

На правах рукописи



Лисаков Сергей Анатольевич

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ МНОГОТОЧЕЧНАЯ ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ И
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2020

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Павлов Андрей Николаевич

**Официальные
оппоненты:**

Лобода Егор Леонидович, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий кафедрой физической и вычислительной механики.

Павленко Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук» (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, главный научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов.

Защита состоится 22 сентября 2020 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 502.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу г. Томск, ул. Белинского, 53а и на сайте: <http://dis.tpu.ru/>

Автореферат разослан 15 июля 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Шевелева Елена
Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Существует множество техногенных объектов, связанных с применением взрывчатых и легковоспламеняющихся веществ или с возможным возникновением горючих сред (например, объекты нефтегазовой и угольной промышленности). Обеспечение безопасности таких объектов, в большинстве случаев, осуществляется с помощью автоматических комплексов противопожарной защиты и взрывоподавления.

При этом эффективное взрывоподавление достигается только при локализации взрыва на начальной стадии пламенного горения за счет высокого быстродействия автоматического комплекса в целом, не превышающего 50 мс. Учитывая, что время срабатывания устройств взрывоподавления составляет 35 мс, быстродействие системы контроля пламени не должно превышать 15 мс. Это требование, как правило, выполняется благодаря использованию в качестве технических средств контроля наличия пламени оптико-электронных приборов. В соответствии с ГОСТ 54777-2011, с точки зрения контроля, под пламенем понимается зона горения газопылевоздушных смесей с видимым излучением, имеющая эквивалентный диаметр не менее 0,5 м.

Дополнительное повышение эффективности автоматических комплексов взрывоподавления и, как следствие, увеличение безопасности техногенного объекта может быть достигнуто в случае, если система контроля будет способна не только быстро обнаружить наличие пламени, но и определить его пространственное расположение. При этом благодаря точечной локализации отдельным взрывоподавляющим устройством меньшего объема, осуществляется рациональное использование огнетушащего агента и сохраняется возможность локализации вторичных возгораний. Кроме того, такая организация локализации пламени является более безопасной для персонала.

На практике при разработке систем контроля наличия пламени недостаточно внимания уделяется необходимости обнаружения пламени и определения его трехмерных координат по всему объему охраняемого объекта и возможности адаптации системы под сложную геометрическую конфигурацию помещения. Следовательно, отдельные участки помещения могут остаться незащищенными, что приводит к несвоевременному обнаружению пламенного горения и снижению уровня безопасности техногенного объекта.

Исходя из вышесказанного, актуальной и перспективной задачей является разработка оптико-электронной системы (ОЭС) контроля пламени на взрыво- и пожароопасных техногенных объектах, удовлетворяющей следующим требованиям: возможность обнаружения пламени во всем объеме охраняемого объекта сложной геометрической формы; высокое быстродействие (менее 15 мс); устойчивость к воздействию оптических помех от источников освещения; возможность определения трёхмерных координат пламени для эффективной локализации горения по месту возникновения.

Степень разработанности темы. Существенный вклад в изучение вопросов пожаровзрывобезопасности объектов нефтегазовой промышленности внесли такие ученые, как Абросимов А.А., Водяник В.И., Бесчастнов М.В., Корольченко А.Я. и

другие. Их работы касаются совершенствования подходов к управлению пожаровзрывобезопасностью, исследования причин возникновения пожаров и взрывов при переработке углеводородов. Проблемы взрывозащиты угольных шахт представлены в работах Айруни А.Т., Нецепляева М.И., Шевцова Н.Р., Мамаева В.И. и других учёных, работы которых внесли существенный вклад в изучение прогнозирования причин и условий возникновения взрывов, характера их протекания, разработку и оценку эффективности способов предотвращения и локализации взрывов. В настоящее время работы в области промышленной безопасности и разработки средств обеспечения пожаровзрывобезопасности нефтегазовых и угледобывающих предприятий ведутся в АО «НЦ ВостНИИ» (г. Кемерово), АО «НИИ «Гириконд» (г. Санкт-Петербург), АО «Межведомственная комиссия по взрывному делу» и др. Анализ известных методов и средств обнаружения и локализации взрывов показал необходимость разработки ОЭС контроля пламени, сочетающей в себе высокое быстродействие, возможность определения пространственных координат пламени, возможность адаптации под охраняемый объект сложной геометрической формы.

Целью работы является разработка принципа построения и создание быстродействующей многоточечной оптико-электронной системы контроля для обнаружения и определения координат пламени в охраняемом техногенном объекте сложной геометрической формы.

Задачи исследований.

1. Разработать принцип построения быстродействующей многоточечной ОЭС контроля пламени и определения его пространственных координат.
2. Предложить метод определения пространственных координат пламени по значениям выходных сигналов некоординатных оптико-электронных датчиков (НОЭД), входящих в состав ОЭС.
3. Создать способ адаптации ОЭС под помещения сложной геометрической формы.
4. Выработать техническое решение быстродействующей многоточечной ОЭС и входящих в ее состав НОЭД на основе разработанного принципа построения и метода определения пространственных координат пламени.
5. Разработать методики и провести экспериментальные исследования спроектированной ОЭС в лабораторных условиях и условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, и определить значения ее основных технических параметров.

Объект исследования. Пламенное горение на потенциально опасном техногенном объекте сложной геометрической формы.

Предмет исследования. Быстродействующая многоточечная ОЭС контроля пламени и определения его пространственных координат во всем объеме охраняемого техногенного объекта сложной геометрической формы.

Методы исследования. В рамках выполнения диссертационного исследования использовались методы регрессионного анализа данных, численные методы поиска экстремумов функции, поисковые методы оптимального проектирования. Исследование применимости принципов и методов, положенных в основу работы ОЭС, выполнялось на базе математического моделирования. При обработке результатов измерений применялись методы математической статистики.

Научная новизна работы.

1. Предложен новый принцип построения быстродействующей многоточечной ОЭС контроля пламени, основанный на совместной регистрации оптического излучения некоординатными оптико-электронными датчиками, количество, месторасположение и пространственная ориентация которых определяются геометрической формой внутреннего объема охраняемого техногенного объекта и требуемой точностью определения пространственных координат пламени.

2. Разработан метод определения координат пламени многоточечной ОЭС в условиях запыленности атмосферы охраняемого объекта, основанный на априорном получении (с учетом параметров охраняемого объекта, количества, месторасположения и пространственной ориентации датчиков) функции полиномиальной регрессии, связывающей значения выходных сигналов датчиков и координаты пламени, и применении полученной функции в процессе работы ОЭС для расчета координат пламени.

3. Предложен способ адаптации ОЭС контроля пламени под геометрические параметры охраняемого объекта, основанный на определении оптимальных параметров системы – количества некоординатных оптико-электронных датчиков, их пространственного расположения и ориентации – за счет использования численных методов минимизации целевой функции, полученной на базе математического моделирования ОЭС, и обеспечивающий заданную погрешность определения координат пламени.

4. Впервые создана экспериментальная методика нахождения погрешности определения пространственных координат пламени многоточечной ОЭС, основанная на размещении тестовых очагов различного типа в реперных точках объемного испытательного стенда, имитирующего реальное охраняемое пространство, позволяющая установить влияние расположения зоны горения на точность контроля.

Практическая значимость

1. Выявлены оптимальные спектральные диапазоны контроля пламени углеводородовоздушных смесей (1,6 – 3,8 мкм и 2,6 – 4,7 мкм) и оптических помех от излучения ламп накаливания (0,78 – 1,1 мкм) и нагретых тел (3,88 – 3,92 мкм).

2. Разработан, с учетом выявленных спектральных диапазонов, принцип построения НОЭД, обеспечивающего исключение оптических помех в виде фоновой освещенности от ламп накаливания до 600 лк и излучения тел, нагретых до 350 °С, за счет использования компенсационного метода подавления оптических помех.

3. Разработано программное обеспечение, позволяющее определять количество, месторасположение и пространственную ориентацию НОЭД (на основе задаваемых геометрических параметров охраняемого объема, концентрации и дисперсного состава пыли в промежуточной среде) для построения многоточечной ОЭС обнаружения пламени с требуемой точностью определения пространственных координат пламени (не ниже 15 % согласно требованиям, предъявляемым к аналогичным системам) (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018610282 от 09.01.2018).

4. Разработанная методология построения многоточечной ОЭС контроля пламени может использоваться при проектировании быстродействующих автоматических комплексов взрывоподавления для увеличения безопасности техногенных объектов с пожаровзрывоопасными средами.

5. Разработан объемный измерительный стенд, обеспечивающий практическую реализацию созданной экспериментальной методики нахождения погрешности определения пространственных координат пламени многоточечной ОЭС.

Положения, выдвигаемые на защиту.

1. Принцип построения быстродействующей многоточечной ОЭС контроля наличия пламени на основе совокупности некоординатных оптико-электронных датчиков, расположенных специальным образом на охраняемом техногенном объекте, обеспечивающий высокое быстродействие (менее 15 мс) и требуемую приведенную погрешность определения координат пламени (не более 15 %) при наличии запыленной атмосферы и оптических помех.

2. Метод определения пространственных координат пламени, основанный на получении функции полиномиальной регрессии выходных сигналов НОЭД.

3. Способ адаптации ОЭС под охраняемый объект сложной геометрической формы и реализующий его программный комплекс для обеспечения контроля наличия пламени и определения его пространственных координат с заданной погрешностью по всему объему охраняемого техногенного объекта.

4. Методика исследования погрешности определения пространственных координат пламени ОЭС в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации.

Достоверность полученных результатов работы обеспечивается корректностью постановки задач, их строгой физической обоснованностью, логической взаимосвязью полученных экспериментальных данных, применением современной измерительной техники и общепринятых методов обработки результатов. Достоверность подтверждается непротиворечивостью и воспроизводимостью результатов, удовлетворительным совпадением результатов экспериментов и расчетов.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (г. Бийск, 2012 – 2014 гг., 2017 и 2018 гг.), International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (г. Новосибирск, 2012 – 2018 гг.), на XIV международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация» ИКИ-2013 (г. Барнаул), международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» АППМИМ-2016 (г. Воронеж). Результаты исследований представлялись на IV Международной выставке «Измерение, мир, человек – 2014» (г. Барнаул, золотая медаль выставки).

Личный вклад автора. Автором лично получены основные результаты, которые заключаются в формировании принципа построения быстродействующей многоточечной ОЭС контроля пламени и ее адаптации под охраняемый объект сложной формы, разработке оптимального метода определения пространственных координат пламени на базе создания математической модели объекта контроля, планировании и проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке полученных данных, написании статей на основе полученных результатов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 40 научных работах, в том числе в 9 статьях журналов из перечня ВАК, в 13 статьях в

международной базе цитирования Scopus, в 11 статьях в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, в 7 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

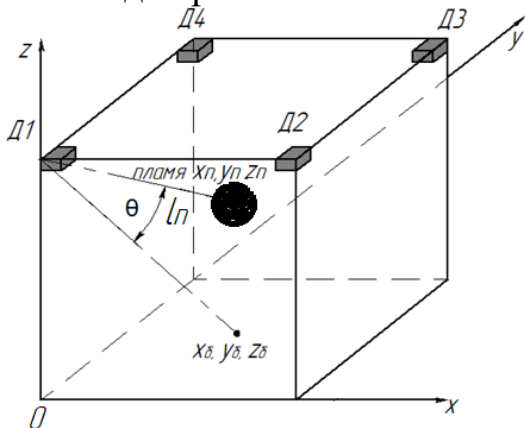
Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 112 наименований. Диссертационная работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 10 таблиц, 45 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, указан личный вклад автора.

В первой главе представлен обзор и анализ пожаровзрывоопасности техногенных объектов, проанализированы известные методы и средства обнаружения и локализации горения. Обоснована необходимость создания новой быстродействующей многоточечной ОЭС, способной обнаружить пламенное горение во всем объеме охраняемого техногенного объекта сложной геометрической формы и определить пространственные координаты пламени для его эффективной локализации по месту возникновения.

Вторая глава посвящена разработке принципа построения быстродействующей многоточечной ОЭС обнаружения пламени и определения его пространственных координат. Приведен анализ предложенных методов определения пространственных координат пламени и выбран оптимальный. Описан способ адаптации ОЭС под охраняемый объект сложной геометрической формы.



$Д_1...Д_4$ – НОЭД; $x_б, y_б, z_б$ – координаты точки базиса;

$x_п, y_п, z_п$ – координаты пламени

Рисунок 1 – Иллюстрация расположения НОЭД для простейшего охраняемого объекта

Принцип построения ОЭС предполагает организацию совокупности объединенных в единую систему некоординатных оптико-электронных датчиков, расположенных специальным образом в пространстве охраняемого объекта (рисунок 1) и совместно регистрирующих излучение. Некоординатные датчики (НОЭД) способны только зафиксировать уровень освещенности в собственной зоне обнаружения, но не могут самостоятельно измерять координаты.

Расположение НОЭД и ориентация их оптических осей должна обеспечивать пересечение зон обнаружения НОЭД так, чтобы общая зона обнаружения ОЭС перекрывала весь объем охраняемого помещения. Ориентация НОЭД задается нормалью-базисом – вектором,

перпендикулярным чувствительной площадке фотоприемника, начало которого соответствует точке с пространственными координатами НОЭД, а конец соответствует точке базиса в плоскости пола охраняемого помещения.

Каждый НОЭД регистрирует излучение пламени внутри охраняемой зоны. Изменение выходного сигнала НОЭД в зависимости от расположения пламени определяется законом обратных квадратов, законом Ламберта и законом Бугера. Принимая допущение, что зона пламенного горения является изотермической по объему и имеет форму шара, выходной сигнал НОЭД можно рассчитать по формуле:

$$U_d = \frac{\cos\theta}{l_n^2} \cdot r^2 \cdot K \cdot \Delta A \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_I(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) \cdot M_{\text{есф}}(\lambda) d\lambda = \frac{\cos\theta}{l_n^2} \cdot C_d \quad (1)$$

где θ – угол между нормалью-базисом и прямой, соединяющей центр чувствительной площадки фотоприемника с центром зоны горения, град; l_n – расстояние от площадки фотоприемника ΔA до центра огненного шара, м; r – радиус шара, м; K – коэффициент преобразования сигнала в электронном тракте, В/А; ΔA – площадь чувствительной площадки фотоприемника, м²; λ – длина волны, м; $\lambda_1 \dots \lambda_2$ – спектральный диапазон, в котором происходит прием излучения фотоприемником; $S_I(\lambda)$ – спектральная токовая чувствительность фотоприёмника, А/Вт; $\tau_c(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания промежуточной среды; $M_{\text{есф}}(\lambda)$ – спектральная энергетическая светимость огненного шара, Вт/м².

В случае однородной промежуточной среды коэффициент

$$C_d = r^2 \cdot K \cdot \Delta A \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_I(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) \cdot M_{\text{есф}}(\lambda) d\lambda$$

практически не зависит от пространственного расположения пламени и определяется параметрами пламени, промежуточной среды и фотодиода. Поскольку НОЭД по своим параметрам являются идентичными, и параметры пламени не изменяются за время опроса всех НОЭД, то для воздушной промежуточной среды можно принять, что значения коэффициентов для всех НОЭД приблизительно равны $C_{d1} \approx C_{d2} \approx \dots \approx C_{dM}$. Откуда отношение выходных сигналов двух НОЭД может быть представлено в виде простого выражения:

$$R_1 = \frac{U_{d1}}{U_{d2}} = \frac{C_{d1} \cdot l_{n2}^2 \cdot \cos\theta_1}{C_{d2} \cdot l_{n1}^2 \cdot \cos\theta_2} \approx \frac{l_{n2}^2 \cdot \cos\theta_1}{l_{n1}^2 \cdot \cos\theta_2}.$$

Таким образом, задача расчета координат пламени может быть сведена к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} x_n = f_1(R_1, R_2, \dots, R_S); \\ y_n = f_2(R_1, R_2, \dots, R_S); \\ z_n = f_3(R_1, R_2, \dots, R_S), \end{cases} \quad (2)$$

где x_n, y_n, z_n – координаты пламени, м; $R_1, R_2, \dots, R_S$ – отношения выходных сигналов НОЭД; S – количество отношений сигналов НОЭД.

Для определения трех неизвестных координат источника излучения путем решения системы уравнений (2) необходимо составить минимум три отношения сигналов НОЭД и использовать минимум четыре НОЭД. Предложены следующие методы решения задачи определения пространственных координат пламени: 1) метод многофакторной полиномиальной регрессии; 2) метод регрессии нейронными сетями; 3) численные методы решения нелинейных уравнений.

При использовании методов регрессии полиномами и нейронными сетями решается задача по установлению функциональных связей f_1, f_2, f_3 между факторами – отношениями выходных сигналов НОЭД $R_1, R_2, \dots, R_S$ – и зависящими от них величинами – координатами пламени x_n, y_n, z_n .

Для метода многофакторной полиномиальной регрессии дальнейшая задача заключается в расчете коэффициентов полиномиальных функций регрессии f_1, f_2, f_3 методом наименьших квадратов:

$$f(R_1, R_2, \dots, R_S) = b_0 + \sum_{i=1}^S b_i R_i + \sum_{i=1}^S \sum_{j=i}^S b_{ij} R_i R_j + \dots,$$

где b_i и b_{ij} – коэффициенты функций регрессии.

При выполнении задачи нахождения неизвестных функции f_1, f_2, f_3 методом регрессии нейронными сетями на вход нейронной сети подаются отношения выходных сигналов НОЭД, при этом количество нейронов во входном слое определяется числом отношений S . Пройдя через все слои нейронной сети, входные сигналы преобразуются в координаты пламени x_n, y_n, z_n , т.е. выходной слой состоит из трех нейронов. При этом используется полносвязная нейронная сеть без обратных связей (двухслойный персептрон), обучаемая алгоритмом обратного распространения ошибки. В результате обучения определяются весовые коэффициенты входных сигналов нейронов, соответствующие минимальному среднеквадратичному отклонению текущего выхода (расчетных координат пламени) и желаемого выхода (действительных координат размещения пламени). Количество нейронов в скрытом слое и вид активационной функции нейронных сетей определялись в результате исследования набора нейронных сетей путем их сравнения по точности расчета координат пламени.

Задача определения координат пламени может также решаться с использованием численных методов решения систем нелинейных уравнений. Например, приняв за базовый первый НОЭД для системы из четырех датчиков, можно составить систему нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{U_{д1}}{U_{д2}} - \frac{l_{п2}^2 \cdot \cos \theta_1}{l_{п1}^2 \cdot \cos \theta_2} = 0; \\ \frac{U_{д1}}{U_{д3}} - \frac{l_{п3}^2 \cdot \cos \theta_1}{l_{п1}^2 \cdot \cos \theta_3} = 0; \\ \frac{U_{д1}}{U_{д4}} - \frac{l_{п4}^2 \cdot \cos \theta_1}{l_{п1}^2 \cdot \cos \theta_4} = 0, \end{cases}$$

для решения которой можно использовать метод Ньютона. При этом для расчета начальных приближений используется комплексный подход, заключающийся как в учете физических соображений (законов освещенности), так и методов математического анализа.

С целью определения оптимального метода для реализации ОЭС проведено исследование методов расчета пространственных координат пламени на базе компьютерного моделирования выходных сигналов НОЭД для простейшего охраняемого объекта. При этом точки контроля (НОЭД) располагались на виртуальном охраняемом объекте в виде прямоугольного параллелепипеда с габаритными размерами $6 \times 6 \times 5$ м в соответствии с тремя предложенными вариантами (рисунок 2):

1) три из четырех НОЭД располагаются в углах охраняемого помещения на высоте, равной высоте помещения, и один НОЭД располагается в центре потолка помещения;

2) четыре из пяти НОЭД располагаются в углах охраняемого помещения на высоте, равной не более 0,9 высоты помещения, и один НОЭД располагается в центре потолка помещения;

3) четыре из пяти НОЭД располагаются в углах охраняемого помещения на высоте, равной высоте помещения, и один НОЭД располагается в центре потолка помещения.

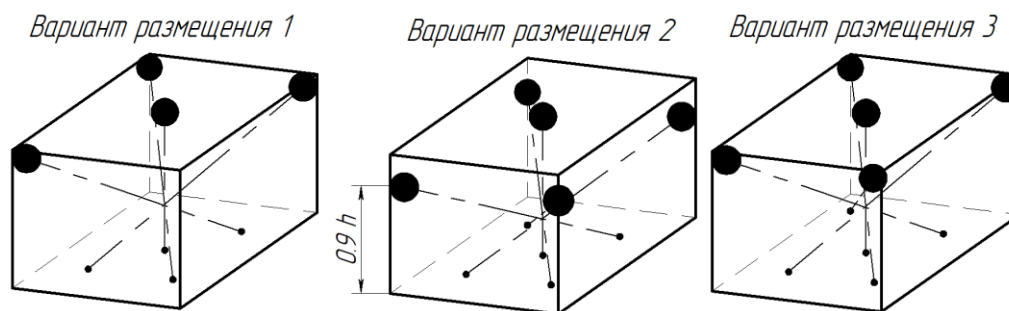


Рисунок 2 – Способы расположения НОЭД на простейшем охраняемом объекте

Во всех вариантах НОЭД, расположенные в углах, имеют угол обзора не менее 90° , и их оптические оси наклонены к плоскости пола помещения. Для НОЭД, располагаемого на потолке, вектор нормали базиса направлен перпендикулярно плоскости пола охраняемого помещения, и угол обзора составляет не менее 100° . Введение пятого НОЭД во втором и третьем варианте размещения является аппаратной избыточностью для повышения точности определения координат пламени.

Методика исследования методов расчета координат пламени сводится к определению максимальной приведенной погрешности определения расположения пламени по осям $\gamma_{x\max}$, $\gamma_{y\max}$, $\gamma_{z\max}$ для разных вариантов размещения НОЭД и разных коэффициентов пропускания промежуточной среды. При этом при изменении коэффициента пропускания промежуточной среды для расчетов используются коэффициенты полиномиальных функций и весовые коэффициенты нейронной сети, полученные без учета влияния запыленности (т.е. коэффициенты не пересчитываются).

Для методов регрессии с введением в систему дополнительного пятого НОЭД погрешность определения координат для всех вариантов расположений НОЭД снижается в 1,5 раза по сравнению с вариантом из четырех НОЭД. Введение рассогласования по высоте (вариант расположения № 2) несущественно влияет на погрешность определения координат. Для прозрачной промежуточной среды метод Ньютона показал лучшую точность, однако при наличии запылённой среды данный метод неприменим из-за большой погрешности. Наименьшее влияние пропускания среды на погрешность определения координат пламени получено для 3-го варианта расположения при выполнении регрессии 5-ти факторным полиномом 3-й степени. При этом максимальная погрешность определения координат x и y составила 17,7 %; для z -координаты – 20 %. То есть использование данной конфигурации системы приемлемо в условиях запыленности или задымленности атмосферы охраняемого объекта.

Методы регрессии полиномами и нейронными сетями являются менее вычислительно затратными по сравнению с методом Ньютона. Это обусловлено тем, что коэффициенты полиномиальной функции регрессии и весовые коэффициенты нейронной сети определяются заранее, а затем используются для расчета координат пламени. Метод Ньютона предполагает выполнение итерационных вычислений при решении системы нелинейных уравнений. При этом число итераций для

нахождения решения заранее неизвестно, что не обеспечивает расчет координат пламени за гарантированное время. При получении функций регрессии метод полинома требует меньше времени, по сравнению с нейронными сетями, связанными с выполнением многократных процедур обучения для достижения требуемой точности регрессии.

Таким образом, для простого охраняемого объекта в форме параллелепипеда оптимальным методом определения пространственных координат пламени является метод полиномиальной регрессии с использованием варианта расположения № 3 из 5 НОЭД на одной высоте.

Адаптация системы под охраняемый объект произвольной геометрической формы заключается в определении требуемого количества НОЭД (точек контроля) и их расположения с целью обеспечения определения пространственных координат пламени во всем охраняемом объеме с требуемой точностью.

Блок схема алгоритма адаптации системы представлена на рисунке 3.

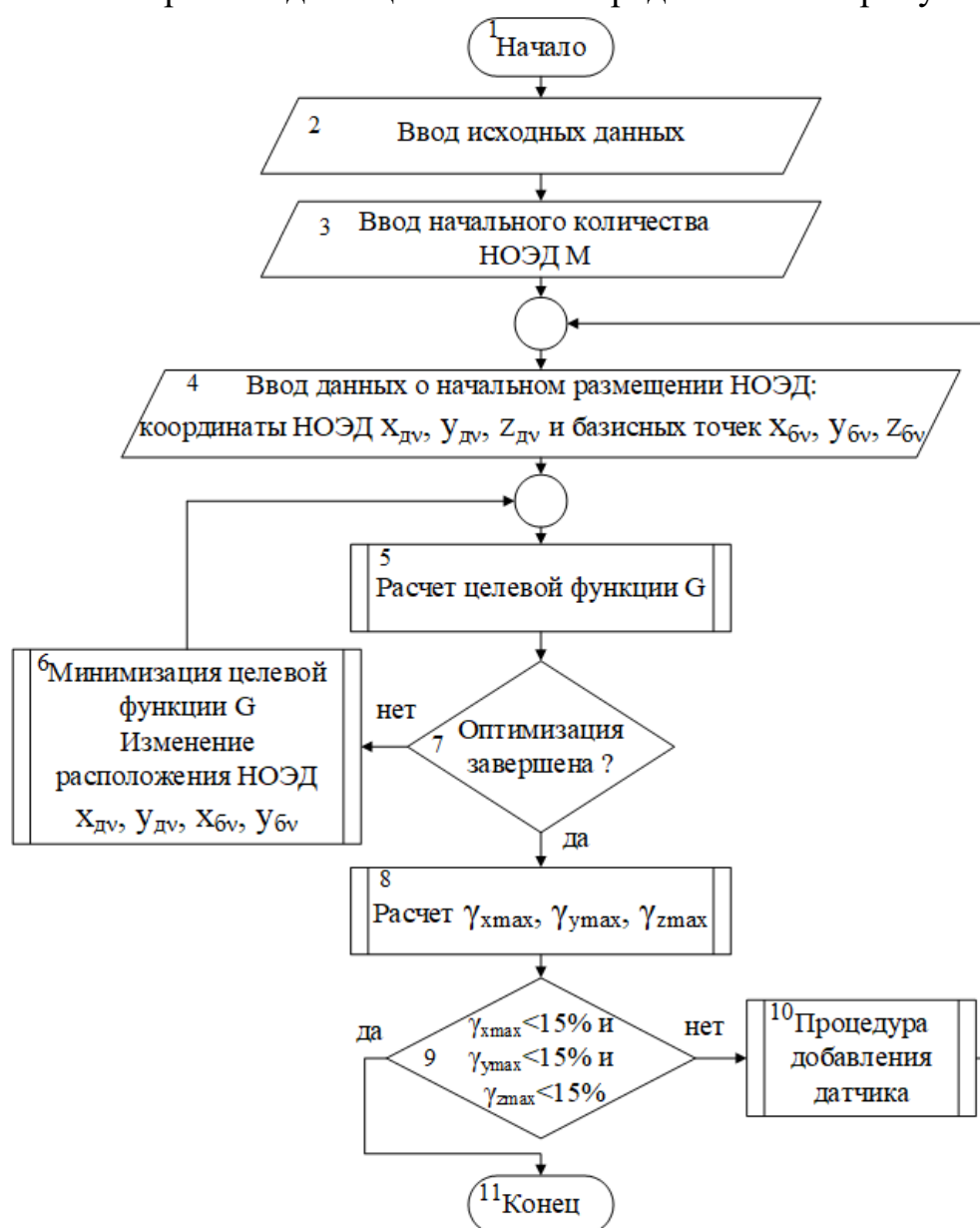


Рисунок 3 – Блок схема алгоритма адаптации ОЭС

В блоке 2 выполняется формирование исходных данных:

- 1) ввод параметров и характеристик для моделирования пламенного горения (диаметр огненного шара, спектральный коэффициент поглощения продуктов горения, температура), промежуточной среды (спектральный коэффициент поглощения угольной пыли, массовая концентрация пыли, средняя удельная поверхность пыли), НОЭД (спектральная токовая чувствительность фотоприёмника, площадь чувствительной площадки фотоприемника, коэффициент преобразования сигнала в электронном тракте);
- 2) ввод исходных данных о геометрии охраняемого объекта;
- 3) задание точек размещения пламени, равномерно распределенных на охраняемом объекте.

В блоке 3 осуществляется ввод начального минимального числа НОЭД M . В блоке 4 реализуется ввод данных о начальном размещении НОЭД путем задания координат НОЭД и координат их базисных точек.

В блоке 5 выполняется расчет целевой функции. Аргументами целевой функции G являются пространственные координаты НОЭД $D_v(x_{dv}; y_{dv}; z_{dv})$ и координаты их базисных точек $B_v(x_{bv}; y_{bv}; z_{bv})$: $G = f(D_1, B_1, \dots, D_M, B_M)$. Значение целевой функции рассчитывается на базе компьютерной модели как среднее значение по погрешностям определения абсциссы $\overline{y_x}$, ординаты $\overline{y_y}$ и аппликаты $\overline{y_z}$ пламени:

$$G = \frac{\overline{y_x} + \overline{y_y} + \overline{y_z}}{3}.$$

При этом каждая из величин $\overline{y_x}$, $\overline{y_y}$, $\overline{y_z}$ является средней погрешностью определения соответствующей координаты в каждой точке размещения пламени.

В блоке 6 выполняется решение задачи многомерной оптимизации (минимизации целевой функции) на базе метода покоординатного спуска или градиентного метода с дроблением шага. Изменение аргументов целевой функции, определяющих расположение и ориентацию НОЭД, при минимизации выполняется в соответствии со следующим подходом, исходя из практических соображений:

- изменение расположения НОЭД производится в плоскости потолка помещения ($z_d = z_{\max} = \text{const}$);
- изменение расположения базисных точек выполняется в плоскости пола помещения ($z_b = z_{\min} = \text{const}$);
- изменение расположения всех НОЭД и их базисных точек производится последовательно сначала для первого НОЭД и его базисной точки, затем для второго НОЭД и т.д.

Блок 7 определяет условия завершения оптимизации. Далее в блоках 8 и 9 выполняется проверка соответствия результатов минимизации целевой функции требуемой погрешности определения координат пламени (не более 15 %) во всех точках охраняемого объекта. В случае превышения требуемого значения погрешности принимается решение об изменении конфигурации системы путем введения дополнительного НОЭД (блок 10) в область охраняемого объема с наибольшей погрешностью определения координат.

Для проверки алгоритма адаптации ОЭС, в качестве тестовых объектов выбраны три прямоугольных сопряжения выработок угольных шахт с поперечным сечением 3×3 м: прямое пересечение, прямое ответвление, примыкание выработок

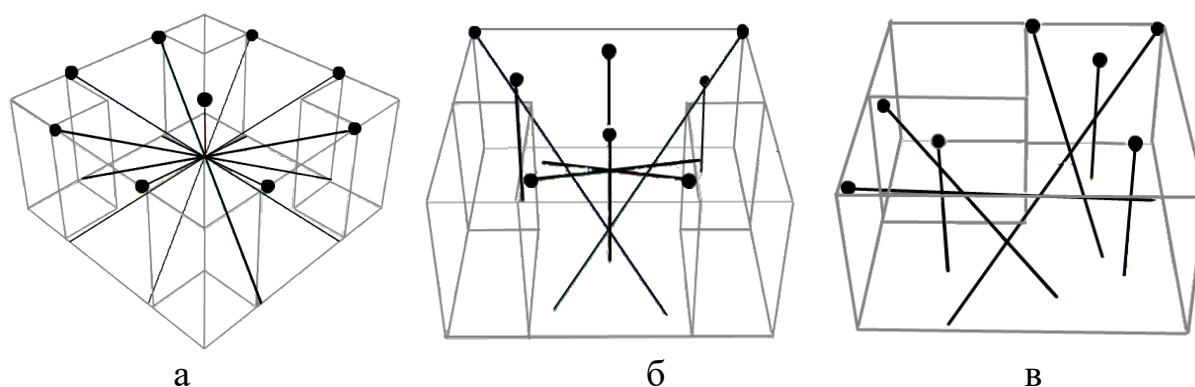
под прямым углом (рисунок 4). В таблице 1 приведены результаты адаптации ОЭС под тестовые объекты.

Таблица 1 – Результаты адаптации ОЭС под тестовые объекты

Вид охраняемого объекта	Количество НОЭД	Метод оптимизации целевой функции	Степень полинома для регрессии	$\gamma_{x\max}, \%$	$\gamma_{y\max}, \%$	$\gamma_{z\max}, \%$
Прямое пересечение	9	Градиентный метод с дроблением шага	4	10,6	7,8	1
Прямое ответвление	8	Метод покоординатного спуска	4	7,1	5,9	4,2
Примыкание выработок под прямым углом	7	Метод покоординатного спуска	4	12,4	13,5	9,5

Требуемые значения погрешности определения координат пламени достигаются для сопряжения в виде прямого пересечения при использовании 9-ти НОЭД, для сопряжения в виде прямого ответвления – 8-ми НОЭД, для сопряжения в виде примыкания выработки под прямым углом – 7-ми НОЭД. Приемлемая погрешность определения координат достигается при использовании полиномов 4 порядка. Выбор метода оптимизации несущественно влияет на итоговую погрешность определения координат.

Полученные в результате адаптации схемы размещения НОЭД показаны на рисунке 4. Сферами обозначены точки размещения НОЭД. Отрезки показывают пространственную ориентацию оптических осей НОЭД.



а – прямое пересечение (9 НОЭД); б – прямое ответвление (8 НОЭД);
в – примыкание выработок под прямым углом (7 НОЭД)

Рисунок 4 – Схемы размещения НОЭД в сопряжениях угольных шахт

Третья глава посвящена разработке технического решения быстродействующей многоточечной ОЭС. Система содержит некоординатные оптико-электронные датчики ($\text{НОЭД}_1, \text{НОЭД}_2, \dots, \text{НОЭД}_N$), блок обработки данных, блок управления устройствами пожаротушения, объединенные сетью передачи данных (рисунки 5 и 6).

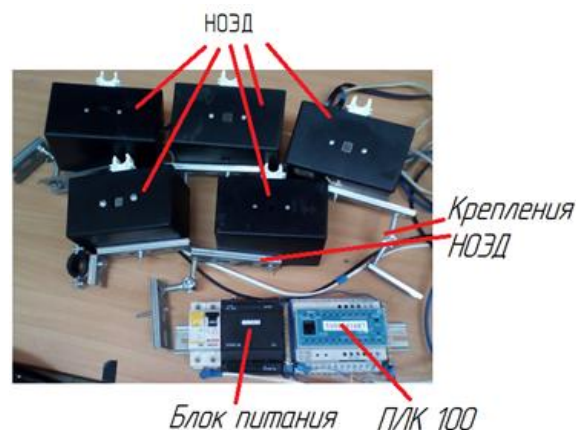
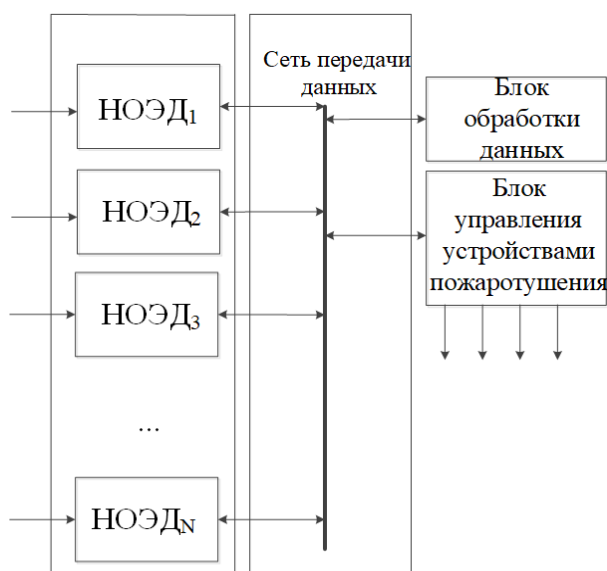


Рисунок 5 – Структурная схема ОЭС Рисунок 6 – Лабораторный образец ОЭС

НОЭД, размещённые на охраняемом объекте, регистрируют поток оптического излучения и преобразуют его в электрический сигнал. Сигналы с НОЭД в цифровом виде передаются через высокоскоростную сеть передачи данных на блок обработки данных, который выполняет обработку полученной измерительной информации и, в случае превышения значений выходных сигналов НОЭД порога срабатывания, принимает решение о наличии пламени. Затем вычисляются координаты в соответствии с заданным алгоритмом, и формируется команда активации для блока управления устройствами пожаротушения.

Ключевыми элементами системы являются НОЭД, определяющие надежность срабатывания, помехозащищенность и быстродействие системы в целом и должны удовлетворять определенным требованиям. На рынке подобные датчики не встречаются, поэтому НОЭД разрабатывались отдельно.

Для обеспечения помехоустойчивости в НОЭД используется компенсационный метод подавления оптических помех, сущность которого заключается в том, что НОЭД принимает оптическое излучение с помощью минимум двух селективных приемников в различных спектральных диапазонах. Спектральный диапазон для первого приемника соответствует типичному спектру излучения цели (излучение пламени), а для второго приемника – типичному спектру излучения оптической помехи. При дальнейшей обработке сигнал второго приемника вычитается из сигнала первого приемника.

После анализа спектральных характеристик излучения пламени и основных источников оптических помех (лампа накаливания, нагретое тело) были определены оптимальные спектральные диапазоны контроля и подобраны соответствующие фотодиоды НОЭД. Оптические помехи в виде излучения светодиодных и люминесцентных ламп полностью исключаются выбором рабочих диапазонов длин волн в инфракрасной области спектра.

Для контроля оптического излучения пламени используются два фотодиода ФЭ722 и ФЭ724 с максимальной спектральной чувствительностью на длинах волн 2,6 и 4,2 мкм. Контроль излучения от тепловых помех выполняется фотодиодом

ФЭ724 с центральной длиной волны 3,9 мкм. Контроль излучения оптических помех в виде ламп накаливания осуществляется с помощью фотодиода BPW34F с максимумом спектральной чувствительности на длине волны 0,95 мкм. При этом для исключения ложных срабатываний при модуляции излучения лампы накаливания светонепроницаемой перегородкой, используются 2 фотодиода BPW34F, расположенных на одной линии с фотодиодом контроля излучения пламени. Таким образом, для обеспечения помехоустойчивости НОЭД включает пять фотодиодов.

Для обеспечения максимального угла обзора НОЭД чувствительные элементы фотодиодов расположены в одной плоскости так, чтобы центры соседних фотодиодов образовывали равносторонний треугольник. Фотодиоды касаются друг друга, и их чувствительные элементы направлены на пламя, оптические оси каналов параллельны (рисунок 7).

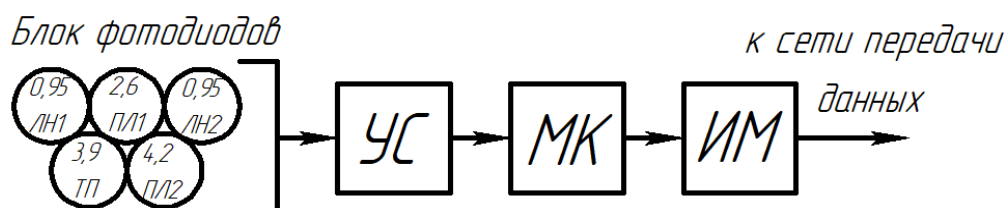


Рисунок 7 – Структурная схема НОЭД

Излучение контролируемой области через светофильтры поступает на фотодиоды. Токовые сигналы с фотодиодов преобразуются в напряжение и усиливаются с помощью усилителей (УС), а затем поступают на входы аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера (МК). Микроконтроллер преобразует сигналы с усилителей в цифровой код, выполняет обработку сигналов с учетом компенсационного метода подавления оптических помех и принимает решение о возникновении (или отсутствии) пламени. В случае возникновения пламени, данные о значении выходного сигнала $U_{\text{вых}}$, характеризующего излучение пламени, передаются через интерфейсный модуль (ИМ), подключенный к сети передачи данных.

Обработка сигналов с учетом компенсационного метода подавления оптических помех включает:

1) расчет сигнала цели $\Delta_1 = U_{\text{пл1}} - U_{\text{лн}}$ при компенсации сигнала оптической помехи в виде излучения лампы накаливания $U_{\text{лн}}$ для канала $U_{\text{пл1}}$, где

$$U_{\text{лн}} = \begin{cases} U_{\text{лн1}}, & \text{если } U_{\text{лн1}} \geq U_{\text{лн2}} \\ U_{\text{лн2}}, & \text{если } U_{\text{лн1}} < U_{\text{лн2}} \end{cases},$$

т.е. в качестве сигнала оптической помехи от лампы накаливания фиксируется максимальное из двух сигналов $U_{\text{лн1}}$ и $U_{\text{лн2}}$. Это позволяет исключить ложные срабатывания НОЭД при модуляции излучения от лампы накаливания.

2) расчет сигнала цели Δ_2 при компенсации сигнала тепловой помехи $U_{\text{ТП}}$ для сигнала цели Δ_1 , который принимается в качестве выходного сигнала НОЭД:

$$\Delta_2 = U_{\text{вых}} = \Delta_1 - U_{\text{ТП}}.$$

3) расчет сигнала цели Δ_3 при компенсации сигнала тепловой помехи $U_{\text{ТП}}$ для канала $U_{\text{пл2}}$:

$$\Delta_3 = U_{\text{пл2}} - U_{\text{ТП}}.$$

Возникновение пламени определяется превышением значений сигналов цели Δ_2 и Δ_3 порога срабатывания $U_{\text{пор}}$, при котором значение сигнал-шум равен 10.

В результате анализа устройств, представленных на рынке, для реализации НОЭД выбран микроконтроллер АТМega8 фирмы ATMEL, удовлетворяющий требованиям быстродействия, наличия встроенного АЦП и необходимых портов ввода-вывода. Для реализации блока обработки данных экспериментального образца системы был выбран программируемый логический контроллер ПЛК100 фирмы ОВЕН, имеющий в своем составе интерфейс RS-485 со скоростью обмена данными 115200 бит/с, что удовлетворяет требованиям к сети передачи данных (рисунок 6).

В четвертой главе приведены методики и результаты экспериментального исследования лабораторного образца ОЭС в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, и определены значения ее основных технических параметров: быстродействия, точности определения пространственных координат пламени, размеров охраняемой зоны, помехоустойчивости к оптическим помехам.

Размеры охраняемой зоны и помехоустойчивость ОЭС определяются исключительно параметрами отдельного НОЭД такими как: расстояние обнаружения возгорания; угол обзора; максимальное значение фоновой освещенности, создаваемое лампой накаливания и максимальное значение температуры оптической помехи в виде излучения от нагретого тела, при которых НОЭД сохраняет работоспособность и не выдает ложное срабатывание.

Исследование расстояния обнаружения очага пожара НОЭД проводилось путем определения максимального расстояния до тестового очага пожара (ТП-5 или ТП-6 по ГОСТ 53325-2012), при котором происходит устойчивое срабатывание НОЭД. В результате расстояние обнаружения для тестового очага пожара ТП-5 составило 17 м, для ТП-6 – 12 м.

Определение угла обзора проводилось путем получения диаграммы чувствительности НОЭД (рисунок 8), в соответствии с которой угол обзора составляет 90°, что удовлетворяет установленным требованиям.

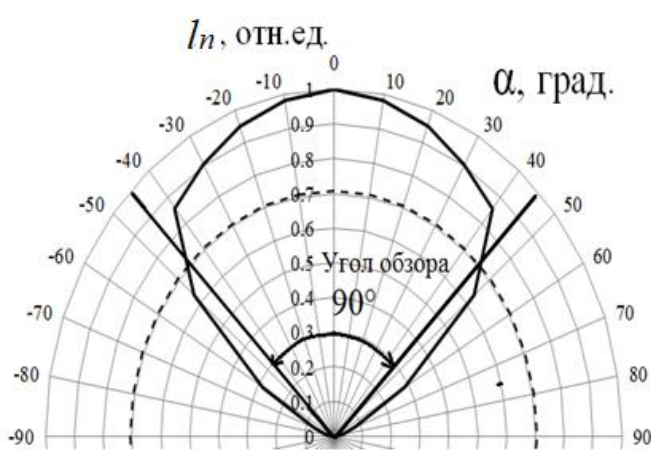


Рисунок 8 – Диаграмма чувствительности НОЭД

Исследование помехоустойчивости НОЭД проводилось для оптических помех в виде излучения ламп накаливания и нагретых тел как при одновременном воздействии полезного сигнала (излучения пропановой горелки), так и при его отсутствии. При этом измерялись сигналы каждого канала и рассчитывались значения целевых сигналов Δ_2 и Δ_3 .

При выполнении исследования воздействия излучения лампы накаливания мощностью 60 Вт создавалась освещенность в плоскости чувствительных элементов НОЭД в диапазоне от 50 лк до 600

лк с шагом 50 лк путем изменения расстояния между источником излучения и НОЭД. Результаты исследования при одновременном воздействии излучения лампы накаливания и пламени показаны на рисунке 9.

При выполнении исследования воздействия излучения нагретого тела в качестве источника излучения использовалась модель абсолютно черного тела

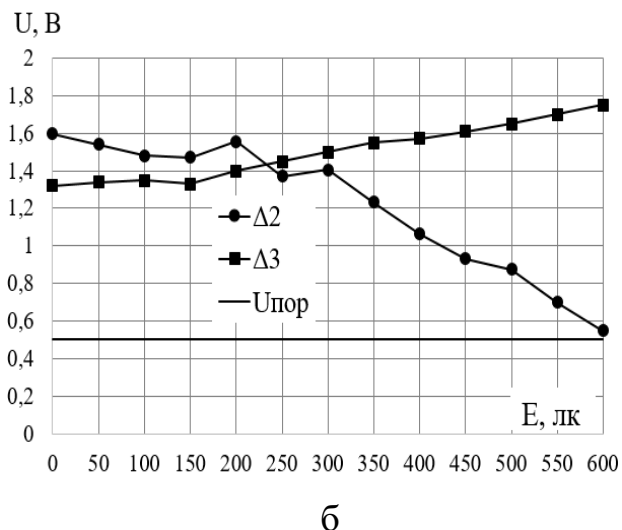
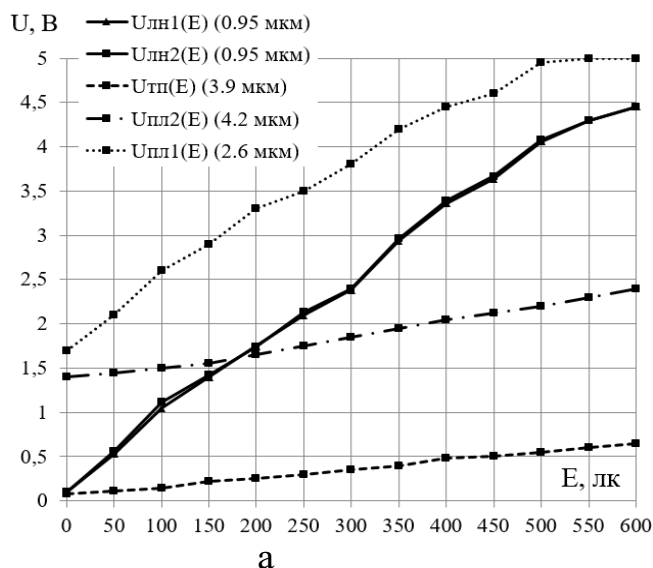


Рисунок 9 – Зависимости сигналов с фотодиодов НОЭД (а) и целевых сигналов $\Delta 2$ и $\Delta 3$ (б) от освещенности, создаваемой лампой накаливания

АЧТ- 45/100/1000, которая устанавливалась на расстоянии 1 м от НОЭД и выводилась на значение температуры от 100 °С до 400 °С с шагом 50 °С (рисунок 10).

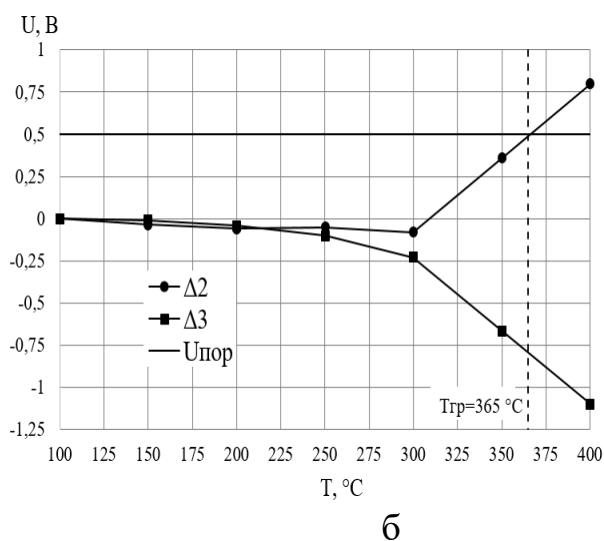
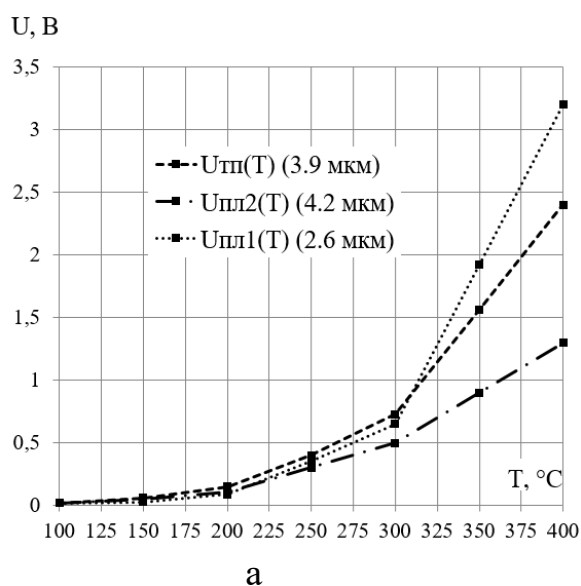


Рисунок 10 – Зависимости сигналов с фотодиодов НОЭД (а) и целевых сигналов $\Delta 2$ и $\Delta 3$ (б) от температуры нагретого тела (при отсутствии пламени)

В результате исследования помехоустойчивости НОЭД определены следующие параметры, при которых НОЭД сохраняет работоспособность и не выдает ложное извещение: максимальное значение фоновой освещенности, создаваемой лампой накаливания $E_{лн.макс}=600$ лк; максимальное значение температуры оптической помехи в виде излучения от нагретого тела $T_{тп.макс}=365$ °С.

Быстродействие ОЭС оценивалось путем измерения временного интервала между появлением быстропротекающего горения в зоне обнаружения ОЭС и моментом выдачи ОЭС сигнала запуска устройств пожаротушения на специальной экспериментальной установке, представляющей собой реакционный сосуд для про-

ведения взрывов пылегазовоздушных смесей с установленным лабораторным образцом ОЭС и автоматизированной измерительной системой. В результате проведения исследования установлено, что быстродействие ОЭС составляет 14 ± 1 мс и удовлетворяет установленным требованиям – не более 30 мс.

Для исследования погрешности определения пространственных координат пламени разработана новая методика, основанная на организации объемного испытательного стенда со специально размещенными тестовыми очагами пожара различного типа (ТП-5 и ТП-6 по ГОСТ 53325-2012), что позволило провести экспериментальное исследование лабораторного образца ОЭС контроля наличия пламени в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации (рисунок 11).

Объемный испытательный стенд реализован в специальном помещении с габаритными размерами ($l=11$ м, $s=7$, $h=3,85$) и климатическими условиями, соответствующими ГОСТ 53325-2012. Стены, пол и потолок помещения обеспечивают минимальное отражение излучения тестовых очагов.

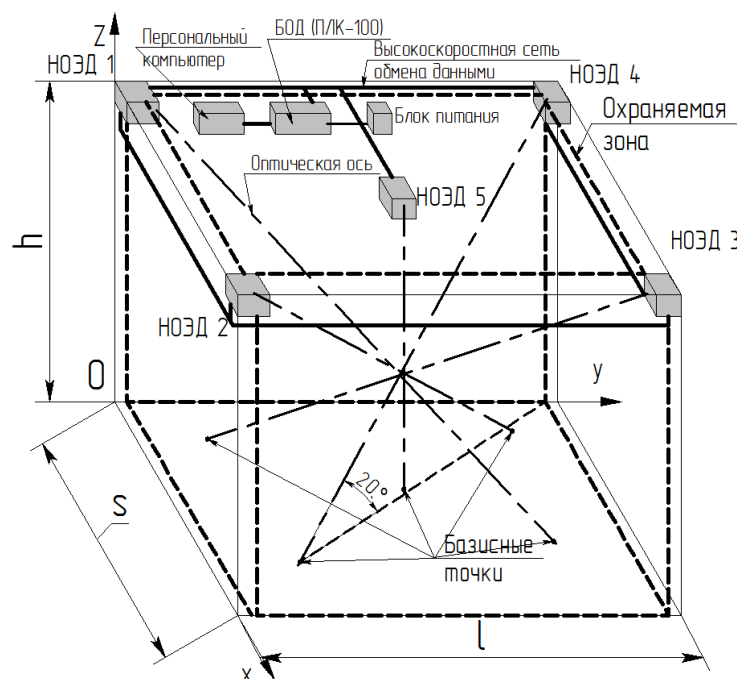


Рисунок 11 – Схема стенда для исследования погрешности определения координат пламени

Методика исследования погрешности включает следующие действия:

- 1) ОЭС разместить в соответствии со схемой, представленной на рисунке 11;
- 2) определить пространственные координаты НОЭД с помощью измерительных инструментов;
- 3) ориентировать оптические оси НОЭД в заданные базисные точки с помощью лазерного указателя;
- 4) определить диапазон измерения абсциссы x , ординаты y и аппликаты z пламени, исходя из данных о координатах НОЭД и габаритных размерах помещения;
- 5) рассчитать коэффициенты полиномиальных функций для определения пространственных координат пламени с учетом диапазонов измерения и координат НОЭД в соответствии с методом многофакторной полиномиальной регрессии. Ввести коэффициенты полиномиальных функций в память блока обработки данных;

б) организовать тестовый очаг пожара в точке с заданными пространственными координатами $x_{ТПд}$, $y_{ТПд}$, $z_{ТПд}$;

7) выполнить серию из 100 измерений абсциссы, ординаты и аппликаты тестового очага пожара $x_{ТПр}$, $y_{ТПр}$, $z_{ТПр}$ с помощью лабораторного образца ОЭС;

8) рассчитать выборочные средние значения для абсциссы, ординаты и аппликаты тестового очага пожара $\bar{x}_{ТПр}$, $\bar{y}_{ТПр}$, $\bar{z}_{ТПр}$ и определить доверительный интервал по заданной доверительной вероятности $P=0,95$;

9) рассчитать приведенную погрешность определения координат пламени по каждой из осей.

Результаты экспериментального исследования по оценке погрешности определения координат пламени приведены в таблице 2. Тестовый очаг № 4 расположен в центре помещения, остальные тестовые очаги – в углах помещения. Очаг № 6 поднят на высоту 0,8 м. Тестовые очаги № 1 и 2 расположены в одной точке, но используются различные типы очагов – ТП-5 и ТП-6.

Таблица 2 – Результаты экспериментального исследования

№	Тестовый очаг пожара	Расположение ТП ($x_{ТПд}$; $y_{ТПд}$; $z_{ТПд}$), м	γ_x , %	γ_y , %	γ_z , %
1	ТП-5	В углу (5; 8; 0,3)	15	13	7,3
2	ТП-6	В углу (5; 8; 0,3)	13	10	11,3
3	ТП-6	В углу (1,5; 8; 0,3)	3	11	11,3
4	ТП-6	В центре (3,5; 5; 0,3)	3,6	3	15
5	ТП-6	В углу (4,5; 2,45; 0,3)	5,7	6	5
6	ТП-6	В углу, приподнят (1,5; 4; 0,8)	7,1	5,5	15

В результате исследования установлено, что приведенная погрешность определения координат для тестового очага пожара ТП-5 составила по абсциссе не более 15 %, по ординате не более 13 %, по аппликате не более 8 %. Для тестовых очагов ТП-6 приведенная погрешность составила по абсциссе не более 13 %, по ординате не более 11,3 %, по аппликате не более 15 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Предложен новый принцип построения многоточечной ОЭС контроля пламени на основе совокупности некоординатных оптико-электронных датчиков, расположенных специальным образом на охраняемом техногенном объекте, обеспечивающий возможность обнаружения пламени и определения его пространственных координат по всему объему охраняемого помещения сложной геометрической формы с требуемой точностью и высоким быстродействием.

2) Разработан метод определения пространственных координат пламени, основанный на получении функции полиномиальной регрессии выходных сигналов некоординатных оптико-электронных датчиков, что упрощает процесс вычисления, обеспечивая высокое быстродействие при сохранении требуемой погрешности даже в условиях запыленности атмосферы охраняемого объекта.

3) Предложен способ адаптации ОЭС под охраняемый объект сложной геометрической формы, позволяющий определить оптимальное количество некоординатных оптико-электронных датчиков, их пространственное расположение и ориентацию с помощью численных методов поиска минимума целевой функции для обеспечения контроля наличия пламени и определения его пространственных координат с заданной погрешностью по всему объему охраняемого техногенного объекта.

4) Разработано техническое решение быстродействующей многоточечной ОЭС и НОЭД, входящих в ее состав. Определены оптимальные спектральные диапазоны контроля излучения пламени с учетом применения в НОЭД компенсационного метода подавления оптических помех. Разработан алгоритм функционирования блока обработки данных ОЭС.

5) Разработана новая методика исследования погрешности определения пространственных координат пламени в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, основанная на организации объемного испытательного стенда со специально размещенными тестовыми очагами различного типа, позволяющая установить влияние расположения зоны горения на точность контроля.

6) Проведены экспериментальные исследования спроектированной ОЭС в лабораторных условиях и в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации. В результате определены значения технических параметров системы для ОЭС из четырех НОЭД:

- размеры охраняемой зоны: $8 \times 8 \times 8$ м;
- угол обзора НОЭД: 90° ;
- быстродействие: 14 мс;
- погрешность определения координат пламени, не более 15 %;
- значение фоновой освещенности, создаваемое лампой накаливания, при которой сохраняется работоспособность и не выдается ложное извещение – не более 600 лк;
- значение температуры оптической помехи в виде излучения от нагретого тела, при которой сохраняется работоспособность и не выдается ложное извещение – не более 365°C .

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Лисаков, С.А. Компьютерное моделирование системы определения координат очага взрыва на основе пространственного многоточечного анализа оптического излучения / С.А. Лисаков, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, Кулявцев Е.Я. // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2013. – № 1.1. – С. 88–97.

2. Лисаков, С.А. Определение координат очага взрыва многоточечной оптико-электронной системой на основе метода центра тяжести / С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 77–81.

3. Лисаков, С.А. Определение основных эксплуатационных параметров оптико-электронного датчика многоточечной системы определения пространственного расположения очага возгорания / С.А. Лисаков, Е.В. Сыпин, А.В. Кураев, А.Н. Павлов // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 107–110.

4. Лисаков, С.А. Программно-аппаратный комплекс для управления многоточечной системой определения координат очага возгорания / С.А. Лисаков, Е.В. Сыпин, А.В. Кураев, А.Н. Павлов // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 179–182.

5. Зырянова, М.Н. Применение численного моделирования для решения задачи определения пространственных координат очага возгорания многоточечной оптико-электронной системой / М.Н. Зырянова, С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 1. – С. 43–50.

6. Сидоренко, А.И. Экспериментальное исследование компенсационного метода для повышения помехоустойчивости ОЭП обнаружения взрывов / А.И. Сидоренко, С.А. Лисаков, Сыпин Е.В. // Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 102–108.

7. Лисаков, С.А. Компьютерное моделирование излучения пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития / С.А. Лисаков, А.И. Сидоренко, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 3. – С. 32–41.

8. Лисаков, С.А. Определение оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени при использовании компенсационного метода подавления оптических помех / С.А. Лисаков, А.И. Сидоренко, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов // Ползуновский вестник. – 2016. – №4. – Т.2. – С.116–124.

9. Лисаков, С.А. Определение числа точек контроля и их расположения на охраняемом объекте для быстродействующей многоточечной оптико-электронной системы обнаружения пламени и определения его пространственных координат / С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2017. – № 1. – С. 87–100.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

10. Программа расчета координат очага возгорания многоточечной оптико-электронной системой на базе нейросетевого алгоритма / С.А. Лисаков, А.В. Кураев, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2015662499, 2015.

11. Управляющая программа контроллера лабораторного образца системы определения координат очага возгорания на основе пространственного многоточечного анализа оптического излучения / С.А. Лисаков, А.В. Кураев, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2015662584, 2015.

12. Программа расчета выходных сигналов оптико-электронных датчиков системы определения координат очага возгорания на основе пространственного многоточечного анализа оптического излучения / С.А. Лисаков, А.В. Кураев, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2015662582, 2015.

13. Компьютерная программа для расчета спектральных диапазонов контроля излучения пламени при использовании компенсационного метода подавления оптических помех / С.А. Лисаков, А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, Г.В.

Леонов // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2017612062, 2017.

14. Компьютерная программа для адаптации многоточечной оптико-электронной системы определения пространственных координат пламени под охраняемый объект заданной формы / С.А. Лисаков, Г.В. Леонов, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, А.Ю. Сидоренко, А.И. Кин // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2018610282, 2018.

15. Компьютерная программа для оптимизации расположения датчиков многоточечной оптико-электронной системы на базе градиентного метода / С.А. Лисаков, Г.В. Леонов, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, А.Ю. Сидоренко, А.И. Кин // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2018615380, 2018.

16. Компьютерная программа для оптимизации расположения датчиков многоточечной оптико-электронной системы на базе метода покоординатного спуска / С.А. Лисаков, Г.В. Леонов, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, А.Ю. Сидоренко, А.И. Кин // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2018615378, 2018.

Публикации в международной базе цитирования Scopus

17. Lisakov, S.A. High-speed multipoint electrooptical system of flame detection and determination of its spatial coordinates / S.A. Lisakov, A.N. Pavlov, E.V. Sypin // Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti. – 2019. – Iss. 10. – P. 7–13.

18. Lisakov, S.A. Experimental tests of flame control high-speed multipoint electro-optical system / S.A. Lisakov, A.N. Pavlov, E.V. Sypin // Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti. – 2019. – Iss. 12. – P. 30–36.

19. Application of Neural Networks to Determine the Coordinates of the Seat of Fire by Multipoint Electro-optical System / S.A. Lisakov, E.V. Sypin, A.N. Pavlov // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – P. 265–269.

20. Adaptation of the High-Speed Multipoint Electro-Optical System for Determining of Flame Spatial Coordinates at the Object of the Specified Form / S.A. Lisakov, A.N. Pavlov, E.V. Sypin, G.V. Leonov, A.I. Kin, A.Yu. Sidorenko // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2018: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – P. 403–410.

21. Experimental Study on Verification of the Flame Spatial Coordinates Determining Adequacy by Multipoint Electro-Optical System / A.N. Pavlov, E.V. Sypin, G.V. Leonov, V.A. Shadrin // 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2018: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – P. 433–437.