методом цветовой пирометрии, способного определять координаты очага в двумерном пространстве.

Задачи исследований:

1. Выполнить аналитический обзор технических средств контроля возгорания в газодисперсных системах.
2. Адаптировать методику энергетического расчета ОЭПК применительно к задачам обнаружения очагов возгорания и разработать его технические решения с использованием оптических затворов.

3. Разработать методики и провести исследования спроектированного ОЭПК в лабораторных условиях, а также оценить значения его основных технических параметров: стабильности чувствительности, помехоустойчивости к оптическим помехам, точности определения координат очага возгорания, быстродействия.

4. Разработать экспериментальную установку для контроля параметров ОЭПК в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, позволяющую дополнительно проводить исследования взрываемости пылегазовоздушных смесей.

5. Разработать методики, провести стендовые испытания спроектированного ОЭПК и определить в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, его технические параметры: время обнаружения очага взрыва, показатель визирования и достоверность обнаружения очага взрыва.

Объект исследования. Очаг возгорания на начальной стадии в газодисперсных системах потенциально опасных техногенных объектов.

Предмет исследования. Оптико-электронный прибор контроля с оптическими затворами, предназначенный для контроля очага возгорания на начальной стадии развития взрыва и определения координат очага в двумерном пространстве.

Методы исследования. Использованы методы цветовой пирометрии, параксиальной оптики, цифровой обработки информации, натурных испытаний, математической статистики и обработки экспериментальных данных.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложен новый принцип построения ОЭПК для обнаружения и контроля очага возгорания, определяющего координаты очага возгорания на ранней стадии в двумерном пространстве с погрешностью не более 8% и быстродействием не более 6 мс.

2. Предложена новая оптическая система ОЭПК для обнаружения очага возгорания включающая полевую диафрагму, что повышает чувствительность и помехоустойчивость прибора при сохранении возможности определения координат очага возгорания в двумерном пространстве.

3. Предложен метод определения двумерных координат источника излучения оптической системой с оптическими затворами, основанный на определении центра тяжести, что обеспечило точность определения координат не хуже 8%.

4. Разработана новая экспериментальная установка, способная воспроизводить взрывы газопылевоздушных смесей различного состава и позволяющая определять технические параметры ОЭПК для обнаружения взрыва в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, а также проводить исследования взрываемости газопылевоздушных смесей с определением параметров очага взрыва и распространения фронта горения.

5. Разработан комплекс методик проведения экспериментальных взрывов и определения технических параметров ОЭПК для обнаружения взрыва.

Практическая значимость состоит в возможности использования полученных технических решений для изготовления быстродействующих оптоэлектронных приборов контроля с возможностью определения координат очага возгорания на ранней стадии, используемых в составе активной системы пожаротушения или взрывоподавления для различных отраслей промышленности, связанных со взрывоопасными средами, с целью создания новых технических средств контроля охраняемого объекта в условиях сильной запыленности.

Ценность предложенных методик экспериментального исследования заключается в возможности их адаптирования для других ОЭПК для обнаружения взрыва. Разработанная экспериментальная установка может быть использована для проведения стендовых испытаний ОЭПК для обнаружения взрыва и автоматических систем локализации взрывов газопылевоздушных смесей в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, а также для исследования взрываемости различных газопылевоздушных смесей с определением необходимых параметров очага взрыва и распространения фронта горения и показателей пожаро-взрывоопасности горючих смесей.

Положения, выдвигаемые на защиту:

1. Комбинированный принцип построения ОЭПК для обнаружения очага возгорания, основанный на методах цветовой пирометрии, с возможностью определения координат очага возгорания на начальной стадии развития в двумерном пространстве при помощи полевой диафрагмы.

2. Оптическая система ОЭПК для обнаружения очага возгорания и определения его координат в двумерном пространстве на основе полевой диафрагмы, выполняющей функции анализатора изображения и представляющей собой матрицу независимо управляемых оптических затворов.

3. Способ определения двумерных координат источника излучения оптической системой с оптическими затворами, включающий математическую обработку с использованием метода центра тяжести для повышения точности определения координат.

4. Экспериментальная установка воспроизводства взрывов газопылевоздушных смесей различного состава, позволяющая определять в условиях эксплуатации, близких к реальным, технические параметры ОЭПК для обнаружения взрыва, а также проводить исследования взрываемости газопылевоздушных смесей с определением параметров очага взрыва и распространения фронта горения.

5. Комплекс методик проведения экспериментальных взрывов и определения технических параметров ОЭПК для обнаружения взрыва в условиях эксплуатации, близких к реальным.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Всероссийской научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» ИАМП-2010, ИАМП-2011, ИАМП-2012 ИАМП-2013, ИАМП-2014 (Бийск), Siberian Russian Student Work-

shops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2010, EDM'2011, EDM'2012, EDM'2013, EDM'2014 (Novosibirsk).

Личный вклад автора заключается в разработке и комплексном экспериментальном исследовании нового оптико-электронного прибора контроля для обнаружения возгорания; в создании новой экспериментальной установки, способной воспроизводить экспериментальные взрывы газопылевоздушных смесей различного состава с возможностью регистрации параметров горения; в разработке комплекса методик для проведения экспериментальных взрывов; в проведении экспериментальных исследований и получении новых экспериментальных данных, характеризующих взрываемость газопылевоздушных смесей, параметры очага взрыва и фронта горения на ранней стадии и функциональные возможности разработанного оптико-электронного прибора контроля с оптическими затворами.

Публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 33 работах: в 4 статьях периодических журналов, рекомендованных ВАК, в 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ, в 25 статьях в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, в методических рекомендациях к выполнению лабораторных работ по курсу «Основы оптико-электронных приборов и систем». Получен патент РФ на изобретение №2536355 «Пирометрический датчик координат очага возгорания с полевой диафрагмой».

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 117 наименований. Общий объем работы составляет 154 страницы машинописного текста, содержит 15 таблиц, 50 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обусловлена необходимость разработки теоретических основ, методов и средств активного взрывоподавления на потенциально опасных производствах и объектах со взрывоопасными газодисперсными средами с целью снижения риска и последствий техногенных катастроф, определены научная новизна и практическая значимость результатов, представлена структура диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор и анализ современных методов и средств обнаружения и локализации взрывов в газодисперсных системах и указаны их недостатки. Обоснована необходимость создания нового оптико-электронного прибора контроля для обнаружения начальной стадии развития взрыва, свободного от недостатков своих аналогов и способного при сохранении высоких значений быстродействия, чувствительности и помехоустойчивости определять координаты очага возгорания в двумерном пространстве на ранней стадии и температуру очага методом спектрального отношения.

Во второй главе приведен расчет и описание разработанного ОЭПК для обнаружения очага взрыва в газодисперсных системах и определения его двумерных координат. Приведено теоретическое и экспериментальное исследование повышения помехоустойчивости оптико-электронных приборов контроля к оптическим помехам методом спектральной селекции.

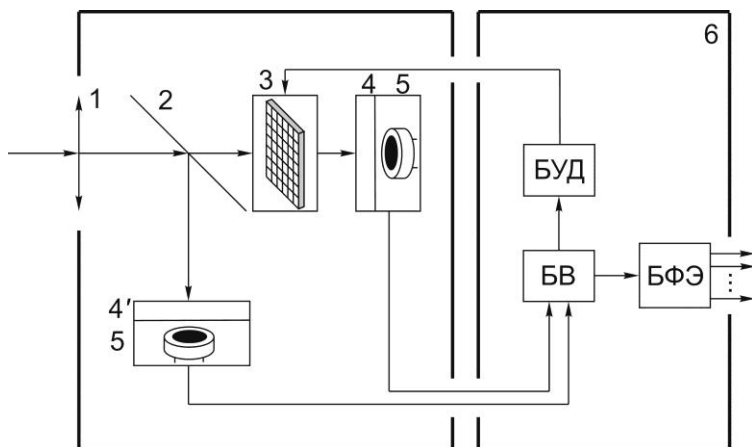
На основе проведенного аналитического обзора разработана структурная схема ОЭПК с оптическими затворами для обнаружения очага возгорания и определения его двумерных координат, представленная на рис. 1. Излучение контролируемой области собирается при помощи объектива 1 и разделяется разделителем светового потока 2 на два потока (оптических канала). Каждый из этих потоков фокусируется на одноэлементных приемниках излучения, одновременно происходит выделение узкого спектра энергии светочувствительными элементами 4 и 4' для обеспечения возможности определения температуры очага возгорания методом спектрального отношения. Определение местоположения очага возгорания в угловом поле прибора (расчет двумерных координат) основано на сканировании области возникновения возгорания с последующей математической обработкой полученных данных.

Сканирование осуществляется при помощи полевой диафрагмы 3, которая выполняет функцию анализатора изображения и конструктивно представляет собой квадратную матрицу независимо управляемых оптических затворов. При поочередном открытии оптических затворов матрицы (сканировании) на фотоприемник поступает излучение определенного участка контролируемой области, соответствующего открытому в данный момент оптическому затвору, местоположение которого в диафрагме однозначно определяет угол смещения источника излучения в угловом поле прибора. Сигналы с фотоприемников подаются в исполнительную схему 6 на блок вычислений, который преобразует их в цифровые значения, выполняет программную фильтрацию помех, вычисляет координаты очага возгорания, вычисляет отношение электрических сигналов с одноэлементных некоординатных приемников излучения и сравнивает полученное отношение с заранее заданным значением для принятия решения о возникновении (или отсутствии) возгорания.

Блок управления диафрагмой осуществляет управление оптическими затворами полевой диафрагмы в соответствии с алгоритмом, заданным блоком вычислений. В случае возникновения возгорания исполнительная схема 6 формирует управляющий сигнал на соответствующее взрывоподавляющее устройство при помощи блока формирования электроимпульсов.

Исходя из проведенных теоретических и экспериментальных исследований, в качестве оптического затвора по совокупности параметров были выбраны жидкокристаллические (ЖК) структуры, построенные на основе двойной π -ячейки. Измеренная спектральная характеристика выбранного ЖК оптического затвора представлена на рис. 2. Максимум пропускания оптического затвора наблюдается

на длине волны $\lambda_{\max} = 940$ нм; максимальный контраст на этой длине волны составляет 32,7%.



1 – объектив; 2 – разделитель светового потока; 3 – полевая диафрагма;
4, 4' – светофильтры; 5 – одноэлементный некоординатный приемник излучения;
6 – исполнительная схема; БУД – блок управления диафрагмой; БВ – блок вычислений;
БФЭ – блок формирования электроимпульсов

Рисунок 1 – Структурная схема прибора

При проектировании прибора использовалась полевая диафрагма, представляющая собой квадратную матрицу из шестнадцати ЖК оптических затворов квадратной формы. С целью определения оптимального взаимного расположения оптических компонентов было проведено исследование работы оптической системы ОЭПК на базе компьютерного моделирования. Критериями оптимальности являлись угловое разрешение, определяющее минимальный угол смещения источника излучения, который может зарегистрировать прибор, и чувствительность прибора.

На рис. 3 представлен ход лучей и взаимное расположение оптических компонентов для оптического канала с полевой диафрагмой, установленной перпендикулярно оптической оси. С помощью полевой диафрагмы поле зрения прибора в пространстве предметов (рис. 4) разбивается на квадратные области, каждая из которых имеет координаты центра (x_i, y_j) , однозначно определяемые расстоянием l до объекта контроля и угловым полем прибора 2ω .

Результатом сканирования является массив напряжений $U[i,j]$, где i – номер затвора по горизонтали; j – номер затвора по вертикали. Для уточнения местоположения очага возгорания внутри определенного участка необходима математическая обработка массива $U[i,j]$, позволяющая учесть значения потоков излучения от всех остальных участков поля зрения прибора.

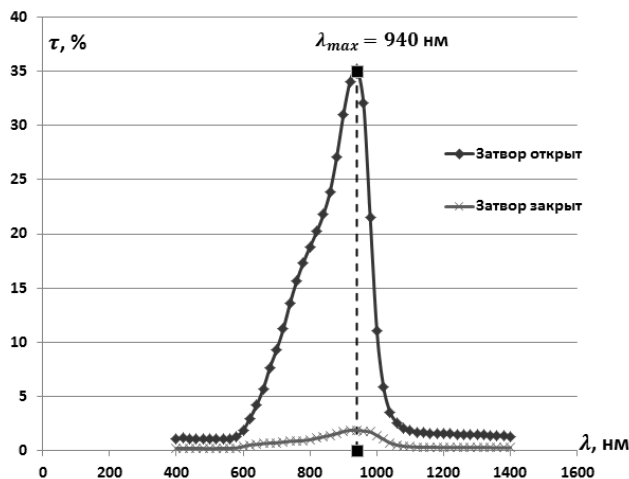


Рисунок 2 – Спектральная характеристика ЖК оптического затвора

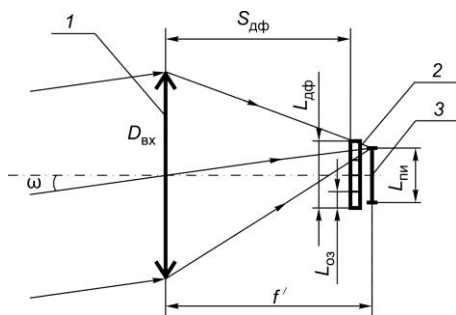
После анализа математических методов повышения точности определения координат очага возгорания было предложено два метода, применимых к поставленной задаче: метод центра тяжести и метод интерполяции многочленом Лагранжа. На основе компьютерного моделирования было установлено, что минимальную погрешность определения координат источника излучения (3%) в более широком диапазоне углового поля зрения оптической системы прибора дает метод центра тяжести. В общем случае «центр тяжести» сигналов рассчитывается по формулам:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{di} U_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_{ij}} ; y_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{dj} U_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_{ij}} ,$$

где x_{di} , y_{dj} – действительные координаты центра участка линейного поля зрения прибора, соответствующего i, j оптическому затвору (рис. 4). Особенности работы жидкокристаллических оптических затворов накладывают ограничение на алгоритм сканирования, заключающееся в том, что повторное открытие затвора возможно только по истечении промежутка времени, составляющего 3,5 мс. Исходя из этого, для обеспечения требования по быстродействию прибора, сканирование должно осуществляться путем поочередного последовательного открытия всех оптических затворов полевой диафрагмы.

Далее было проведено экспериментальное исследование повышения помехоустойчивости к оптическим помехам методом спектральной селекции с целью выбора оптимальных рабочих диапазонов длин волн прибора контроля. Исходными данными для экспериментального исследования были спектральный состав излучения пламени углеводородов, характерных для потенциально охраняемого

объекта, характерные температуры контролируемого объекта и спектральные характеристики источников оптических помех в угольных шахтах.



1 – входная собирающая линза; 2 – диафрагма;
3 – приемник излучения

Рисунок 3 – Ход лучей и взаимное расположение
оптических компонентов для оптического канала с
установленной диафрагмой

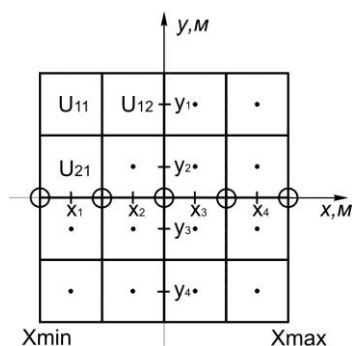


Рисунок 4 – Поле зрения прибора в
пространстве предметов

Выявлено, что при выборе оптимальных рабочих диапазонов длин волн прибора перспективным с точки зрения помехозащищенности является обнаружение линий излучения углекислого газа и паров воды, образующихся при горении метановоздушной смеси: 2,7 и 4,2 мкм. Исходя из спектральной характеристики оптического затвора, фотодиод, установленный в оптическом канале с полевой диафрагмой должен обладать максимумом спектральной чувствительности в окрестности длины волны 0,95 мкм. При проведении экспериментального исследования в качестве оптической помехи использовались галогенная лампа и лампа накаливания; в качестве тестовых очагов пожара – горение пропан-бутановой смеси и тестовый очаг пожара ТП-6 по ГОСТ Р 53325-2012. После обработки экспериментальных данных вычислены отношения выходных сигналов напряжения блоков преобразования для фотодиодов с исследуемыми длинами волн при одинаковых условиях проведения экспериментов. Полученные данные сведены в таблицу 1.

В результате проведения экспериментов выявлено, что значения отношений не зависят от освещенности в плоскости чувствительного элемента фотодиода. Из таблицы видно, что излучение при горении углеводородных смесей можно отличить от излучения источников искусственного освещения при использовании метода спектрального отношения, причем максимальное отличие (примерно в 49,5 раза) наблюдается при использовании фотодиодов с максимумами спектральной чувствительности, соответствующими длинам волн 4,2 и 0,95 мкм, которые и были выбраны в качестве рабочих длин волн прибора контроля.

Таблица 1 – Результаты экспериментального исследования повышения помехоустойчивости прибора

Тип источника излучения	2,7 мкм / 0,95 мкм	4,2 мкм / 0,95 мкм	4,2 мкм / 2,7 мкм
Галогенная лампа	0,94	0,13	0,14
Лампа накаливания	0,6	0,1	0,17
Горение пропан– бутановой смеси	8,17	4,37	0,56
ПП-6	7,71	4,95	0,93

На основе полученных данных был осуществлен энергетический и габаритный расчет оптической системы прибора. Для этого обобщенная методика энергетического расчета оптико-электронных приборов была адаптирована к структурной схеме ОЭПК с оптическими затворами и реальным условиям работы прибора. В качестве основного энергетического уравнения для энергетического расчета использовалось отношение сигнал–шум на выходе прибора, пороговое значение которого согласно ГОСТ 14014-91 принято равным 5. Выходной сигнал прибора определяется следующим выражением:

$$u = k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_0(\lambda) S(\lambda) \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda,$$

где k – коэффициент, учитывающий преобразование сигнала в электронном тракте прибора; $\tau_0(\lambda)$ – спектральная характеристика пропускания оптической системы прибора; $S(\lambda)$ – спектральная характеристика чувствительности приемника излучения; $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – спектральная плотность потока излучения на входном зрачке прибора; λ_1 и λ_2 – длины волн, определяющие спектральный диапазон, в котором спектральная характеристика чувствительности используемого приёмника излучения отлична от нуля.

Для проведения энергетического расчета выбран площадный тип излучателя, при котором спектральная плотность потока излучения на входном зрачке прибора определяется следующим образом:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \varepsilon_T \frac{D^2 \Delta A}{4l^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_c(\lambda) M_{e\lambda}(\lambda) d\lambda,$$

где ε_T – коэффициент излучения; ΔA – видимая площадь излучателя; D – диаметр входного зрачка прибора; l – расстояние от излучателя до входного зрачка прибора; $\tau_c(\lambda)$ – коэффициент пропускания промежуточной оптической среды; $M_{e\lambda}(\lambda)$ – функция Планка. При проведении расчета было принято допущение, что очаг возгорания излучает как абсолютно черное тело. Поглощение в охраняемой зоне обусловлено в основном взвешенными частицами угля с размерами менее 0,25 мкм, поэтому показатель поглощения для расчета коэффициента пропускания оптической среды $\tau_c(\lambda)$ был принят равным 10^{-4} см^{-1} . С учетом спектральных характеристик $S_e(\lambda)$ выбранных фотодиодов рассчитано спектральное распределение плотности выходных сигналов фотодиодов по длине волны:

$$I_{\text{вых}}(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\lambda}(\lambda) S_e(\lambda) \tau_{O_i}(\lambda) d\lambda,$$

где i – номер оптического канала; λ_1 и λ_2 – длины волн, определяющие полуширину спектральной характеристики светофильтра на уровне 50% от максимума.

В результате предварительного энергетического расчета определены значения основных параметров оптической системы ОЭПК с оптическими затворами, при которых обеспечивается требуемое значение отношения сигнал–шум для характерной температуры контролируемого объекта (вспышка метана, 600 °С): диаметр входного зрачка прибора $D_{\text{вх}} \geq 25$ мм; центральные длины волн полосовых светофильтров $\lambda_{C1} = 0,95$ мкм, $\lambda_{C2} = 4,2$ мкм; полуширина характеристики светофильтра на уровне 50% от максимума $\Delta\lambda = 30$ нм. На основании предварительного энергетического расчета был осуществлен габаритный расчет, в результате которого окончательно рассчитаны оптические компоненты и определено их взаимное положение в пространстве. Далее определены коэффициенты пропускания оптической системы для каждого оптического канала в соответствии со следующими выражениями:

$$\tau_{O1}(\lambda) = (1 - \rho_{\text{л}}(\lambda))(1 - \rho_{\text{о.з}}(\lambda)) \cdot \tau_{\text{л}}^{h_{\text{л}}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{о.з}}^{h_{\text{о.з}}}(\lambda) \cdot T_{\text{сф}}(\lambda) \cdot T_{\text{д}}(\lambda);$$

$$\tau_{O2}(\lambda) = (1 - \rho_{\text{л}}(\lambda)) \cdot \tau_{\text{л}}^{h_{\text{л}}}(\lambda) \cdot T_{\text{сф}}(\lambda) \cdot R_{\text{д}}(\lambda),$$

где $\rho_{\text{л}}(\lambda)$ – коэффициент отражения от поверхности раздела сред воздух–линза; $\rho_{\text{о.з}}(\lambda)$ – коэффициент отражения от поверхности раздела сред воздух–оптический затвор; $\tau_{\text{л}}(\lambda)$ – коэффициент пропускания линзы; $h_{\text{л}}$ – толщина линзы, см; $\tau_{\text{о.з}}(\lambda)$ – коэффициент пропускания оптического затвора; $h_{\text{о.з}}$ – толщина оптического затвора, см; $T_{\text{сф}}(\lambda)$ – коэффициент пропускания светофильтра; $T_{\text{д}}(\lambda)$ – коэффициент пропускания разделителя светового потока; $R_{\text{д}}(\lambda)$ – коэффициент отражения разделителя светового потока. По полученным данным проведен окончательный энергетический расчет прибора (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты окончательного энергетического расчета для некоторых значений температуры

Центральная длина волны пропускания фильтра, мкм	0,95				4,2			
Температура, °С	525	550	575	600	525	550	575	600
Напряжение на выходе блока преобразования, В	0,018	0,028	0,033	0,040	0,850	0,943	0,992	1,052
Отношение сигнал–шум	3,96	6,20	7,26	8,80	41,87	46,40	48,80	51,76

На основании габаритного расчета разработана конструктивная схема оптической системы ОЭПК с оптическими затворами. Затем приведено обоснование программно-аппаратного подхода к построению исполнительной схемы, и спроектирована электронная часть прибора на основе микроконтроллера. В конце главы рассчитаны основные технические параметры прибора: нижний предел обна-

ружения по температуре составил 550 °С; быстроедействие $t_s = 4,193$ мс, температурная разрешающая способность $\Delta T_D = 7^\circ\text{C}$.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований разработанного ОЭПК в лабораторных условиях. Предложены следующие методики: методика определения стабильности чувствительности прибора; комплекс методик для исследования помехоустойчивости к оптическим помехам (методика огневых испытаний, методика испытаний на устойчивость к воздействию прямого света, методика огневых испытаний с дополнительным введением оптической помехи); методика оценки точности определения координат очага возгорания; методика оценки быстрогодействия прибора.

При оценке стабильности чувствительности, подразумевающей независимость значения чувствительности ОЭПК от количества срабатываний, был определен коэффициент неустойчивости k по ГОСТ Р 53325-2012, составивший 1,17. При проведении исследований помехоустойчивости использовалась лабораторная установка, конструкция которой представлена на рис. 5. В качестве тестовых очагов при испытаниях использовались последовательно горение пропан-бутановой смеси и тестовый очаг ТП-6 по ГОСТ Р 53325-2012. В качестве оптической помехи использовались лампа накаливания РЗ.75-1+0.5, белый светодиод со световым потоком не менее 50 лм (применяемый в шахтерском светильнике НГР 06-4-003-01), люминесцентная лампа ЛД402 и бытовая лампа накаливания мощностью 40 Вт. Для разных типов оптической помехи проведено 20 огневых испытаний с дополнительным введением оптической помехи. В каждом испытании зафиксировано срабатывание прибора от тестового очага возгорания и нечувствительность прибора к оптической помехе.

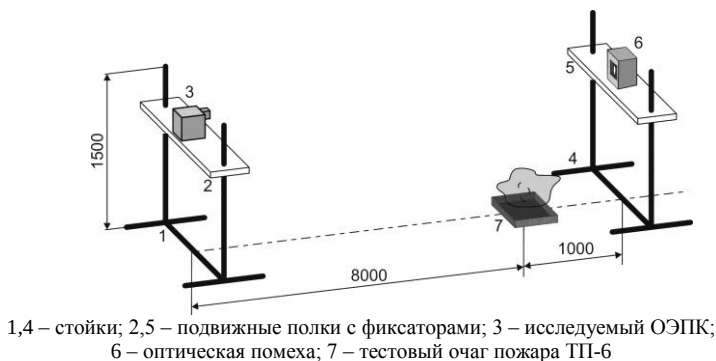


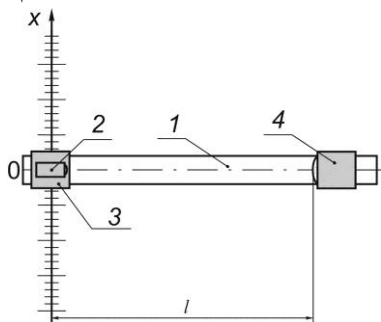
Рисунок 5 – Конструкция лабораторной установки для исследования помехоустойчивости

В результате проведения испытаний на устойчивость к воздействию прямого света (лампы накаливания) был определен максимальный уровень освещенно-

сти, при котором прибор не выдает ложного срабатывания: $\overline{E_v} = (2100 \pm 50)$ лк при доверительной вероятности $P=0,95$.

Для исследования точности определения координат очага возгорания в качестве источника излучения использовался светодиод с центральной длиной волны 0,95 мкм (рис. 6). По результатам экспериментов максимальная приведенная погрешность определения абсциссы и ординаты источника излучения составила 8%, что соответствует абсолютной погрешности 0,255 м на расстоянии 8 м. По результатам проведения серии экспериментов на определение быстродействия прибора время срабатывания составило $\bar{t} = (5,2 \pm 0,1)$ мс при доверительной вероятности $P=0,95$.

В четвертой главе описана разработанная экспериментальная установка для исследования параметров ОЭПК для обнаружения взрыва и для исследования взрываемости газопылевоздушных смесей. Описаны методики проведения экспериментов на разработанной установке и приведены результаты стендовых испытаний разработанного ОЭПК в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации.



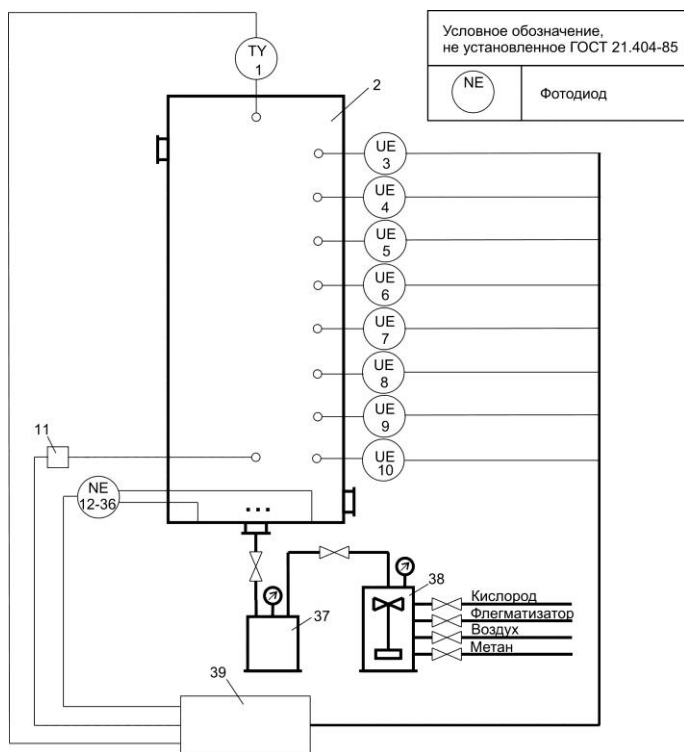
1 – оптическая скамья; 2 – источник излучения; 3 – подвижная платформа; 4 – исследуемый ОЭД

Рисунок 6 – Конструкция лабораторной установки для исследования точности определения координат

Исходя из проведенных теоретических исследований с учетом опыта проведения экспериментальных взрывов на реальном охраняемом объекте, предложена экспериментальная установка, функциональная схема которой представлена на рис. 7. Поджигание газовой смеси осуществляется в нижней части реакционного сосуда, исследуемый ОЭПК устанавливается в верхней части. В зависимости от вида проводимого эксперимента в качестве измерительных датчиков 3–10 могут использоваться датчики температуры или потока излучения. Измерительные датчики 12–36, представляющие собой датчики потока излучения, устанавливаются

в нижней крышке реакционного сосуда и предназначены для определения формы фронта очага взрыва. Для синхронизации работы и последующей обработки информации сигнал с системы воспламенения поступает на блок управления 39. Необходимая рабочая газопылевоздушная смесь подготавливается в смесителе 38, после чего она подается в ресивер 37 для достижения требуемого давления. На основе функциональной схемы разработан комплект рабочей конструкторской документации, на основе которого изготовлен реакционный сосуд экспериментальной установки и автоматизированная измерительная система. Предло-

жены следующие методики: методика сборки экспериментальной установки на месте проведения экспериментов; методика подготовки газопылевоздушной смеси в реакционном объеме экспериментальной установки; методика определения времени обнаружения очага возгорания в условиях, близких к реальным; методика оценки достоверности обнаружения очага возгорания в условиях запыленности и при наличии оптических помех; методика определения показателя визирования. Для получения дополнительной информации при проведении экспериментов использовалась скоростная видеосъемка для визуального наблюдения процесса развития взрыва. Определение обнаружения очага возгорания на установке для проведения экспериментальных взрывов заключается в определении разности между моментом инициации взрыва устройством воспламенения и моментом возникновения импульса на выходе сигнализации о наличии очага возгорания исследуемого ОЭПК.



1 – исследуемый ОЭПК; 2 – реакционный сосуд установки; 3–10, 12–36 – измерительные датчики; 11 – система воспламенения; 7 – ресивер; 38 – смеситель; 39 – блок управления

Рисунок 7 – Функциональная схема экспериментальной установки

В результате анализа скоростной видеосъемки измерены значения диаметра очага взрыва в процессе его развития на ранней стадии. В таблице 3 представле-

ны результаты измерений при различной концентрации угольной пыли в реакционном сосуде экспериментальной установки. В результате проведения экспериментов выявлено, что диаметр очага взрыва, при котором ОЭПК с оптическими затворами устойчиво срабатывает, составляет примерно 170 мм. Максимальная скорость развития взрыва на экспериментальной установке зарегистрирована при концентрации угольной пыли, составляющей 200 г/м³. При этом за время, необходимое ОЭПК с оптическими затворами на выработку выходного сигнала, очаг возгорания увеличивается в диаметре примерно на 30 мм.

Таблица 3 – Диаметр очага взрыва в зависимости от времени развития взрыва и концентрации угольной пыли, мм

Концентрация угольной пыли, г/м ³	Время, мс								Время обнаружения, мс
	5	7,5	10	15	17,5	20	22,5	25	
0	15	30	50	90	105	115	130	145	49±2
100	30	70	120	150	170	180	200	230	22±2
200	40	80	130	170	185	200	230	260	20±2

Определение показателя визирования осуществляется в результате сопоставления времени обнаружения прибором очага взрыва и линейного размера очага, полученного в результате анализа скоростной видеосъемки процесса развития взрыва. Для измерения показателя визирования ОЭПК необходимо определить линейный размер фронта пламени в момент времени, определяемый следующим выражением:

$$t_{\text{обн}} = t_{\text{вых}} - t_{\text{сраб}},$$

где $t_{\text{вых}}$ – момент выработки прибором сигнала об обнаружении возгорания; $t_{\text{сраб}}$ – быстродействие прибора, измеренное в лабораторных условиях. По результатам проведения серии экспериментов показатель визирования прибора составил 1 : 12 при доверительной вероятности 95%. Испытания на достоверность обнаружения очага возгорания проводились при следующих условиях:

- концентрация C₃H₈, % – 4,5–5,5;
- марка угля – ТС;
- концентрация угольной пыли, г/м³ – 35–50;
- дисперсный состав пыли, мкм – 75–100;
- тип воспламенителя – электрическая дуга;
- расстояние от объектива прибора до очага возгорания, м – 1,8;
- тип оптической помехи – лампа для шахтерского фонаря СГД;
- расстояние от объектива прибора до оптической помехи, м – 1,3.

В указанных условиях было проведено 20 испытаний, вероятность обнаружения очага взрыва $P_{\text{обн}}$ составила 90%.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен новый комбинированный принцип построения ОЭПК для обнаружения очага возгорания и определения его координат в двумерном пространстве, а также способ определения координат источника излучения оптической системой с оптическими затворами, включающий математическую обработку с использованием метода центра тяжести для повышения точности определения координат.

2. Адаптирована методика энергетического расчета ОЭПК применительно к задачам обнаружения очагов возгорания. По методике осуществлен расчет, в результате которого получены конструктивные параметры оптической системы прибора и выбрана элементная база оптической системы.

3. Спроектирован и изготовлен ОЭПК для обнаружения очага возгорания со следующими параметрами:

- быстродействие, не более, мс 6;
- погрешность определения абсциссы и ординаты, % 8;
- длина охраняемой зоны, м 8;
- температурная разрешающая способность, °C 7;
- нижний порог обнаружения по температуре, °C 550.

4. Проведено исследование в лабораторных условиях параметров созданного ОЭПК. Для этого в рамках диссертационного исследования разработаны следующие методики:

- оценки стабильности чувствительности ОЭПК;
- исследования помехоустойчивости от оптических помех (методика огневых испытаний, методика испытаний на устойчивость к воздействию прямого света, методика огневых испытаний с дополнительным введением оптической помехи);
- оценки точности определения координат очага возгорания;
- оценки быстродействия.

Проведенные исследования показали соответствие прибора заявленным техническим требованиям и высокую помехоустойчивость к различным оптическим помехам.

5. Разработана и изготовлена новая экспериментальная установка, способная воспроизводить взрывы газопылевоздушных смесей различного состава и позволяющая определять технические параметры ОЭПК для обнаружения взрыва в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, а также проводить исследования взрываемости газопылевоздушных смесей с определением параметров очага взрыва и распространения фронта горения.

6. Проведены стендовые испытания созданного ОЭПК. Для этого в рамках диссертационного исследования разработаны следующие методики:

- определения времени обнаружения очага возгорания;

- определения показателя визирования ОЭПК;
- оценки достоверности обнаружения очага возгорания в условиях запыленности и при наличии оптических помех.

В результате стендовых испытаний установлено, что созданный ОЭПК позволяет обеспечить успешную локализацию очага взрыва на ранней стадии развития с вероятностью обнаружения не менее 90%.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для представления основных научных результатов кандидатской диссертации

1. Сидоренко, А.И. Проектирование лабораторного образца пирометрического датчика с цилиндрическими линзами [Текст] / А.И. Сидоренко [и др.] // Ползуновский вестник. – 2012. – №3/2. – С.93–95.

2. Сидоренко, А.И. Пирометрический датчик с оптическими затворами для определения двухмерных координат очага взрыва [Текст] / А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, Е.Я. Кулявцев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – №1.1. – С. 98–104.

3. Сидоренко, А.И. Установка для экспериментального исследования систем взрывоподавления [Текст] / А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, Д.В. Герасимов // Датчики и системы. – 2013. – №10. – С. 27–31.

4. Сидоренко, А.И. Разработка лабораторного образца пирометрического датчика координат очага возгорания с полевой диафрагмой [Текст] / А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов // Датчики и системы. – 2014. – №1. – С. 48–53.

Патенты на изобретения и свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

5. Программа управления оптико-электронной системой определения трехмерных координат очага взрыва в газодисперсных системах на начальной стадии [Текст] / А.И. Сидоренко [и др.] // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2009612429, 2009.

6. Программа микроконтроллера для опроса фотоприёмников лабораторного учебного стенда по курсу «Основы оптико-электронных приборов и систем» [Текст] / А.И. Сидоренко [и др.] // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2011613886, 2011.

7. Программа обработки данных с экспериментальной установки для проведения взрывов газовых смесей [Текст] / А.И. Сидоренко [и др.] // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2011613887, 2011.

8. Пат. 2536355 Российская Федерация, МПК G 08 В 17/12. Пирометрический датчик координат очага возгорания с полевой диафрагмой [Текст] / Сидоренко А. И. [и др.] заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Алт. гос. тех. ун-т им. И.И.Ползунова. – №2012147669/08 ; заявл. 08.11.12 ; опубл. 20.05.14, Бюл. № 35. – 7 с.: ил.

9. Сидоренко, А.И. Установка для определения параметров горения и взрыва пылеметановоздушных смесей [Текст] / А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин // Радиоэлектроника и молодёжь в XXI веке : 15-й Юбилейный Международный молодёжный форум : сб. материалов форума. – Харьков : Харьковский нац. ун-т радиоэл-ки, 2011. – Т. 2. – С.296–297.

10. Сидоренко, А.И. Прибор для обеспечения пожарной безопасности и взрывозащиты техногенных объектов [Текст] / А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин // Ползуновский альманах. – 2011. – №4/2. – С.126–130.

11. Сидоренко, А.И. Автоматизированная система управления экспериментальной установкой для проведения взрывов пылегазовоздушных смесей [Текст] / А.И. Сидоренко [и др.] // Измерение, контроль, информатизация: материалы XIV международной научно-технической конференции. Том 2 – под. ред. Л.И. Сучковой. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. – С. 110–116.

12. Sidorenko, A.I. Lens means of position pyrometric detector of explosion with optical shutters [Текст] / A.I. Sidorenko, E.V. Sypin, A.N. Pavlov // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM`2012 : Conference proceedings. – Novosibirsk: Новосиб. гос. тех. ун-т, 2012. – P.249–252.

13. Сидоренко, А.И. Оптическая система координатного пирометрического датчика обнаружения очага возгорания с оптическими затворами [Электронный ресурс] / А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов // Южно-Сибирский научный вестник : сетевое издание – 2012. – № 2. – С. 161–164. – URL: http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/40_161-164.pdf.

14. Sidorenko, A.I. Laboratory pattern of position pyrometric detector of explosion with field stop [Текст] / A.I. Sidorenko, E.V. Sypin, A.N. Pavlov // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM`2013: Conference proceedings. – Novosibirsk: Новосиб. гос. тех. ун-т, 2013. – P. 229–233.

15. Сидоренко, А.И. Методы повышения точности определения координат пирометрическим датчиком с полевой диафрагмой [Электронный ресурс] / А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов // Южно-Сибирский научный вестник : сетевое издание – 2013. – № 2. – С. 112–116. – URL: http://s-sibsb.ru/images/articles/2013/2/25_112-116.pdf.

Подписано в печать 14.04.2015 г.
Формат А4/2. Ризография
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 11/04-15
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050, г. Томск, пр. Ленина 34а