

Бийский технологический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Павлов Андрей Николаевич

Бийск – 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	13
1.1 Пожаровзрывоопасность промышленных объектов	13
1.1.1 Анализ пожаровзрывоопасности объектов нефтегазовой промышленности.....	13
1.1.2 Анализ пожаровзрывоопасности угольных шахт.....	16
1.1.3 Механизмы образования и распространения волны горения горючей смеси.....	19
1.2 Методы и технические средства обнаружения и локализации взрывов	21
1.2.1 Методы и средства обнаружения и локализации взрывов с высокой инерционностью.....	22
1.2.2 Методы и средства контроля обнаружения и локализации взрывов с высоким быстродействием.....	23
1.2.2.1 Методы и средства обнаружения и локализации взрывов без определения его пространственного расположения	24
1.2.2.2 Методы и средства обнаружения и локализации взрывов с определением его пространственного расположения.....	26
1.3 Выводы по главе 1.....	33
2 РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ МНОГОТОЧЕЧНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ.....	34
2.1 Требования к техническим параметрам разрабатываемой системы	34
2.2 Принцип построения системы	36
2.3 Методы определения координат пламени.....	39
2.3.1 Решение задачи определения координат пламени на основе метода многофакторной полиномиальной регрессии.....	42

2.3.2	Решение задачи определения координат пламени на основе метода регрессии нейронными сетями	44
2.3.3	Решение задачи определения координат пламени с использованием численных методов решения нелинейных уравнений	47
2.4	Сравнение методов определения пространственных координат пламени ...	50
2.4.1	Методика исследования методов определения пространственных координат пламени.....	51
2.4.2	Исходные данные для расчета выходных сигналов НОЭД.....	52
2.4.2.1	Расположение точек контроля на охраняемом объекте.....	54
2.4.3	Исследование методов определения пространственных координат пламени	57
2.5	Адаптация системы под объект заданной формы.....	59
2.5.1	Алгоритм адаптации системы.....	60
2.5.2	Проверка алгоритма адаптации системы для помещений сложной формы	65
2.6	Выводы по главе 2.....	68
3	РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ МНОГОТОЧЕЧНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ...	70
3.1	Разработка структурной схемы системы	70
3.2	Разработка некоординатного оптико-электронного датчика системы.....	71
3.2.1	Применение компенсационного метода подавления оптических помех в оптико-электронном датчике	72
3.2.2	Определение оптимальных спектральных диапазонов контроля для оптико-электронного датчика системы	74
3.2.2.1	Методика определения оптимальных спектральных диапазонов контроля	74
3.2.2.2	Анализ спектральных характеристик излучения пламени и источников оптических помех.....	75

3.2.2.3	Выбор фотоприемников для контроля излучения пламени и оптических помех.....	77
3.2.2.4	Расчет критериев оптимальности для спектральных диапазонов контроля	79
3.2.2.5	Результаты определения оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени.....	82
3.2.3	Структурная схема оптико-электронного датчика системы	84
3.2.4	Алгоритм работы управляющей программы микроконтроллера для оптико-электронного датчика	88
3.3	Высокоскоростная сеть передачи данных между оптико-электронными датчиками и блоком обработки данных	90
3.4	Блок обработки данных системы.....	91
3.5	Выводы по главе 3.....	94
4	ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ МНОГОТОЧЕЧНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ...	95
4.1	Исследование параметров НОЭД.....	96
4.1.1	Расстояние обнаружения тестовых очагов пожара НОЭД	96
4.1.2	Угол обзора НОЭД.....	98
4.1.3	Помехоустойчивость НОЭД к оптическим помехам	101
4.1.3.1	Исследование воздействия оптической помехи в статическом режиме.....	103
4.1.3.2	Исследование помехоустойчивости при одновременном воздействии полезного сигнала и помехи	107
4.1.3.3	Исследование помехоустойчивости при модуляции излучения лампы накаливания	110
4.2	Исследование параметров системы.....	114
4.2.1	Быстродействие системы	114
4.2.1.1	Экспериментальная установка для исследования системы.....	114
4.2.1.2	Методика проведения экспериментального исследования	117

4.2.2 Исследование точности определения пространственных координат пламени	120
4.2.2.1 Экспериментальный стенд для исследования точности	120
4.2.2.2 Методика экспериментального исследования	121
4.2.2.3 Результаты исследования	123
4.3 Выводы по главе 4	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ	143

ВВЕДЕНИЕ

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, разработке и оценке 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 быст-

родействие, 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.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1 Пожаровзрывоопасность промышленных объектов

Современная промышленность насчитывает несколько десятков процессов, являющихся пожаровзрывоопасными, к которым прежде всего относятся: переработка, хранение и транспортировка углеводородного сырья, добыча и переработка угля. Повышение безопасности промышленных объектов может быть достигнуто путем создания систем контроля пламенного горения пожароопасных и взрывоопасных сред. Создание таких систем осуществляется на базе анализа пожаровзрывоопасности промышленных объектов, включающего рассмотрение причин аварий и характера протекания аварийной ситуации. Наиболее опасными по возникновению пожаров (взрывов) являются объекты нефтегазовой и угольной промышленности, на которых высока вероятность воспламенения углеводородо-воздушных смесей.

1.1.1 Анализ пожаровзрывоопасности объектов нефтегазовой промышленности

С развитием нефтегазовой промышленности наблюдается увеличение числа пожаров и взрывов углеводородовоздушных смесей. В мире за год на нефтегазовых предприятиях происходит до 1500 аварий, и аварийность предприятий непрерывно растет. В США за период с 1972 по 2002 гг. число аварий в нефтегазовой отрасли увеличилось в 3 раза, количество человеческих жертв в 6 раз, материальный ущерб в 11 раз [1].

Основными опасностями предприятий являются аварийная загазованность, пожары и взрывы. В общем количестве аварий доля пожаров составляет 58,5 %, взрывов – 15,1 %. Аварийная загазованность составляет 17,9 % [1].

В работе [2] приведены статистические данные об авариях на объектах нефтегазовой промышленности России в период с 1998 по 2007 гг. За анализируемый период всего произошло 662 аварии, половина которых связана с взрывами

и/или пожарами. В нефтяной промышленности доля аварий, сопровождающихся взрывами и пожарами составляет 45 %, при данных авариях погибло 90 % от всех погибших. В газовой промышленности доля аварий, связанных со взрывами и пожарами составляет 53 %, а доля погибших в этих авариях составляет 77 %.

В работе [3] исследовано 150 крупных аварий на нефтегазовых предприятиях России в период с 2003 по 2013 гг. В технологическом оборудовании произошло 56 % взрывов, а в атмосфере 44 % взрывов. Из 150 взрывов 100 произошло в производственных зданиях и 50 – на открытых установках; в 73 случаях происходили разрушения зданий, технологических установок и других объектов.

Основными источниками загазованности нефтегазовых производств является аварийное истечение горючих газов, легковоспламеняющихся жидкостей, залповый выброс горючих газов из поврежденного технологического оборудования. Воспламенение взрывоопасной смеси происходит, как правило, через некоторое время после ее образования [1].

Причинами аварий на нефтегазовых производствах (пожаров и взрывов), связанных с утечками горючей жидкости или углеводородного газа, являются нарушения правил: техники безопасности и пожарной безопасности (33 %); монтажа и ремонта оборудования (22 %); обеспечения молниезащиты (3 %); технологического регламента (1 %). Износ оборудования является причиной 8 % аварий [1]. Источниками воспламенения горючих смесей являются: нагретые поверхности технологического оборудования (36,8 %); открытый огонь (22,8 %); электрическое искрение (8,9 %); сварочные работы (8,8 %); увеличение температуры поверхности оборудования при трении (7,6 %); самовоспламенение смесей (7,5 %) [1].

Мерами, применяемыми для обеспечения безопасности нефтегазовых предприятий, являются: обеспечение надежности работы оборудования для снижения числа аварийных выбросов взрывоопасных веществ; совершенствование технологических процессов и модернизация оборудования; совершенствование систем управления производством, технологическими процессами и пожаровзрывобезопасностью [1].

Согласно работе Абросимова А. А. «Экология переработки углеводородных систем» [1] основными стадиями и характеристиками аварии с выбросом горючих газов являются:

- 1) Выброс пожаровзрывоопасных газов, определяемый характером и ходом их истечения.
- 2) Загазованность помещения (территории) и образование облака топливовоздушной смеси, определяемая массой газа способного воспламениться, местонахождением и формой взрывоопасной зоны.
- 3) Воспламенение, характеризуемое мощностью источника зажигания.
- 4) Взрыв облака, определяемый массой взрывоопасного газа.
- 5) Образование волн давления, характеризуемое избыточным давлением и продолжительностью его существования.
- 6) Разрушение производственных объектов под действием предельных нагрузок и колебаний.

В результате анализа пожаровзрывоопасности объектов нефтегазовой промышленности установлено, что:

- максимальная доля в общем числе аварий приходится на пожары и взрывы углеводородовоздушных смесей, сопровождающиеся гибелью людей и значительным материальным ущербом;
- значительная доля аварий происходит внутри производственных зданий;
- аварии, связанные с пожарами и взрывами, сопровождаются пламенным горением и происходят в основном при воспламенении горючей смеси нагретыми поверхностями оборудования;
- ускорение распространения пламени может привести к возникновению взрыва.

Таким образом, системы пожаровзрывобезопасности нефтегазовых предприятий должны контролировать возникновение пламенного горения углеводородовоздушных смесей на начальной стадии развития до возникновения взрыва внутри производственных зданий.

1.1.2 Анализ пожаровзрывоопасности угольных шахт

Катастрофические последствия имеют аварии в угольных шахтах, связанные с воспламенением метанопылевоздушных смесей [4, 5, 6].

Данные о динамике взрывов газа и пыли в угольных шахтах России за период с 1991 года по 2010 год приведены в источнике [7]. В угольных шахтах произошло 193 взрыва метана и угольной пыли. Среднее число взрывов составляет 9,65 в год. Около 82 % взрывов произошло в шахтах, относящихся к сверхкатегорийным и опасным по выбросу метана, из которых 40 % случились на выемочных участках с крутым падением угольных пластов и 36,3 % имели место на выемочных участках с пологим падением угольных пластов; 3,6 % – взрывов произошли в шахтах, являющихся не опасными и отнесёнными к 1 категории по метану.

В результате анализа установлены основные причины образования взрывоопасных концентраций метана:

- нарушение режима проветривания выработок (47,2 % случаев);
- загазованность в непроветриваемых (изолированных) местах (выработанные пространства, тупиковые выработки) (36,8 % случаев);
- обрушение горных выработок 15 % случаев [7].

К основным источникам воспламенения метановоздушной смеси относятся:

- подземные пожары (35,8 %);
- электрическое искрение (28 %);
- проведение взрывных работ (22,3 %);
- курение людей (8,3 %) [7].

К комплексу мер, применяемых для обеспечения безопасности в угольных шахтах, относятся: выполнение нормативно-организационных требований к обеспечению безопасных атмосферных условий; применение научно-методических руководств при проектировании шахтной вентиляции, автоматизация управления вентиляцией, использование взрывоопасного и искробезопасного электрооборудования; применение систем контроля концентрации метана в шахтной атмосфере.

ре, воспламенений газа и пыли. Несмотря на применяемые меры, количество аварий в угольных шахтах не уменьшается [8, 9].

Возможно два варианта образования в угольных шахтах горючих смесей [8]:

1) образование предварительно перемешанной газовоздушной или газопылевоздушной смеси, которая возникает чаще всего и является наиболее опасной при воспламенениях. Такая смесь образуется при нарушениях режима проветривания горных выработок; самопроизвольных выбросах газа и угля; подземных пожарах; при образовании слоевых скоплений горючего газа. В первых трех случаях взрывоопасная смесь формируется на участках горных выработок большой протяжённости и может сгорать практически мгновенно с образованием мощных ударных волн;

2) образование предварительно неперемешанной горючей газовоздушной системы (встречается редко). Горение происходит в процессе взаимного диффузионного смешивания газа и воздуха [8].

В шахтных условиях возможны три вида горения метановоздушных смесей:

1) медленное взрывное горение на начальной стадии взрыва или при местных вспышках относительно небольшого объема метановоздушной смеси (скорость распространения пламени до 37 м/с);

2) обычный взрыв, при котором непрерывно нарастает скорость распространения пламени под влиянием возрастающего количества выделяемого тепла и увеличивающегося давления. Такое избыточное давление достигает 1 – 4 МПа. Скорость распространения пламени при взрыве составляет 500 – 700 м/с;

3) детонационный взрыв – это химическое превращение (горение) метана, распространяющееся со скоростью ударной волны (от 1500 м/с до 5000 м/с) и поддерживающее ударную волну [8].

Взрывоопасная пылевоздушная смесь формируется [8]:

1) в технологическом процессе при выемке угля, перегрузке и т.д., при отсутствии источника воспламенения;

2) при прохождении ударной волны взрыва над поверхностью отложившейся пыли, в результате пыль переходит во взвешенное состояние.

Воспламенение метана (взрыв, вспышка) чаще всего является источником воспламенения взвешенной угольной пыли [8].

В результате анализа литературы [8, 10, 9] установлен наиболее вероятный сценарий развития аварии в угольной шахте состоящий из 5 этапов. Этапы определялись с учетом статистики о месте возникновения, основных причинах образования взрывоопасных концентраций метана источниках воспламенения.

Этап I. Загазование тупиковой выработки угольной шахты.

Этап II. Воспламенение метановоздушной смеси источником в виде подземного пожара или электрической искры в тупиковой выработке.

Этап III. Начальная стадия развития взрыва, характеризующаяся ламинарным горением метановоздушной смеси и обоснованная следующими условиями:

- наиболее часто (при крупных авариях) сначала происходит вспышка метановоздушной смеси, которая впоследствии переходит во взрыв пылевоздушной смеси.

- горение происходит в форме огненного шара с невозмущенным фронтом пламени и скоростью фронта, не превышающей несколько метров в секунду.

Этап IV. Ускорение фронта горения при его турбулизации на препятствиях. Достижение скорости фронта пламени нескольких сотен метров в секунду и возникновение волн сжатия, а также ударных волн.

Этап V. Переход горения в детонацию с возникновением детонационных волн.

В результате анализа пожаровзрывоопасности угольных шахт установлено следующее:

- аварии, связанные с воспламенением и взрывами горючих смесей, происходят главным образом в горных выработках угольных шахт, и чаще всего причиной загазованности является нарушение работы вентиляции;

- источником воспламенения горючей смеси зачастую являются подземные пожары и электрическое искрение;

– аварии, связанные с пожарами и взрывами, сопровождаются на начальном этапе пламенным горением метановоздушных смесей, пыль воспламеняется впоследствии;

– скорость распространения пламени изменяется в широких пределах, и возможен переход горения в детонацию.

Таким образом, системы обеспечения пожаровзрывобезопасности в выработках угольных шахтах должны быть ориентированы на контроль пламенного горения метановоздушных смесей на ранней стадии развития (до перехода во взрыв).

1.1.3 Механизмы образования и распространения волны горения горючей смеси

Механизмы образования и распространения волны горения горючей смеси, характерные как для аварий на нефтегазовых предприятиях, так и в угольных шахтах, подробно приведены в работах [8, 9]. Выделяют тепловой, цепочный и цепочно-тепловой механизмы.

Большинство взрывов с участием углеводородовоздушных смесей определяются цепочно-тепловым механизмом, при котором развитие реакции с самого начала происходит по цепочному механизму вырожденных разветвлений в зависимости от условия превышения скорости выделения тепла над скоростью теплоотвода. Далее ускорение реакции происходит в основном по тепловому механизму за счет саморазогрева реакционной среды [8, 9]. При этом нормальная скорость горения метановоздушной смеси не превышает 0,27 м/с из-за передачи тепла от слоя к слою с невысокой скоростью за счет молекулярной теплопроводности.

Турбулизирующее влияние шероховатых стен помещения и различных препятствий движению потока вентиляционного воздуха может накладываться на процесс распространения волны горения [8]. Для данного случая механизм передачи тепла определяется турбулентной теплопроводностью и диффузией, а не мо-

лекулярной теплопроводностью. Передача тепла происходит с большей скоростью, что приводит к ускорению пламени. Кроме этого, происходит увеличение скорости пламени под влиянием предварительного нагрева и сжатия метановоздушной смеси волнами сжатия перед фронтом пламени, что в дальнейшем приводит к возникновению ударной волны [8].

Ударная волна движется со сверхзвуковой скоростью, что приводит к увеличению давления, скорости движения и температуры горючей смеси перед фронтом пламени. При определенных условиях (наличие протяженного загазованного участка) интенсивность ударной волны может увеличиться, что может привести к переходу горения в детонацию и возникновению детонационной волны [8, 9].

Воспламенение пылевоздушных смесей отличается от процессов в газозвудушных смесях. При этом механизм распространения пламени в пылевоздушных смесях является подобным механизму горения газозвудушных смесей [8].

При воспламенении угольной пыли происходит быстрый прогрев частиц пыли, при котором выделяются взрывчатые продукты пиролиза, образующие газовую оболочку вокруг частицы. При достижении в этой оболочке концентрации газа взрывоопасных пределов происходит воспламенение пылевоздушной смеси. Тепловое излучение от горячей пылевой частицы передается негорящим частицам, поглощающим излучение и происходит воспламенение новых частиц. Если выделение тепла превышает теплоотвод в окружающую среду, то происходит увеличение температуры и скорости протекания реакции, а горение угольной пыли приобретает лавинообразный характер [8].

Взрывы угольной пыли могут распространяться на значительные расстояния от места возникновения воспламенения, вызывая катастрофические разрушения и групповую гибель шахтеров. Такие взрывы характеризуются участием отложившейся угольной пыли, которая переводится во взвешенное состояние движущейся ударной волной.

Разнообразие причин и сложность механизмов горения газопылевоздушных смесей приводит к разработке множества методов и технических средств об-

наружения и локализации взрывов именно на начальной стадии развития, что позволяет значительно снизить последствия, связанные с травматизмом и гибелью людей, а также с нанесением материального ущерба предприятиям.

К преимуществам борьбы со взрывами на начальной стадии относятся [10] низкие скорости распространения горения и малые размеры зоны горения, что обеспечивает достаточное время для принятия решения о возникновении горения и его локализации средствами пожаротушения (взрывоподавления).

Известные методы и технические средства обнаружения горения углеводородовоздушных смесей не дают полной гарантии предотвращения крупных аварий. Одной из эффективных мер борьбы с взрывами является разработка и совершенствование автоматических устройств и систем пожаровзрывозащиты, необходимых для контроля возникновения опасной ситуации и приведения объекта защиты к нормальному режиму функционирования.

1.2 Методы и технические средства обнаружения и локализации взрывов

Физические явления, сопровождающие горение и взрыв, регистрируются с помощью соответствующих датчиков, используемых в автоматических комплексах взрывоподавления [8, 11].

Классификация технических средств контроля наличия горения приведена в работе Сидоренко А.И.: «Технические средства контроля наличия горения по принципу работы делятся на активные и пассивные; по виду определяемого фактора горения – на тепловые, дымовые, оптические, давления; по типу используемого чувствительного элемента – на инфракрасные, фотоэлектрические, акустические, барометрические, сейсмические, ионизационные, пьезоэлектрические, магнитоконтактные, электроконтактные, комбинированные; по быстродействию – с высокой инерционностью и быстродействующие» [12].

Быстродействие является ключевым классификационным признаком, поскольку определяет эффективность обеспечения пожарной безопасности. Поэтому

анализ эффективности применения технических средств для контроля наличия горения проводится с учетом их быстродействия.

1.2.1 Методы и средства обнаружения и локализации взрывов с высокой инерционностью

К техническим средствам обнаружения и локализации взрывов с высокой инерционностью относятся приборы и системы, основанные на применении тепловых датчиков и датчиков давления.

Тепловые датчики реагируют на высокую температуру пламени. Недостатками таких датчиков является необходимость в непосредственном контакте чувствительного элемента с пламенем и высокая инерционность [8]. Однако в настоящее время ведется разработка быстродействующих датчиков температуры для контроля пламени на основе планарных термопар. Время формирования электрического импульса термобатарей из 250 планарных термопар составляет ~ 1 мс, что позволяет использовать импульс для запуска комплексов взрывоподавления и пожаротушения [13].

Недостатком датчиков давления является их малая чувствительность. Датчики давления не срабатывают при незначительных величинах давления на начальной стадии развития взрыва. Увеличение чувствительности датчиков приводит к возникновению ложных срабатываний на посторонние помехи (например, на взрывные работы) [8].

В угольных шахтах применяются автоматические комплексы взрывоподавления и локализации взрывов АСВП-ЛВ [14]. Комплекс АСВП-ЛВ срабатывает при воздействии ударной воздушной волны, возникающей при взрыве метано-пылевоздушной смеси. Ударная воздушная волна оказывает воздействие на приёмный щит и в результате происходит выбрасывание огнетушащего порошка массой 25 кг в объем горной выработки (рисунок 1.1) за время, не превышающее 20 мс. В результате чего в объёме горной выработки формируется заслон в виде облака огнетушащего порошка протяженностью 30 м.

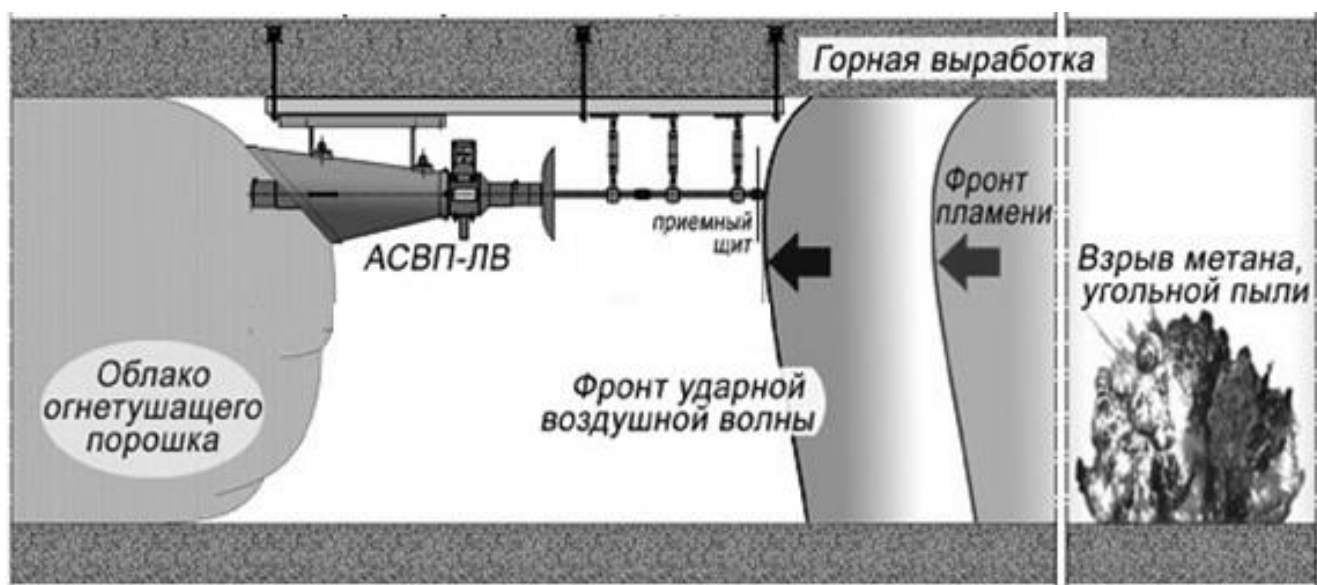


Рисунок 1.1 – Автоматическая система АСВП-ЛВ

Недостатком комплекса АСВП-ЛВ является позднее обнаружение взрыва, когда скорость распространения фронта пламени составляет не менее 40 м/с и возникает требуемое для срабатывания давление ударно-воздушной волны 0,02 МПа.

Таким образом, применение высокоинерционных технических средств позволяет обнаружить только развитое горение, что, как следствие, приводит к низкой надежности обеспечения пожарной безопасности.

1.2.2 Методы и средства контроля обнаружения и локализации взрывов с высоким быстродействием

Быстродействующие технические средства обнаружения и локализации взрывов строятся на основе оптико-электронных датчиков, регистрирующих оптическое излучение пламени [8, 15, 16, 17, 18].

При применении оптико-электронных датчиков для обнаружения и локализации взрывов необходимо учитывать специфические условия, характерные для производственных процессов [9]:

– неопределенность возникновения во времени и пространстве локального горения, что значительно усложняет возможность его обнаружения и локализации, в особенности на ранней стадии развития;

– работа в условиях возможной запыленности – оптическое излучение пламени может приходить на датчик значительно ослабленным промежуточной средой;

– существенное влияние оптических помех от источников освещения при обнаружении пламени, что увеличивает вероятность ложных срабатываний;

– скорость распространения фронта пламени изменяется в широких пределах от 3 до 300 м/с, что требует высокого быстродействия от системы контроля в целом не более 50 мс.

С учетом особенностей применения некоторые современные технические средства контроля наличия горения на основе оптико-электронных датчиков позволяют не только обнаружить пламенное горение, но и определить его расположение на охраняемом объекте для точной локализации горения.

Таким образом, технические средства контроля наличия пламени с высоким быстродействием можно классифицировать с учетом возможности определения расположения пламени.

1.2.2.1 Методы и средства обнаружения и локализации взрывов без определения его пространственного расположения

Одной из распространённых систем контроля в горных выработках является система СЛВА-1 предназначенная для обнаружения и подавления взрывов метанопылевоздушных смесей на начальной стадии их развития [9, 19].

В системе СЛВА-1 содержатся датчики пламени, построенные на базе фотоприемника с инфракрасным светофильтром работающие по принципу пирометра частичного излучения. Датчик способен обнаружить пламя с диаметром 0,75 м на расстоянии 5 м за время, не превышающее 2 мс.

Недостатком датчика в СЛВА-1 является низкая устойчивость к воздействию оптических помех в виде излучения источников искусственного освещения, что может привести к ложным срабатываниям. Для исключения ложных срабатываний разработчики значительно снизили чувствительность датчиков пламени, что привело к низкой надежности системы СЛВА-1 [19], связанной с пропуском возгораний на начальной стадии.

Известны извещатели пламени многодиапазонные «НАБАТ», которые предназначены для обнаружения горения и используются в системах противопожарной защиты и взрывоподавления [20, 21, 22]. Принцип работы извещателей «НАБАТ» основан на методе спектральной селекции и предполагает выделение излучения пламени, используя отличительные особенности спектральных характеристик излучения пламени и оптических помех в виде излучения источников освещения. Это позволяет обеспечить их высокую чувствительность при высокой помехозащищенности для различных оптических помех.

Быстродействие выпускаемых моделей извещателей составляет 100 мс [21]. Максимальное расстояние, при котором происходит устойчивое срабатывание извещателя пламени от излучения тестовых очагов пожара ТП-5 и ТП-6 составляет 25 и 17 м соответственно. Извещатели не выдают ложного срабатывания при фоновой освещенности 2500 лк от люминесцентных ламп и 250 лк от ламп накаливания. Угол обзора извещателей составляет от 50 до 70° [21].

К недостатку извещателей пламени «НАБАТ» можно отнести низкое быстродействие серийно выпускаемых извещателей.

Известна автономная система взрывозащиты газоотводящей сети аэродинамическая (СВГСА). СВГСА предназначена для ликвидации взрывного горения метановоздушной смеси и предотвращения проникновения пламени в выработку или газоотводящую скважину [23]. В системе СВГСА используется оптический датчик ДОВМ-001. ДОВМ-001 представляет собой оптико-электронный прибор обнаружения взрыва на начальной стадии развития и формирования электроимпульса на запуск устройств взрывоподавления при превышении температуры охраняемого объекта. ДОВМ-001 работает по принципу пирометра спектрального

отношения [16] и имеет температуру срабатывания – 873 К при длине охраняемой зоны, не превышающей 35 м. Быстродействие ДОВМ-001 составляет не более 1 мс. Средством взрывоподавления выступает пылеметная газодинамическая мортира, которая вмещает 28 кг огнетушащего порошка и имеет быстродействие 18 мс.

Особенностью датчика является отсутствие влияния оптических свойств запыленной среды на температуру срабатывания за счет использования принципа пирометра спектрального отношения, но при этом датчик имеет низкую чувствительность за счет существенного ослабления принимаемого излучения в оптической системе, что может привести к пропуску пламени.

1.2.2.2 Методы и средства обнаружения и локализации взрывов с определением его пространственного расположения

При использовании технических средств, определяющих только наличие пламени, для локализации аварии необходимо с помощью устройства взрывоподавления в течение малого периода времени (менее 20 мс) заполнить весь охраняемый объем огнетушащим агентом, выбросив достаточно большую его массу (порядка 30 кг) с высокой скоростью [16]. Это может быть опасным для жизни и здоровья персонала, находящегося в непосредственной близости к системе локализации. Использование распределённого барьера устройств пожаротушения (взрывоподавления) уменьшенного объема может привести к повышению эффективности использования огнетушащего агента и безопасности для персонала.

Существуют оптико-электронные приборы и системы обнаружения пламени, позволяющие определить его пространственное расположение и активировать соответствующее устройство пожаротушения (взрывоподавления) из распределенного барьера [15, 18, 17].

Известен пирометрический датчик координат очага возгорания (рисунок 1.2), описанный в патенте № 2536355 [18]. Определение температуры очага возгорания в пирометрическом датчике основано на методе спектрального отно-

шения. Двумерные координаты очага возгорания определяются путем сканирования области возникновения возгорания с помощью полевой диафрагмы, представляющей матрицу управляемых оптических затворов. Оптическое излучение отдельных участков охраняемой зоны контролируется поочередным открытием оптических затворов матрицы с одновременной регистрацией излучения фотоприемником.

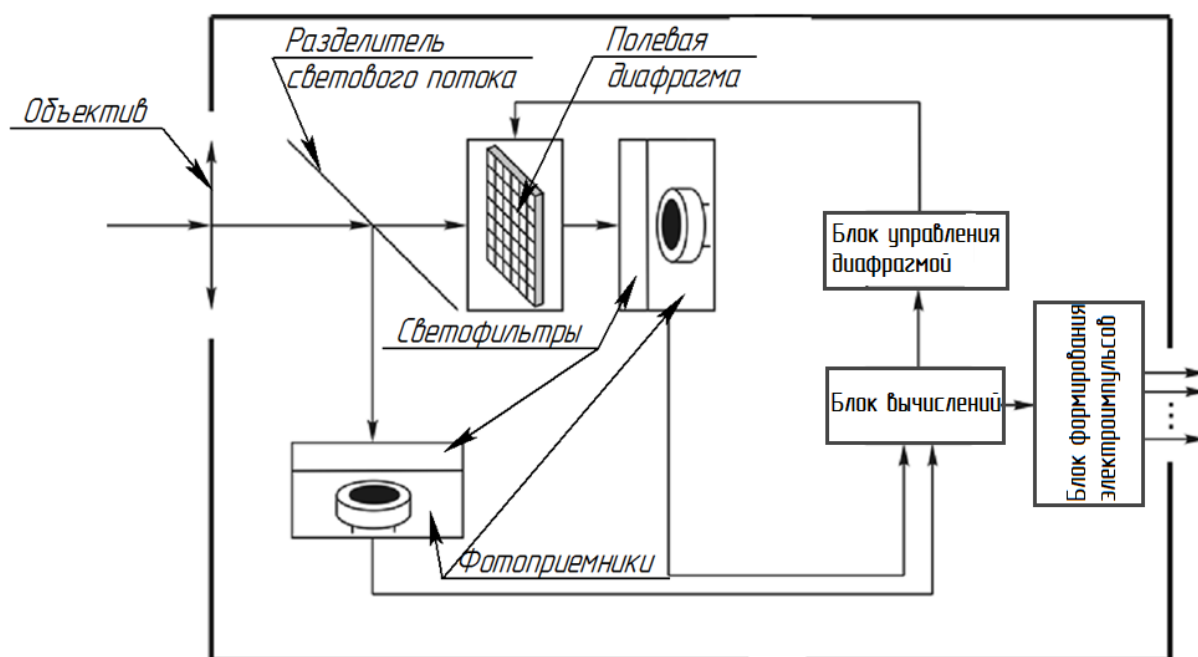
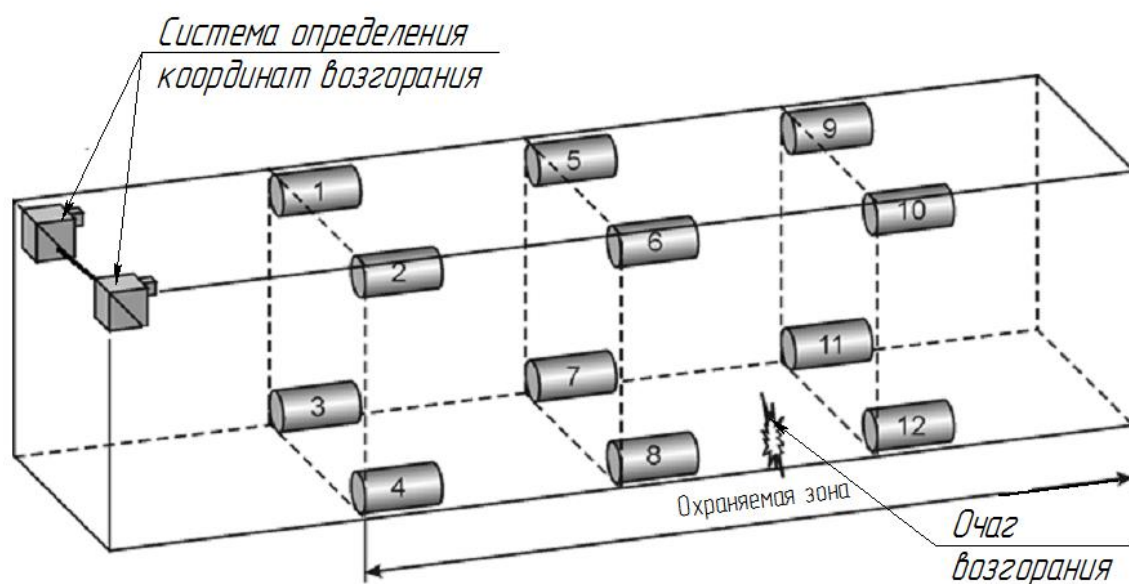


Рисунок 1.2 – Структурная схема датчика с оптическими затворами

Недостатком пирометрического датчика с оптическими затворами является низкая чувствительность при обнаружении очага возгорания, что может привести к пропуску наличия пламени или к значительным погрешностям определения его координат. Данный недостаток обусловлен тем, что результирующий поток излучения, поступающий на приемник излучения, существенно ослабляется в последовательно установленных в оптическом канале компонентах: разделителе светового потока, полевой диафрагме, интерференционных светофильтрах с узким спектром пропускания. Поэтому очаг возгорания может быть обнаружен только в ближайшей к датчику зоне контроля, а остальная часть помещения остается незащищенной.

Определение трехмерных координат пламени возможно путем организации бинокулярной системы на основе двух датчиков, определяющих двумерные координаты пламени [18, 15]. Схема взрывозащиты на основе использования подобной системы и распределенного барьера взрывоподавления показана на рисунке 1.3. При этом охраняемая зона системы имеет простую форму в виде прямоугольного параллелепипеда.



1 ... 12 – взрывоподавляющие устройства

Рисунок 1.3 – Схема взрывозащиты

В отдельную группу систем определения координат пламени можно выделить распределённые системы, применяемые для обеспечения пожарной безопасности в помещениях, в которых могут возникать локальные неконтролируемые участки из-за сложной геометрии охраняемой зоны [24, 25, 26]. Адаптация систем под такие помещения осуществляется за счет увеличения числа датчиков и изменения их расположения на охраняемом объекте.

Известна система определения координат пожара, описанная в патенте WO2015/092691A1 [27]. Система построена на базе инфракрасных датчиков двумерных координат пожара распределённых по охраняемому объёму (рисунок 1.4). Датчики посредством сети передачи данных подключены к системному контрол-

леру, предназначенному для расчета трехмерных координат пожара по показаниям датчиков.

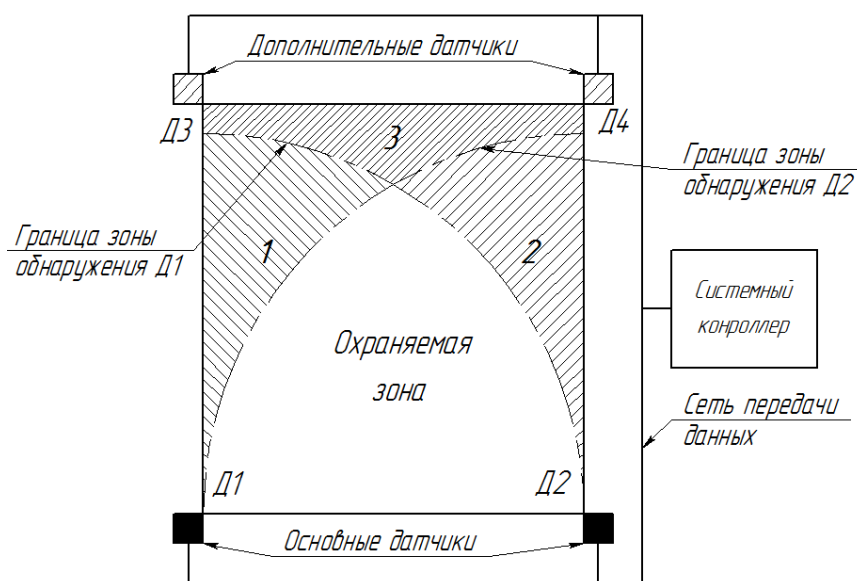


Рисунок 1.4 – Схема распределенной системы на базе датчиков двумерных координат пожара

Система содержит 2 основных датчика (Д1 и Д2), но может содержать дополнительные датчики (Д3, Д4) для обеспечения обнаружения во всех участках охраняемого объема. При контроле основными датчиками, исходя из их зон обнаружения в охраняемой зоне, имеют место локальные участки (1 и 2), в которых контроль может осуществляться только одним из датчиков, а также неконтролируемый участок 3. Для обеспечения возможности определения координат по всему охраняемому объему вводятся дополнительные датчики (Д3, Д4), располагаемые так, чтобы их зона обнаружения включала такие локальные участки.

Расчет координат пожара контроллером выполняется путем программного выбора пары координатных датчиков из всей совокупности для построения бинокулярной системы определения трехмерных координат. Расчет координат пожара выполняется с последовательным использованием нескольких пар датчиков. Данные расчета по нескольким парам анализируются программой системного контроллера для точного определения координат пожара. Это позволяет повысить надежность работы системы и снизить вероятность пропуска пожара.

Данный подход в случае использования координатных датчиков неминуемо приводит к сильному усложнению системы и, как следствие, к снижению быстродействия и надежности.

Таким образом, для построения адаптивных систем, контролирующих наличие пламени в охраняемой области сложной формы, перспективным является использование достаточно простых некоординатных датчиков пламени, распределенных по охраняемому объекту. Это позволит обеспечить высокое быстродействие и надежность комплекса взрывоподавления в целом.

В работе [24] рассмотрена распределенная многоточечная волоконно-оптическая измерительная система (ВОИС) обнаружения пламени и определения его местоположения в тоннелях метро. ВОИС состоит из совокупности светосборников (датчиков) объединенных в волоконно-оптический тракт с помощью волоконных световодов (ВС) (рисунок 1.5). Контроль зон (1 – 4), где возможно возникновение пламени осуществляется парами светосборников. При построении системы обеспечивается прохождение оптических сигналов между парами светосборников. Оптическое излучение пламени распространяется по волоконно-оптическому тракту и регистрируется фотоприемниками [24].

Определение расположения пламени по сигналу активного светосборника (датчика) основано на использовании следующих методов:

- метод расчета относительных задержек по фронту сигнала;
- метод расчета относительных задержек на базе корреляционного анализа.

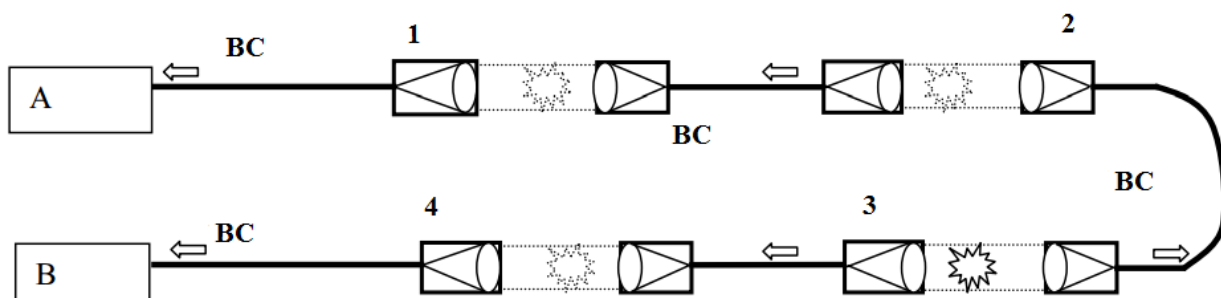


Рисунок 1.5 – Схема распределенной волоконно-оптической измерительной системы обнаружения открытого пламени

Метод расчета относительных задержек по фронту сигнала обеспечивает минимальное время срабатывания (несколько микросекунд), но имеет большую погрешность в определении номера активного датчика.

Метод расчета относительных задержек с использованием корреляционного анализа обеспечивает меньшую погрешность определения номера активного датчика, которая зависит от времени обнаружения пламени (накопление и обработка сигнала). Погрешность определения номера активного датчика уменьшается с увеличением времени обнаружения пламени. Например, для величины времени обнаружения 1 мс количество датчиков в системе равно 50 [24].

Таким образом, система ВОИС обладает приемлемыми характеристиками по быстродействию. К недостаткам можно отнести то, что система применима только для контроля узких протяженных объектов и не позволяет определять пространственные координаты пламени.

Автоматическая система пожаротушения, построенная на основе «метода оптической решетки» представлена в работах [26, 25]. Система содержит минимум две группы оптико-электронных датчиков. Ряды датчиков размещаются таким образом, чтобы происходило пересечение их зон обзора и формировались локальные участки контроля (рисунок 1.6). С учетом этого, организуется система электронного сканирования, позволяющая определить двумерные координаты очага пожара. Быстродействие системы составляет 100 мс. Угол, определяющий пересечение проекций оптических осей двух групп датчиков на горизонтальную плоскость, составляет $90^\circ \pm 30^\circ$.

Координаты очага пожара определяются на основе «метода оптической решетки». Метод предполагает разделение всех датчиков системы определения координат пожара на две группы, располагаемые по оси x и по оси y . Для каждого датчика определяются координаты на плоскости. При обнаружении датчиками пожара в охраняемой зоне выполняется аппроксимация значений выходных сигналов датчиков полиномом степени количества датчиков. Для полиномиальных функций, полученных для каждой оси, находится координата глобального макси-

му (x_{max} или y_{max}), а затем определяется точка $P(x_{max}, y_{max})$ на плоскости, соответствующая расположению очага пожара [26].

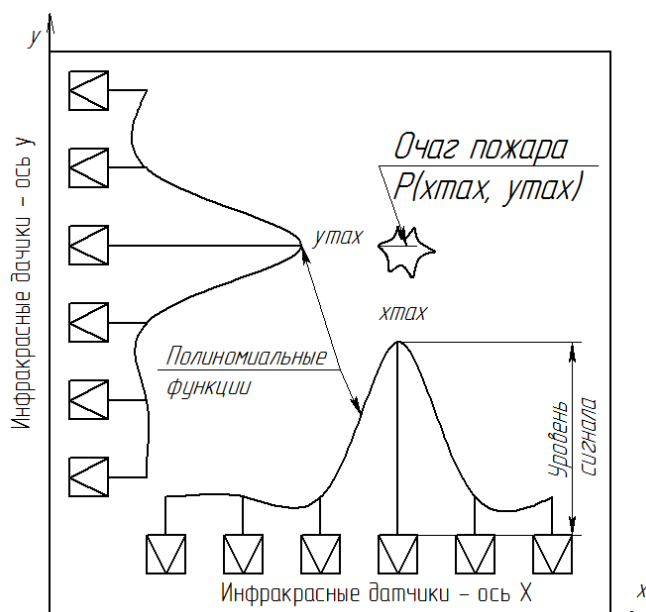


Рисунок 1.6 – Схема автоматической системы пожаротушения на основе «метода оптической решетки»

Недостатками автоматической системы пожаротушения на основе «метода оптической решетки» являются:

- возможность определения только двумерных координат очага возгорания, исходя из подхода к расположению датчиков (на плоскости). Пространственные координаты пожара в пределах охраняемого объема не определяются;
- низкое быстродействие системы за счет значительного времени опроса большого количества датчиков (100 мс).

Таким образом, разработка многоточечной оптико-электронной системы, обладающей высоким быстродействием, способной обнаружить пламя по всему объему охраняемого помещения и определить его трехмерные координаты внутри охраняемой зоны сложной геометрической формы позволит повысить эффективность обеспечения пожаровзрывоопасности промышленных объектов.

1.3 Выводы по главе 1

1. Проведен анализ пожаровзрывоопасности объектов нефтегазовой промышленности и угледобывающей промышленности (угольных шахт). В результате анализа установлено, что системы обеспечения пожаровзрывобезопасности должны контролировать возникновение пламенного горения углеводородовоздушных смесей на ранней стадии развития (до перехода во взрыв) в производственных помещениях (выработках шахт). Исходя из низких скоростей распространения горения и малых размеров зоны горения на начальной стадии взрыва, обеспечивается достаточное время для обнаружения и локализации горения.

2. Рассмотрены методы и технические средства обнаружения и локализации взрывов и проведен анализ эффективности методов и средств при обеспечении пожарной безопасности с учетом их быстродействия. Определено, что для контроля взрыва на начальной стадии развития наиболее эффективным является использование быстродействующих оптико-электронных приборов и систем способных обнаружить пламенное горение и определить его пространственное расположение с целью его последующей локализации по месту возникновения.

3. Определены недостатки средств обнаружения пламени с определением его координат. Для устранения недостатков предложено разработать эффективную быстродействующую многоточечную оптико-электронную систему, позволяющую обнаружить пламя и определить его трехмерные координаты в охраняемой зоне сложной формы.

2 РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ МНОГОТОЧЕЧНОЙ ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ

При разработке теоретических принципов построения быстродействующей многоточечной оптико-электронной системы контроля пламени и определения его пространственных координат необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать требования к техническим параметрам разрабатываемой системы;
- сформулировать принцип построения системы;
- разработать методы определения пространственных координат пламени;
- провести исследование по сравнению методов определения пространственных координат пламени для охраняемой зоны с простой геометрией;
- определить подход к адаптации системы под объект сложной формы.

Материалы, представленные во второй главе, отражены в публикациях автора [28 – 38].

2.1 Требования к техническим параметрам разрабатываемой системы

Требования к техническим параметрам разрабатываемой системы определяются условиями, в которых будет применяться система, приведенными в аналитическом обзоре см. пп. 1.2.2.

Неопределенность возникновения в пространстве локального пламенного горения обуславливает необходимость обеспечения возможности обнаружения пламени и определения его пространственных координат с требуемой точностью во всем объеме охраняемого помещения с заданными размерами и формой.

Требования к размерам охраняемой зоны для разрабатываемой системы устанавливаются исходя из требований, приведенных в нормативной документации [39]. Согласно [39] расстояние, при котором оптико-электронные датчики реагируют на излучение тестовых очагов пожара ТП-5 и ТП-6, должно составлять

не менее 8 м, что в итоге определяет чувствительность датчиков. В результате в качестве требуемых были приняты размеры охраняемой зоны не менее $8 \times 8 \times 8$ м.

Требования к погрешности определения координат пламени разрабатываемой системой определяются на основе анализа требований, устанавливаемых при практической реализации аналогичных систем. Для распределённой системы пожаротушения, построенной на основе «метода оптической решетки» [26, 25], максимально допустимая погрешность определения координат устанавливалась на базе эксперимента и составила 15 %. Таким образом, требуемая приведенная погрешность расчета координат пламени для разрабатываемой системы не должна превышать 15 %.

Скорость распространения фронта пламени изменяется в широких пределах, что требует малого времени срабатывания от системы контроля в целом. Согласно требованиям, приведенным в ГОСТ Р-5477-2011 [40] для автоматических комплексов взрывоподавления, время срабатывания не должно превышать 50 мс. Исходя из того, что время срабатывания взрывоподавляющих устройств составляет 35 мс, быстродействие оптико-электронной системы должно составлять не более 15 мс.

Влияние оптических помех источников освещения при контроле пламени обуславливает помехоустойчивость оптико-электронной системы к воздействию излучения оптических помех.

В результате анализа литературы и нормативной документации сформулированы требования к техническим параметрам разрабатываемой системы:

- размеры охраняемой зоны: не менее $8 \times 8 \times 8$ м;
- быстродействие: не более 15 мс;
- погрешность определения пространственных координат пламени: не более 15 %.

2.2 Принцип построения системы

Принцип построения системы предполагает использование в составе системы совокупности некоординатных оптико-электронных датчиков (НОЭД), распределенных в пространстве охраняемого объекта.

НОЭД построен на основе фотоприемника (фотодиода) и инфракрасного светофильтра. Каждый НОЭД регистрирует оптическое излучение пламени в охраняемой зоне. Выходной сигнал НОЭД изменяется в зависимости от местоположения пламени в соответствии со следующими законами: закон обратных квадратов, закон Ламберта (освещенность на чувствительном элементе датчика пропорциональна косинусу угла падения лучей от очага возгорания на освещаемую поверхность), закон Бугера, определяющий пропускание промежуточной среды [41, 42]. Определение расположения источника излучения по выходному сигналу одного НОЭД, исходя из законов освещенности, не представляется возможным. Однако при построении оптико-электронной системы на основе совокупности НОЭД, которые размещаются в пространстве охраняемого объекта определенным образом, можно определять трехмерные координаты источника оптического излучения с использованием отношений величин сигналов НОЭД [28].

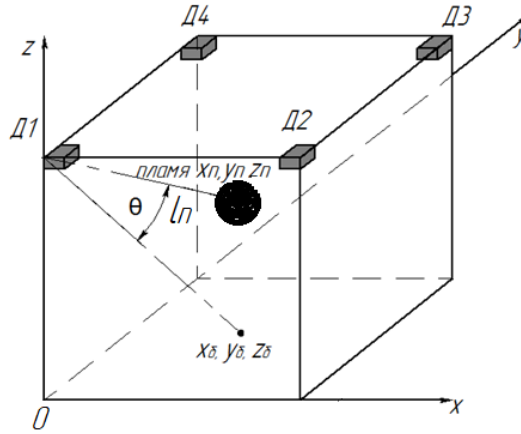
Исходные данные для расчета трёхмерных координат пламени включают: выходные сигналы НОЭД, трехмерные координаты размещения НОЭД, координаты конца нормали-базиса для каждого НОЭД. Нормалью-базисом является вектор, который перпендикулярен чувствительной площадке фотоприемника НОЭД. Началом нормали-базиса является точка с пространственными координатами фотоприемника. Концом нормали-базиса является точка базиса в плоскости пола охраняемого объекта.

На рисунке 2.1 показан способ размещения НОЭД на охраняемом объекте. НОЭД привязаны определённым образом к координатным осям.

Расположение НОЭД и ориентация их оптических осей должна обеспечивать пересечение зон обнаружения НОЭД, так чтобы зона обнаружения системы перекрывала весь объем охраняемого помещения.

Значения выходных сигналов НОЭД зависят от пространственного расположения пламени внутри охраняемого помещения.

Рассмотрим аналитические зависимости для расчета выходных сигналов НОЭД.



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

$x_п, y_п, z_п$ – координаты пламени

Рисунок 2.1 – Способ расположения НОЭД

При расчете оптического излучения пламени рассматривается изотермическая по объему зона пламенного горения в форме огненного шара [33, 34]. Выходной сигнал НОЭД можно рассчитать по формуле:

$$U_d = F \cdot K \cdot \Delta A \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_I(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) \cdot M_{есф}(\lambda) d\lambda, \quad (2.1)$$

где F – угловой коэффициент; K – коэффициент преобразования сигнала в электронном тракте, В/А; ΔA – площадь чувствительной площадки фотоприемника, m^2 ; λ – длина волны, м; $S_I(\lambda)$ – спектральная токовая чувствительность фотоприёмника, А/Вт; $\tau_c(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания промежуточной среды; $M_{есф}(\lambda)$ – спектральная энергетическая светимость, Вт/ m^2 ; $\lambda_1... \lambda_2$ – спектральный диапазон чувствительности фотоприемника [41].

При этом спектральная энергетическая светимость $M_{есф}(\lambda)$ описывается выражением [43]:

$$M_{есф}(\lambda) = M_{eb}(\lambda) \left[1 + \frac{2}{Dk(\lambda)} e^{-Dk(\lambda)} - \frac{2}{(Dk(\lambda))^2} (1 - e^{-Dk(\lambda)}) \right], \quad (2.2)$$

где $k(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения продуктов горения метановоздушной смеси, м^{-1} ; $M_{\text{eb}}(\lambda)$ – спектральная энергетическая светимость (полусферическая) абсолютно черного тела, $\text{Вт}/\text{м}^2$; D – диаметр огненного шара, м .

Величина $M_{\text{eb}}(\lambda)$ рассчитывается по формуле Планка:

$$M_{\text{eb}}(\lambda) = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}, \quad (2.3)$$

где T – температура, К ; $C_1 = 0,59544 \cdot 10^{-16}$, $\text{Вт} \cdot \text{м}^2$; $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ $\text{м} \cdot \text{К}$.

Угловой коэффициент F определяется для элементарной площадки dA и шара радиусом r [44, 45]:

$$F = \frac{\cos \theta}{L^2} = \frac{r^2 \cos \theta}{l_n^2}, \quad (2.4)$$

где θ – угол между нормалью-базисом и вектором центра зоны пламенного горения; $L = l_n/r$ – безразмерный параметр; r – радиус шара; l_n – расстояние от площадки dA до центра сферы.

Начало вектора центра зоны пламенного горения находится в точке с пространственными координатами фотоприемника НОЭД. Конец вектора центра зоны пламенного горения является точкой с координатами пламени. Таким образом, угол θ соответствует углу между нормалью $\bar{n}$ к элементарной площадке dA и прямой, соединяющей центр dA с центром огненного шара [28].

Величина квадрата расстояния l_n^2 от НОЭД до пламени рассчитывается в соответствии с выражением:

$$l_n^2 = (x_n - x_{dv})^2 + (y_n - y_{dv})^2 + (z_n - z_{dv})^2, \quad (2.5)$$

где x_n, y_n, z_n – координаты пламени, м ; x_{dv}, y_{dv}, z_{dv} – координаты v -го НОЭД, м .

Косинус угла θ для отдельного НОЭД определяется согласно выражению [46]:

$$\cos \theta = \frac{|x_{dv} - x_n| \cdot |x_{dv} - x_{6v}| + |y_{dv} - y_n| \cdot |y_{dv} - y_{6v}| + |z_{dv} - z_n| \cdot |z_{dv} - z_{6v}|}{\sqrt{(x_{dv} - x_n)^2 + (y_{dv} - y_n)^2 + (z_{dv} - z_n)^2} \cdot \sqrt{(x_{dv} - x_{6v})^2 + (y_{dv} - y_{6v})^2 + (z_{dv} - z_{6v})^2}}. \quad (2.6)$$

Исходя из выражений (2.1), (2.4), (2.5), (2.6) значения выходных сигналов НОЭД зависят от расположения пламени x_n, y_n, z_n . При этом для совокупности НОЭД можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} U_{д1} = \varphi_1(x_{п}, y_{п}, z_{п}); \\ U_{д2} = \varphi_2(x_{п}, y_{п}, z_{п}); \\ \dots \\ U_{дМ} = \varphi_M(x_{п}, y_{п}, z_{п}), \end{cases} \quad (2.7)$$

где $x_{п}, y_{п}, z_{п}$ – координаты пламени, м; $U_{д1}, U_{д2}, \dots, U_{дМ}$ – сигналы на выходах НОЭД, В; M – количество НОЭД.

На основе информации о пространственном расположении НОЭД и значений их выходных сигналов необходимо решить задачу определения координат источника оптического излучения внутри охраняемой зоны.

2.3 Методы определения координат пламени

Возникает задача в разработке методов расчета координат пламени, основанных на обработке совокупности значений выходных сигналов НОЭД. При этом необходимо выполнить решение системы уравнений:

$$\begin{cases} x_{п} = f_1(U_{д1}, U_{д2}, \dots, U_{дМ}); \\ y_{п} = f_2(U_{д1}, U_{д2}, \dots, U_{дМ}); \\ z_{п} = f_3(U_{д1}, U_{д2}, \dots, U_{дМ}), \end{cases} \quad (2.8)$$

где $U_{д1}, U_{д2}, \dots, U_{дМ}$ – выходные сигналы НОЭД, В; $x_{п}, y_{п}, z_{п}$ – координаты пламени, м; M – количество НОЭД.

Поскольку площадь и температура горения заранее неизвестны, то уравнения, входящие в систему (2.8) сложно описать аналитически [30]. Также на выходной сигнал НОЭД влияет пропускание промежуточной среды, которое также заранее неизвестно [28].

На основе выражений (2.1), (2.4) можно рассчитать выходной сигнал датчика следующим образом:

$$U_{д1} = \frac{\cos\theta}{l_{п}^2} \cdot r^2 \cdot K \cdot \Delta A \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_I(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) \cdot M_{есф}(\lambda) d\lambda = \frac{\cos\theta}{l_{п}^2} \cdot C_{д1} \quad (2.9)$$

Коэффициент

$$C_{д1} = r^2 \cdot K \cdot \Delta A \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_I(\lambda) \cdot \tau_c(\lambda) \cdot M_{есф}(\lambda) d\lambda, \quad (2.10)$$

в формуле (2.9) зависит от параметров пламени, пропускания промежуточной среды и параметров фотоприемника, но не определяется местоположением пламени.

Ослаблением излучения промежуточной средой в виде сухого воздуха можно пренебречь ($\tau_c=1$). Поскольку для слоя протяженностью 100 м величина интегрального (по спектру) коэффициента пропускания τ_c составляет не менее 0,95 [43]. Однако при наличии запыленной промежуточной среды расчет выходных сигналов НОЭД должен выполняться с учетом коэффициента пропускания среды. При этом l_{π} входит в выражение для расчета сигнала на выходе датчика дважды – в форме закона обратных квадратов и форме аргумента функции для расчета коэффициента пропускания промежуточной среды. Коэффициент пропускания однородной запыленной промежуточной среды рассчитывается в соответствии с законом Бугера [47, 48]:

$$\tau_c(\lambda) = e^{-k_{\pi}(\lambda) \cdot \mu \cdot F_{уд} \cdot l_{\pi}}, \quad (2.11)$$

где $k_{\pi}(\lambda)$ – спектральный безразмерный коэффициент поглощения; l_{π} – длина поглощающего слоя пыли, м; μ – массовая концентрация угольной пыли, г/м³; $F_{уд}$ – средняя удельная поверхности пыли, м²/г.

НОЭД по своим параметрам являются идентичными, и параметры пламени остаются неизменными в течение времени опроса всех НОЭД. Принимается, что значения коэффициентов для всех НОЭД приблизительно равны $C_1 \approx C_2 \approx \dots \approx C_M$ для воздушной промежуточной среды. Откуда отношение выходных сигналов двух НОЭД описывается выражением:

$$R_1 = \frac{U_{д1}}{U_{д2}} = \frac{C_1 \cdot l_{\pi 2}^2 \cdot \cos \theta_1}{C_2 \cdot l_{\pi 1}^2 \cdot \cos \theta_2} \approx \frac{l_{\pi 2}^2 \cdot \cos \theta_1}{l_{\pi 1}^2 \cdot \cos \theta_2}. \quad (2.12)$$

Из выражения видно, что отношение сигналов НОЭД определяется главным образом взаимным расположением НОЭД и пламени.

Таким образом, функции f_1, f_2, f_3 в системе (2.8) для упрощения могут быть составлены на основе отношений сигналов с НОЭД:

$$\begin{cases} x_{\pi} = f_1(R_1, R_2, \dots, R_S); \\ y_{\pi} = f_2(R_1, R_2, \dots, R_S); \\ z_{\pi} = f_3(R_1, R_2, \dots, R_S), \end{cases} \quad (2.13)$$

где $R_1, R_2, \dots, R_S$ – отношения выходных сигналов НОЭД; $x_{\text{п}}, y_{\text{п}}, z_{\text{п}}$ – координаты пламени; S – количество отношений сигналов НОЭД.

Три неизвестных координаты пламени определяются путем составления не менее трех отношений сигналов НОЭД с использованием не менее четырех НОЭД для решения системы уравнений (2.13).

Предложено три возможных способа расчета отношений выходных сигналов НОЭД:

1) Отношения значения сигнала базового НОЭД (например, D_1) к значениям сигналов остальных НОЭД:

$$R_1 = U_{\text{д}1}/U_{\text{д}2}; \quad (2.14)$$

$$R_2 = U_{\text{д}1}/U_{\text{д}3}; \quad (2.15)$$

$$R_3 = U_{\text{д}1}/U_{\text{д}4}. \quad (2.16)$$

Данный способ описан в [49] и является наиболее простым.

2) Отношение значения сигнала отдельного НОЭД к сумме сигналов всех НОЭД:

$$R_v = \frac{U_{\text{д}v}}{\sum_{v=1}^M U_{\text{д}v}}, \quad (2.17)$$

где v – номер НОЭД.

Для рассматриваемого варианта количество используемых НОЭД равно количеству вычисляемых отношений. При этом вводится алгоритмическая избыточность за счет использования дополнительных отношений в системе уравнений (2.8) без увеличения количества используемых НОЭД [28].

3) Отношения сигналов НОЭД могут быть составлены на основе решения задачи о координатах центра тяжести системы материальных точек. Проводится аналогия между массами материальных точек и их положением в пространстве и выходными сигналами НОЭД [28, 29]. Выходные сигналы НОЭД $U_{\text{д}v}$ соответствуют массам частиц, а их отношения представляют собой координаты центра тяжести выходных сигналов НОЭД и рассчитываются по формулам:

$$R_1 = x_c = \frac{\sum_{v=1}^M x_{\text{д}v} \cdot U_{\text{д}v}}{\sum_{v=1}^M U_{\text{д}v}}; \quad (2.18)$$

$$R_2 = y_c = \frac{\sum_{v=1}^M y_{dv} \cdot U_{dv}}{\sum_{v=1}^M U_{dv}}; \quad (2.19)$$

$$R_3 = z_c = \frac{\sum_{v=1}^M z_{dv} \cdot U_{dv}}{\sum_{v=1}^M U_{dv}}, \quad (2.20)$$

где x_c, y_c, z_c – координаты центра тяжести сигналов НОЭД; x_{dv}, y_{dv}, z_{dv} – координаты v -го НОЭД [29].

В данном варианте отношений координаты x_c, y_c, z_c дают оценку значений координат пламени. Однако оценка значений координат имеет высокую погрешность, что связано со значительной нелинейностью зависимости выходных сигналов НОЭД от расстояния до пламени, что требует дополнительных методов обработки данных.

По полученным одним из приведенных способов отношениям решение задачи определения пространственных координат пламени может выполняться с использованием предложенных методов:

- метод многофакторной полиномиальной регрессии;
- метод регрессии нейронными сетями;
- численные методы решения нелинейных уравнений.

2.3.1 Решение задачи определения координат пламени на основе метода многофакторной полиномиальной регрессии

Методы регрессии полиномами и нейронными сетями предполагают определение функциональных связей f_1, f_2, f_3 между факторами – $R_1, R_2, \dots, R_S$ – и зависящими от них величинами – координатами пламени $x_{пл}, y_{пл}, z_{пл}$ [28].

Совокупность выходных сигналов НОЭД $U_{д1}, U_{д2}, \dots, U_{дМ}$ для $N_{пл}$ точек размещения пламени с действительными координатами $(x_{пл}, y_{пл}, z_{пл})$, равномерно расположенных по всему объему охраняемого помещения используется в качестве исходных данных для определения функций f_1, f_2, f_3 . Исходные данные формируются на базе компьютерного моделирования. По значениям $U_{д1}, U_{д2}, \dots, U_{дМ}$ определяются отношения сигналов $R_1, R_2, \dots, R_S$ в $N_{пл}$ точках. Дальнейшая задача

заключается в расчете коэффициентов линейного уравнения регрессии. Число точек $N_{\text{п}}$ должно превышать число коэффициентов S .

В качестве функций f_1, f_2, f_3 используются полиномиальные функции как наиболее часто применяемые [50]:

$$f_{\text{пол}}(R_1, R_2, \dots, R_S) = b_0 + \sum_{i=1}^S b_i R_i + \sum_{i=1}^S \sum_{j=i}^S b_{ij} R_i R_j + \dots, \quad (2.21)$$

где $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{SS}$ – коэффициенты уравнения регрессии.

В уравнении (2.21) используются линейные члены, члены второго порядка, которые подразделяются на квадратичные R_i^2 и смешанные произведения $R_i R_j$ при $j \neq i$. Аналогично можно получить функции в виде полинома третьего порядка и т.д. Число коэффициентов регрессии в уравнении (2.21) равно числу сочетаний из $(S+\alpha)$ по степени полинома α [50]. Например, для полинома второй степени ($\alpha=2$) функция для $x_{\text{п}}$ определяется уравнением:

$$x_{\text{п}} = b_0 + b_1 R_1 + b_2 R_2 + \dots + b_S R_S + b_{12} R_1 R_2 + \dots, \quad (2.22)$$

$$+ b_{S-1,S} R_{S-1} R_S + b_{11} R_1^2 + \dots + b_{SS} R_S^2.$$

Коэффициенты уравнения регрессии $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{SS}$ определяются методом наименьших квадратов из условия минимума суммы квадратов отклонений исходных значений действительной координаты пламени (например, $x_{\text{пд}}$) от соответствующего значения ($x_{\text{пр}}$), предсказанного уравнением (2.21). Сумма σ_x определяется выражением [50]:

$$\sigma_x = \sum_{i=1}^{N_{\text{п}}} (x_{\text{пд}i} - x_{\text{пр}i})^2, \quad (2.23)$$

где $x_{\text{пд}i}$ – действительное значение координаты пламени в i -й точке; $x_{\text{пр}i}$ – значение, рассчитанное по уравнению (2.21) для i -й точки; $N_{\text{п}}$ – число точек.

Дифференцируя выражение (2.23) по $b_0, b_1, b_2, \dots, b_{SS}$ и приравнявая частные производные нулю, получают систему нормальных уравнений и выполняют ее решение [50].

После вычисления коэффициентов выполняется расчет приведенной погрешности определения координат пламени в $N_{\text{п}}$ точках, при этом расчетные значения погрешности не должны превышать требуемое значение 15 %. Изначально степень полинома неизвестна, поэтому расчеты выполняются несколько раз, уве-

личивая на каждом шаге степень полинома до достижения требуемых расчетных значений погрешности.

Расчет координат пламени на основе метода многофакторной полиномиальной регрессии может быть выполнен с помощью специализированного математического пакета MAPLE11 [51].

2.3.2 Решение задачи определения координат пламени на основе метода регрессии нейронными сетями

Задача определения неизвестных функциональных связей f_1 , f_2 , f_3 может быть решена с использованием регрессии нейронными сетями. Отношения выходных сигналов НОЭД поступают на вход нейронной сети. Входной слой содержит число нейронов, равное числу отношений S . Пройдя через все слои нейронной сети, входные сигналы преобразуются в координаты пламени $x_{\text{п}}$, $y_{\text{п}}$, $z_{\text{п}}$. Таким образом, выходной слой состоит из трех нейронов. При этом предполагается использование полносвязной нейронной сети без обратных связей, обучаемой алгоритмом обратного распространения ошибки.

В качестве начальной архитектуры нейронной сети был выбран двухслойный персептрон. Нейроны входного слоя (0) служат лишь в качестве разветвлений для первого множества весов и не влияют на вычислительные возможности сети. Нейроны скрытого слоя (1) определяют вычислительные возможности нейронной сети. Нейроны выходного слоя (2) являются выходами нейронной сети. Выбранная архитектура и алгоритм обучения являются наиболее простыми с точки зрения реализации и довольно часто используются для решения задач регрессии [52, 53].

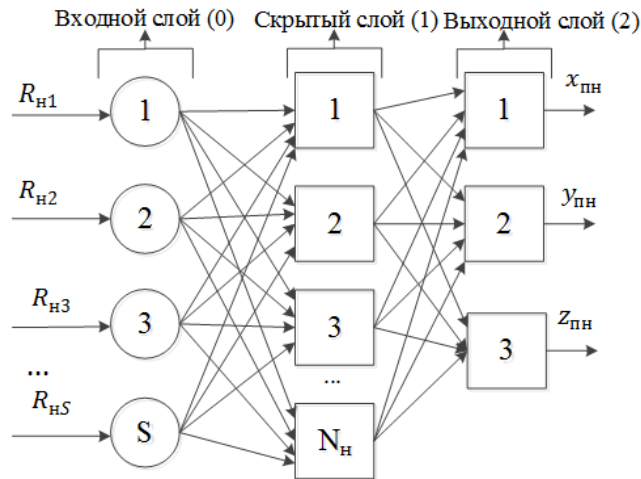
Структура связей нейронной сети для определения координат пламени показана на рисунке 2.2.

Особенность метода регрессии нейронными сетями заключается в необходимости нормирования входных и выходных (целевых) данных нейронной сети на рабочий диапазон активационных функций нейронов от 0 до 1. Для вариантов

отношений № 1 (формулы (2.14) – (2.16)) и № 3 (формулы (2.18) – (2.20)) выполняется нормирование согласно формуле:

$$R_H = \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}, \quad (2.24)$$

где R_H – нормированное отношение сигналов НОЭД; $R_{\max}$ и $R_{\min}$ – соответственно максимальное и минимальное значение для отношения, вычисленные по всему множеству точек размещения пламени N_{π} .



$R_{H1}, R_{H2}, \dots, R_{HS}$ – нормированные отношения сигналов НОЭД, В; N_H – количество нейронов в скрытом слое; $x_{\pi p}, y_{\pi p}, z_{\pi p}$ – расчетные координаты; кругами обозначены нейроны входного слоя

Рисунок 2.2 – Структура связей нейронной сети для определения координат пламени

При этом для варианта № 2 (формула (2.17)), отношение лежит в рабочем диапазоне активационных функций нейронов от 0 до 1 и нормирование данных для входного слоя нейронной сети не требуется.

Выходные (целевые) данные, несущие информацию о положении пламени внутри охраняемой зоны, должны быть нормированы к диапазону от 0 до 1 согласно формулам:

$$x_{\pi n} = \frac{x_{\pi}}{l}; \quad (2.25)$$

$$y_{\pi n} = \frac{y_{\pi}}{s}; \quad (2.26)$$

$$z_{\pi n} = \frac{z_{\pi}}{h}; \quad (2.27)$$

где $x_{пн}$, $y_{пн}$, $z_{пн}$ – нормированные координаты пламени; l , s , h – длина, ширина и высота охраняемого помещения, м (рисунок 2.1).

Обучающее множество состоит из пар векторов нормированных отношений и нормированных координат пламени, соответствующих точкам размещения пламени. Алгоритм обратного распространения ошибок представляет собой итеративный градиентный алгоритм обучения. В результате выполнения алгоритма минимизируется среднеквадратичное отклонение текущего выхода (расчетных координат пламени) от желаемого выхода (действительных координат размещения пламени в $N_{п}$ точках) [52, 54].

При выполнении регрессии зависимостей с помощью нейронных сетей возникают проблемы недообучения или переобучения, что связано со степенью сложности нейронной сети. Для подбора требуемой степени сложности необходимо использовать механизм контрольной кросс-проверки. При этом исходные данные разделяют на обучающее и контрольное множества. Последнее в обучении по алгоритму обратного распространения ошибок не участвует, а используется для независимого контроля результата вычисления [52]. С учетом рекомендаций [52] исходные данные для нейронной сети разделяются на обучающее множество (70% исходных данных) и контрольное (30% исходных данных).

На практике при определении архитектуры нейронной сети, обеспечивающей требуемую точность расчета координат пламени, подбирается число нейронов в скрытом слое, число слоев, а также активационная функция нейронов [52]. При этом предпочтительной является более простая архитектура из двух сетей с близкими значениями погрешности координат. Нейронная сеть с заданной архитектурой обучается несколько раз с различными исходными весовыми коэффициентами, чтобы удостовериться в том, что функция ошибок не попала в локальный минимум [52].

На основе рекомендаций, приведенных в источнике [52], предложено для каждой архитектуры нейронной сети выполнять серию из 5 обучений для различных исходных весовых коэффициентов, задаваемых случайным образом. Число нейронов в скрытом слое изменяется от 4 до 30. Для начальной архитектуры

нейронной сети число нейронов в скрытом слое принимается равным полусумме числа входов и числа выходов [52]. Таким образом, начальное число нейронов в скрытом слое равно четырем и при выполнении подбора архитектуры может быть увеличено. Использование более 30 нейронов нецелесообразно, поскольку это приводит к значительному усложнению, как процедуры обучения нейронной сети, так и непосредственной ее реализации. При определении архитектуры нейронной сети в скрытом и выходном слоях применяются активационные функции как одного, так и разного типа.

Функции активации нейронов скрытого и выходного слоев, предложенные для реализации нейросети, представлены в таблице 2.1. Активационная функция обозначена в таблице 2.1, как $f(s)$, где s – взвешенная сумма входных сигналов [30]. Данные функции являются наиболее часто используемыми при организации многослойного персептрона [52].

Таблица 2.1 – Активационные функции нейрона

Вид активационной функции	Формула
Логистическая	$f(s) = 1/(1 + e^{-s})$
Гиперболический тангенс	$f(s) = (e^s + e^{-s})/(e^s - e^{-s})$
Экспоненциальная	$f(s) = e^{-s}$
Линейная (тождественная)	$f(s) = s$

Нейронная сеть была реализована в виде специально разработанного программного обеспечения для ПЭВМ, позволяющего выполнить обучение нейронной сети и вычислять значения контрольных ошибок на базе контрольного множества [55].

2.3.3 Решение задачи определения координат пламени с использованием численных методов решения нелинейных уравнений

Приняв за базовый НОЭД $U_{д1}$ для системы из 4-х НОЭД используя выражение (2.12), можно составить систему:

$$\begin{cases} \frac{U_{д1}}{U_{д2}} - \frac{l_{п2}^2 \cdot \cos \theta_1}{l_{п1}^2 \cdot \cos \theta_2} = 0; \\ \frac{U_{д1}}{U_{д3}} - \frac{l_{п3}^2 \cdot \cos \theta_1}{l_{п1}^2 \cdot \cos \theta_3} = 0; \\ \frac{U_{д1}}{U_{д4}} - \frac{l_{п4}^2 \cdot \cos \theta_1}{l_{п1}^2 \cdot \cos \theta_4} = 0, \end{cases} \quad (2.28)$$

где $U_{д1} \dots U_{д4}$ – выходные сигналы НОЭД; $\theta_1 \dots \theta_4$ – угол между нормалью-базисом и вектором центра пламени для соответствующего НОЭД; $l_{п1} \dots l_{п4}$ – расстояние от соответствующего НОЭД до пламени.

Система нелинейных уравнений (2.28) не решается аналитически, поэтому для ее решения предложено использовать численные методы [31]: метод Ньютона; метод простых итераций; метод Зейделя [56]. При использовании метода Ньютона преобразование исходной системы уравнений к стандартному виду не требуется [56]. Недостатком метода простых итераций и метода Зейделя является существенно долгий (по сравнению с методом Ньютона) итеративный процесс решения системы уравнений.

Система нелинейных уравнений (2.28) в общем виде описывается формулой:

$$\begin{cases} \psi_1(x_{п}, y_{п}, z_{п}) = 0; \\ \psi_2(x_{п}, y_{п}, z_{п}) = 0; \\ \psi_3(x_{п}, y_{п}, z_{п}) = 0. \end{cases} \quad (2.29)$$

В векторной форме систему уравнений (2.28) можно представить в виде:

$$\Psi(X) = \Psi(x_{п}, y_{п}, z_{п}) = 0, \quad (2.30)$$

где $X = (x_{п}, y_{п}, z_{п})$.

Решение системы уравнений (2.30) методом Ньютона выполняется на базе итерационной последовательности:

$$X^{(i+1)} = X^{(i)} - W^{-1}(X^{(i)}) \cdot \Psi(X^{(i)}), \quad (2.31)$$

где $X^{(i)}$ – известное i -тое приближение; $i=0, 1, 2, \dots$; $W(X)$ – матрица Якоби [56]:

$$W(X) = \begin{cases} \frac{\partial \psi_1}{\partial x_{п}} & \frac{\partial \psi_1}{\partial y_{п}} & \frac{\partial \psi_1}{\partial z_{п}}; \\ \frac{\partial \psi_2}{\partial x_{п}} & \frac{\partial \psi_2}{\partial y_{п}} & \frac{\partial \psi_2}{\partial z_{п}}; \\ \frac{\partial \psi_3}{\partial x_{п}} & \frac{\partial \psi_3}{\partial y_{п}} & \frac{\partial \psi_3}{\partial z_{п}}. \end{cases} \quad (2.32)$$

Хорошая сходимость при использовании метода Ньютона обеспечивается за счет выбора начального приближения [56]. Начальные приближения рассчитываются на базе комплексного подхода, учитывающего законы освещённости и использующего метод последовательного перебора [31].

На первом этапе устанавливаются интервалы определения координат $x \in [a_x, b_x]$, $y \in [a_y, b_y]$ и $z \in [a_z, b_z]$ в пространстве охраняемой области на основе законов освещенности. При этом пространство охраняемой области условно разделяется на четыре равные части. Для проведения последовательного перебора определяется часть области рядом с НОЭД, значение выходного сигнала которого превышает значения сигналов остальных НОЭД (рисунок 2.3) [31].

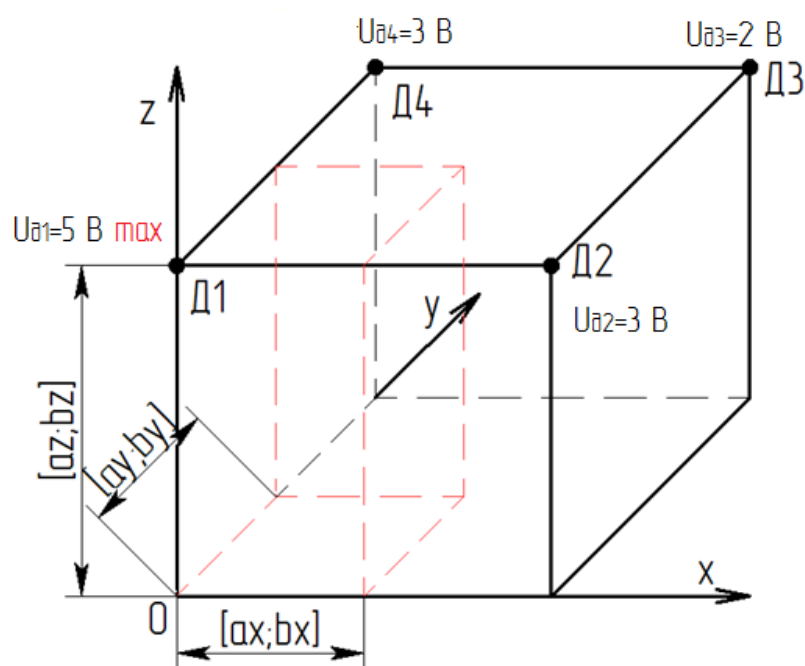


Рисунок 2.3 – К определению начальных приближений

На втором этапе выполняется последовательный перебор начальных приближений. Для этого рассчитываются значения функции $\Psi(x, y, z)$ в реперных точках. Координаты реперных точек вычисляются на основе разбиения интервалов определения координат по каждой из осей на $N_{ш}$ равных отрезков. Например,

для абсциссы с интервалом $x \in [a_x, b_x]$ реперные точки определяются согласно формуле (рисунок 2.3):

$$x_i = a_x + i \cdot \Delta x_{\text{ш}}, \quad (2.33)$$

где $i = 0, 1, \dots, N_{\text{ш}}$; $\Delta x_{\text{ш}} = (b_x - a_x)/N_{\text{ш}}$.

Значения координат реперных для ординаты с интервалом $y \in [a_y, b_y]$ и аппликаты интервалом $z \in [a_z, b_z]$ рассчитываются аналогично [31].

Путем последовательного перебора реперных точек устанавливаются границы интервалов $[x_s, x_{s+1}]$, $[y_s, y_{s+1}]$ и $[z_s, z_{s+1}]$ согласно условию:

$$\Psi(x_s, y_s, z_s) \cdot \Psi(x_{s+1}, y_{s+1}, z_{s+1}) < 0. \quad (2.34)$$

Локализация корней функции $\Psi(x, y, z)$ согласно (2.34) выполняется с точностью $\Delta x_{\text{ш}}/2$. В результате значения верхних границ интервалов $X(1) = (x_{s+1}, y_{s+1}, z_{s+1})$ являются начальными приближениями для расчета системы нелинейных уравнений (2.29) [57].

Разработанный метод расчета координат пламени был реализован в программной среде Mathcad 14, позволяющей решать нелинейные системы уравнений [58].

2.4 Сравнение методов определения пространственных координат пламени

Сравнение методов определения пространственных координат пламени выполняется на базе компьютерного моделирования системы и включает решение следующих задач:

- разработка методики исследования методов определения пространственных координат пламени;
- формулирование исходных данных для компьютерного моделирования, включающих данные о параметрах пламени и параметрах НОЭД;
- разработка вариантов расположения точек контроля в охраняемом помещении;

– проведение исследования и анализ полученных результатов с целью определения метода, который наилучшим образом подходит для реализации системы.

2.4.1 Методика исследования методов определения пространственных координат пламени

Методика проведения исследования включает следующие действия:

1) ввод исходных данных для расчета выходных сигналов НОЭД на базе компьютерного моделирования;

2) расчет выходных сигналов НОЭД при расположении пламенного горения (огненного шара) в 100 точках ($N_{\text{п}} = 100$), которые равномерно размещены по объему охраняемой области;

3) расчет отношений сигналов НОЭД тремя способами (2.14) – (2.20) для $N_{\text{п}} = 100$ точек размещения пламени;

4) расчет координат пламени для $N_{\text{п}} = 100$ точек и соотношений сигналов тремя предложенными методами: многофакторной полиномиальной регрессии, регрессии нейронными сетями, численным методом решения нелинейных уравнений. На этом шаге для полиномиальных функций определяется их порядок и коэффициенты уравнения регрессии; для нейросети – количество нейронов в скрытом слое, вид активационной функции и весовые коэффициенты;

5) определение максимальной приведенной погрешности определения координат пламени по осям $\gamma_{x\text{max}}$, $\gamma_{y\text{max}}$, $\gamma_{z\text{max}}$ из совокупности приведенных погрешностей, рассчитанных для всех $N_{\text{п}}$ точек согласно формулам:

$$\gamma_x = \frac{|x_{\text{пр}} - x_{\text{пд}}|}{x_{\text{диап}}} \cdot 100\%; \quad (2.35)$$

$$\gamma_y = \frac{|y_{\text{пр}} - y_{\text{пд}}|}{y_{\text{диап}}} \cdot 100\%; \quad (2.36)$$

$$\gamma_z = \frac{|z_{\text{пр}} - z_{\text{пд}}|}{z_{\text{диап}}} \cdot 100\%, \quad (2.37)$$

где $x_{\text{пл}}$, $y_{\text{пл}}$, $z_{\text{пл}}$ – действительные значения координат пламени, полученные в результате компьютерного моделирования; $x_{\text{пр}}$, $y_{\text{пр}}$, $z_{\text{пр}}$ – расчетные значения координат пламени; $x_{\text{диап}}$, $y_{\text{диап}}$, $z_{\text{диап}}$ – диапазоны измерения координат пламени.

б) изменение коэффициента пропускания промежуточной среды и выполнение пунктов методики 2 – 5. При этом используются новые данные о выходных сигналах НОЭД, пересчитанные с учетом изменения коэффициента пропускания среды, а коэффициенты полиномиальных функций и весовые коэффициенты нейронной сети, полученные без учета влияния запыленной среды, не пересчитываются [28].

2.4.2 Исходные данные для расчета выходных сигналов НОЭД

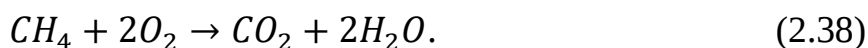
Исходными данными для расчета выходных сигналов НОЭД являются параметры пламени и промежуточной среды; параметры НОЭД; координаты размещения НОЭД и их ориентация на охраняемом объекте.

Для расчета напряжения на выходе НОЭД используются аналитические зависимости (2.1) – (2.6), в соответствии с которыми формируются конкретные исходные данные.

В выражении (2.1) спектральный диапазон, в котором происходит прием излучения фотоприемником, и его спектральная токовая чувствительность устанавливается исходя из характеристики фотодиода PD24-28 с чувствительностью в диапазоне от 0,9 до 2,5 мкм, выпускаемого российской фирмой ООО «АИБИ» [59]. Площадь чувствительной площадки фотоприемника составляет 3 мм². Коэффициент преобразования сигнала в электронном тракте принимается равным 10⁵ В/А.

В выражении (2.2) спектральный коэффициент поглощения продуктов горения метана рассчитывается с помощью банка данных HITRAN информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов».

Расчет коэффициента поглощения выполняется с учетом реакции горения стехиометрической метановоздушной смеси (рисунок 2.4):



Для рассматриваемой реакции объемные доли продуктов горения CO_2 и H_2O составляют 9,5 и 19 % соответственно. Температура горения стехиометрической метано-воздушной смеси составляет $T = 2206 \text{ К}$ ($1933 \text{ }^\circ\text{C}$), и горение происходит при атмосферном давлении 101 КПа [60, 61].

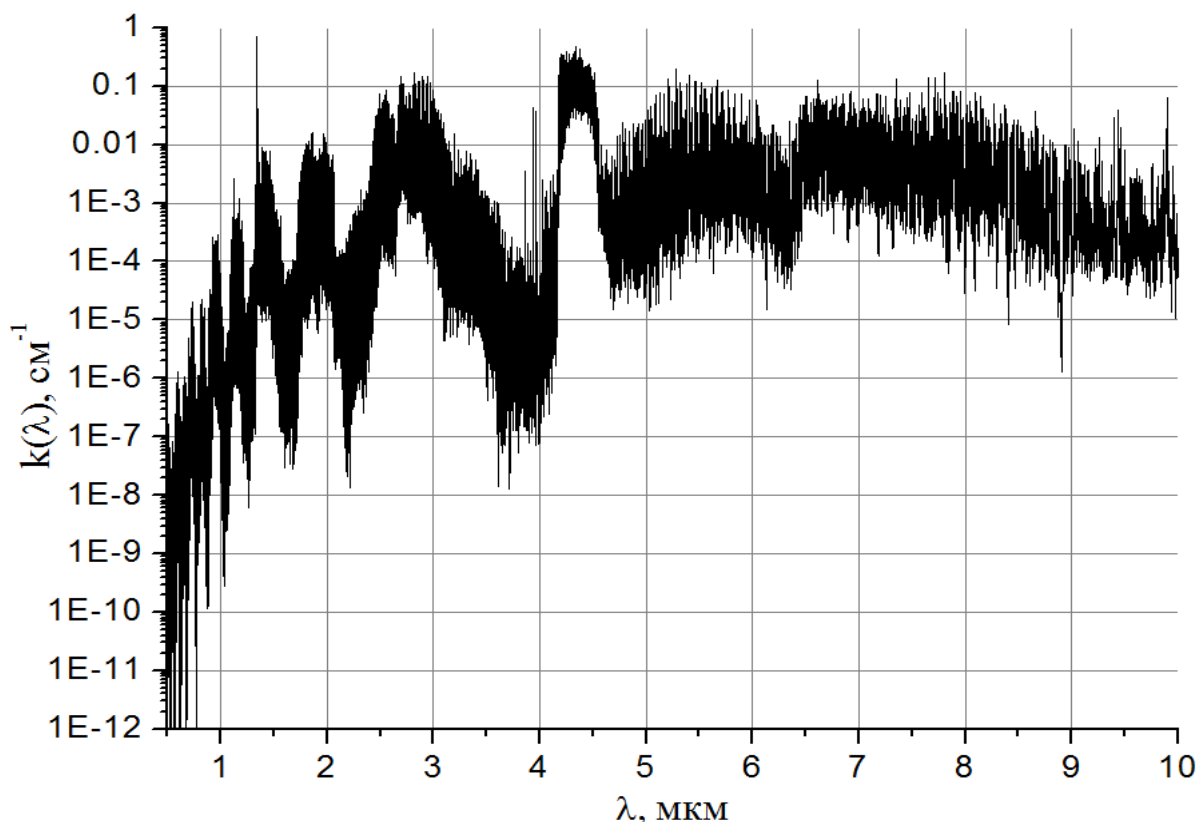


Рисунок 2.4 – Спектральный коэффициент поглощения продуктов горения метана

Диаметр огненного шара, принимающийся за начальную стадию развития горения метановоздушной смеси, составляет $0,5 \text{ м}$ [33].

На первом этапе при расчете выходных сигналов НОЭД ослабление излучения промежуточной средой не учитывается $\tau_c=1$. Однако на последующих этапах выполнения методики выполняется расчет выходных сигналов НОЭД с учетом коэффициента пропускания излучения (см. выражение (2.11)) в запыленной угольной пылью среде с дисперсным составом, характерным для угольных шахт. В формуле (2.11) коэффициент $k_p(\lambda)$ рассчитывается исходя из данных о спектральной поглощательной способности $a(\lambda)$, полученных на базе теории Ми в работе [32] (рисунок 2.5):

$$k_{\pi}(\lambda) = \frac{-\ln(1-a(\lambda))}{F_{уд}l_{\pi}\mu}. \quad (2.39)$$

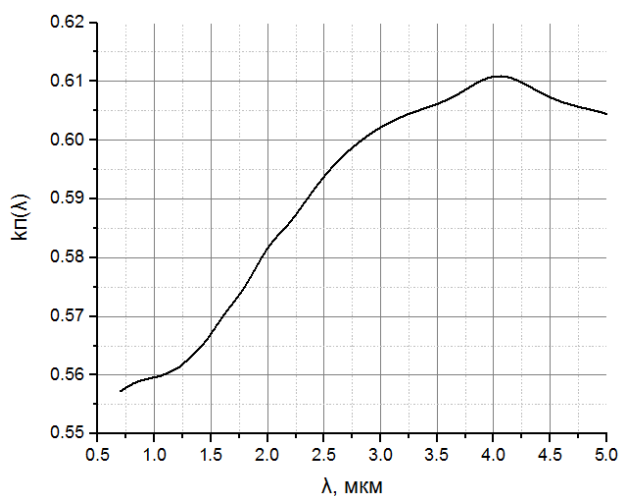


Рисунок 2.5 – Спектральный безразмерный коэффициент ослабления излучения газодисперсной системы «угольная пыль-воздух» $k_{\pi}(\lambda)$

Значение средней удельной поверхности пыли составляет $F_{уд}=0,34 \text{ м}^2/\text{г}$ [32].

Коэффициент пропускания запыленной среды устанавливается в диапазоне от 0,88 до 0,31 при изменении концентрации взвешенной в воздухе угольной пыли от 0,05 до 0,5 $\text{г}/\text{м}^3$ и протяженности запыленного слоя до 10 м, исходя из максимального расстояния от НОЭД до огненного шара.

Данные о координатах размещения и ориентации НОЭД определяются, исходя из их расположения на охраняемом объекте.

2.4.2.1 Расположение точек контроля на охраняемом объекте

Трехмерные координаты точек контроля (НОЭД) на охраняемом объекте определяют его размерами и формой, а также параметрами НОЭД.

Охраняемый объект представляет собой отрезок выработки угольной шахты с широко распространённой прямоугольной формой поперечного сечения [62]. Ширина и высота выработки составляют 6 и 5 м, что соответствует максимальной площади ее поперечного сечения 30 м^2 [62, 63]. Таким образом, охраняемый объект представляет собой прямоугольный параллелепипед с габаритными размерами $6 \times 6 \times 5 \text{ м}$, в котором длина равна ширине [28].

Определение размещения и числа используемых НОЭД выполняется исходя из необходимости обнаружения пламени по всему объему охраняемого объекта и определения координат пламени с требуемой погрешностью и быстродействием [64].

Согласно предложенным методам определения координат пламени при построении многоточечной оптико-электронной системы используется минимум четыре НОЭД, которые устанавливаются в верхней части объекта [64] и контролируют весь охраняемый объем. Для контролируемого объекта прямоугольной формы требуются НОЭД с углом обзора не менее 90° [28].

Исходя из подходов к определению отношений сигналов НОЭД, не рекомендуется размещать НОЭД в одной плоскости (на разной высоте) при составлении третьего варианта отношения сигналов (формулы (2.18) – (2.20)). Однако для остальных вариантов отношений № 1 (формулы (2.14) – (2.16)) и № 2 (формула (2.17)) размещение НОЭД в одной плоскости допускается. Разность по высоте при расположении НОЭД должна составлять не менее 0,1 высоты объекта [28].

Максимальная дальность обнаружения пламени в компьютерной модели не ограничивается, хотя при разработке реального НОЭД будет играть ключевую роль.

В ходе анализа было предложено три возможных варианта размещения точек контроля (НОЭД) на охраняемом объекте:

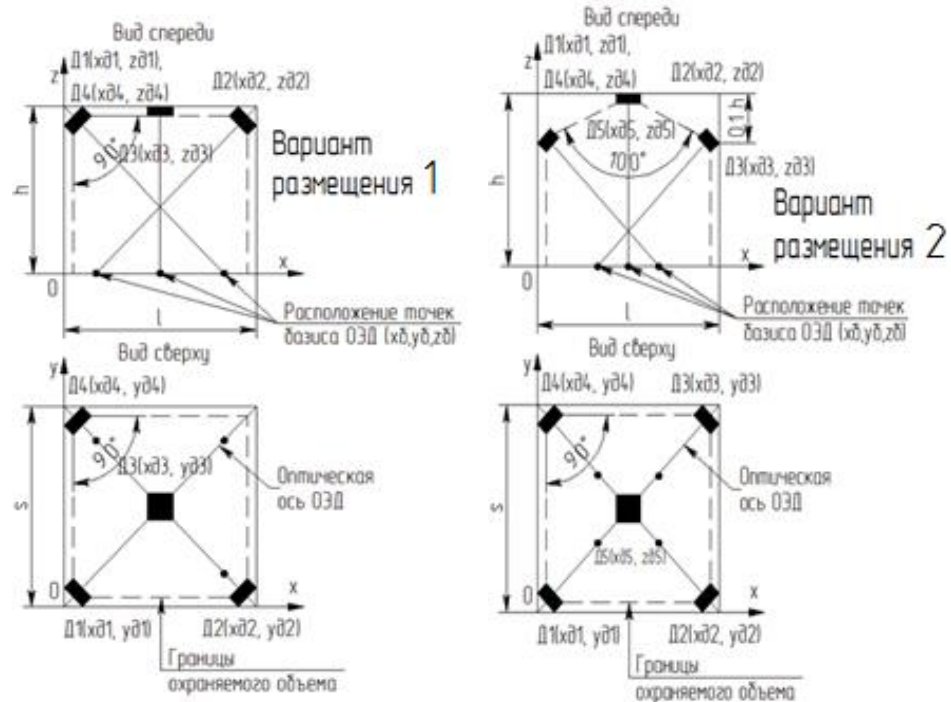
1) три из четырех НОЭД располагаются в углах охраняемого помещения на высоте, равной высоте помещения, и один НОЭД располагается в центре потолка помещения (рисунок 2.6 а);

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 (рисунок 2.6 б);

3) четыре из пяти НОЭД располагаются в углах охраняемого помещения на высоте, равной высоте помещения, и один НОЭД располагается в центре потолка помещения (рисунок 2.6 в).

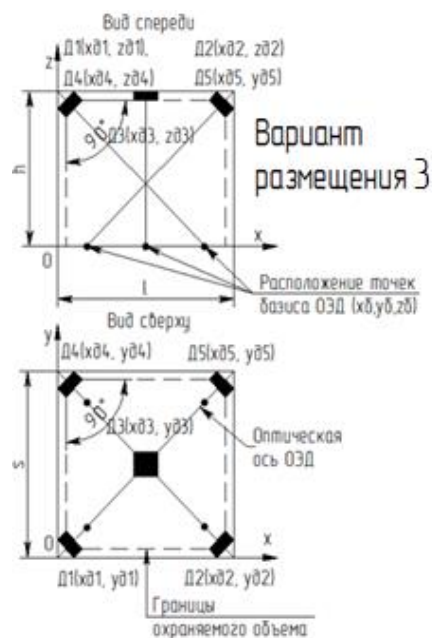
Оптические оси НОЭД, установленных в углах объекта, наклонены к плоскости пола помещения во всех вариантах и имеют угол обзора не менее 90° . Вектор

нормали базиса у НОЭД, располагаемого на потолке, перпендикулярен плоскости пола и угол обзора данного НОЭД равен 100° .



а)

б)



в)

$D_1 \dots D_5$ – НОЭД; $x_{d1} \dots x_{d5}$, $y_{d1} \dots y_{d5}$, $z_{d1} \dots z_{d5}$ – координаты НОЭД;

x_6 , y_6 , z_6 – координаты точки базиса

Рисунок 2.6 – Варианты размещения точек контроля на охраняемом объекте

Пятый НОЭД во втором и третьем варианте размещения вводится в систему с целью обеспечения аппаратной избыточности за счет получения дополнительного отношения сигналов НОЭД, которое, как предполагается, позволит повысить точность определения координат пламени [28].

2.4.3 Исследование методов определения пространственных координат пламени

В соответствии с разработанной методикой исследования проведен анализ полученных данных о максимальной приведенной погрешности расчета трехмерных координат пламени для исследуемых вариантов размещения НОЭД и методов расчета координат пламени (таблица 2.2).

Введение в многоточечную оптико-электронную систему дополнительного (пятого) НОЭД для методов регрессии и всех вариантов размещения НОЭД приводит к уменьшению максимальной приведенной погрешности расчета координат пламени в 1,5 раза по сравнению с вариантами размещения включающими 4 НОЭД.

Введение рассогласования по высоте (вариант расположения №2) несущественно влияет на погрешность определения координат.

Наилучшие результаты среди методов регрессии получены для варианта отношений № 2 (формула (2.17)).

Наилучшую точность среди исследуемых методов при отсутствии запыленной среды показал Метод Ньютона. Точность метода Ньютона не зависит от числа используемых НОЭД, вариантов их размещения и вариантов задания отношений сигналов НОЭД. Это связано с тем, что особенности размещения НОЭД и задания отношений их сигналов учитываются при задании системы нелинейных уравнений. Однако при наличии запылённой среды метод Ньютона неприменим из-за большой погрешности [28].

Таблица 2.2 – Максимальная приведённая погрешность определения координат пламени для помещения простой формы

Вариант размеще-	Вариант отношений сигналов	Метод определения пространственных координат пламени	τ_c	$\gamma_{x\max}, \%$	$\gamma_{y\max}, \%$	$\gamma_{z\max}, \%$
1	2	4-х факторный полином 3 степени	1	15	15	17
			0,88	16	16	29
			0,78	16	16	28
			0,62	18	17,9	25
			0,31	26	26	45
1	1	Метод Ньютона	1	1	1	1,2
			0,88	10	10	6,7
			0,78	30	30	11
			0,62	38	38	21
			0,31	91	91	50
2	2	5-ти факторный полином 3 степени	1	10	9,9	8,7
			0,88	9,4	9,3	10
			0,78	9	10	12
			0,62	13	16	15
			0,31	33	30	35
2	3	3х факторный полином 3 степени	1	18	18	24
			0,88	19	20	25
			0,78	20	21	30
			0,62	21	22	32
			0,31	26	25	47
3	2	5ти факторный полином 3 степени	1	10	10	11
			0,88	12	12	15
			0,78	14	14	17
			0,62	15	16	18
			0,31	17,7	17,7	20
3	2	5ти факторный полином 4 степени	1	13	13	13
			0,88	12	12	25
			0,78	12	12	49
			0,62	14	12	93
			0,31	21	21	194
3	2	Нейронная сеть (двухслойный персептрон, число нейронов в скрытом слое 32, активационная функция – скрытый слой логистическая, выходной слой линейная)	1	6,3	3,6	4,9
			0,88	9,6	7,2	12
			0,78	9,4	7,9	15
			0,62	10	10	19
			0,31	19	17,7	24
3	1	Метод Ньютона	1	1	1,1	1
			0,88	3,3	1,6	1,6
			0,78	8,3	8,3	3,3
			0,62	10	8,3	11
			0,31	41,6	25	33,3

Конфигурация многоточечной оптико-электронной системы, обеспечивающая удовлетворительную погрешность определения координат пламени координат (для координат x и y – 17,7 %; для z – 20 %) в условиях запыленности атмосферы охраняемого объекта, получена для 3-го варианта расположения и метода полиномиальной регрессии при использовании 5-ти факторного полинома 3-й степени.

Методы регрессии полиномами и нейронными сетями имеют более высокое быстродействие при реализации их в системе по сравнению с методом Ньютона. Это обусловлено тем, что коэффициенты полиномиальной функции регрессии и весовые коэффициенты нейронной сети рассчитываются предварительно, а затем используются оптико-электронной системой при вычислении координат пламени.

Расчет координат пламени по методу Ньютона выполняется за несколько итераций, количество которых для нахождения решения системы нелинейных уравнений заранее неизвестно. В результате время, затрачиваемое на расчет координат пламени, может превысить требуемое время срабатывания системы [28].

Получение функций регрессии для метода полиномиальной регрессии является менее вычислительно затратным по сравнению с методом регрессии нейронными сетями, поскольку весовые коэффициенты для нейронной сети, обеспечивающей требуемую точность регрессии, рассчитываются путем выполнения многократных процедур обучения.

Таким образом, для простого помещения оптимальным методом определения пространственных координат пламени является метод полиномиальной регрессии с использованием варианта расположения № 3 для 5 НОЭД и варианта отношений выходных сигналов № 2 (формула (2.17)).

2.5 Адаптация системы под объект заданной формы

Адаптация системы заключается в определении требуемого количества НОЭД (точек контроля) и их расположения с целью обеспечения определения

пространственных координат пламени в помещениях различной формы с требуемой точностью.

2.5.1 Алгоритм адаптации системы

Алгоритм адаптации системы составлен в соответствии с подходами и методами, определенными по результатам проведенных исследований для помещения простой формы. Блок схема алгоритма адаптации системы представлена на рисунке 2.7.

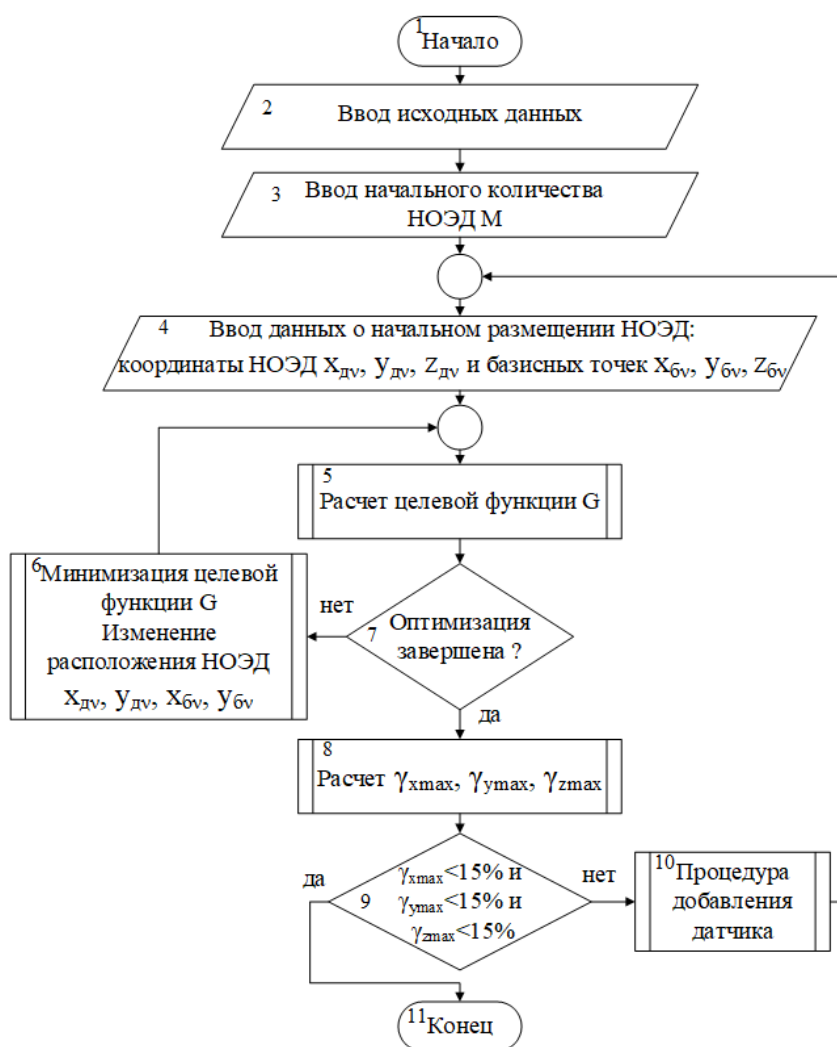


Рисунок 2.7 – Блок схема алгоритма адаптации системы

В блоке 2 выполняется формирование исходных данных:

1) ввод параметров и характеристик для моделирования: пламенного горения – D , $k(\lambda)$, T ; промежуточной среды – $k_p(\lambda)$, μ , F ; НОЭД – $S_l(\lambda)$, ΔA , K ;

2) ввод исходных данных о геометрии охраняемого объекта с учетом его формы.

3) распределение точек размещения пламени N_p по объему охраняемого объекта.

В блоке 3 осуществляется ввод начального минимального числа НОЭД M .

В блоке 4 задаются начальные координаты НОЭД и координаты их базисных точек.

В блоке 5 выполняется расчет целевой функции.

Целевая функция служит для оценки точности определения координат пламени МОЭС и представляет собой среднюю приведенную погрешность определения координат пламени при его размещении в точках, равномерно распределенных в пространстве охраняемого объема.

Аргументами целевой функции G являются пространственные координаты НОЭД x_{dv}, y_{dv}, z_{dv} и координаты их базисных точек x_{6v}, y_{6v}, z_{6v} [35, 38]:

$$G = f(x_{d1}, y_{d1}, z_{d1}, x_{61}, y_{61}, z_{61} \dots x_{dv}, y_{dv}, z_{dv}, x_{6v}, y_{6v}, z_{6v} \dots x_{dM}, y_{dM}, z_{dM}, x_{6M}, y_{6M}, z_{6M}). \quad (2.40)$$

где v – номер НОЭД; M – количество НОЭД.

Расчет целевой функции выполняется на базе компьютерной модели, основанной на совокупности подходов и методов, позволяющих описать работу ОЭС в заданных условиях (см. п. 2.3). Расчет координат пламени ОЭС включает выбор необходимых параметров (например, степени полинома или количества нейронов в нейросети).

Целевая функция рассчитывается как среднее значение по погрешностям определения абсциссы $\overline{\gamma_x}$, ординаты $\overline{\gamma_y}$ и аппликаты $\overline{\gamma_z}$:

$$G = \frac{\overline{\gamma_x} + \overline{\gamma_y} + \overline{\gamma_z}}{3}. \quad (2.41)$$

При этом расчет средних по диапазонам приведенных погрешностей определения координат пламени $\overline{\gamma_x}$, $\overline{\gamma_y}$, $\overline{\gamma_z}$ выполняется на основе данных расчета координат пламени в каждой из 100 точек согласно формулам:

$$\overline{\gamma_x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_p} \frac{|x_{i\text{пр}} - x_{i\text{нд}}|}{x_{\text{диап}}} \cdot 100\%; \quad (2.42)$$

$$\overline{\gamma_y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_p} \frac{|y_{i\text{пр}} - y_{i\text{нд}}|}{y_{\text{диап}}} \cdot 100\%; \quad (2.43)$$

$$\overline{\gamma_z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_p} \frac{|z_{i\text{пр}} - z_{i\text{нд}}|}{z_{\text{диап}}} \cdot 100\%, \quad (2.44)$$

где i – номер точки; $x_{i\text{пр}}$, $y_{i\text{пр}}$, $z_{i\text{пр}}$ – расчетные значения координат пламени; $x_{i\text{нд}}$, $y_{i\text{нд}}$, $z_{i\text{нд}}$ – действительные расчетные значения координат пламени; $x_{\text{диап}}$, $y_{\text{диап}}$, $z_{\text{диап}}$ – диапазоны измерения координат пламени.

В блоке 6 выполняется решение задачи многомерной оптимизации на базе метода покоординатного спуска, либо градиентного метода с дроблением шага [65, 66].

Минимизация выполняется исходя из того, что целевая функция является многомерной (например, для 10 НОЭД число переменных равно 60) и задана в неявном виде.

Изменение аргументов целевой функции, определяющих расположение НОЭД, при минимизации выполняется в соответствии со следующим подходом:

- изменение расположения НОЭД производится в плоскости потолка помещения ($z_d = z_{\text{max}} = \text{const}$);
- изменение расположения базисных точек выполняется в плоскости пола помещения ($z_6 = z_{\text{min}} = \text{const}$);
- 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. Это условие принято для упрощения поиска минимума сложной многомерной целевой функции;
- ограничивающие условия при расположении НОЭД и их базисных точек определяются геометрией охраняемого объема:

$$\begin{cases} x_{d\text{min}} \leq x_{dv} \leq x_{d\text{max}}; \\ y_{d\text{min}} \leq y_{dv} \leq y_{d\text{max}}; \\ z_{dv} = z_{\text{max}} = \text{const}; \\ x_{6\text{min}} \leq x_{6v} \leq x_{6\text{max}}; \\ y_{6\text{min}} \leq y_{6v} \leq y_{6\text{max}}; \\ z_{6v} = z_{\text{min}} = \text{const}. \end{cases} \quad (2.45)$$

Метод покоординатного спуска и градиентный метод с дроблением шага применяются для нахождения минимума целевой функции (2.40):

$$G = f(X), \quad (2.46)$$

где X – векторный аргумент, компонентами которого являются координаты НО-ЭД и базисных точек:

$$X = (x_{д1}, y_{д1}, z_{д1}, x_{б1}, y_{б1}, z_{б1} \dots x_{дv}, y_{дv}, z_{дv}, x_{бv}, y_{бv}, z_{бv} \dots x_{дM}, y_{дM}, z_{дM}, x_{бM}, y_{бM}, z_{бM}). \quad (2.47)$$

В методе покоординатного спуска направлениями траектории спуска от предыдущей точки $X^{[k-1]}$ к последующей $X^{[k]}$ являются последовательно направления координат $x_{дv}, y_{дv}, x_{бv}, y_{бv}$. Т.е. сначала выполняется спуск на один шаг по координате $x_{дv}$, затем по координате $y_{дv}$ и т.д. Движение от точки $X^{[k-1]}$ к $X^{[k]}$ продолжается до достижения окрестности точки минимума целевой функции. Определение величины шага $\lambda^{[k]}$ выполняется на основе метода одномерного поиска – метода деления отрезка пополам [66].

Градиентный метод с дроблением шага заключается в построении последовательности точек $\{X^{[k]}\}$ при условии $f(X^{[k+1]}) < f(X^{[k]})$. Точки последовательности $\{X^{[k]}\}$ рассчитываются согласно формуле [65]:

$$X^{[k+1]} = X^{[k]} - \lambda^{[k]} \cdot \nabla f(X^{[k]}), \quad (2.48)$$

где $\lambda^{[k]}$ – шаг.

Точка $X^{[0]}$ определяется исходными данными о предварительном размещении НОЭД.

Для упрощения оптимизация градиентным методом осуществляется последовательно отдельно для расположения v -го НОЭД $(x_{дv}; y_{дv})$, затем для его базисной точки $(x_{бv}; y_{бv})$. Остальные датчики при этом фиксируются. Таким образом, градиент целевой функции $\nabla f(X^{[k]})$ в точке $X^{[k]}$ для расположения v -го НОЭД рассчитывается по формуле:

$$\nabla f(X^{[k]}) = \left(\frac{\partial f(X^{[k]})}{\partial x_{дvk}}, \frac{\partial f(X^{[k]})}{\partial y_{дvk}} \right). \quad (2.49)$$

Поскольку целевая функция задана неявно, то частные производные рассчитываются численно:

$$\frac{\partial f(X^{[k]})}{\partial x_{dvk}} = \frac{f(x_{dv} + \Delta x, y_{dv}) - f(x_{dv}, y_{dv})}{\Delta x}, \quad (2.50)$$

где $\Delta x = 10^{-2}$ м – шаг дифференцирования, определенный из практических соображений.

Величина шага $\lambda^{[k]}$ остается постоянной при убывании целевой функции, что проверяется условием:

$$f(X^{[k]}) - f(X^{[k+1]}) \geq \varepsilon \cdot \lambda^{[k]} \cdot |\nabla f(X^{[k]})|^2, \quad (2.51)$$

где $\varepsilon=0,1$.

В формуле (2.51) модуль градиента $|\nabla f(X^{[k]})|$ определяется по формуле:

$$|\nabla f(X^{[k]})| = \sqrt{\left(\frac{\partial f(X^{[k]})}{\partial x_{dvk}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(X^{[k]})}{\partial y_{dvk}}\right)^2}, \quad (2.52)$$

При невыполнении условия (2.51) производится дробление шага согласно формуле [65]:

$$\lambda^{[k]} = \lambda^{[k]} \cdot \delta, \quad (2.53)$$

где $\delta=0,95$.

Блок 7 определяет условия завершения оптимизации. Построение последовательности заканчивается в точке $X^{[k]}$, для которой выполняется или условие:

$$|\nabla f(X^{[k]})| < \varepsilon_1, \quad (2.54)$$

где ε_1 – малое положительное число, определяемое из практических соображений, или условие

$$k > I_{max}, \quad (2.55)$$

где I_{max} – максимальное число итераций, или при выполнении двух неравенств:

$$|\nabla f(X^{[k]}) - \nabla f(X^{[k+1]})| < \varepsilon_2, \quad (2.56)$$

$$|X^{[k]} - X^{[k+1]}| < \varepsilon_2, \quad (2.57)$$

где ε_2 – малое положительное число, определяемое из практических соображений.

В блоке 8 выполняется расчет максимальных приведенных погрешностей определения координат пламени γ_{xmax} , γ_{ymax} , γ_{zmax} . Расчет выполняется путем определения максимальной погрешности расчета абсциссы, ординаты и апплика-

ты пламени по N_{π} точкам его размещения для расположения НОЭД, полученного в результате минимизации целевой функции.

В блоке 9 осуществляется сравнение расчетных максимальных приведенных погрешностей с требуемой погрешностью определения координат пламени – не более 15 %. При этом погрешность определения координат не должна превышать предельного значения во всех точках охраняемого объема. В случае выполнения указанного условия процесс адаптации завершается, и фиксируются данные об оптимальном расположении НОЭД.

В случае превышения требуемого значения погрешности в блоке 10 выполняется процедура введения дополнительного НОЭД в состав системы [35, 38].

Дополнительный НОЭД вводится в область охраняемого объема с наибольшей погрешностью определения координат. Увеличение количества НОЭД происходит от минимального – пяти – до максимального, ограниченного быстродействием системы.

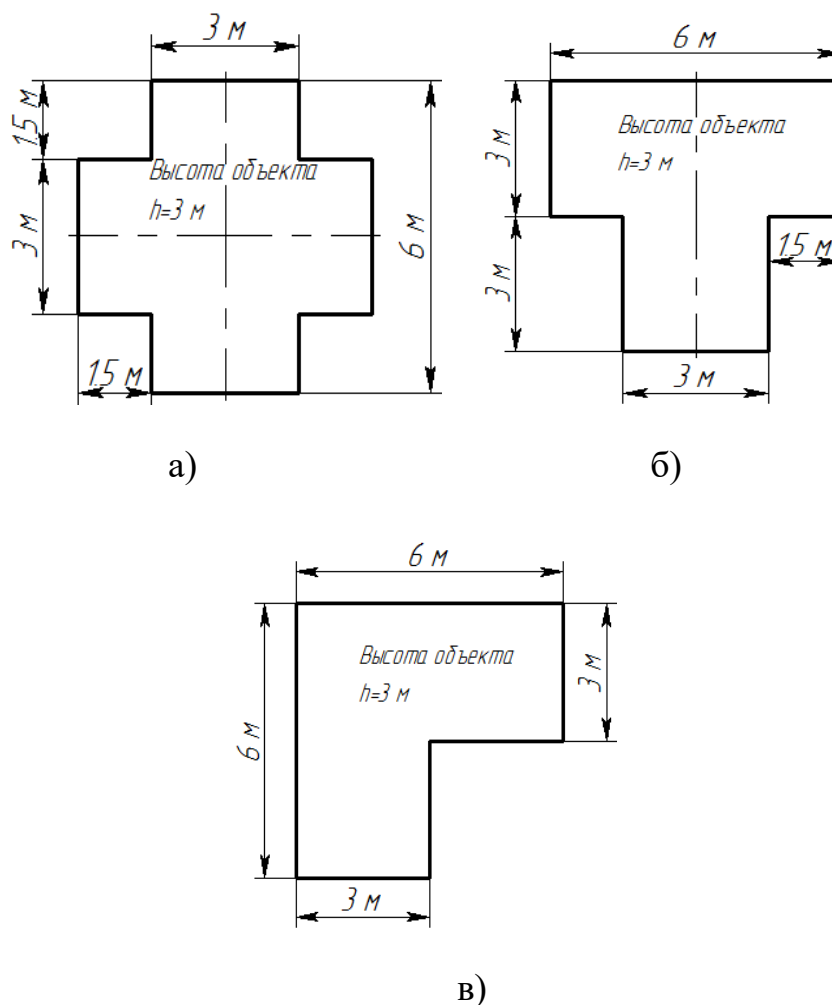
Таким образом, выполнение адаптации системы согласно предложенному алгоритму позволяет обеспечить требуемую погрешность определения координат пламени во всех точках охраняемого объема.

2.5.2 Проверка алгоритма адаптации системы для помещений сложной формы

Охраняемые промышленные объекты имеют разнообразную геометрическую форму, определяемую особенностями выполняемых производственных процессов. Поэтому для проверки алгоритма адаптации все многообразие охраняемых объектов предложено сузить до участков выработок угольных шахт со сложной геометрией – сопряжений выработок [67], поскольку они определяют наиболее часто встречаемые сложные конфигурации.

Для проверки алгоритма выбраны три прямоугольных сопряжения выработок: прямое пересечение, прямое ответвление, примыкание выработок под прямым углом (рисунок 2.8). Геометрические размеры сопряжений определялись с

учетом поперечного сечения выработки прямоугольной формы размерами 3×3 м [62].



а – прямое пересечение; б – прямое ответвление;

в – примыкание выработок под прямым углом

Рисунок 2.8 – Сопряжения выработок

Для удобства выполнения алгоритма адаптации было разработано специальное программное обеспечение, реализующее не только функционал блок-схемы на рисунке 2.7, но и удобный трехмерный визуальный редактор охраняемого объекта, позволяющий наглядно показать расположение НОЭД [68, 69, 70].

Полученные в результате применения алгоритма адаптации значения максимальной приведенной погрешности определения координат пламени методом полиномиальной регрессии в зависимости от вида охраняемого объекта, количества НОЭД и метода минимизации целевой функции представлены в таблице 2.3.

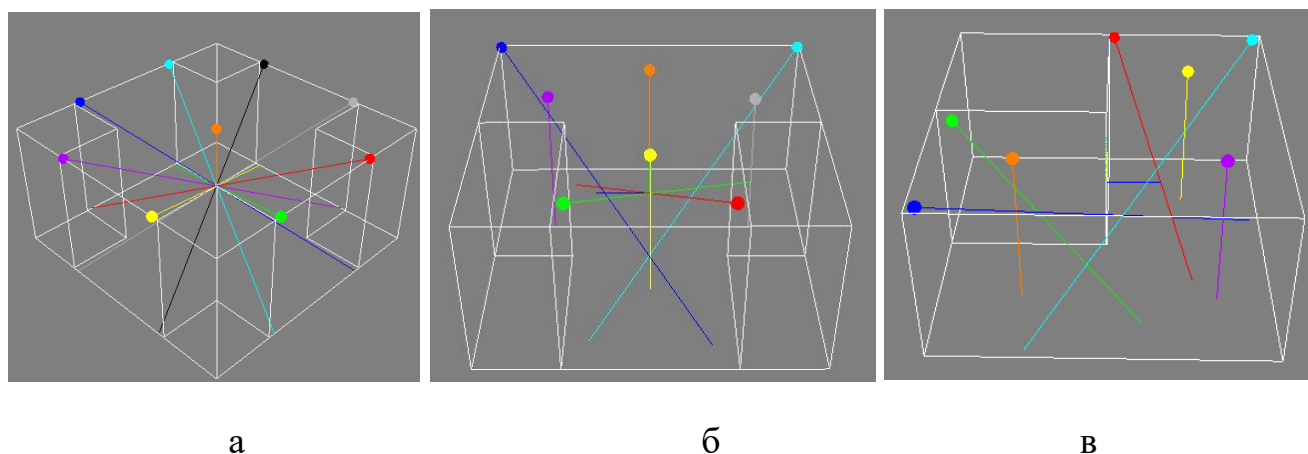
Таблица 2.3 – Максимальная приведенная погрешность определения координат пламени после адаптации ОЭС под разные охраняемые объекты

Вид охраняемого объекта	Количество НОЭД	Метод оптимизации целевой функции	Степень полинома для регрессии	$\gamma_{x\max}$, %	$\gamma_{y\max}$, %	$\gamma_{z\max}$, %
Прямое пересечение	8	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 3 степени	46	48	13
	8	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 4 степени	49	44	13
	9	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 3 степени	14,3	12,5	1,4
	9	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 4 степени	10,6	7,8	1
	9	Метод покоординатного спуска	Полином 3 степени	14,8	12	1,5
	9	Метод покоординатного спуска	Полином 4 степени	9,1	12,5	7,9
Прямое отвлечение	7	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 3 степени	45	19	19
	7	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 4 степени	42	18	9
	8	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 3 степени	12,9	9,3	5,8
	8	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 4 степени	6,3	10,4	3,6
	8	Метод покоординатного спуска	Полином 3 степени	10,4	8,5	4,9
	8	Метод покоординатного спуска	Полином 4 степени	7,1	5,9	4,2
Примыкание выработок под прямым углом	6	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 3 степени	19	22	16
	6	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 4 степени	15	15	9
	7	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 3 степени	13,4	13,8	12,1
	7	Градиентный метод с дроблением шага	Полином 4 степени	12,6	11,8	10,1
	7	Метод покоординатного спуска	Полином 3 степени	12	14,1	11,9
	7	Метод покоординатного спуска	Полином 4 степени	12,4	13,5	9,5

Требуемые значения максимальной приведенной погрешности определения координат пламени достигаются для сопряжения в виде прямого пересечения при использовании 9-ти НОЭД, для сопряжения в виде прямого отвлечения – 8-ми НОЭД, для сопряжения в виде примыкания выработки под прямым углом – 7-

ми НОЭД. Наименьшая погрешность определения координат достигается при использовании полиномов 4 порядка. Конечная погрешность определения координат пламени не зависит существенным образом от выбора метода оптимизации [35, 38].

Схемы размещения НОЭД, обеспечивающие требуемую погрешность определения координат пламени на исследуемых охраняемых объектах (выделены в таблице 2.3 жирным шрифтом) приведены на рисунке 2.9. Сферами обозначены НОЭД. Ориентация в пространстве оптических осей НОЭД показана в виде отрезков, соединяющих НОЭД с базисными точками.



а – прямое пересечение (9 НОЭД); б – прямое ответвление (8 НОЭД);

в – примыкание выработок под прямым углом (7 НОЭД)

Рисунок 2.9 – Схемы размещения НОЭД в сопряжениях угольных шахт, обеспечивающие требуемую погрешность определения координат пламени

Таким образом, выполнение адаптации системы согласно предложенному алгоритму позволяет обеспечить требуемую погрешность определения координат пламени во всех точках охраняемого объема сложной формы.

2.6 Выводы по главе 2

1. Сформулированы требования к техническим параметрам разрабатываемой системы: быстродействию, точности определения пространственных координат пламени и размерам охраняемой зоны для разрабатываемой системы.

2. Сформулирован принцип построения системы на основе совокупности НОЭД, распределенных в пространстве охраняемого объекта.

3. Разработаны методы определения пространственных координат пламени по выходным сигналам НОЭД:

- метод многофакторной полиномиальной регрессии;
- метод регрессии нейронными сетями;
- численные методы решения нелинейных уравнений.

4. Проведено исследование по сравнению методов определения пространственных координат пламени для охраняемой зоны с простой геометрией. Для простого помещения оптимальным методом определения пространственных координат пламени является метод полиномиальной регрессии с использованием пяти НОЭД.

5. Предложен алгоритм адаптации системы под помещение заданной формы, заключающийся в определении требуемого количества НОЭД (точек контроля) и их расположения с целью обеспечения определения пространственных координат пламени с требуемой точностью. Апробация адаптации системы для помещений сложной формы согласно предложенному алгоритму (сопряжений выработок угольных шахт) показало его работоспособность.

3 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ МНОГОТОЧЕЧНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ

3.1 Разработка структурной схемы системы

В соответствии с предложенным принципом построения разработана структурная схема быстродействующей многоточечной оптико-электронной системы контроля пламени и определения его пространственных координат, показанная на рисунке 3.1. Система содержит некоординатные оптико-электронные датчики 1 (НОЭД₁, НОЭД₂, ... НОЭД_N), блок обработки данных 3, блок управления устройствами пожаротушения 4, которые объединены посредством сети передачи данных 2.

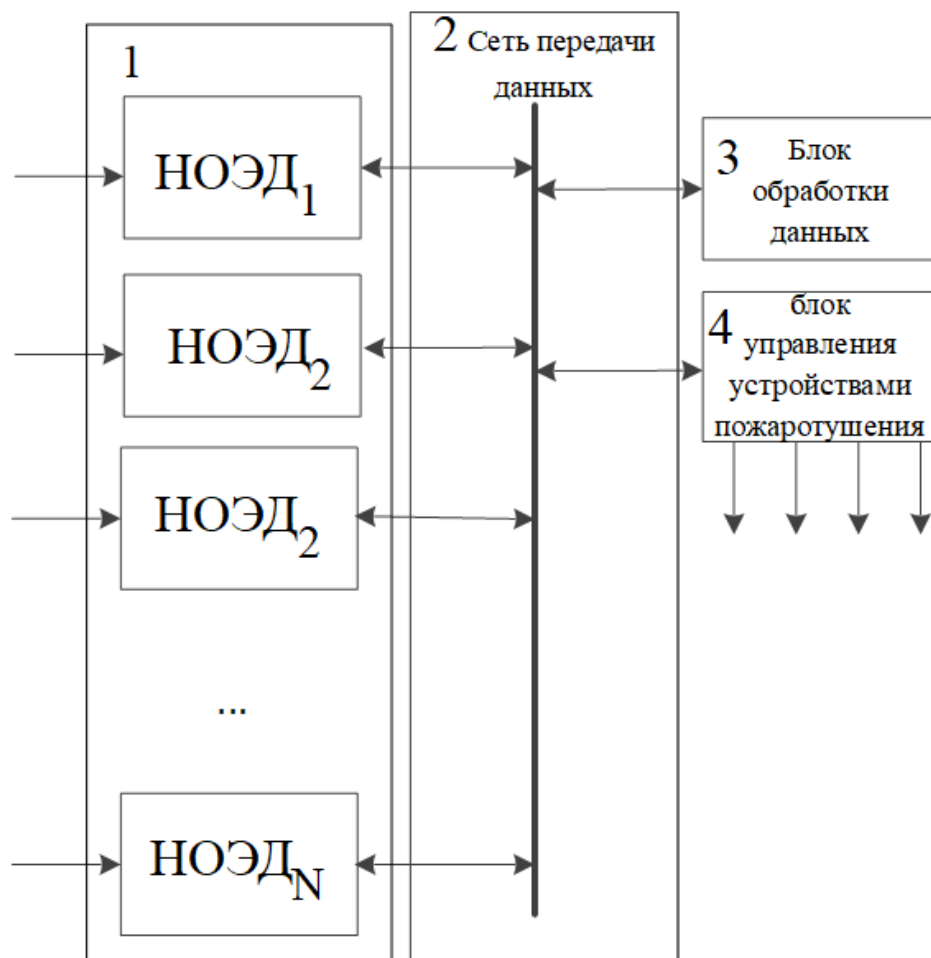


Рисунок 3.1 – Структурная схема системы

Система работает следующим образом. На входные зрачки НОЭД поступает поток оптического излучения. Сигналы с НОЭД в цифровом виде поступают на блок обработки данных 3 через высокоскоростную сеть передачи данных 2. Обработка полученных сигналов с НОЭД заключается в обнаружении пламени при достижения сигналами НОЭД порога срабатывания. В случае обнаружения пламени блок обработки данных выполняет расчет пространственных координат пламени. Затем с учетом данных о координатах пламени блок обработки данных передает команды активации на блок управления устройствами пожаротушения 4, который в свою очередь запускает соответствующее устройство пожаротушения.

Таким образом, ключевыми элементами системы являются НОЭД, параметры которых определяют надежность срабатывания, устойчивость к оптическим помехам и быстродействие многоточечной оптико-электронной системы.

3.2 Разработка некоординатного оптико-электронного датчика системы

На основе анализа литературных источников [15, 16, 71], требований ГОСТ Р 53325-2012 [39] и требований к оптико-электронной системе (см. пункт 2.1) были установлены следующие граничные технические параметры НОЭД:

- угол обзора – не менее 90°;
- значение фоновой освещенности, создаваемое лампами накаливания, при котором НОЭД сохраняет работоспособность и не выдает ложное извещение – не менее 250 лк. НОЭД не должен выдавать ложного извещения при модуляции излучения ламп накаливания светонепроницаемой перегородкой и включением (выключением) источника питания;
- значение температуры нагретого тела, выступающего как оптическая помеха, при котором НОЭД не выдает ложное извещение – не менее 300 °С;
- расстояние, на котором НОЭД должен срабатывать от воздействия излучения, создаваемого тестовыми очагами пламени ТП-5 и ТП-6 – не менее 8 м;
- быстродействие – не более 1 мс;

– возможность объединения НОЭД в единую оптико-электронную систему посредством сети передачи данных.

3.2.1 Применение компенсационного метода подавления оптических помех в оптико-электронном датчике

Для обеспечения требуемой помехозащищенности НОЭД от излучения источников естественного и искусственного происхождения было предложено использовать компенсационный метод подавления оптических помех.

Сущность метода заключается в регистрации потока оптического излучения двумя фотоприемниками, имеющими разные спектральные диапазоны чувствительности, характерные для цели и помехи: первый фотоприемник с диапазоном $(\lambda_1 \dots \lambda_2)$ регистрирует излучение цели (пламени); второй фотоприемник $(\lambda_3 \dots \lambda_4)$ – излучение оптической помехи. Затем сигнал второго фотоприемника вычитается из сигнала первого фотоприемника [72].

Выбор спектральных диапазонов $\lambda_1 \dots \lambda_2$ и $\lambda_3 \dots \lambda_4$ определяется следующими условиями:

– выходные сигналы фотоприемников уравниваются при регистрации излучения оптической помехи в спектральных диапазонах $\lambda_1 \dots \lambda_2$ и $\lambda_3 \dots \lambda_4$, для обеспечения возможности компенсации сигнала оптической помехи;

– существенное различие потоков излучения пламени в выбранных спектральных диапазонах для обеспечения возможности выделения полезного сигнала на фоне помехи [72, 73].

Условие уравнивания выходных сигналов при регистрации излучения оптической помехи двумя фотоприемниками имеет вид:

$$K_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\text{п}}(\lambda) s_1(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) d\lambda = K_2 \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} M_{\text{п}}(\lambda) s_2(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) d\lambda, \quad (3.1)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты преобразования сигналов с фотоприемников в электронном тракте НОЭД, В/А; $M_{\text{п}}(\lambda)$ – спектральная энергетическая светимость помехи, Вт/(м²·нм); $s_1(\lambda), s_2(\lambda)$ – спектральные характеристики чувствительности

фотоприемников, А/Вт; $\tau_o(\lambda)$ и $\tau_c(\lambda)$ – спектральные коэффициенты пропускания оптической системы и промежуточной среды соответственно [72, 73].

Уравнивание выходных сигналов фотоприемников, регистрирующих поток излучения оптической помехи выполняется с учетом их спектральной чувствительности, а также принимая во внимание зависимость коэффициентов пропускания светофильтров от длины волны излучения [72, 73]. Существуют следующие подходы к выполнению уравнивания сигналов фотоприемников [73, 41]:

- выбор спектральных диапазонов $\lambda_1 \dots \lambda_2$ и $\lambda_3 \dots \lambda_4$ путем задания границ пропускания излучения светофильтрами;
- выбор коэффициентов пропускания светофильтров, при которых излучение ослабляется в заданное число раз;
- выбор коэффициентов преобразования сигналов с фотоприемников в электронном тракте НОЭД.

Выделяемый сигнал цели (пламени) пропорционален разности сигналов в двух спектральных диапазонах [72, 73]:

$$\Delta \sim \left[K_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\text{ц}}(\lambda) s_1(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) d\lambda - K_2 \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} M_{\text{ц}}(\lambda) s_2(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) d\lambda \right]. \quad (3.2)$$

где $M_{\text{ц}}(\lambda)$ – спектральная энергетическая светимость цели, Вт/(м²·нм);

Условие минимизации потери сигнала цели при компенсации воздействия помехи для спектрального диапазона цели (пламени) $\lambda_1 \dots \lambda_2$ и оптической помехи $\lambda_3 \dots \lambda_4$ имеет вид [72, 73]:

$$K_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\text{ц}}(\lambda) s_1(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) d\lambda \gg K_2 \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} M_{\text{ц}}(\lambda) s_2(\lambda) \tau_o(\lambda) \tau_c(\lambda) d\lambda. \quad (3.3)$$

Компенсационный метод применим для априорно известных спектральных характеристик помехи и промежуточной среды, которые не изменяются во времени. При отклонении характеристик от априорно известных оптическая помеха не будет компенсирована полностью [72, 73].

3.2.2 Определение оптимальных спектральных диапазонов контроля для оптико-электронного датчика системы

3.2.2.1 Методика определения оптимальных спектральных диапазонов контроля

Частными критериями оптимальности при определении оптимальных спектральных диапазонов являются: коэффициент потерь сигнала цели при компенсации $q_{\text{пк}}$; отношение сигнал-шум $\mu_{\text{вых}}$.

Коэффициент $q_{\text{пк}}$ характеризует возможность выделения сигнала цели на фоне оптических помех и должен стремиться к минимуму, чтобы повысить помехоустойчивость НОЭД [72].

Чувствительность НОЭД оценивается на основе отношения сигнал-шум, которое должно стремиться к максимуму.

Повышение помехоустойчивости НОЭД может привести к уменьшению его чувствительности. Следовательно, для построения НОЭД необходимо выбрать набор фотоприемников, обеспечивающий его оптимальную помехоустойчивость и чувствительность. Для этого необходимо ввести обобщенный критерий оптимальности [72].

Принимая частные критерии равноценными, обобщённый критерий оптимальности $Q(\Lambda)$ рассчитывается как сумма относительных отклонений частных критериев от их оптимальных значений:

$$Q(\Lambda) = \sum_{j=1}^2 [Q_j(\Lambda) - Q_j^*] / Q_j^*, \quad (3.4)$$

где $\Lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4]$ – переменная, определяющая спектральные диапазоны чувствительности пар фотоприемников; $Q_j(\Lambda)$ – частный критерий оптимальности для заданной пары фотоприемников; Q_j^* – оптимальное значение частного критерия [74].

Для определенности задача оптимизации сводится к минимизации $Q(\Lambda)$, поэтому частные критерии оптимальности должны быть приведены к минимуму [72].

С учетом критерия оптимальности и рекомендаций, приведенных в работах [41, 73, 75, 76] была разработана методика определения оптимальных спектральных диапазонов контроля НОЭД:

1. Проводится анализ спектральной энергетической светимости пламени и оптических помех и определяются оптические помехи, воздействие которых приводит к ложному срабатыванию НОЭД, и спектральные диапазоны контроля излучения пламени $\lambda_1 \dots \lambda_2$ и оптической помехи $\lambda_3 \dots \lambda_4$.

2. Определяется набор пар фотоприемников для контроля излучения пламени и оптической помехи на основе анализа параметров и характеристик выпускаемых фотоприемников.

3. Выполняется уравнивание выходных сигналов фотоприемников при регистрации ими потока излучения оптической помехи в спектральных диапазонах $\lambda_1 \dots \lambda_2$ и $\lambda_3 \dots \lambda_4$ путем подбора коэффициентов преобразования сигналов с фотоприемников в электронном тракте.

4. Устанавливается возможность выделения сигнала от излучения пламени на фоне оптической помехи после выполнения уравнивания сигналов. Рассчитывается первый частный критерий оптимальности – $q_{пк}$.

5. Рассчитывается второй частный критерий оптимальности – $\mu_{вых}$ при регистрации фотоприемниками излучения пламени.

6. Рассчитывается $Q(\lambda)$ и определяется оптимальная пара фотоприёмников для контроля излучения пламени и оптической помехи [72].

3.2.2.2 Анализ спектральных характеристик излучения пламени и источников оптических помех

Исходными данными для определения оптимальных спектральных диапазонов контроля являются данные о спектральной энергетической светимости при излучении пламени и оптических помех [72, 77].

Спектральная энергетическая светимость огненного шара с диаметрами $D = 0,2; 1$ и 3 м (температура $T=2206$ К) при горении метановоздушной смеси по-

лучена на основе формул (2.1) – (2.6), приведенных в главе 2 (рисунок 3.2) [72, 77].

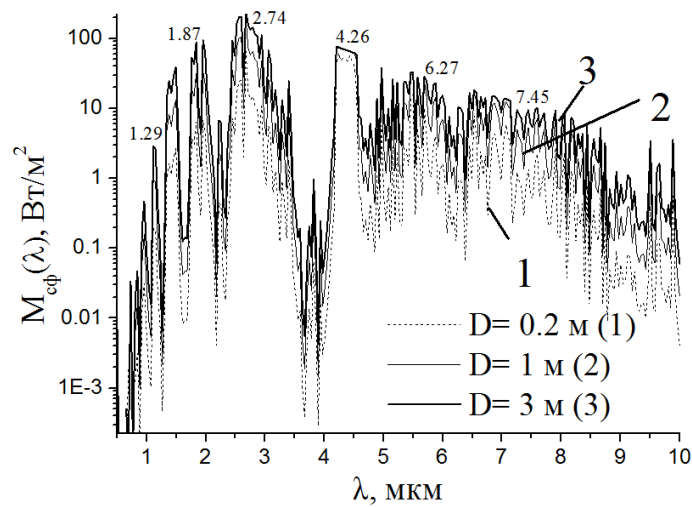


Рисунок 3.2 – Спектральная энергетическая светимость огненного шара

Ложные срабатывания НОЭД, могут возникать при воздействии излучения источников естественного (Солнце) и искусственного (люминесцентных и светодиодных ламп, ламп накаливания) освещения [73]. В отдельных условиях эксплуатации требуется обеспечить помехоустойчивость НОЭД от оптических помех в виде инфракрасного излучения нагретых тел.

Оптические помехи в виде излучения нагретых тел имеют температуру от 100 до 300 °С и обусловлены излучением промышленного оборудования на охраняемом объекте (рисунок 3.3) [20, 78].

Спектральные характеристики излучения ламп накаливания и нагретых тел наиболее близки к характеристикам излучения продуктов горения (H_2O и CO_2), следовательно, такие помехи могут привести к ложным срабатываниям НОЭД (рисунок 3.3).

Излучение люминесцентных и светодиодных ламп может быть подавлено за счет применения спектральной фильтрации в НОЭД, поскольку основная доля энергии излучения таких ламп находится в видимой области спектра.

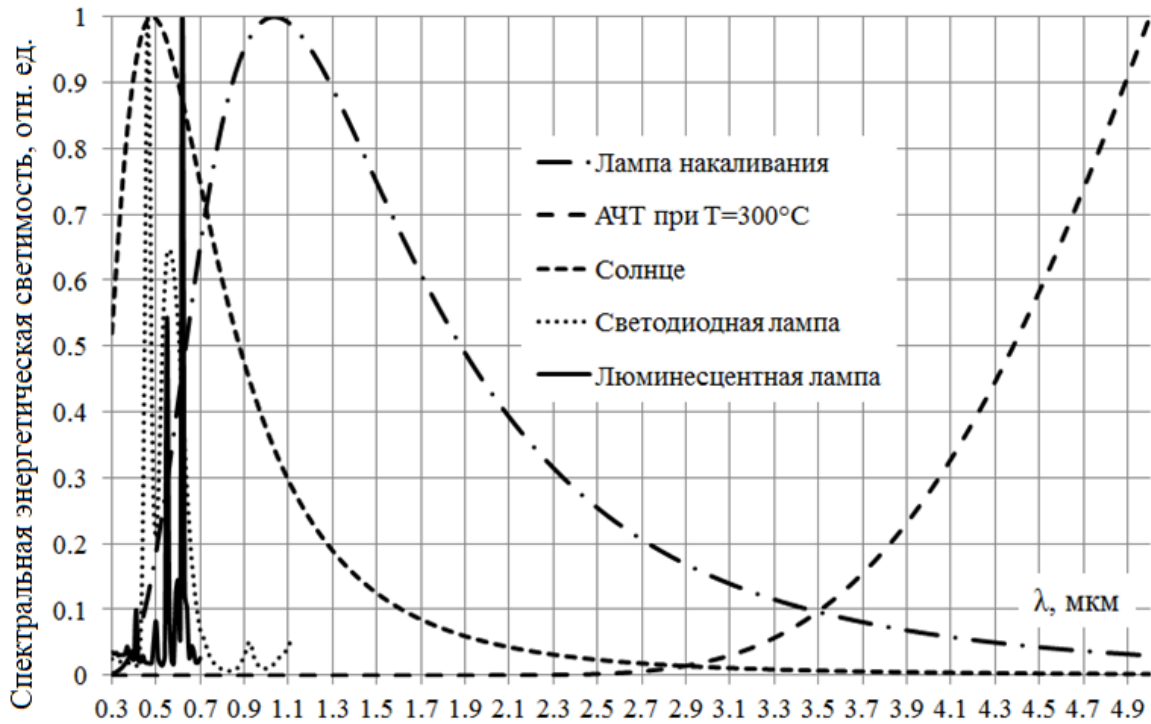


Рисунок 3.3 – Спектральная энергетическая светимость источников оптических помех

Для исключения ложного срабатывания НОЭД при воздействии излучения ламп накаливания и нагретых тел необходимо использовать комплексный подход, заключающийся как в применении спектральной фильтрации, так и компенсационного метода подавления оптических помех [77].

Спектральная энергетическая светимость ламп накаливания рассчитывается по закону Планка с учетом спектрального коэффициента излучения вольфрама для температуры тела накала 2700 К [79, 80]. Спектральную энергетическую светимость нагретых тел допускается рассчитывать с помощью закона Планка для абсолютно черного тела при температуре от 100 до 300 °С [20].

3.2.2.3 Выбор фотоприемников для контроля излучения пламени и оптических помех

Диапазон спектральной чувствительности фотоприемников, используемых при контроле излучения пламени, должен соответствовать максимумам спектральной энергетической светимости продуктов горения – 2, 2,7 и 4,2 мкм, а при

контроле излучения ламп накаливания должен составлять от 0,8 до 1 мкм для обеспечения значительного различия величин потока излучения пламени и лампы накаливания.

Контроль излучения нагретых тел выполняется в диапазонах от 3,7 до 3,9 мкм и от 4,6 до 5 мкм с использованием фотоприемников с соответствующими диапазонами спектральной чувствительности для обеспечения существенного различия величин потоков излучения пламени и нагретого тела [77].

Наименования выпускаемых импортных и отечественных фотодиодов и спектральные диапазоны их чувствительности для контролируемых источников излучения приведены в таблице 3.1 [72].

Таблица 3.1 – Спектральные диапазоны чувствительности фотодиодов

Фотодиод	Спектральный диапазон чувствительности, мкм	Длина волны в максимуме чувствительности, мкм	Производитель
Излучение пламени			
PD24-28	0,9 – 2,5	2,1	ООО «АИБИ» [59]
PD36-10	1,0 – 3,8	3,4	ООО «АИБИ»
PD48-05	2,5 – 4,9	4	ООО «АИБИ»
ФЭ722	1,6 – 3,5	2,6	ОАО «НИИ “ТИРИКОНД”» [81]
ФЭ723	1,6 – 4,2	3,2	ОАО «НИИ “ТИРИКОНД”»
ФЭ724	2,6 – 4,75	3,7	ОАО «НИИ “ТИРИКОНД”»
Оптическая помеха – излучение лампы накаливания			
BPW34F	0,78 – 1,1	0,95	OSRAM Opto Semiconductors [82]
ФД Призма 5	0,8 – 1,8	1,5	ОАО "ЦКБ Ритм" [83]
Оптическая помеха – излучение нагретого тела			
ФЭ724 со светофильтром (3,9 мкм)	3,8 – 3,95	3,9	ОАО «НИИ “ТИРИКОНД”»
ФЭ724 со светофильтром (4,67 мкм)	4,6 – 4,75	4,67	ОАО «НИИ “ТИРИКОНД”»

3.2.2.4 Расчет критериев оптимальности для спектральных диапазонов контроля

При расчете обобщенного критерия оптимальности согласно формуле (3.4) частные критерии оптимальности необходимо привести к минимуму.

Оптимальное значение $q_{\text{пк}}$ определяется как минимальное по диапазонам чувствительности пар фотоприемников, откуда $Q_1(\Lambda)=q_{\text{пк}}$.

Оптимальное отношение сигнал-шум изначально должно стремиться к максимуму. Следовательно, предложено установить второй частный критерий как обратное отношение $Q_2(\Lambda)=1/\mu_{\text{вых}}$. Тогда величина $Q_2(\Lambda)$ будет стремиться к минимуму [72].

Величина $q_{\text{пк}}$ рассчитывается согласно следующей формуле:

$$q_{\text{пк}} = \frac{K_2 \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} M_{\text{ц}}(\lambda) s_2(\lambda) \tau_{o2}(\lambda) \tau_{c2}(\lambda) d\lambda}{K_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\text{ц}}(\lambda) s_1(\lambda) \tau_{o1}(\lambda) \tau_{c1}(\lambda) d\lambda}. \quad (3.5)$$

Величина $\mu_{\text{вых}}$ рассчитывается по сигналу на выходе усилителя НОЭД при регистрации фотодиодами потока излучения пламени (сигнал цели):

$$\mu_{\text{вых}} = \frac{U_c}{U_{\text{ш}}}, \quad (3.6)$$

где U_c – усиленный полезный сигнал с фотодиода, регистрирующего поток излучения пламени, В; $U_{\text{ш}}$ – среднее квадратическое значение шума на выходе усилителя, В.

Величина U_c рассчитывается на основе формул (2.1) – (2.6), приведенных во второй главе. Исходные данные для расчета приведены в п. 2.4.2. Значение диаметра огненного шара составляет 0,25 м. Расстояние от огненного шара до НОЭД равно 25 м и определяется техническими требованиями к НОЭД [72].

Исходные данные о параметрах фотодиодов для расчета отношения сигнал-шум взяты из технической документации, представленной производителями.

При расчете $U_{\text{ш}}$ учитывались шумы, вносимые электронной схемой усилителя, которые помимо собственного шума фотодиода составляют значительную долю в суммарном шуме, поскольку выполняется усиление сигнала со средневолнового инфракрасного фотодиода с низким дифференциальным сопротивлением

R_0 (от 10 Ом до 100 кОм) [84]. Электронная схема представляет собой преобразователь ток-напряжение (ПТН), активным элементом которого является операционный усилитель (ОУ) [72].

Эквивалентная шумовая схема преобразователя ток-напряжение представлена на рисунке 3.4 [85].

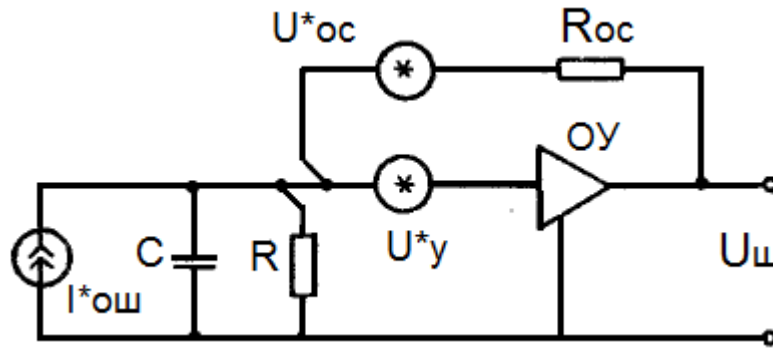


Рисунок 3.4 – Эквивалентная шумовая схема преобразователя ток-напряжение

Величина $U_{ш}$ описывается выражением:

$$U_{ш} = \sqrt{\left\{ (U_y^*)^2 \left[\left(1 + \frac{R_{oc}}{R} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} (\Delta f)^2 C^2 R_{oc}^2 \right] + R_{oc}^2 (I_{oш}^*)^2 + 4kTR_{oc} \right\} \cdot \Delta f}, \quad (3.7)$$

где $(U_y^*)^2$ – спектральная плотность шума по напряжению ОУ, В²/Гц; R_{oc} – сопротивление обратной связи, Ом; R – эквивалентное сопротивление, Ом; C – эквивалентная емкость, Ф; $(I_{oш}^*)^2$ – общая спектральная плотность шума тока, А²/Гц; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ – постоянная Больцмана, Т – температура фотодиода, К, Δf – ширина полосы частот схемы, Гц [85].

В источниках шума среднее квадратическое значение шума тока (напряжения) изменяется прямо пропорционально ширине полосы частот Δf . При этом источники шума характеризуют средним квадратическим значением амплитуды на единицу полосы частот – спектральной плотностью шума (обозначено знаком *).

Величина $I_{oш}^*$ рассчитывается согласно формуле [85]:

$$(I_{oш}^*)^2 = (I_y^*)^2 + (I_{тш}^*)^2 = 4kT/R + (I_y^*)^2. \quad (3.8)$$

где I_y^* – шум тока усилителя; $I_{тш}^*$ – тепловой шум эквивалентного сопротивления схемы.

Дробовой шум не учитывается, поскольку в фотодиодах он составляет незначительную долю по сравнению с тепловым шумом.

Эквивалентное сопротивление R определяется согласно формуле:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{\text{дф}}} + \frac{1}{R_{\text{вх}}}. \quad (3.9)$$

где $R_{\text{дф}}$ – дифференциальное сопротивление фотодиода, Ом; $R_{\text{вх}}$ – входное сопротивление операционного усилителя, Ом [85].

Эквивалентная емкость C определяется согласно выражению:

$$C = C_{\text{ф}} + C_{\text{вх}}, \quad (3.10)$$

где $C_{\text{ф}}$ – емкость фотодиода, Ф; $C_{\text{вх}}$ – входная емкость операционного усилителя, Ф.

При изменении фототока напряжение на нагрузке будет изменяться с запаздыванием, которое определяется постоянной времени RC .

Спектральная плотность шума по напряжению $(U_{\text{ос}}^*)^2$ для сопротивления обратной связи $R_{\text{ос}}$ рассчитывается с учетом его теплового шума [85]:

$$(U_{\text{ос}}^*)^2 = 4kTR_{\text{ос}}. \quad (3.11)$$

Величина $R_{\text{ос}}$ представляет собой коэффициент преобразования ПТН $K_{\text{ПТН}}$ равный 10^6 . Однако его значение в дальнейшем может быть уточнено с учетом входного диапазона АЦП НОЭД.

Согласно рекомендациям [84, 86], при реализации ПТН для фотодиодов с низким дифференциальным сопротивлением рекомендуется выбирать малошумящие ОУ, например, AD797 на биполярных транзисторах. Параметры ОУ используемые при расчете составляют $U_y^* = 0,9 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, $I_y^* = 2 \text{ пА}/\sqrt{\text{Гц}}$, $R_{\text{вх}} = 100 \text{ МОм}$, $C_{\text{вх}} = 5 \text{ пФ}$. Величина Δf принята при расчете равной 1 МГц с учетом требований к быстродействию НОЭД и зависящей от него частоты преобразования аналого-цифрового преобразователя [72].

Определение требуемого значения соотношения между сигналом и шумами для качественной (надежной) работы НОЭД наиболее часто выполняется на базе статистических критериев, позволяющих оценить вероятность приема полезного сигнала на фоне помех, к которым относятся вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги [42, 41]. В известных приборах и системах обнаруже-

ния пламенного горения [15, 18, 87] значения отношения сигнал-шум принимаются равными от 2 до 5. Согласно ГОСТ 26342-84 [88] для охранно-пожарных извещателей (в том числе извещателей пламени) указывается: «при использовании амплитудного способа обработки сигнала отношение сигнал-шум на входе порогового устройства должно быть не менее 10, при этом эффективное значение напряжения шума измеряют при отсутствии внешних возмущающих воздействий в полосе полезного сигнала.» ГОСТ 26342-84 является действующим и актуализирован в соответствии с приказом Ростехрегулирования от 30.04.2009 г. № 1573, поэтому в качестве минимального соотношения сигнал-шум принимается $\mu_{\text{вых min}} = 10$.

3.2.2.5 Результаты определения оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени

Согласно методике, представленной в п. 3.2.2.1 выполнен расчет оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени с использованием разработанной программы для ЭВМ [89]. Результаты расчета $Q(\Lambda)$ при влиянии излучения оптической помехи в виде лампы накаливания представлены в таблице 3.2 [72].

Таблица 3.2 – Результаты расчётов $Q(\Lambda)$ при влиянии излучения оптической помехи в виде лампы накаливания

Фотодиод для контроля излучения помехи (лампа накаливания)	Фотодиод для контроля излучения пламени	$Q_{\text{ПК}}$	$\mu_{\text{вых}}$	$Q(\Lambda)$
BPW34F	PD24-28	0.011	144	23
BPW34F	PD36-10	$7,6 \cdot 10^{-4}$	22	6,1
BPW34F	PD48	$8,4 \cdot 10^{-4}$	2,5	58
BPW34F	ФЭ722	$8 \cdot 10^{-4}$	36	3,7
BPW34F	ФЭ723	$7,6 \cdot 10^{-4}$	33	3,9
BPW34F	ФЭ724	$4,7 \cdot 10^{-4}$	17	7,5
ФД Призма 5	PD36-10	0.038	22	85
ФД Призма 5	ФЭ722	0.04	36	87

Минимальные значения критерия $Q(\lambda)$ при влиянии помех в виде излучения лампы накаливания получены для пары фотодиодов BPW34F и ФЭ722, контролирующих излучение оптической помехи и пламени в спектральных диапазонах 0,78 – 1,1 мкм и 1,6 – 3,5 мкм соответственно.

Требуемому значению сигнал-шум не соответствует фотодиод PD48 из-за малой площади чувствительной области при существенном уровне шума. При этом для остальных фотодиодов требуемое значение сигнал-шум превышает 10. Наибольшее значение отношения сигнал-шум показал фотодиод PD24-28. Удовлетворительные результаты показали фотодиоды ФЭ723, ФЭ724 и PD36-10.

Результаты расчетов $Q(\lambda)$ при воздействии помехи в виде излучения нагретого тела ($T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$) представлены в таблице 3.3 [72].

В результате в качестве фотоприемника для контроля излучения пламени был выбран фотодиод ФЭ722. Оптические помехи в виде ламп накаливания будут минимально воздействовать на сигнал с ФЭ724. Для контроля излучения оптической помехи в виде лампы накаливания выбран фотодиод BPW34F. Для контроля излучения от нагретых тел на используется фотодиод ФЭ724 с дополнительно установленным интерференционным светофильтром с центральной длиной волны 3,9 мкм [77].

Таблица 3.3 – Результаты расчётов $Q(\lambda)$ при воздействии излучения помехи в виде нагретого тела

Фотодиод для контроля излучения помехи (нагретое тело)	Фотодиод для контроля излучения пламени	$q_{\text{пк}}$	$\mu_{\text{вых}}$	$Q(\lambda)$
ФЭ724 со светофильтром (3,9 мкм)	PD36-10	$1,9 \cdot 10^{-4}$	22	7
ФЭ724 со светофильтром (3,9 мкм)	ФЭ722	$7,9 \cdot 10^{-5}$	36	3
ФЭ724 со светофильтром (3,9 мкм)	ФЭ723	$3,5 \cdot 10^{-4}$	33	6,7
ФЭ724 со светофильтром (3,9 мкм)	ФЭ724	0,0015	17	25
ФЭ724 со светофильтром (4,67 мкм)	PD36-10	0,007	22	19
ФЭ724 со светофильтром (4,67 мкм)	ФЭ722	0,003	36	8
ФЭ724 со светофильтром (4,67 мкм)	ФЭ723	0,012	33	28

Параметры выбранных фотоприемников и светофильтров для построения НОЭД приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Параметры фотодиодов НОЭД

Объект контроля		Лампа накаливания	Пламя	Нагретое тело	Пламя
Спектральный диапазон, мкм		0,78 – 1,1	1,6 – 3,8	3,88 – 3,92	2,6 – 4,7
Параметры фотодиодов	Название	BPW34F	ФЭ722	ФЭ724 с фильтром 3,9 мкм	ФЭ724
	Токовая монохроматическая чувствительность, А/Вт	0,62	0,2	0,2	0,2
	Обнаружительная способность, Вт ⁻¹ смГц ^{1/2}	$3,5 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^9$	$6 \cdot 10^9$
	Размеры чувствительной площадки, мм	2,65×2,65	2×2	2×2	2×2
	Время нарастания и спада фототока, мкс	$5 \cdot 10^{-3}$	5	5	5
	Угол обзора, град, не менее	90	90	90	90

Фотодиоды в таблице 3.4 обеспечивают необходимый угол обзора и время нарастания и спада фототока исходя из требуемых параметров НОЭД.

3.2.3 Структурная схема опико-электронного датчика системы

Структурная схема НОЭД разрабатывалась исходя из установленных требований (см. п. 2.1) с учетом выбранных оптимальных спектральных диапазонов контроля излучения пламени и оптических помех для реализации компенсационного метода, используя соответствующие фотодиоды.

Для контроля оптического излучения пламени используются 2 фотодиода (ФЭ722 и ФЭ724) с максимальной спектральной чувствительностью на длинах волн 2,6 и 4,2 мкм. Для контроля излучения от помех в виде нагретых тел используется фотодиод ФЭ724 со светофильтром с максимальной спектральной чувствительностью на длине волны 3,9 мкм.

Чувствительные элементы всех фотодиодов расположены в одной плоскости так, чтобы их центры находились в вершинах равностороннего треугольника. Фотодиоды касаются друг друга и их чувствительные элементы направлены на пламя, оптические оси каналов параллельны. Предложенное расположение фотодиодов позволяет обеспечить максимальный угол обзора НОЭД (рисунок 3.5) [77, 90].

Излучение ламп накаливания (ЛН) контролируется двумя фотодиодами BPW34F с максимумом спектральной чувствительности на длине волны 0,95 мкм.

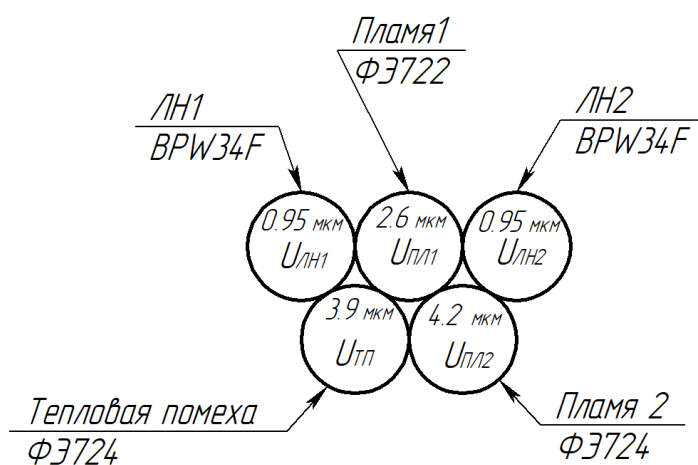


Рисунок 3.5 – Схема размещения фотодиодов

Фотодиоды BPW34F, регистрирующие поток излучения лампы накаливания, установлены на одной линии с фотодиодом ФЭ722 контроля излучения пламени (2,6 мкм). На рисунке 3.6 показано изменение сигналов $U_{ЛН1}$, $U_{ЛН2}$ и $U_{ПЛ1}$ во времени при модуляции излучения светонепроницаемой перегородкой [77].

Момент времени t_1 соответствует ситуации, когда фотодиоды не перекрыты, t_2 – перекрыт фотодиод ЛН1, t_3 – перекрыт фотодиод ПЛ1. В момент времени t_2 возникает ситуация, когда $U_{ПЛ1} > U_{ЛН1}$ и целевой сигнал превышает пороговый, что может определяться как наличие пламени. В момент времени t_3 $U_{ПЛ1} < U_{ЛН1}$ и целевой сигнал принимает отрицательное значение, т.е. пламя отсутствует. Таким образом, при расчете целевого сигнала в качестве сигнала оптической помехи от лампы накаливания должно выбираться максимальное значение из двух сигналов $U_{ЛН1}$ и $U_{ЛН2}$.

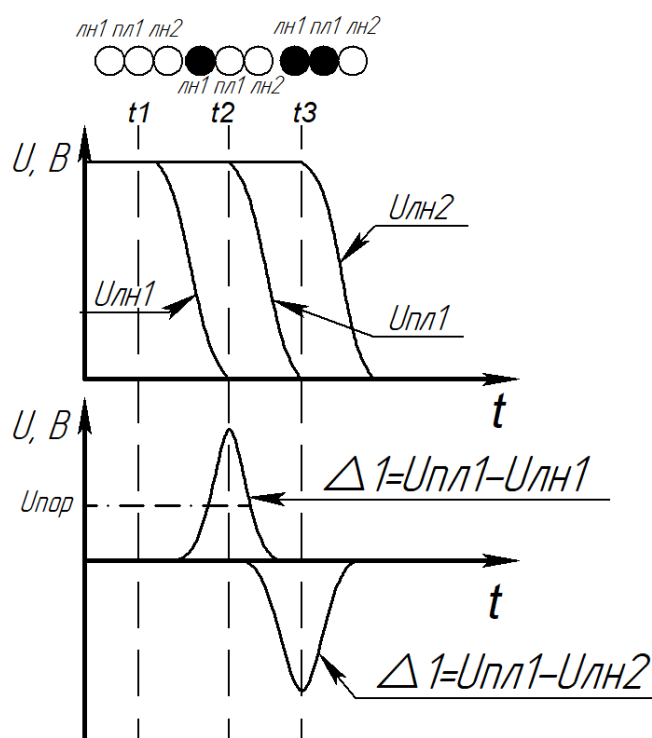


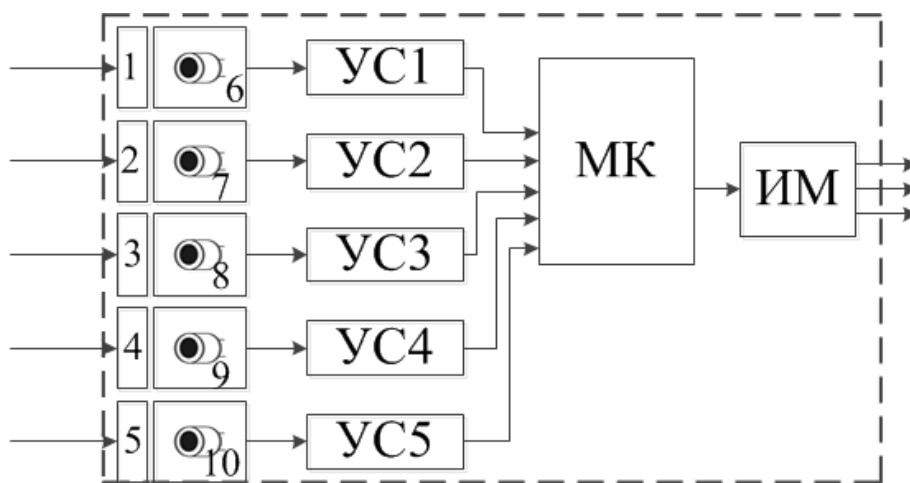
Рисунок 3.6 – Изменение сигналов при модуляции излучения светонепроницаемой перегородкой

Следовательно, предложенное расположение фотодиодов BPW34F на одной линии с фотодиодом ФЭ722 и подход к расчету целевого сигнала, позволяют исключить ложные срабатывания НОЭД при воздействии модулированного светонепроницаемой перегородкой излучения лампы накаливания [77].

Таким образом, для обеспечения помехоустойчивости НОЭД должен включать пять фотодиодов. Структурная схема НОЭД представлена на рисунке 3.7.

НОЭД содержит светофильтры 1 – 5, фотодиоды 6 – 10 с усилителями УС1 – УС5, микроконтроллер (МК) и интерфейсный модуль (ИМ). Поток излучения через светофильтры поступает на фотодиоды, включенные в фотогальваническом режиме работы. Далее выполняется преобразование фототока каждого фотодиода в напряжение и усиление полученных сигналов с помощью усилителей УС1 – УС5. Усиленные сигналы поступают на входы АЦП микроконтроллера. Микроконтроллер (МК) преобразует сигналы с усилителей в цифровой код, выполняет

обработку сигналов на базе компенсационного метода подавления оптических помех и принимает решение о возникновении (или отсутствии) пламени.



1 – 5 – светофильтры; 6 – 10 фотодиоды; УС1 – УС5 – усилители;

МК – микроконтроллер; ИМ – интерфейсный модуль

Рисунок 3.7 – Структурная схема НОЭД системы

В случае возникновения пламени значение выходного сигнала $U_{\text{вых}}$, характеризующего излучение пламени, передается через ИМ, с помощью сети передачи данных на блок обработки данных системы (рисунок 3.1).

Обработка сигналов на базе компенсационного метода подавления оптических помех включает [77]:

1) расчет сигнала цели Δ_1 при компенсации сигнала оптической помехи в виде лампы накаливания $U_{\text{лн}}$ для канала $U_{\text{пл1}}$ согласно формуле:

$$\Delta_1 = U_{\text{пл1}} - U_{\text{лн}}. \quad (3.12)$$

При этом, значение $U_{\text{лн}}$ определяется из условия:

$$U_{\text{лн}} = \begin{cases} U_{\text{лн1}}, & \text{если } U_{\text{лн1}} \geq U_{\text{лн2}} \\ U_{\text{лн2}}, & \text{если } U_{\text{лн1}} < U_{\text{лн2}} \end{cases}, \quad (3.13)$$

т.е. из двух сигналов $U_{\text{лн1}}$ и $U_{\text{лн2}}$ определяется максимальный и фиксируется как сигнал от излучения лампы накаливания. Таким образом, обеспечивается помехоустойчивость НОЭД к модулированному светонепроницаемой перегородкой излучению лампы накаливания.

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

$$\Delta_2 = U_{\text{вых}} = \Delta_1 - U_{\text{ТП}}. \quad (3.14)$$

3) расчет сигнала цели Δ_3 при компенсации сигнала помехи в виде излучения нагретого тела $U_{\text{ТП}}$ для канала $U_{\text{пл2}}$:

$$\Delta_3 = U_{\text{пл2}} - U_{\text{ТП}}. \quad (3.15)$$

Возникновение пламени определяется превышением значений сигналов цели Δ_2 и Δ_3 порога срабатывания $U_{\text{порог}}$ принимается решение.

Усилители УС1 – УС5 построены на базе одноканальных ОУ AD797, включенных по схеме преобразователя тока в напряжение. В результате анализа рынка микроконтроллеров с учетом опыта разработки и эксплуатации оптико-электронных приборов контроля пламенного горения [16, 91, 92] для построения НОЭД выбран микроконтроллер ATmega8 фирмы ATMEL [93], обеспечивающий необходимое быстродействие и имеющий в своем составе встроенный АЦП и необходимые порты ввода-вывода.

3.2.4 Алгоритм работы управляющей программы микроконтроллера для оптико-электронного датчика

Алгоритм работы управляющей программы микроконтроллера для НОЭД заключается в выполнении следующих процедур:

1) Инициализация микроконтроллера, при которой переменным присваиваются исходные значения, настраиваются порты ввода вывода и АЦП.

2) Опрос фотодиодов, при котором выполняется последовательное аналого-цифровое преобразование сигналов с выходов соответствующих усилителей и цифровая фильтрация данных.

3) Обработка сигналов на основе компенсационного метода подавления оптических помех. Блок-схема данной процедуры представлена на рисунке 3.8. После ввода значений сигналов всех каналов определяется сигнал оптической по-

мехи $U_{\text{лн}}$ от лампы накаливания согласно формуле (3.13). Затем выполняется расчет сигнала цели Δ_1 . Далее определяются сигналы цели Δ_2 и Δ_3 в соответствии с формулами (3.14) и (3.15). При превышении значений сигналов цели Δ_2 и Δ_3 порога срабатывания $U_{\text{порог}}$ принимается решение о наличии пламени.

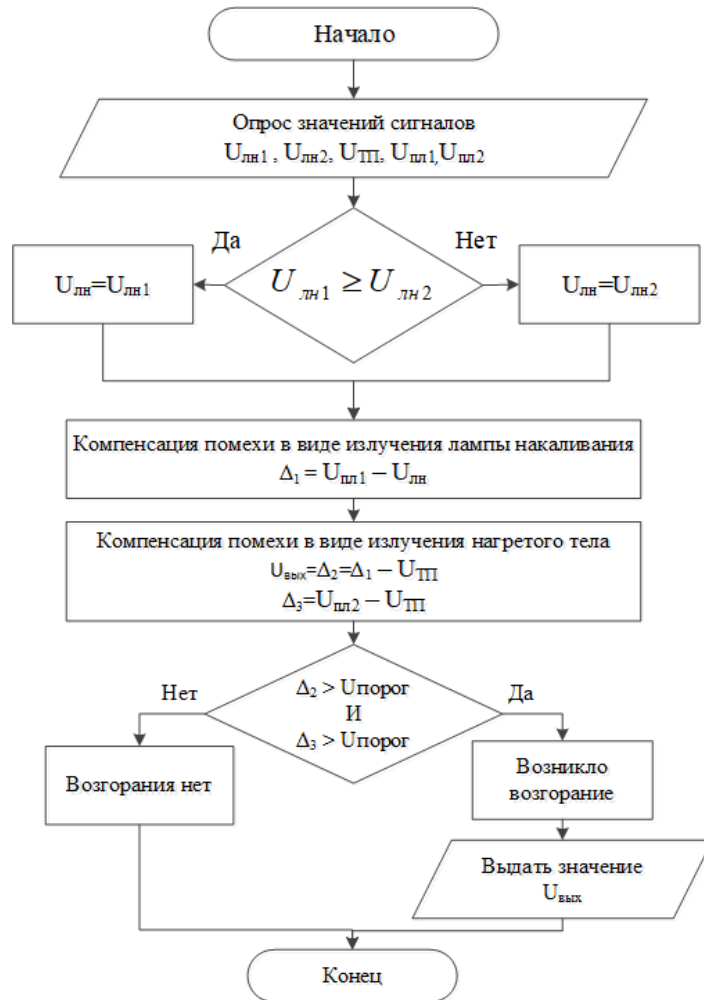


Рисунок 3.8 – Блок-схема процедуры обработки сигналов на основе компенсационного метода подавления оптических помех

4) При обнаружении пламени, выполняется передача выходного сигнала НОЭД $U_{\text{вых}} = \Delta_2$ (формула (3.14)) посредством сети передачи данных на блок обработки данных системы.

Исходя из алгоритма работы управляющей программы микроконтроллера можно определить быстродействие НОЭД. Быстродействие НОЭД t_d определяется временем нарастания и спада сигналов с усилителей фотодиодов $t_{\text{ф}}$ (5 мкс) и временем работы управляющей программы микроконтроллера $t_{\text{мк}}$, включающем

время преобразования АЦП микроконтроллера. Время работы управляющей программы микроконтроллера было определено с помощью эмулятора программы в среде Atmel Studio 6.0 [94] для тактовой частоты АЦП АТМega8 1МГц и составило 810 мкс. Таким образом, быстродействие НОЭД составляет 815 мкс.

3.3 Высокоскоростная сеть передачи данных между оптико-электронными датчиками и блоком обработки данных

Основной задачей высокоскоростной сети передачи данных является надежный обмен данными между НОЭД и блоком обработки данных при обеспечении требуемого быстродействия системы.

Быстродействие системы определяется быстродействием НОЭД, временем опроса НОЭД блоком обработки данных, временем выполнения операций блоком обработки данных.

Быстродействие НОЭД составляет 0,815 мс (см. п.п. 3.2.4).

Время опроса $t_{оп}$ всех НОЭД системы рассчитывается по формуле:

$$t_{оп} = t_d + N \cdot \frac{I_{inf}}{BR}, \quad (3.16)$$

где t_d – время срабатывания НОЭД, с; N – количество НОЭД; BR – скорость передачи данных, бит/с; I_{inf} – количество передаваемой информации, бит.

Величина I_{inf} составляет 96 бит и включает информацию о наличии пламени, значении выходного сигнала и служебную информацию, необходимую для контроля исправности НОЭД и линий связи, а также корректности передачи данных между устройствами системы [95].

В соответствии с формулой (3.16) рассчитана минимальная скорость передачи данных для системы из пяти НОЭД при времени опроса $t_{оп} = 6$ мс, исходя из требований к быстродействию оптико-электронной системы:

$$BR = \frac{N \cdot I_{inf}}{t_{оп} - t_d} = \frac{5 \cdot 96}{0,006 - 8,15 \cdot 10^{-4}} = 92574 \text{ бит/с}, \quad (3.17)$$

где N – количество НОЭД; t_d – время срабатывания НОЭД, с; BR – скорость передачи данных, бит/с; I_{inf} – количество передаваемой информации, бит.

Таким образом, для организации системы из пяти НОЭД требуется обеспечить следующие основные параметры сети передачи данных: скорость передачи данных – не менее 93 Кбит/с; длина кабеля между устройствами системы – не менее 20 м; число НОЭД: не менее 5. С учетом установленных требований для организации сети передачи данных выбран двухпроводной магистральный интерфейс RS-485 [95].

3.4 Блок обработки данных системы

К основным функциям блока обработки данных системы относятся опрос НОЭД, расчет пространственных координат пламени в случае его обнаружения и формирование управляющего сигнала на соответствующее средство пожаротушения (взрывоподавления). Наиболее эффективным средством реализации этих функций при высоких требованиях к быстродействию системы является применение программируемого логического контроллера.

В результате анализа устройств, представленных на рынке, для реализации экспериментального образца системы был выбран программируемый логический контроллер ПЛК100 фирмы ОВЕН [96]. ПЛК100 предназначен для создания систем автоматизированного управления технологическими процессами. Логика работы ПЛК100 определяется в зависимости от задачи в процессе программирования контроллера. Программирование выполняется в среде CoDeSys 2.3 [97].

ПЛК100 имеет в своем составе необходимый интерфейс RS-485 со скоростью обмена данными 115200 бит/с, что удовлетворяет требованиям к сети передачи данных.

Обобщенно алгоритм работы ПЛК сводится к следующему. Выполняется инициализация системы, при которой проверяется исправность всех устройств и наличие связи между НОЭД и ПЛК по интерфейсу RS-485. В результате проверки ПЛК оценивает состояние готовности всех НОЭД к работе. В случае успешной инициализации система начинает последовательный сбор данных о наличии пламени со всех НОЭД.

При отсутствии пламени, система находится в режиме «Наблюдение» и постоянно производит опрос состояния НОЭД [98].

При получении ПЛК сигнала о наличии пламени от НОЭД, многоточечная оптико-электронная система переходит в режим «Пожар», сигнализирует о наличии горения. Затем значения выходных сигналов всех НОЭД передаются на ПЛК, который выполняет расчёт пространственных координат пламени.

Определение пространственных координат пламени с требуемой точностью выполняется при достижении значений выходных сигналов порога срабатывания для не менее 5 НОЭД из всех датчиков системы. В случае если порог срабатывания будет достигнут для меньшего числа НОЭД, то точность определения координат пламени снизится.

После определения координат пламени ПЛК посылает управляющий сигнал на блок управления устройствами пожаротушения, представляющий совокупность реле, обеспечивающих необходимую величину тока для активации устройств пожаротушения (взрывоподавления).

На основе данных о пространственном расположении пламени выполняется активация устройства пожаротушения, наиболее близко расположенного к зоне горения. При этом локализация горения выполняется точно, и затем система вновь переходит в режим «Наблюдение» [98].

Блок-схема алгоритма работы программы ПЛК показана на рисунке 3.9.

Быстродействие блока обработки данных определяется временем, затрачиваемым на выполнение операций в соответствии с функциональным назначением. Время работы ПЛК оценивается при эмуляции программы в среде CoDeSys 2.3. При этом программа записывается контроллер, подключаемый к персональному компьютеру и выполняется один цикл программы. Такой подход рекомендуется производителем для корректной оценки времени исполнения программы.

В результате проектирования оптико-электронной системы была разработана программа для ПЛК100. Расчетное время выполнения программы составляет $t_{\text{Бод}} = 1 \text{ мс}$.

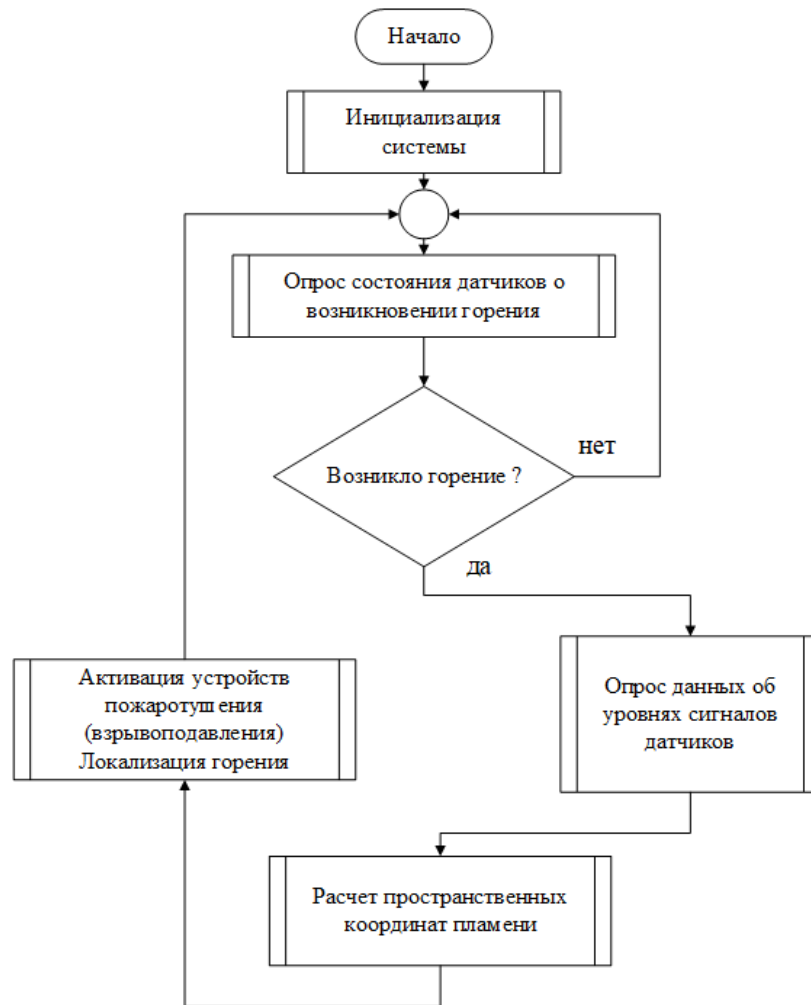


Рисунок 3.9 – Блок-схема алгоритма работы ПЛК

Таким образом, общее быстродействие системы, состоящей из 5 НОЭД, с учетом максимальной скорости передачи данных 115200 бит/с и $I_{inf} = 96$ бит составляет:

$$t_{оэс} = t_{бод} + t_d + N \cdot \frac{I_{inf}}{BR} = 1 + 0,815 + 5 \cdot \frac{96}{115200} = 5,98 \text{ мс.} \quad (3.18)$$

где $t_{бод}$ – быстродействие блока обработки данных, мс; t_d – быстродействие НОЭД, мс; N – количество НОЭД; BR – скорость передачи данных, бит/с; I_{inf} – количество передаваемой информации, бит.

Общее быстродействие системы не превышает требуемое – не более 15 мс (см. п. 2.1).

3.5 Выводы по главе 3

1. Разработана структурная схема быстродействующей многоточечной оптико-электронной системы контроля пламени и определения его пространственных координат, ключевыми элементами которой являются некоординатные оптико-электронные датчики (НОЭД), определяющие надежность срабатывания, помехозащищенность и быстродействие системы в целом.

2. Разработан некоординатный оптико-электронный датчик (НОЭД) системы, а именно:

- определены требуемые технические параметры НОЭД;
- определены оптимальные спектральные диапазоны контроля излучения пламени с учетом применения в НОЭД компенсационного метода подавления оптических помех;
- разработана структурная схема НОЭД и выбрана элементная база для его реализации;
- разработан алгоритм работы управляющей программы микроконтроллера для НОЭД.

3. Определены параметры высокоскоростной сети передачи данных между НОЭД и блоком обработки данных.

4. Разработан алгоритм функционирования блока обработки данных системы. Алгоритм реализован в виде программы для блока обработки данных, построенного на основе программируемого логического контроллера ПЛК100.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ МНОГОТОЧЕЧНОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПЛАМЕНИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ

Для проверки предложенных принципов построения и технических решений системы, а также применимости методов определения пространственных координат пламени необходимо провести комплекс экспериментальных исследований технических параметров разработанного и изготовленного лабораторного образца быстродействующей многоточечной оптико-электронной системы контроля пламени и определения его пространственных координат: быстродействия, точности определения трехмерных координат пламени и размеров охраняемой зоны. Кроме того, должны отсутствовать ложные срабатывания системы при воздействии излучения оптических помех.

Помехоустойчивость системы и размеры охраняемой зоны определяются исключительно параметрами отдельного НОЭД:

- расстояние обнаружения очага пожара;
- угол обзора;
- помехоустойчивость – максимальное значение фоновой освещенности, создаваемое лампой накаливания, и максимальное значение температуры нагретого тела, при которых отсутствуют ложные срабатывания НОЭД.

Расстояние обнаружения очага пожара НОЭД определяется в условиях близких к реальным условиям эксплуатации для тестовых очагов пожара с размерами и энергетической светимостью, характерными для реальных очагов пожара на начальной стадии развития. Определение угла обзора и параметров помехоустойчивости НОЭД может быть выполнено в лабораторных условиях.

Определение быстродействия и точности определения пространственных координат пламени системы в целом выполняется в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации. Быстродействие системы определяется временем обнаружения реального быстропротекающего горения (горение газоздуш-

ной смеси на начальной стадии развития). Исследование точности определения пространственных координат пламени выполняется в испытательном помещении с габаритными размерами близкими к размерам реального охраняемого объекта с использованием тестовых очагов пожара.

Материалы, представленные в четвертой главе, отражены в публикациях автора [77 – 102].

4.1 Исследование параметров НОЭД

4.1.1 Расстояние обнаружения тестовых очагов пожара НОЭД

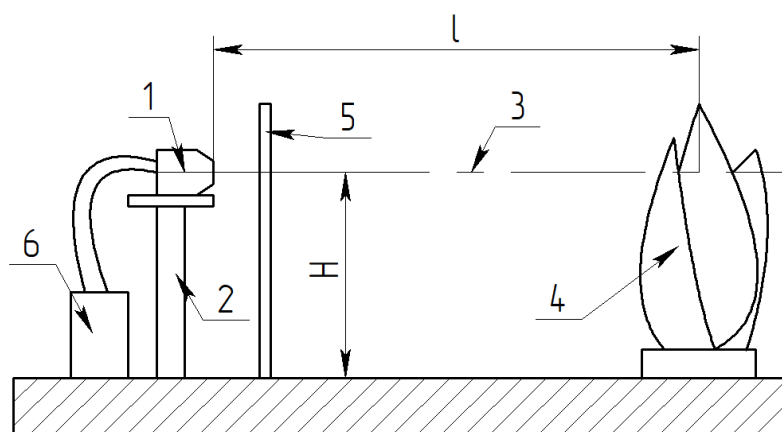
Расстояние обнаружения НОЭД определяется расстоянием, при котором происходит устойчивое срабатывание НОЭД при воздействии излучения тестовых очагов пожара. Лабораторная установка для определения расстояния обнаружения НОЭД разработана с учетом требований ГОСТ 53325-2012 (рисунок 4.1).

В качестве тестовых очагов пожара используются тестовые очаги ТП-5 (горение легковоспламеняющейся жидкости с выделением дыма) и ТП-6 (горение легковоспламеняющейся жидкости без выделения дыма) [39].

Конструкция лабораторной установки для определения расстояния обнаружения НОЭД приведена на рисунке 4.1. НОЭД 1 устанавливается на высоте H над уровнем пола с помощью стойки 2. Оптическая ось НОЭД 3 ориентируется горизонтально чувствительные элементы НОЭД направлены на тестовый очаг пожара. Тестовый очаг пожара 4 устанавливается на полу на расстоянии l от НОЭД. Между НОЭД 1 и тестовым очагом пожара 4 устанавливается светонепроницаемая перегородка 5. К НОЭД 1 подключается источник питания 6.

Испытания выполняются последовательно для тестовых очагов ТП-5 и ТП-6.

Климатические условия в испытательном помещении устанавливались с учетом требований ГОСТ 53325-2012 [39]. Фоновая освещенность в плоскости размещения фотоприемников НОЭД не должна превышать 50 лк.



1 – НОЭД; 2 – стойка; 3 – оптическая ось НОЭД; 4 – тестовый очаг пожара;
5 – светонепроницаемая перегородка; 6 – источник питания; l – расстояние между
НОЭД и тестовым очагом пожара; H – высота расположения НОЭД
Рисунок 4.1 – Конструкция лабораторной установки для определения расстояния
обнаружения НОЭД

Методика определения расстояния обнаружения НОЭД заключается в выполнении следующих действий.

1. Установить НОЭД на высоте $H=1,5\pm0,1$ м над уровнем пола с помощью стойки. Тестовый очаг пожара установить на полу на расстоянии от основания стойки равном 25 м.

2. Установить светонепроницаемую перегородку между НОЭД и тестовым очагом пожара вблизи НОЭД.

3. Зажечь тестовый очаг. Убрать светонепроницаемую перегородку через 30 секунд после зажигания. Проконтролировать срабатывание НОЭД по показаниям устройства индикации.

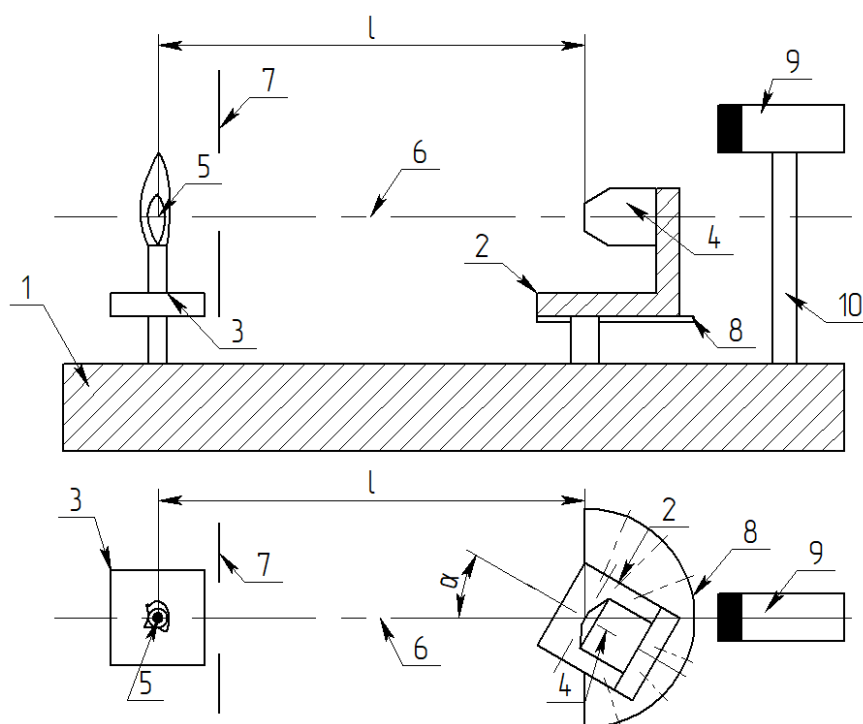
4. Уменьшить расстояние на 1 м между тестовым очагом пожара и НОЭД при отсутствии срабатывания НОЭД и повторно провести испытание согласно рекомендациям [39] и практических соображений.

В результате проведения исследования было определено расстояние обнаружения тестовых очагов пожара НОЭД, которое для тестового очага пожара ТП-5 составило 17 м, для ТП-6 – 12 м.

4.1.2 Угол обзора НОЭД

Угол обзора зоны обнаружения НОЭД – пространственный угол с вершиной в месте расположения фотодиодов НОЭД, в пределах которого может быть обнаружено пламя. Согласно конструкции НОЭД его угол обзора является симметричным и может быть выражен значением линейного угла раствора соответствующего пространственного угла [42]. Определение угла обзора датчика проводят на основе экспериментальных исследований в соответствии с рекомендациями [39, 102].

Конструкция лабораторной установки для исследования угла обзора НОЭД показана на рисунке 4.2.



- 1 – оптическая скамья; 2 – поворотная стойка; 3 – стойка; 4 – НОЭД;
 5 – пропановая горелка; 6 – ось симметрии оптической скамьи; 7 – диафрагма;
 8 – транспортирная линейка; α – угол между осью симметрии оптической скамьи
 и оптической осью НОЭД; 9 – радиометр; 10 – крепление; l – расстояние между
 НОЭД и пропановой горелкой

Рисунок 4.2 – Конструкция лабораторной установки для исследования угла обзора НОЭД

Установка состоит из оптической скамьи 1. На оптической скамье с помощью стоек 2 и 3 установлены НОЭД 4 и источник излучения 5 в виде пропановой горелки соответственно. Стойка 2 является поворотной. НОЭД и пропановую горелку устанавливают на оси симметрии оптической скамьи 6. Перед горелкой устанавливается диафрагма 7. Диафрагма 7 формирует узкий пучок излучения и исключает попадание рассеянного и отраженного от стен помещения излучения горелки на НОЭД. Поворачивая стойку 2 по транспортирной линейке 8, устанавливается требуемый угол α между оптической осью НОЭД и осью симметрии оптической скамьи. Измерение энергетической освещенности, создаваемой пропановой горелкой, выполняется радиометром 9 (Аргус-03), установленным на оптической скамье с помощью крепления 10.

Исследование угла обзора НОЭД выполняется согласно следующей методике:

а) изначально пропановая горелка устанавливается на оптической оси НОЭД. Радиометром измеряется излучаемая горелкой энергетическая освещенность на расстоянии 1,5 м. При проведении испытаний поддерживается значение энергетической освещенности 80 Вт/м^2 с погрешностью не более 10 % путем регулировки уровня пламени горелки;

б) определяется максимальное расстояние, при котором происходит срабатывание НОЭД путем перемещения НОЭД по оптической скамье;

в) последовательно устанавливается НОЭД под углом α между оптической осью НОЭД и осью симметрии оптической скамьи, с шагом в 10° , т.е. $\alpha_j = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ \dots 90^\circ$;

г) для каждого угла α_j перемещается НОЭД по оптической скамье, уменьшая расстояние l , до тех пор, пока не происходит срабатывание НОЭД, и измеряется расстояние l_j между НОЭД и пропановой горелкой. Срабатывание НОЭД контролируется визуально при помощи устройства индикации;

д) по пунктам б)–г) выполняется 10 серий измерений ($N = 10$) [103];

е) для каждого значения α_j рассчитывается среднее расстояние $\bar{l}_j$:

$$\bar{l}_j = \frac{\sum_{i=1}^N l_{ij}}{N} \quad (4.1)$$

где i – номер серии измерения, j – номер исследуемого угла α ;

ж) выполняется построение угловой диаграммы чувствительности НОЭД, т.е. зависимости расстояния срабатывания НОЭД от угла α ;

з) выполняется обработка диаграммы чувствительности и определяется значение угла обзора.

Значение угла обзора НОЭД согласно ГОСТ 53325-2012 определяется по коэффициенту неустойчивости:

$$k = \frac{l_{max}^2}{l_{min}^2} \leq 2, \quad (4.2)$$

где l_{min} – минимальное расстояние между НОЭД и пропановой горелкой при повороте НОЭД на угол α ; l_{max} – максимальное расстояние между НОЭД и пропановой горелкой, при котором происходит срабатывание ($\alpha = 0^\circ$). Таким образом, если принять $l_{max} = 1$ и коэффициент неустойчивости $k = 2$, то получим

$$l_{min} = 0,707 \cdot l_{max}. \quad (4.3)$$

Максимальный угол обзора определяется расстоянием l_{min} .

При обработке данных проводят из центра диаграммы окружность радиусом $l = 0,707$ от максимального расстояния и находится точка пересечения окружности с кривой чувствительности НОЭД.

Затем проводится прямая через центр окружности и полученную точку. В результате находят значение половины угла обзора НОЭД ω и полный угол обзора 2ω .

В результате выполнения исследования по определению угла обзора НОЭД получена диаграмма чувствительности, представленная на рисунке 4.3.

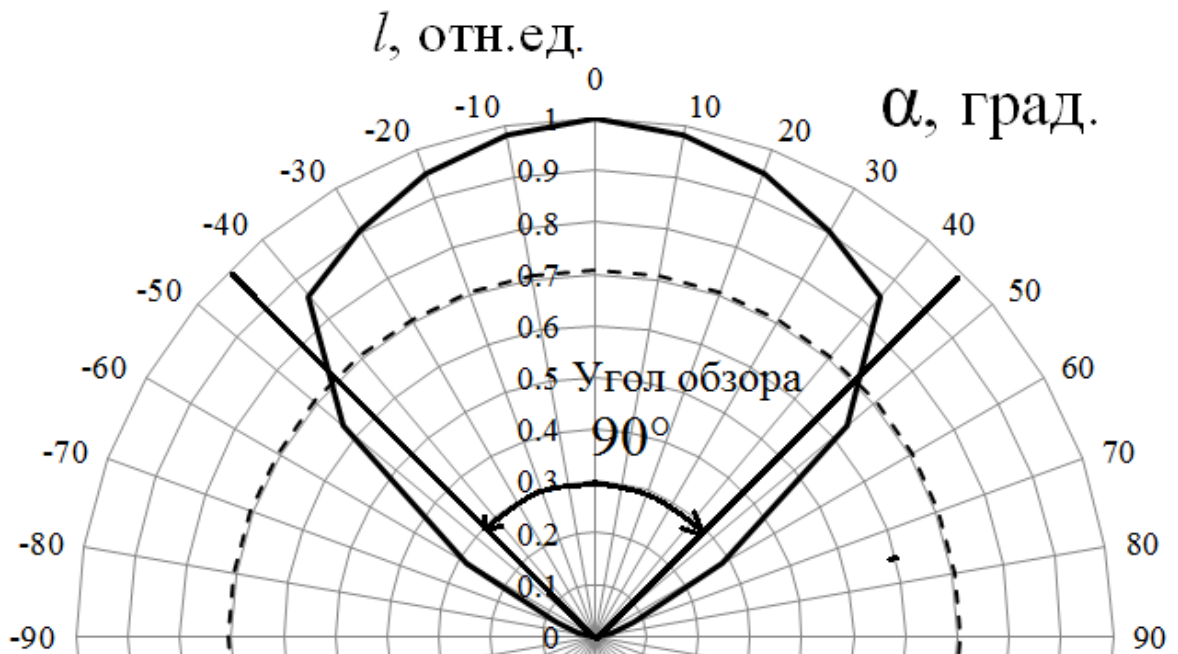


Рисунок 4.3 – Диаграмма чувствительности НОЭД

После обработки диаграммы чувствительности был определен угол обзора НОЭД, значение которого составляет 90° и удовлетворяет установленным требованиям (см. п. 3.2). Угол обзора НОЭД может быть увеличен при снижении расстояния обнаружения на границах зоны обнаружения.

4.1.3 Помехоустойчивость НОЭД к оптическим помехам

В ходе исследования помехоустойчивости НОЭД к оптическим помехам необходимо установить соответствие НОЭД следующим требованиям (см. п. 3.2):

- значение фоновой освещенности, создаваемое лампой накаливания, при котором НОЭД сохраняет работоспособность и не выдает ложное извещение – не менее 250 лк. НОЭД не должен выдавать ложного извещения при модуляции излучения ламп накаливания светонепроницаемой перегородкой и включением (выключением) источника питания;

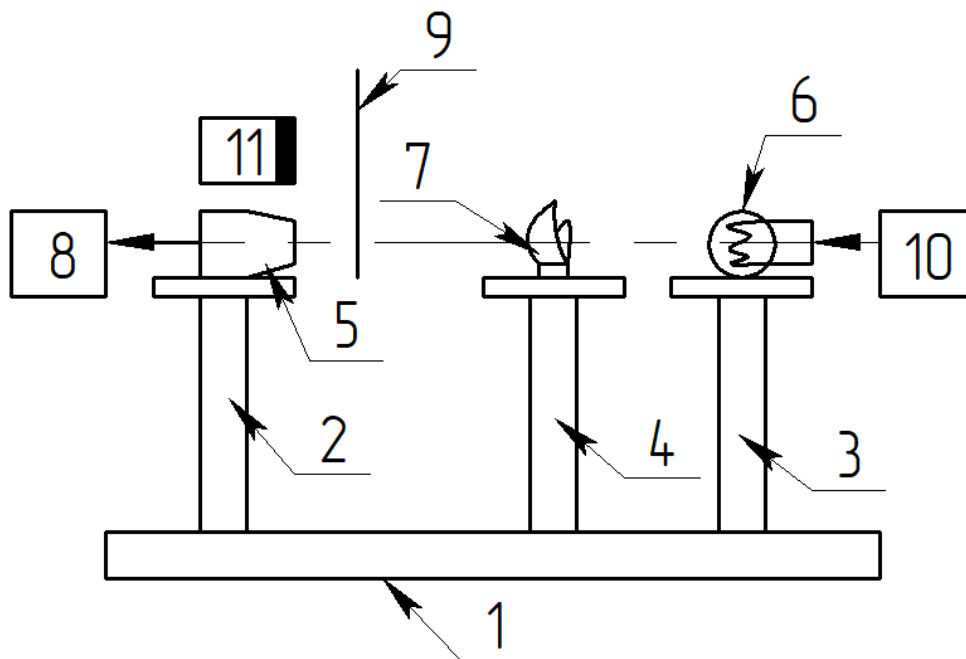
- максимальное значение температуры нагретого тела, при котором НОЭД сохраняет работоспособность и не выдает ложное извещение – не более 300°C .

Кроме того, при проведении исследования необходимо рассмотреть воздействие источников излучения полезного сигнала и помехи не только на приня-

тие решения о наличии пламени, но и на каждый сигнал фотодиода НОЭД в отдельности для более детального анализа эффективности использования компенсационного метода.

Конструкция лабораторной установки для проведения исследования помехоустойчивости НОЭД к оптическим помехам приведена на рисунке 4.4.

На оптической скамье 1 устанавливаются штативы 2, 3 и 4. НОЭД 5 устанавливается на штативе 2. Оптическая помеха 6 устанавливается на штативе 3. На штативе 4 закрепляется пропановая горелка 7. НОЭД 5 передает выходные сигналы с ПТН каждого из приемников излучения на модуль АЦП 8 встроенный персональный компьютер. Модуляция излучения оптической помехи создается светонепроницаемой перегородкой 9 или включением (выключением) источника питания 10. Измерение освещенности от источника излучения в виде лампы накаливания в плоскости чувствительных элементов НОЭД выполняется с помощью люксметра 11.



1 – оптическая скамья; 2, 3, 4 – штатив; 5 – НОЭД; 6 – оптическая помеха; 7 – пропановая горелка; 8 – персональный компьютер; 9 – светонепроницаемая перегородка; 10 – источник питания; 11 – люксметр

Рисунок 4.4 – Структурная схема лабораторной установки для исследования помехоустойчивости НОЭД к оптическим помехам

В качестве источников излучения сигнала помехи используется лампа накаливания мощностью 60 Вт и прибор АЧТ-45/100/1000 [104] (для эмуляции излучения нагретого тела).

В качестве источника излучения сигнала цели используется пламя пропановой горелки Rexer RB-04-040. Освещенность измеряется люксметром LX-101 с погрешностью не более 10 % [77].

На входы модуля АЦП поступают преобразованные ПТН сигналы с фотодиодов в соответствии с указанными обозначениями [77]:

- $U_{\text{лн1}}$ и $U_{\text{лн2}}$: с фотодиодов BPW24F (0,95 мкм);
- $U_{\text{ТП}}$: ФЭ724 (3,9 мкм);
- $U_{\text{ПЛ1}}$: ФЭ722 (2,6 мкм);
- $U_{\text{ПЛ2}}$: ФЭ724 (4,2 мкм).

На основе анализа литературы [73, 71, 105] и требований нормативной документации [39] разработаны методики исследования помехоустойчивости НОЭД к оптическим помехам:

- 1) методика исследования воздействия оптической помехи в статическом режиме;
- 2) методика исследования помехоустойчивости при одновременном воздействии полезного сигнала и оптической помехи;
- 3) методика исследования помехоустойчивости при модуляции излучения лампы накаливания.

4.1.3.1 Исследование воздействия оптической помехи в статическом режиме

Исследование воздействия на НОЭД излучения лампы накаливания и нагретого тела в статическом режиме (при отсутствии модуляции) выполняется согласно методике:

1. Изначально лампа накаливания устанавливается на штатив 3. НОЭД устанавливается на одной оптической оси с лампой с помощью штатива 2. Лампа подключается к источнику питания 8.

2. Создается освещенность в плоскости чувствительных элементов НОЭД в диапазоне от 50 лк до 600 лк (освещенность измеряется люксметром) путем изменения расстояния l между источником излучения и НОЭД. Шаг изменения освещенности составляет 50 лк.

3. Измеряются преобразованные сигналы с фотодиодов $U_{\text{лн1}}$, $U_{\text{лн2}}$, $U_{\text{ТП}}$, $U_{\text{пл1}}$, $U_{\text{пл2}}$ на каждом шаге изменения освещенности.

4. Выполняется 10 серий измерений ($N=10$) по пунктам 2–3 [103].

5. Рассчитывается среднее значение сигналов $U_{\text{лн1}}$, $U_{\text{лн2}}$, $U_{\text{ТП}}$, $U_{\text{пл1}}$, $U_{\text{пл2}}$ для каждого шага изменения освещенности:

$$\bar{U}_j = \frac{\sum_{i=1}^N U_{ij}}{N}, \quad (4.4)$$

где $\bar{U}_j$ – среднее значение преобразованного сигнала с отдельного фотодиода; i – номер серии измерения, j – номер шага изменения освещенности.

6. Выполняется анализ зависимостей сигналов с фотоприемников от освещенности.

7. Вместо лампы накаливания на расстоянии 1 м от НОЭД устанавливается источник излучения АЧТ-45/100/1000 и выводится на значение температуры 100 °С.

8. Производится измерение сигналов $U_{\text{лн1}}$, $U_{\text{лн2}}$, $U_{\text{ТП}}$, $U_{\text{пл1}}$, $U_{\text{пл2}}$ при изменении температуры образцового излучателя от 100 °С до 400 °С с шагом 50 °С.

9. Осуществляется 10 измерений сигналов на каждом шаге для установленного значения температуры и результаты измерений усредняются (см. пункт 4 методики).

10. Строятся зависимости выходных сигналов от температуры $U_{\text{лн1}}(T)$, $U_{\text{лн2}}(T)$, $U_{\text{ТП}}(T)$, $U_{\text{пл1}}(T)$, $U_{\text{пл2}}(T)$. Выполняется анализ полученных зависимостей.

Изменение преобразованных сигналов фотодиодов от освещенности, создаваемой лампой накаливания при отсутствии модуляции, показано на рисунке 4.5.

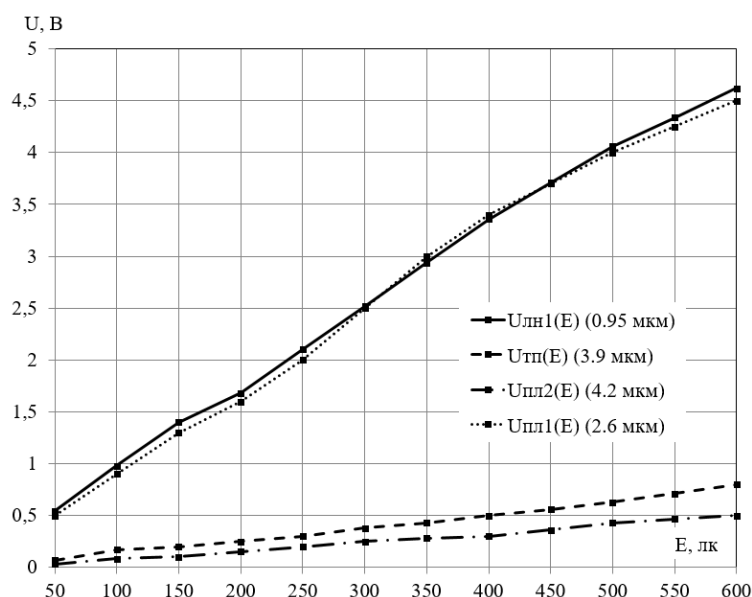


Рисунок 4.5 – Зависимости преобразованных сигналов фотодиодов от освещенности, создаваемой лампой накаливания при отсутствии модуляции

Величина сигнала $U_{пл1}(E)$ значительно увеличивается с ростом освещенности от лампы накаливания (рисунок 4.5). Сигнал $U_{пл1}(E)$ полностью компенсируется сигналом $U_{лн1}(E)$, при этом целевой сигнал удовлетворяет условию $\Delta_2 < U_{пор}$ (0,5 В) (рисунок 4.6). При этом, сигнал $U_{лн2}$ на рисунке не показан поскольку изменяется идентично сигналу $U_{лн1}$ [77].

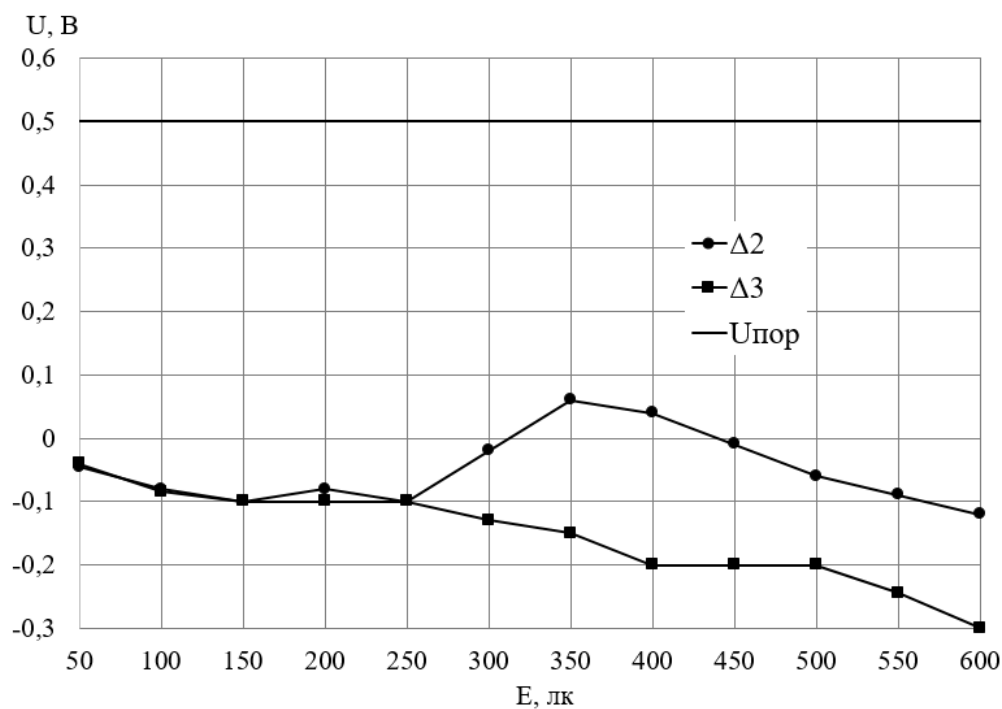


Рисунок 4.6 – Зависимости целевых сигналов Δ_2 и Δ_3 от освещенности

Изменение преобразованных сигналов фотодиодов $U_{пл2}(E)$ и $U_{ТП}(E)$ в меньшей степени зависит от уровня освещенности создаваемой лампой накаливания. При этом сигнал $U_{пл2}(E)$ полностью компенсируется сигналом $U_{ТП}(E)$, а целевой сигнал не превышает пороговый $\Delta_3 < U_{пор}$ [77].

Таким образом, применение компенсационного метода в соответствии с выражением (3.12) позволяет исключить помеху в виде лампы в диапазоне освещенности до 600 лк. Фоновая освещенность, создаваемая лампой накаливания, при которой НОЭД сохраняет работоспособность и не выдает ложное извещение составляет не менее 600 лк.

Зависимости преобразованных сигналов фотодиодов $U_{лн1}(T)$, $U_{лн2}(T)$, $U_{ТП}(T)$, $U_{пл1}(T)$, $U_{пл2}(T)$ от температуры нагретого тела представлены на рисунке 4.7.

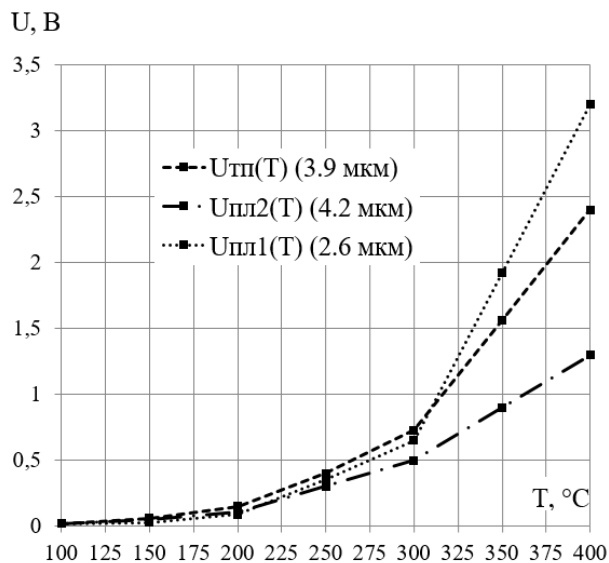


Рисунок 4.7 – Зависимости преобразованных сигналов фотодиодов от температуры нагретого тела

Излучение нагретого тела оказывает значительное влияние на изменение сигналов $U_{ТП}$, $U_{пл1}$ и $U_{пл2}$ в зависимости от его температуры (рисунок 4.7). Фотодиоды BPW24F со спектральным диапазоном контроля 0,78 – 1,1 мкм не реагируют на излучение нагретого тела (т.е. $U_{лн1}=U_{лн2}=0$).

Зависимости целевых сигналов Δ_2 и Δ_3 от температуры нагретого тела представлены на рисунке 4.8.

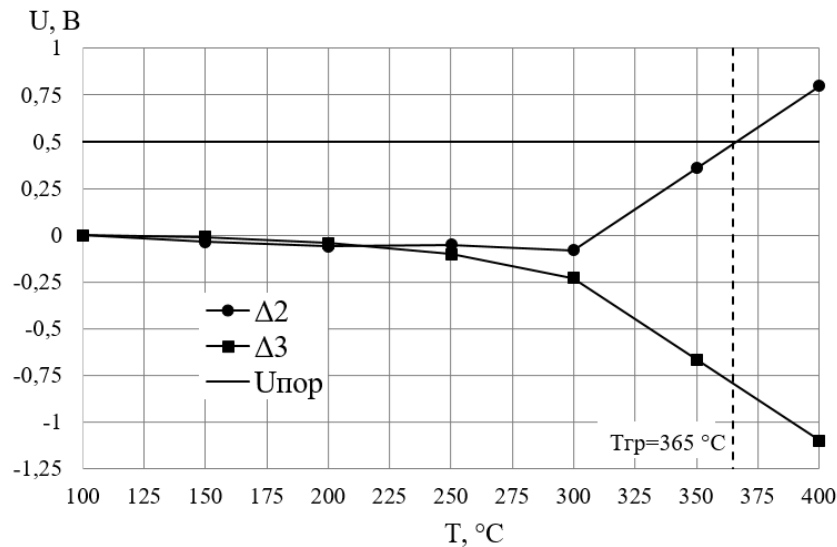


Рисунок 4.8 – Зависимости целевых сигналов Δ_2 и Δ_3 от температуры нагретого тела

Значение граничной температуры при которой Δ_2 превышает пороговое значение 0,5 В составляет $T_{гр}=365\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, исключается ложное срабатывание НОЭД при воздействии излучения нагретого тела при изменении его температуры в диапазоне от 100 до 365 $^{\circ}\text{C}$.

4.1.3.2 Исследование помехоустойчивости при одновременном воздействии полезного сигнала и помехи

Исследование помехоустойчивости при одновременном воздействии излучения пропановой горелки (полезный сигнал) и оптических помех проводится аналогично исследованию воздействия оптической помехи в статическом режиме (см. п.п. 4.1.3.1). Но при выполнении исследования дополнительно устанавливается пропановая горелка на штатив № 2 (рисунок 4.4) и зажигается при проведении очередного измерения на каждом шаге изменения освещенности лампы (или температуры АЧТ).

Зависимости сигналов $U_{лн1}(E)$, $U_{лн2}(E)$, $U_{ТП}(E)$, $U_{пл1}(E)$, $U_{пл2}(E)$ от освещенности при одновременном воздействии излучения пропановой горелки и излучения лампы накаливания 60 Вт приведены на рисунке 4.9.

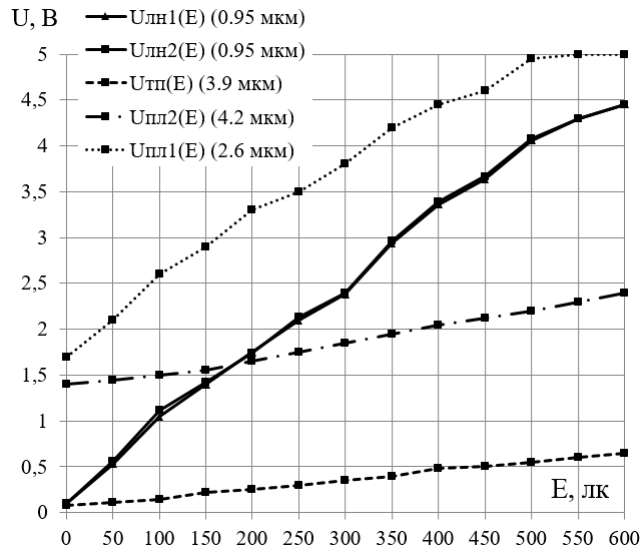


Рисунок 4.9 – Зависимости преобразованных сигналов фотодиодов от освещенности при одновременном воздействии излучения пропановой горелки и излучения лампы накаливания 60 Вт

Значение сигнала $U_{пл1}(E)$ значительно превышает значения сигналов $U_{лн1}(E)$, $U_{лн2}(E)$, а значение сигнала $U_{пл2}(E)$ превышает значение сигнала $U_{тп}(E)$ за счет существенного различия величины потока излучения пламени в спектральных диапазонах чувствительности фотодиодов (рисунок 4.9) [77].

Зависимости целевых сигналов Δ_2 и Δ_3 от освещенности при одновременном воздействии излучения пропановой горелки и излучения лампы накаливания 60 Вт представлены на рисунке 4.10.

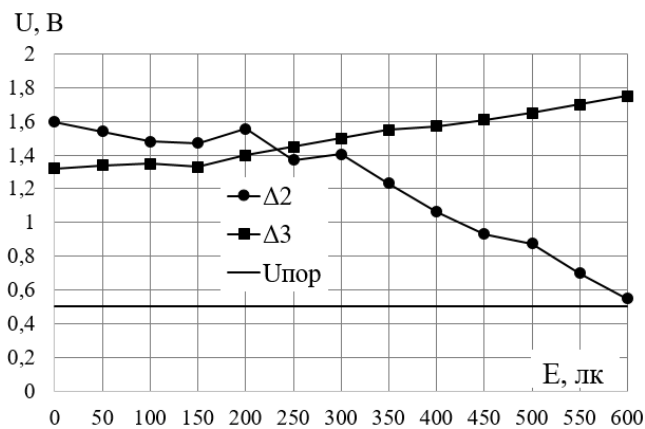


Рисунок 4.10 – Зависимости целевых сигналов от освещенности при одновременном воздействии излучения пропановой горелки и излучения лампы накаливания 60 Вт

Из рисунка 4.10 видно целевые сигналы Δ_2 и Δ_3 существенно превышают пороговый уровень 0,5 В в диапазоне освещенности от 0 до 600 лк, что позволяет обеспечить уверенное обнаружение пламени на фоне излучения лампы накаливания.

Зависимости сигналов $U_{\text{лн1}}(T)$, $U_{\text{лн2}}(T)$, $U_{\text{тп}}(T)$, $U_{\text{пл1}}(T)$, $U_{\text{пл2}}(T)$ от температуры нагретого тела при одновременном воздействии излучения пропановой горелки и излучения нагретого тела приведены на рисунке 4.11.

Из рисунка 4.11 видно, что значения сигналов $U_{\text{пл1}}(T)$ и $U_{\text{пл2}}(T)$ значительно превышают значение сигнала $U_{\text{тп}}(T)$.

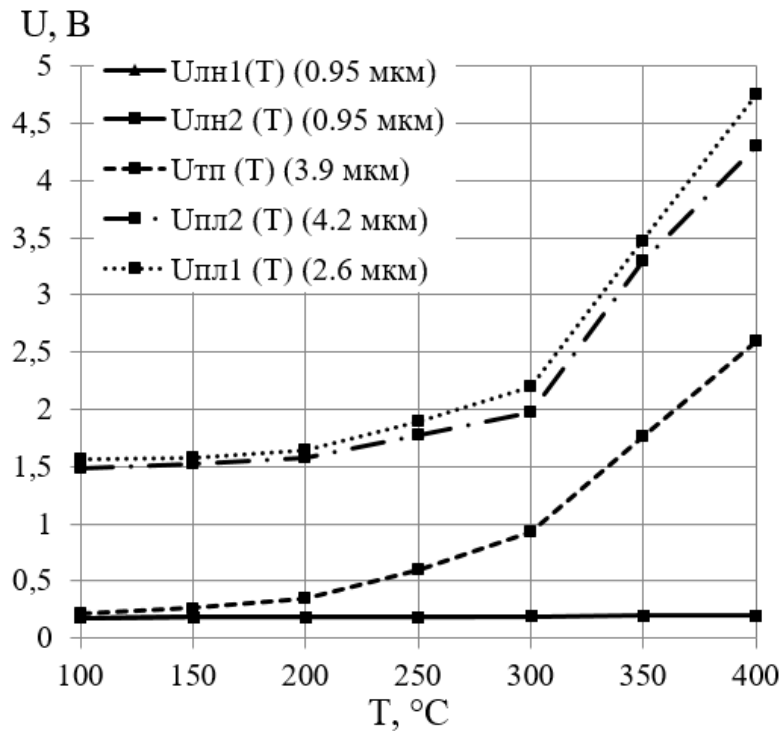


Рисунок 4.11 – Зависимости преобразованных сигналов фотодиодов от температуры нагретого тела при одновременном воздействии излучения пропановой горелки и излучения нагретого тела

Зависимости целевых сигналов от температуры нагретого тела при одновременном воздействии излучения пропановой горелки и излучения нагретого тела представлены на рисунке 4.12.

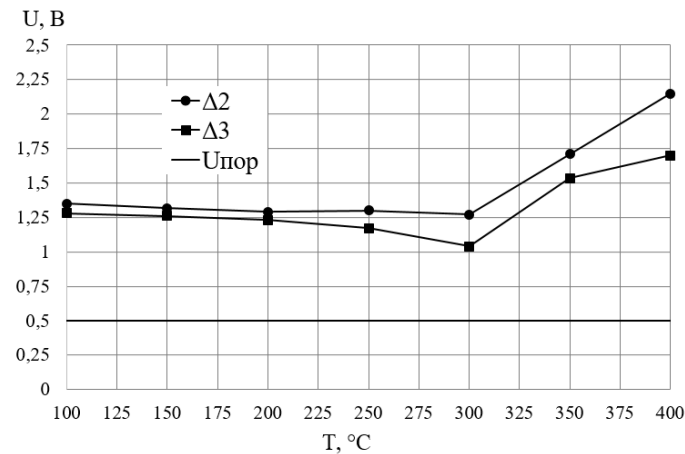


Рисунок 4.12 – Зависимости целевых сигналов от температуры нагретого тела при одновременном воздействии излучения пропановой горелки и излучения нагретого тела

Целевые сигналы Δ_2 и Δ_3 существенно превышают пороговый уровень 0,5 В в диапазоне значений температуры нагретого тела от 100 до 365 °C. Следовательно, пламенное горение может быть обнаружено на фоне излучения нагретого тела (рисунок 4.12) [77].

4.1.3.3 Исследование помехоустойчивости при модуляции излучения лампы накаливания

Исследование воздействия оптической помехи на НОЭД при модуляции излучения лампы накаливания светонепроницаемой перегородкой и включением (выключением) источника питания выполняется согласно методике [77]:

1. Создается освещенность равная 400 лк в плоскости чувствительных элементов НОЭД.

2. Модулируется излучение лампы накаливания с использованием светонепроницаемой перегородки (1 с лампа открыта / 1 с лампа перегороджена) и одновременно выполняется измерение преобразованных сигналов с фотодиодов $U_{\text{лн1}}$, $U_{\text{лн2}}$, $U_{\text{ТП}}$, $U_{\text{пл1}}$, $U_{\text{пл2}}$.

3. Строятся зависимости преобразованных сигналов с фотодиодов от времени $U_{\text{лн1}}(t)$, $U_{\text{лн2}}(t)$, $U_{\text{ТП}}(t)$, $U_{\text{пл1}}(t)$, $U_{\text{пл2}}(t)$ и выполняется их анализ.

4. Модулируется излучение лампы накаливания включением (выключением) источника питания (1 с лампа включена / 1 с лампа выключена) и одновременно измеряются преобразованные сигналы $U_{\text{лн1}}$, $U_{\text{лн2}}$, $U_{\text{тп}}$, $U_{\text{пл1}}$, $U_{\text{пл2}}$.

5. Строятся зависимости выходных сигналов от времени и выполняется их анализ.

Изменение преобразованных сигналов с фотодиодов от времени при модуляции излучения лампы накаливания перегородкой показано на рисунке 4.13.

При модуляции излучения лампы накаливания перегородкой значения сигнала $U_{\text{пл1}}(t)$ могут существенно превышать значения сигнала $U_{\text{лн2}}(t)$ (для данного случая) и привести к ложному срабатыванию (рисунок 4.13). Согласно формуле (3.13) (см. п.п. 3.2.3) целевой сигнал Δ_2 рассчитывается как разность между сигналом $U_{\text{пл1}}(t)$ и максимальным из сигналов $U_{\text{лн1}}(t)$ или $U_{\text{лн2}}(t)$. В результате исключается ложное срабатывание НОЭД, поскольку целевой сигнал Δ_2 не превышает порог срабатывания – 0,5 В.

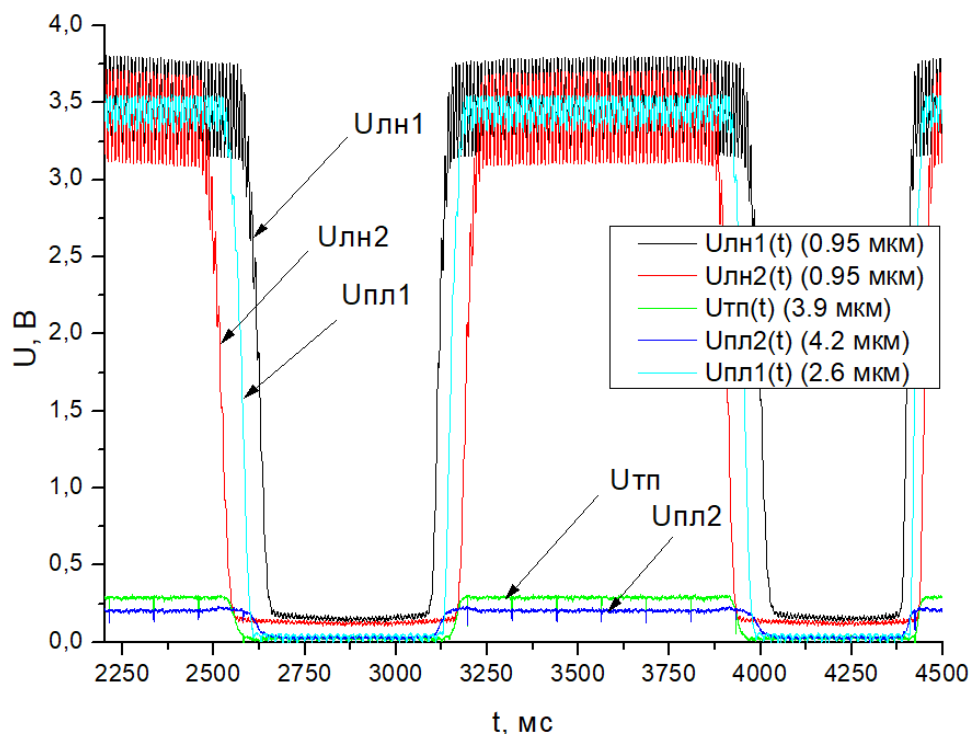


Рисунок 4.13 – Изменение преобразованных сигналов с фотодиодов во времени при модуляции излучения лампы накаливания светонепроницаемой перегородкой

Изменение преобразованных сигналов с фотодиодов от времени при модуляции излучения лампы накаливания включением (выключением) источника питания (при освещенности в плоскости фотодиодов 400 лк) показано на рисунке 4.14.

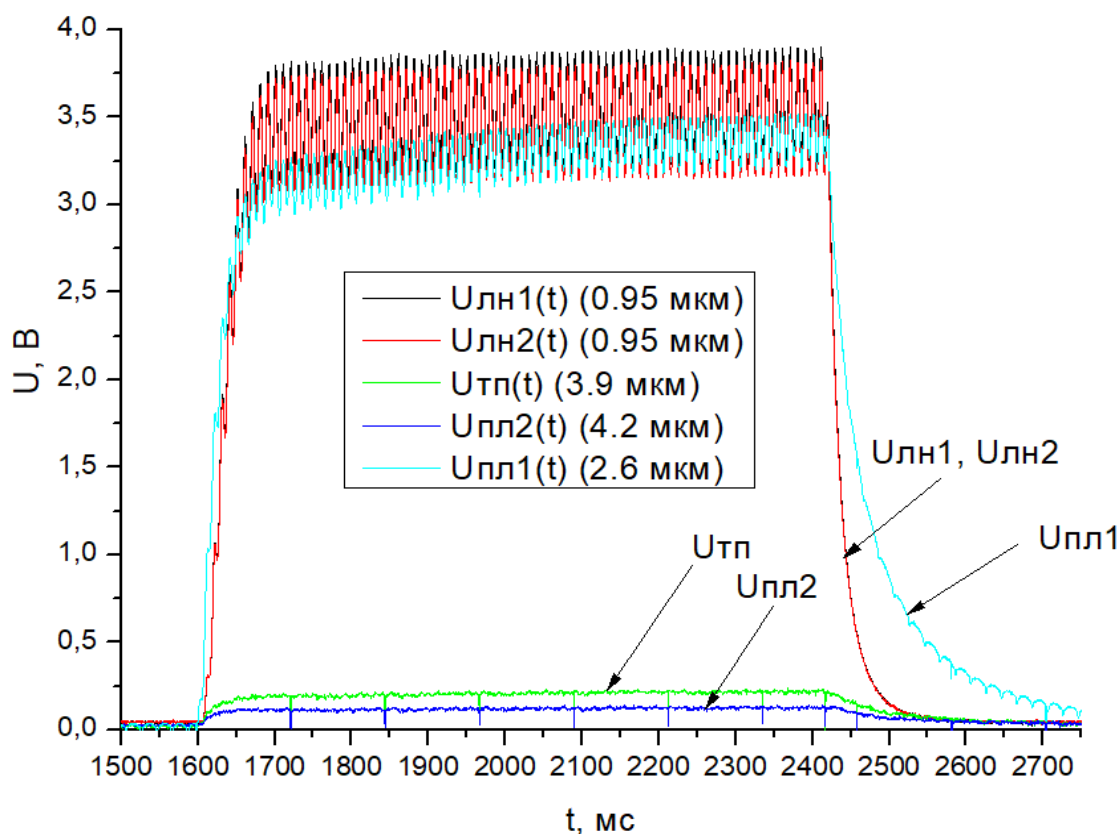


Рисунок 4.14 – Изменение преобразованных сигналов с фотодиодов во времени при модуляции излучения лампы накаливания включением (выключением) источника питания

Сигналы $U_{\text{лн1}}(t)$ и $U_{\text{лн2}}(t)$ не компенсируют сигнал $U_{\text{пл1}}(t)$ из-за инерционности нагрева и охлаждения нити накала в лампе накаливания (рисунок 4.14). При этом уровень сигналов $U_{\text{пл2}}(t)$ и $U_{\text{тп}}(t)$ не изменяется существенным образом [77].

Зависимости целевых сигналов при модуляции излучения лампы накаливания включением (выключением) источника питания показаны на рисунке 4.15.

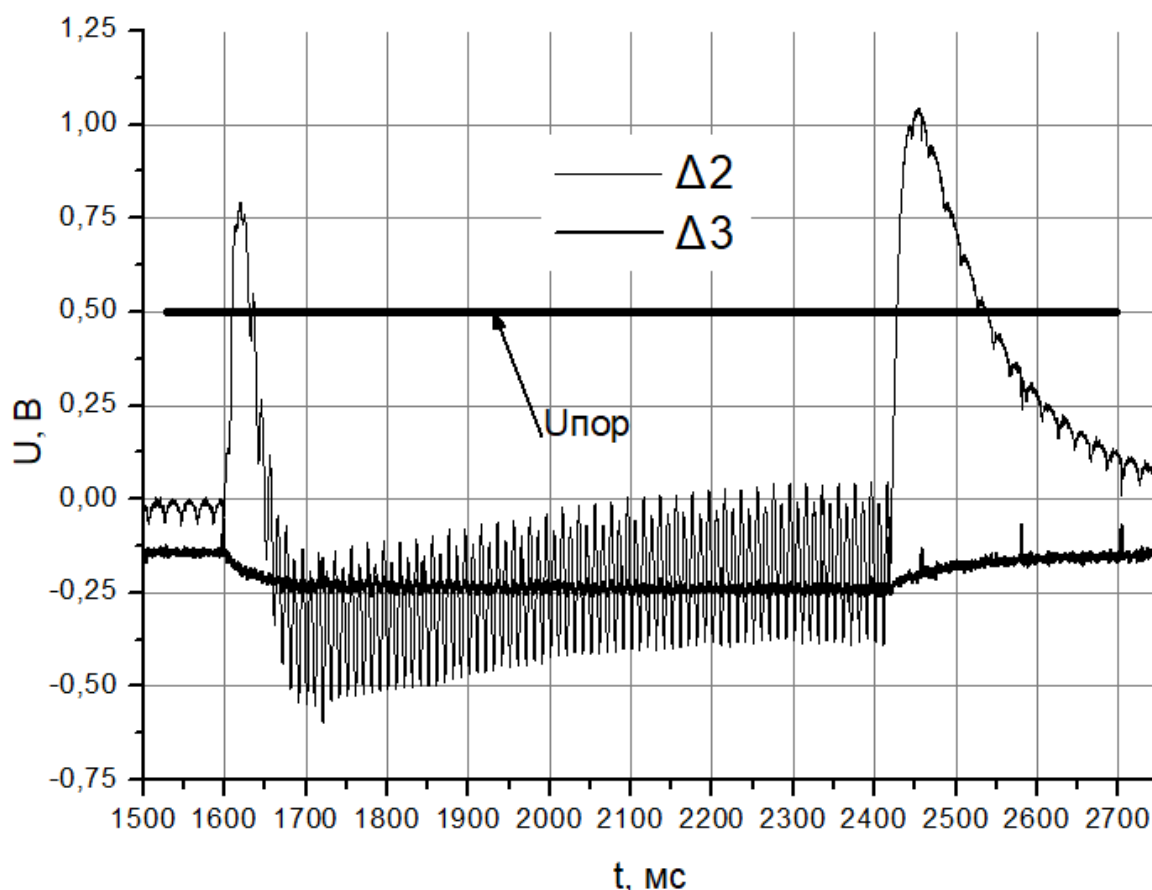


Рисунок 4.15 – Зависимости целевых сигналов при модуляции излучения лампы накаливания включением (выключением) источника питания

Согласно рисунку 4.15, принятие решение о наличии пламени согласно алгоритму обработки сигналов с учетом компенсационного метода подавления оптических помех (п. 3.2.3) при одновременном превышении значений сигналов цели Δ_2 и Δ_3 порога срабатывания $U_{\text{порог}}$ позволяет исключить ложные срабатывания НОЭД при модуляции излучения лампы накаливания при включении (выключении) источника питания.

В результате экспериментальных исследований помехоустойчивости НОЭД было установлено, что компенсационный метод подавления оптических помех позволяет исключить ложные срабатывания НОЭД при воздействии оптических помех в виде излучения ламп накаливания и нагретых тел. НОЭД при этом удовлетворяет установленным требованиям к помехоустойчивости.

4.2 Исследование параметров системы

4.2.1 Быстродействие системы

4.2.1.1 Экспериментальная установка для исследования системы

Быстродействие ОЭС оценивается путем измерения временного интервала между появлением пламени в зоне обнаружения системы и моментом выдачи системой сигнала запуска устройств пожаротушения. Этот интервал определяется быстродействием НОЭД, временем опроса НОЭД и временем обработки измерительной информации БОД. Быстродействие НОЭД t_d определяется временем нарастания и спада сигналов фотодиодов с усилителями t_{ϕ} , временем работы управляющей программы микроконтроллера $t_{\text{мк}}$. При этом время преобразования оптического сигнала в электрический фотоприемниками с усилителями составляет порядка $5 \cdot 10^{-6}$ с и им можно пренебречь. Это допущение позволяет отследить момент времени, характеризующий возникновение пламени, по достижению аналогового сигнала на выходах усилителя порогового значения, устанавливаемого с учетом требуемого отношения сигнал-шум μ . Аналоговые сигналы регистрируются отдельно с использованием высокоскоростного АЦП. Требуемое значение отношения сигнал-шум принимается равным 10 ($\mu=10$).

Проведение испытаний по определению технических параметров автоматических систем пожаротушения (взрывоподавления) проводится либо в лабораторных условиях, либо в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации, путем проведения экспериментальных взрывов газопылевоздушных смесей в специальных реакционных сосудах [19, 106, 107].

Для проведения исследования быстродействия ОЭС было предложено использовать реакционный сосуд экспериментальной установки для проведения взрывов пылегазовоздушных смесей, разработанный в БТИ АлтГТУ [108, 109], с незначительной модернизацией.

Структурная схема разработанной экспериментальной установки для исследования быстродействия ОЭС представлена на рисунке 4.16. Экспериментальная установка включает в себя реакционный сосуд с установленным лабораторным образцом ОЭС и автоматизированную измерительную систему.

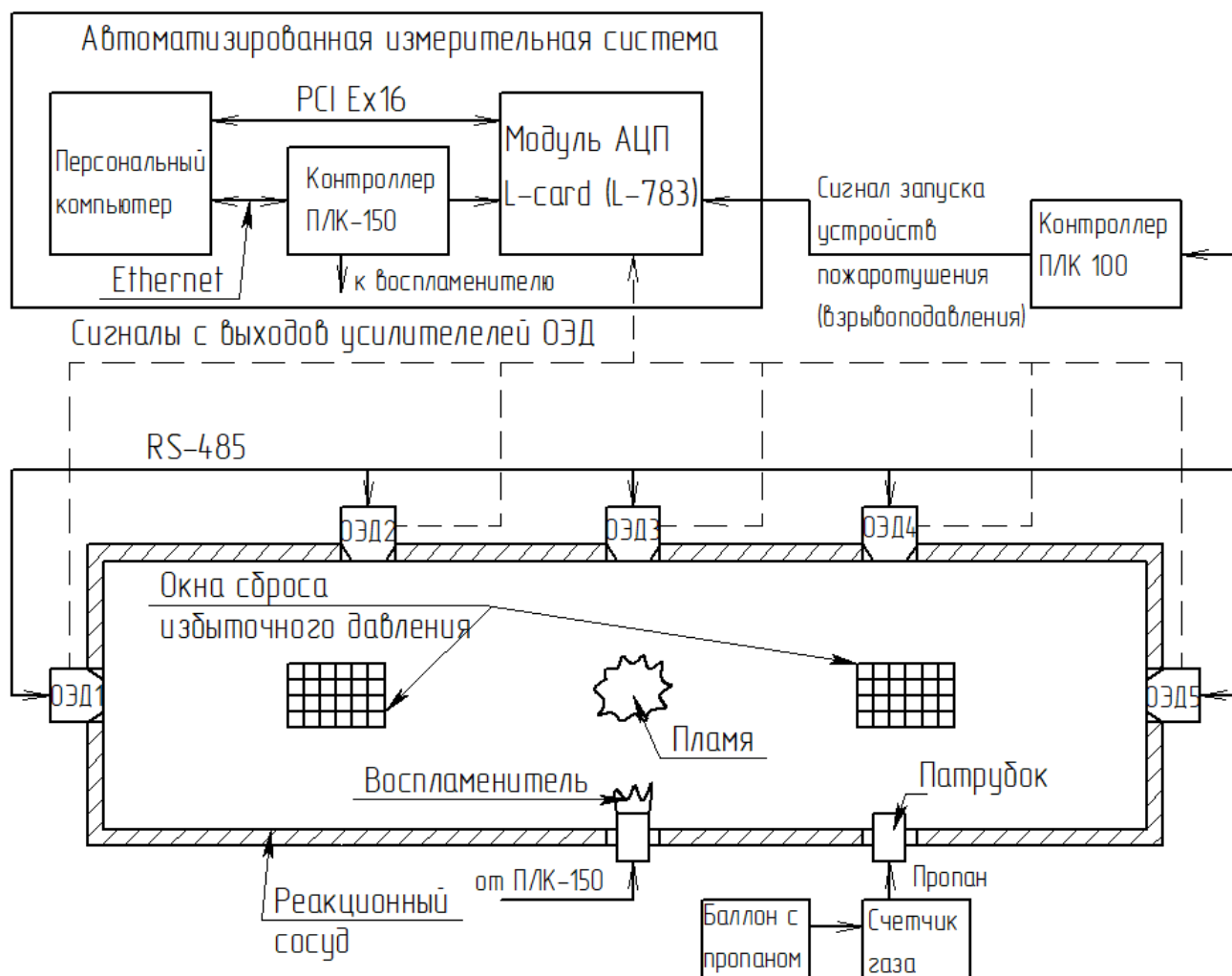


Рисунок 4.16 – Структурная схема экспериментальной установки для исследования быстродействия ОЭС

Реакционный сосуд имеет внутренний диаметр 0,5 м и длину 2 м и устанавливается горизонтально при проведении испытаний. В корпусе реакционного сосуда расположены патрубки для установки НОЭД; патрубки для подачи газа и патрубки для воспламенителя. Конструкции реакционного сосуда включает окна сброса избыточного давления для предотвращения его повреждений при проведении испытаний [108].

В качестве горючего вещества используется пропан, подаваемый в реакционный сосуд через счетчик газа. В объеме реакционного сосуда создается стехиометрическая пропано-воздушная смесь с концентрацией пропана 4,5–5,5 %. Воспламенение пропано-воздушной смеси осуществляется электрической искрой [12].

Сигнал на запуск эксперимента подается с персонального компьютера, после чего управление передается контроллеру ПЛК-150 через интерфейс Ethernet. ПЛК согласно управляющей программе синхронизирует момент поджигания рабочей смеси и момент начала регистрации данных модулем быстродействующего АЦП [96].

Лабораторный образец ОЭС содержит пять НОЭД, регистрирующих поток излучения от пламени (рисунок 4.17). Выходные аналоговые сигналы в НОЭД преобразуются в цифровой код и передаются с помощью сети передачи данных по интерфейсу RS-485 в программируемый логический контроллер (блок обработки данных) – ПЛК-100 [96]. ПЛК-100 на основе полученной информации выдает сигнал запуска устройств пожаротушения.

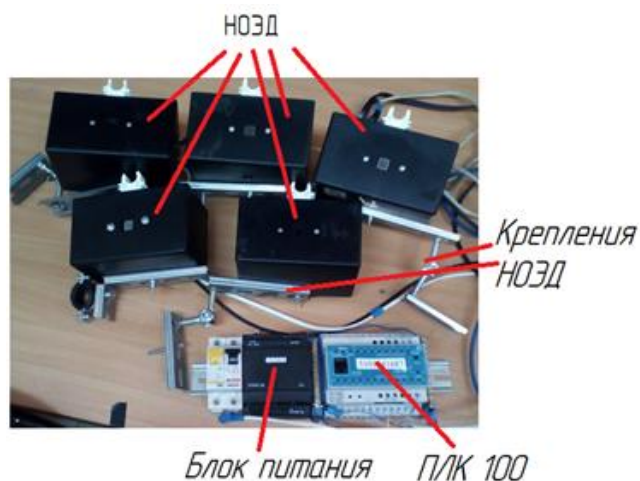


Рисунок 4.17 – Лабораторный образец системы

Сигналы с выходов усилителей фотоприемников НОЭД и сигнал запуска устройств пожаротушения подаются на модуль быстродействующего АЦП L-783, выпускаемый компанией ООО «ЛКард» [110]. Время преобразования данного АЦП составляет 4 мкс.

Данные с модуля АЦП поступают на персональный компьютер через интерфейс PCIEx16 и обрабатываются с помощью программного обеспечения LGraph2.

На рисунке 4.18 показана фотография экспериментальной установки со смонтированной ОЭС.



Рисунок 4.18 – Экспериментальная установка

Проведение испытаний с использованием экспериментальной установки необходимо проводить в специализированном помещении для проведения огневых испытаний или специальном полигоне.

4.2.1.2 Методика проведения экспериментального исследования

На основе рекомендаций, приведенных в работе [12], разработана методика определения быстродействия ОЭС:

1. Выполняется сборка реакционного сосуда и автоматизированной измерительной системы в соответствии с технической документацией.
2. Выполняется сборка ОЭС и ее монтаж на реакционном сосуде.
3. Герметизируются окна сброса избыточного давления.
4. Подается газ в реакционный сосуд через патрубок впуска газа. Объем подаваемого газа контролируется с помощью счетчика газа. Стехиометрическая пропано-воздушная смесь создается путем подачи в реакционный сосуд 24 л пропана.
5. Выдерживается время от 2 до 5 минут для перемешивания пропана с воздухом в реакционном сосуде. В течение этого времени обслуживающий персонал удаляется на безопасное расстояние от установки.

6. Горючая смесь воспламеняется по команде оператора и осуществляется регистрация сигналов с усилителей НОЭД и сигнала запуска устройств пожаротушения.

7. Проводится серия из 10 экспериментов ($N=10$) по пунктам методики 3–6 [103].

8. Выполняется обработка результатов экспериментов.

Обработка зарегистрированных данных выполняется следующим образом:

– для каждого i -го измерения строятся осциллограммы сигналов НОЭД и сигнала запуска устройств пожаротушения;

– для каждого НОЭД фиксируется момент времени, соответствующий достижению порогового значения сигнала на выходе усилителя. Момент t_1 , соответствующий появлению пламени, определяется каналом с максимальным временем достижения порога (см. рисунок 4.19);

– по сигналу запуска фиксируется момент времени t_2 ;

– для каждого i -ого измерения рассчитывается разность между временными моментами t_{2i} и t_{1i} :

$$\Delta t_i = t_{2i} - t_{1i}. \quad (4.5)$$

– рассчитанные значения разностей Δt_i усредняются по 10 экспериментам:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t_i}{N}. \quad (4.6)$$

– определяется доверительный интервал dt при доверительной вероятности $P=0,95$:

$$dt = t_a \sigma_{\overline{\Delta t}}, \quad (4.7)$$

где t_a – коэффициент Стьюдента; $\sigma_{\overline{\Delta t}}$ – стандартное отклонение среднего [103]:

$$\sigma_{\overline{\Delta t}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (\Delta t_i - \overline{\Delta t})^2}. \quad (4.8)$$

Величина $\overline{\Delta t}$ определяет экспериментальное быстродействие системы.

Осциллограммы сигналов для отдельного эксперимента показаны на рисунке 4.19. Порог срабатывания равен 0,5 В, исходя из данных о среднеквадратическом значении шума 0,05 В и отношении сигнал-шум $\mu=10$.

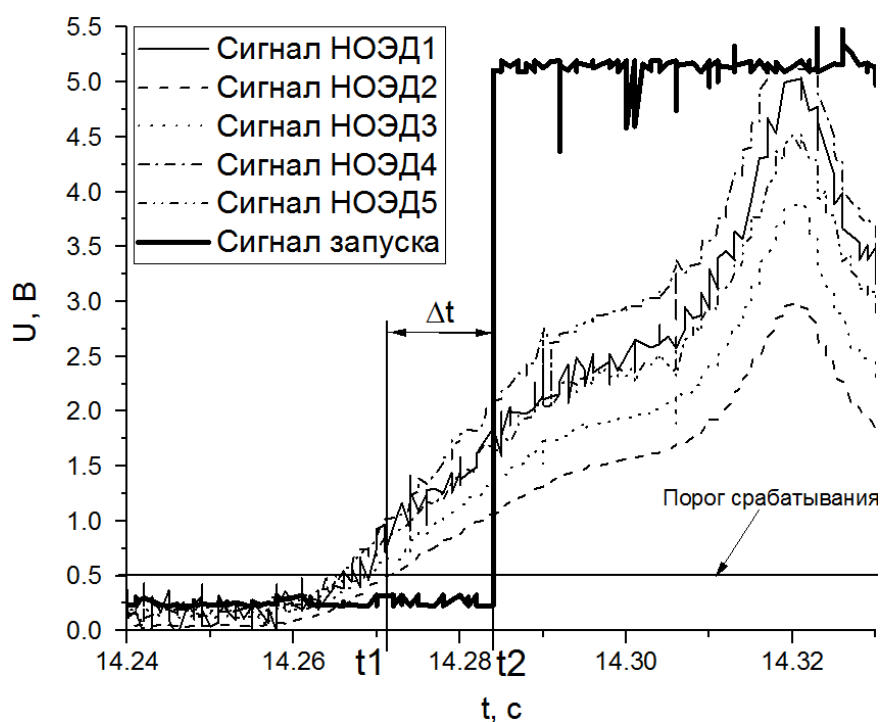


Рисунок 4.19 – Осциллограммы сигналов при проведении экспериментального исследования

Результаты проведения экспериментального исследования по определению быстродействия ОЭС приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты определения быстродействия системы

Номер эксперимента	Δt_i , мс
1	11,26
2	11,84
3	15,34
4	16,51
5	15,02
6	15,86
7	16,02
8	14,88
9	11,47
10	14,62

В результате проведения исследования установлено, что быстродействие системы составляет $\overline{\Delta t} = 14 \pm 1$ мс и удовлетворяет установленным требованиям – не более 15 мс.

4.2.2 Исследование точности определения пространственных координат пламени

4.2.2.1 Экспериментальный стенд для исследования точности

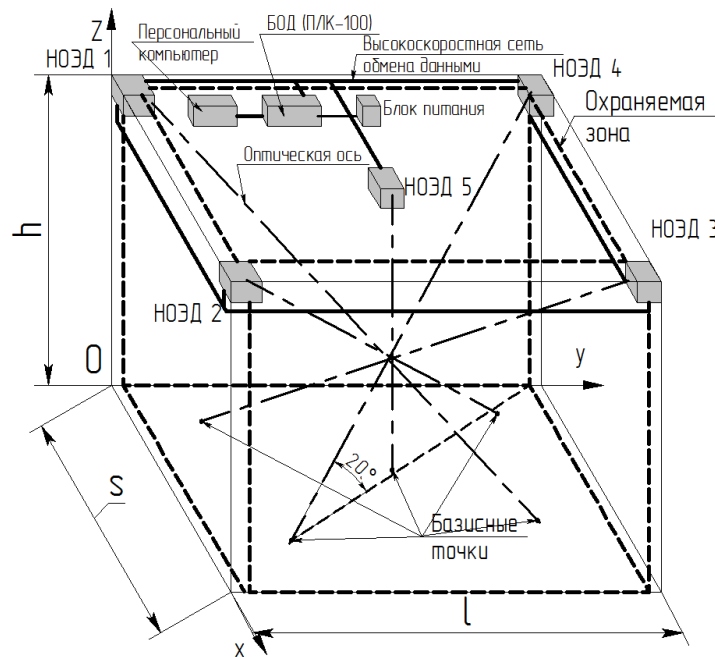
Экспериментальный стенд представляет собой специализированное помещение для проведения огневых испытаний с размещенным лабораторным образцом ОЭС. В качестве очага пламени использовались тестовые очаги пожара ТП-5 и ТП-6, организуемые согласно ГОСТ 53325-2012 [39].

Согласно проведенным теоретическим исследованиям (см. п.п. 2.4.3) для помещения в форме прямоугольного параллелепипеда, многоточечная оптико-электронная система (рисунок 4.20) должна включать 5 НОЭД. НОЭД 1 – 4 размещены в верхних углах помещения, и их оптические оси наклонены к плоскости пола помещения под углом 20° и пересекаются в одной точке. НОЭД 5 размещен на потолке и ориентирован перпендикулярно к плоскости пола [99].

В лабораторном образце многоточечной оптико-электронной системы регистрация потока излучения пламени выполняется пятью НОЭД. Выходные сигналы НОЭД в цифровом виде поступают на ПЛК-100. ПЛК обрабатывает измерительные данные с НОЭД, выполняет обнаружение пламени и рассчитывает его пространственные координаты. Настройка лабораторного образца системы выполняется с помощью персонального компьютера, подключенного через интерфейс RS-232 к ПЛК.

НОЭД с помощью специальных креплений устанавливаются на стены и потолок помещения [99].

Экспериментальное исследование проводилось в специализированном помещении предприятия ЗАО «ПО «Спецавтоматика», соответствующем требованиям ГОСТ Р 53325-2012 [39]. Помещение имеет габаритные размеры: длина – 11 м; ширина – 7 м; высота – 3,85 м. Стены, пол и потолок помещения обеспечивают минимальное отражение излучения тестовых очагов.



l, s, h – габаритные размеры помещения; БОД – блок обработки данных

Рисунок 4.20 – Схема размещения лабораторного образца многоточечной оптико-электронной системы

Климатические условия устанавливались с учетом требований ГОСТ 53325-2012 [39] (см. п.п. 4.1.1).

4.2.2.2 Методика экспериментального исследования

Исследование точности определения пространственных координат тестового очага пожара проводилось в соответствии с методикой [39, 99, 100]:

- 1) Лабораторный образец многоточечной оптико-электронной системы разместить в соответствии со схемой, представленной на рисунке 4.20 и проверить его работоспособность;
- 2) определить пространственные координаты НОЭД в помещении, с помощью измерительных инструментов;
- 3) ориентировать оптические оси НОЭД в заданные базисные точки (см. рисунок 4.21) с помощью лазерного указателя;
- 4) определить диапазон измерения абсциссы x , ординаты y и аппликаты z очага по данным о расположении НОЭД и габаритных размерах помещения. Диапазоны

измерения координат $X_{\text{диап}}$, $Y_{\text{диап}}$ определяются расстоянием между НОЭД в углах помещения, расположенными вдоль оси x (НОЭД1 и НОЭД2) и оси y (НОЭД1 и НОЭД4), диапазон $Z_{\text{диап}}$ определялся размером помещения по высоте (рисунок 4.21);

5) рассчитать теоретически коэффициенты полиномиальных функций для определения трёхмерных координат пламени с учетом $X_{\text{диап}}$, $Y_{\text{диап}}$, $Z_{\text{диап}}$ и расположения НОЭД и в соответствии с методом полиномиальной регрессии (см. п. 2.3.1). Ввести коэффициенты полиномиальных функций в память ПЛК-100;

6) организовать тестовый очаг пожара в точке с заданными координатами $x_{\text{ТПд}}$, $y_{\text{ТПд}}$, $z_{\text{ТПд}}$. Используется шесть точек в пространстве, четыре из которых располагаются в нижних углах помещения и одна по центру на полу. В шестой точке в углу помещения тестовый очаг пожара приподнимается на заданную высоту для оценки погрешности определения координат по оси z . Для сравнения значений погрешности расчета координат различных типов тестовых очагов пожара в одной из точек пространства помещения организуется два тестовых очага пожара различного типа (ТП-5, ТП-6);

7) выполнить серию из 100 измерений координат тестового очага пожара $x_{\text{ТПр}}$, $y_{\text{ТПр}}$, $z_{\text{ТПр}}$ [111, 112];

8) рассчитать выборочные средние значения координат тестового очага пожара $\bar{x}_{\text{ТПр}}$, $\bar{y}_{\text{ТПр}}$, $\bar{z}_{\text{ТПр}}$ и определить доверительный интервал по заданной доверительной вероятности $P=0,95$ по формулам (4.6) – (4.8) [111];

9) вычислить абсолютную погрешность определения координат тестового очага пожара для каждой точки:

$$\Delta x_{\text{ТП}} = |\bar{x}_{\text{ТПр}} - x_{\text{ТПд}}|, \quad (4.9)$$

$$\Delta y_{\text{ТП}} = |\bar{y}_{\text{ТПр}} - y_{\text{ТПд}}|, \quad (4.10)$$

$$\Delta z_{\text{ТП}} = |\bar{z}_{\text{ТПр}} - z_{\text{ТПд}}|, \quad (4.11)$$

где $x_{\text{ТПд}}$, $y_{\text{ТПд}}$, $z_{\text{ТПд}}$ – действительные значения координат тестового очага пожара на осях O_x , O_y , O_z ;

10) рассчитать приведенную погрешность определения координат пламени:

$$\gamma(x) = \frac{\Delta x_{\text{ТП}}}{x_{\text{диап}}} \cdot 100\%, \quad (4.12)$$

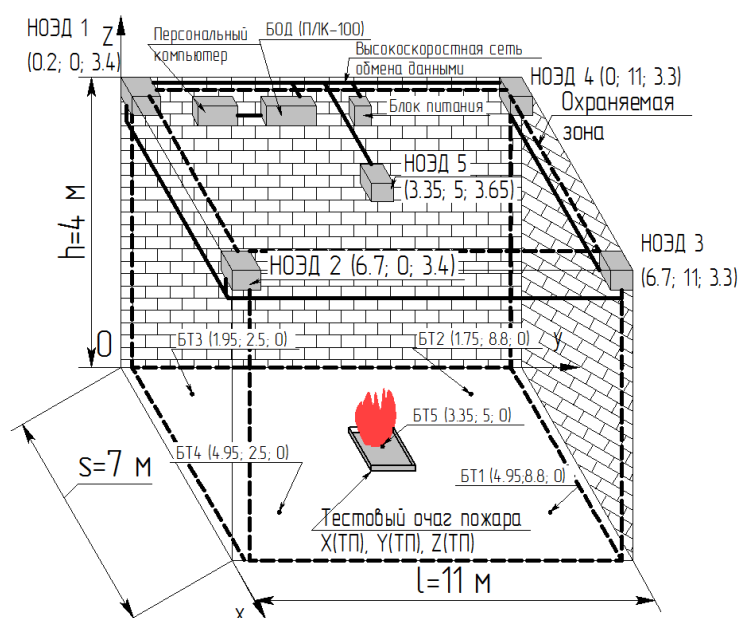
$$\gamma(y) = \frac{\Delta y_{\text{ТП}}}{y_{\text{диап}}} \cdot 100\%, \quad (4.13)$$

$$\gamma(z) = \frac{\Delta z_{\text{ТП}}}{z_{\text{диап}}} \cdot 100\%, \quad (4.14)$$

где $x_{\text{диап}}$, $y_{\text{диап}}$, $z_{\text{диап}}$ – диапазоны измерения координат пламени.

4.2.2.3 Результаты исследования

Схема размещения ОЭС при проведении исследований точности с указанием ключевых геометрических параметров показана на рисунке 4.21.



БТ1 – БТ5 – базисные точки для соответствующих НОЭД

Рисунок 4.21 – Схема размещения ОЭС при проведении исследований точности с указанием ключевых геометрических параметров

Координаты размещения НОЭД в помещении и координаты их базисных точек, определяющие требуемый наклон оптических осей НОЭД под углом 20° и пересечение осей в одной точке согласно рисунку 4.20 и рисунку 4.21, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расположение НОЭД и базисных точек НОЭД в охраняемом помещении

№ НОЭД	Координаты НОЭД (x; y; z), м	Координаты базисной точки (x; y; z), м
1	(0,2; 0; 3,4)	(4,95; 8,8; 0)
2	(6,7; 0; 3,4)	(1,75; 8,8; 0)
3	(6,7; 11; 3,3)	(1,95; 2,5; 0)
4	(0; 11; 3,4)	(4,95; 2,5; 0)
5	(3,35; 5; 3,65)	(3,35; 5; 3,65)

Результаты оценки точности расчета координат пламени приведены в таблице 4.3. В таблице 4.3 указан тип тестового очага пожара, действительные координаты тестового очага пожара $x_{ТПд}$, $y_{ТПд}$, $z_{ТПд}$ и выборочные средние значения координат тестового очага пожара $\bar{x}_{ТПр}$, $\bar{y}_{ТПр}$, $\bar{z}_{ТПр}$, абсолютные $\Delta x_{ТП}$, $\Delta y_{ТП}$, $\Delta z_{ТП}$ и приведенные $\gamma(x)$, $\gamma(y)$, $\gamma(z)$ погрешности определения координат тестового очага пожара.

Таблица 4.3 – Результаты экспериментального исследования

№	Тестовый очаг пожара	$x_{ТПд}$; $y_{ТПд}$; $z_{ТПд}$, м	$\bar{x}_{ТПр}$; $\bar{y}_{ТПр}$; $\bar{z}_{ТПр}$, м	$\Delta x_{ТП}$; $\Delta y_{ТП}$; $\Delta z_{ТП}$, м	$\gamma(x)$; $\gamma(y)$, $\gamma(z)$, %
1	ТП-5	5	3,95±0,1	1,05	15
		8	7,1±0,2	0,9	13
		0,3	0,01±0,12	0,29	7,3
2	ТП-6	5	4,1±0,11	0,9	13
		8	6,9±0,11	1,1	10
		0,3	0,85±0,14	0,55	11,3
3	ТП-6	1,5	1,3±0,1	0,2	3
		8	6,8±0,14	1,2	11
		0,3	0,74±0,12	0,44	11,3
4	ТП-6	3,5	3,25±0,11	0,25	3,6
		5	5,3±0,1	0,3	3
		0,3	-0,3±0,1	0,6	15
5	ТП-6	4,5	4,1±0,1	0,4	5,7
		2,45	1,8±0,1	0,65	6
		0,3	0,1±0,1	0,2	5
6	ТП-6	1,5	2±0,1	0,5	7,1
		4	3,4±0,1	0,6	5,5
		0,8	0,2±0,15	0,6	15

Тестовые очаги пожара №1-3, 5, 6 размещались в углах помещения, а № 5 в центре помещения. Очаг № 6 был приподнят на высоту 0,8 м. Тестовые очаги № 1, 2 располагались в одной точке помещения, но использовались различные типы тестовых очагов пожара – ТП-5 и ТП-6 [99].

Приведенная погрешность расчета координат ТП-5 не превышает по абсциссе – 15%, по ординате – 13%, по аппликате – 8%, для ТП-6 соответственно по абсциссе – 13%, по ординате – 11,3%, по аппликате – 15%.

Значения экспериментальной приведенной погрешности удовлетворительно согласуются с теоретически рассчитанными значениями приведенной погрешности и не превышают требуемое значение погрешности (см. п. 2.4.3) [99].

Причинами увеличения приведенной погрешности при экспериментальном исследовании по сравнению с теоретическими расчетами, приведенными в п. 2.4.3 являются:

- неточное позиционирование НОЭД и ориентация их оптических осей;
- возможное частичное экранирование тестовых очагов №1 и 2, связанное с особенностями планировки помещения, в котором проводилось исследование.

4.3 Выводы по главе 4

1. Проведено экспериментальное исследование с использованием разработанного и изготовленного лабораторного образца быстродействующей многоточечной оптико-электронной системы и определены его технические параметры – быстродействие $14 \pm 1,4$ мс и погрешность определения пространственных координат тестовых очагов пожара по абсциссе не более 13%, по ординате не более 11,3%, по аппликате не более 15%.

2. Проведено экспериментальное исследование технических параметров НОЭД и определены их значения:

- расстояние обнаружения очага пожара;
- угол обзора;

– параметры помехоустойчивости – максимальное значение фоновой освещенности, создаваемое лампой накаливания – 600 лк и максимальное значение температуры оптической помехи в виде излучение от нагретого тела – 365 °С при которых НОЭД сохраняет работоспособность и не выдает ложное извещение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абросимов, А.А. Экология переработки углеводородных систем: Учебник / Под ред. М.Ю. Доломатова, Э.Г. Теляшева. – М.: Химия, 2002. – 608 с.
2. Давыдкин, С.А. Анализ аварий на объектах нефтегазовой промышленности / С.А. Давыдкин, А.Ю. Намычкин // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 6 (16). – 2007. – С. 7–14.
3. Тропкин, С.Н. Обеспечение безопасности оборудования и обслуживающего персонала объектов нефтегазовой отрасли от воздействия ударных волн : диссертация. кандидата технических наук : 05.26.03 / Тропкин С.Н.; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т.]. – Уфа, 2013. – 162 с.: ил.
4. Аварийность и травматизм в угольной отрасли в 2011 г. // Управление по надзору в угольной промышленности. Информационный бюллетень Федеральной службы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ib.safety.ru/assets/pdf/Bull_61/Bull_61_2-14.pdf.
5. Аварии в угольной промышленности // Промышленная безопасность. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://prom-nadzor.ru/content/avarii-v-ugolnoy-promyshlennosti>.
6. О состоянии аварийности и травматизма на предприятиях угольной отрасли за 2014 год / Доклад заместителя начальника Управления по надзору в угольной промышленности Ростехнадзора С.В. Мясникова. // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.minenergo.gov.ru/upload/iblock/f82/949377_etsp_-rostekhnadzor-rg-26-03-15.pdf.
7. Костеренко, В.Н. Факторы, оказывающие влияние на возникновение взрывов газа метана и угольной пыли в шахтах / В.Н. Костеренко, А.Н. Тимченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. №7. – 2011. – С. 368–377.
8. Айруни, А.Т. Взрывоопасность угольных шахт / А.Т. Айруни, Ф.С. Клебанов,

- О.В. Смирнов. – М.: Издательство "Горное дело" ООО "Киммерийский центр", 2011. – 264 с.: ил., табл. (Серия "Библиотека горного инженера". Т.9 "Рудничная аэрология", Кн. 2).
9. Шевцов, Н.Р. Взрывозащита горных выработок / Н.Р. Шевцов. – Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 280 с.
 10. Васильев, А.А. Оценки условий возбуждения и гашения взрывных волн при шахтных взрывах / А.А. Васильев, А.В. Пинаев, П.А. Фомин, А.В. Троцюк, В.А. Васильев, А.А. Трубицын, Д.А. Трубицына // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. №2. – С. 91–105.
 11. Машковец, И.Л. Аэрология и охрана труда на шахтах и в карьерах: Учеб. пособие / И.Л. Машковец, Г.А. Балыхин. – М.: Издательство УДН, 1986. – 312 с.
 12. Сидоренко, А.И. Оптико-электронное устройство для обнаружения очагов возгорания и определения их двумерных координат : диссертация. кандидата технических наук. : 05.11.13 / Сидоренко Антон Игоревич; [Место защиты: Нац. исслед. Том. политехн. ун-т]. – Бийск, 2015. – 154 с. : ил.
 13. Пай, В.В. Исследование параметров регистрации теплового потока при горении и детонации в канале газовой смеси / В.В. Пай [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – №1.2. – 2013. С. 77–84.
 14. Джигрин, А.В. Анализ действующих в угольных шахтах систем локализации взрывов и оценка эффективности их применения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://asvplv.ru/doc/expert_mvsk.pdf.
 15. Павлов, А.Н. Оптико-электронная система определения трехмерных координат очага взрыва в газодисперсных системах на начальной стадии: дис. канд. техн. наук: 05.11.13: защищена 29.06.10: утв. 19.11.10. / Павлов Андрей Николаевич. – Бийск, 2010. – 134 с.

16. Сыпин, Е.В. Оптико-электронный прибор обнаружения начальной стадии развития взрыва в газодисперсных системах: дис. канд. тех. наук : 05.11.13 : защищена 28.05.2007: утв. 14.12.2007 / Сыпин Евгений Викторович. – Барнаул: 2007. – 144 с.
17. Пат. 2459269 Российская Федерация, МПК7 G 08 B 17/12. Пирометрический датчик координат очага возгорания с цилиндрическими линзами / Сыпин Е.В. [и др.]. – №2006137378/09; заявл. 16.03.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. – 5 с.
18. Пат. 2536355 Российская Федерация, МПК7 G 08 B 17/00. Пирометрический датчик координат очага возгорания с полевой диафрагмой / Сыпин Е.В. [и др.]. – № 2012147669/08. заявл. 08.11.2012; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35. – 7 с.
19. Нецепляев, М.И. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев [и др.]. – М.: Недра, 1992. – 298 с.: ил.
20. Кулагов, В.Б. Пожарные извещатели со спектральной селекцией пламени / В.Б. Кулагов // Датчики и системы. – № 7. – 2015. С. 49–55.
21. Горбунов, Н.И. Оптоэлектронные приборы для обнаружения и регистрации электромагнитного излучения / Горбунов Н.И. [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – №1. С. 47–55.
22. Дийков, Л.К. Электронно-оптические извещатели пламени / Л.К. Дийков, Ф.К. Медведев, Ю.Л. Шелехин // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2000. – №6. – С. 26–29.
23. Казанцев, В.Г. Системы взрывозащиты газоотводящей сети высокой пропускной способности / В.Г. Казанцев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – №12. – С. 380–396.
24. Авдеев, С.В. Распределенная многоточечная оптоволоконная система обнаружения пожара в туннелях, в сб. 7-й международной научно-

- практической конференции "Информационные технологии на железнодорожном транспорте" / С.В. Авдеев, А.А. Свинцов, А.Г. Свинцов. – "Фотон-Экспресс". – Наука, 2005. – №6. – С. 177–180.
25. Амельчугов, С.П. Новая технология построения систем защиты от пожара на базе роботизированных комплексов пожаротушения / С.П. Амельчугов, Р.В. Горностаев, С.Н. Лёвин. // Технологии защиты. – 2007. – № 5. – С. 215–218.
 26. Горностаев, Р.В. Применение новых технологий пожаротушения / Р.В. Горностаев, П.А. Осавелюк, А.А. Мельник // Вестник СПбУ ГПС МЧС России. – 2009. – №4. – С. 23–27.
 27. Pat. US WO2015092691 (A1) United States. G08B 17/12. System and method for detecting fire location / Manjuprakash R.R.; TYCO FIRE & SECURITY GMBH. – Pub. date 2015.06.25. – 47 p.
 28. Лисаков, С.А. Определение числа точек контроля и их расположения на охраняемом объекте для быстросействующей 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.
 29. 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. 73–77.
 30. Lisakov, S.A. Application of neural networks to determine the coordinates of the seat of fire by multipoint electro-optical system / S.A. Lisakov, A.N. Pavlov, E.V. Sypin. – 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies. and Electron Devices EDM 2014: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2014. – pp. 265–269.
 31. 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.
32. Лисаков, С.А. Моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух» / С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12. – С. 288–296.
33. Лисаков, С.А. Компьютерное моделирование горения метано-воздушных смесей на начальной стадии развития / С.А. Лисаков, А.И. Сидоренко, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – №3. – С. 37–46.
34. Лисаков, С.А. Компьютерное моделирование излучения пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития / С.А. Лисаков, А.И. Сидоренко, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов, Г.В. Леонов. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 3. – С. 32–41.
35. Лисаков, С.А. Разработка методологии адаптации быстродействующей многоточечной оптико-электронной системы определения пространственных координат пламени под объект заданной формы / С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин. // Южно-сибирский научный вестник. – 2019. – №4 (28). – Т. 2. – С. 125–135. – http://s-sibsb.ru/images/articles/2019/4/2/S-SibSB_Issue_28-125-135.pdf.
36. 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..
37. 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.
38. Кин, А.И. Разработка программного обеспечения для адаптации многоточечной оптико-электронной системы определения пространственных

- координат пламени под охраняемый объект заданной формы / А.И. Кин, С.А. Лисаков, Сидоренко А.Ю., А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин. // Южно-сибирский научный вестник. – 2019. – №1 (25). – С. 222–230. – http://s-sibsb.ru/images/articles/2019/1/S-SibSB_Issue_25-222-230.pdf.
39. ГОСТ Р 53325–2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования. Методы испытаний. – Введен 01–01–2014. – М.: Стандартинформ, 2013. – 270 с.
 40. ГОСТ Р 54777–2011. Автоматические системы взрывоподавления-локализации взрывов метанопылевоздушных смесей в угольных шахтах. Общие технические требования. Методы испытаний. – Введен 2013–01–01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 15 с.
 41. Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник для студентов вузов / Ю.Г. Якушенков. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2011. – 568 с.
 42. Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М.М. Мирошников. – Издательство: «Лань», 2010. – 704 с.
 43. Морозов, Д.О. Баротермическое действие взрыва: ударная волна и термическое поражение / Д.О. Морозов, К.Л. Степанов // Горение и плазмохимия. – 2013. – том 11. – № 1. – С. 57–70.
 44. Блох, А.Г. Теплообмен излучением: Справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
 45. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. – М.: Мир, 1975. – 934 с.
 46. Цыпкин, А.Г. Справочник по математике для средних учебных заведений / А.Г. Цыпкин. – 3-е изд. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 480 с.
 47. Блох, А.Г. Тепловое излучение в котельных установках / А.Г. Блох. – Л.: Энергия. – 1967. – 328 с.

48. Блох, А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А.Г. Блох. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. – 1984. – 240 с., ил.
49. Пат. 2394204 Российская Федерация, МПК F42B35/00, F41J5/02. Способ определения координат объекта испытаний в момент его подрыва / С.И. Герасимов, Е.А. Гончаров [и др.]. № 2009102703/02; заявл. 27.01.2009; Опубл. 10.07.2010, Бюл. №19. – 8 с.
50. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
51. Дьяконов, В.П. Maple 10/11/12/13/14 в математических расчетах / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 800 с.
52. Круглов, В.В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Физматлит. – 2001. – 221 с.
53. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ / С. Хайкин. – М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2016. – 1104 с. : ил.
54. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей. : Пер. с англ. / Р. Каллан. – М.: ООО "Издательский Дом Вильямс", 2001. – 287 с. : ил.
55. 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 № 2015662385. – 2015.
56. Ханова, А.А. Численное решение уравнений и систем уравнений / А.А. Ханова. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2001. – 44 с.
57. Иванов, А.П. Практикум по численным методам. Метод Ньютона / А.П. Иванов. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. – 12 с.
58. Очков, В.Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов / В.Ф. Очков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 368 с.: ил.
59. Оптоэлектронные приборы для ближней и средней ИК области спектра 0.7 -

- 5.0 мкм. Каталог ООО «АИБИ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ibsg.ru/catalogue_2015.pdf.
60. Rothman, L.S., et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J.Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer., 2009, 110, pp. 533–572.
 61. Михайленко, С.Н. Информационно-вычислительная система "Спектроскопия атмосферных газов". Структура и основные функции / С.Н. Михайленко, Ю.Л. Бабилов, В.Ф. Головки // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т.18, № 09. – С. 765–776.
 62. Васючков, Ю.Ф. Горное дело: Учеб. для техникумов / Ю.Ф. Васючков. – М.: Недра. – 1990. – 512 с.
 63. Порцевский, А.К. Технологии проведения горизонтальных, вертикальных горных и горно-разведочных выработок: Учебное пособие. / А.К. Порцевский. – М.: МГОУ, 2004. – 69 с.
 64. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Системы пожарной сигнализации и установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования. – Введ. 2009–03–25. – Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. – 107 с.
 65. Пантелеев, А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – 2-е изд., исправл. – М.: Высш. шк., 2005. – 544 с: ил.
 66. Захарова, Е.М. Обзор методов многомерной оптимизации / Е.М. Захарова, И.К. Минашина // Информационные процессы. – Том 14. – № 3. – 2014. – С. 256–274.
 67. Сыркин, П.С. Шахтное и подземное строительство. Технология строительства горизонтальных и наклонных выработок: Учеб. пособие / П.С. Сыркин, И.А. Мартыненко // Шахтинский ин-т ЮРГТУ. Новочеркасск: ЮРГТУ, 2002. – 430 с.
 68. 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.
69. 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.
70. 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.
71. Тупикина, Н.Ю. Оптико-электронный прибор двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Тупикина Надежда Юрьевна. – Бийск, 2017. – 164 с.
72. 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.
73. Якушенков, Ю.Г. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах / Ю.Г. Якушенков, В.Н. Луканцев, М.П. Колосов. – М.: Радио и связь, 1981. – 180 с.: ил.
74. Батищев, Д.И. Поисковые методы оптимального проектирования // Д.И. Батищев. – М. «Сов. Радио», 1975. – 216 с.
75. Парвулюсов, Ю.Б. Проектирование оптико-электронных приборов: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Ю.Б. Парвулюсов, С.А. Родионов, В.П. Солдатов и др.; Под. ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Логос, 2000. – 488 с.: ил.

76. Торшина, И.П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации / И.П. Торшина. – М.: Университетская книга; Логос, 2009. – 248 с.: ил.
77. Сидоренко, А.И. Экспериментальное исследование компенсационного метода для повышения помехоустойчивости ОЭП обнаружения взрывов / А.И. Сидоренко, С.А. Лисаков, Е.В. Сыпин // Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 102–108.
78. Кулагов, В.Б. Извещатели пламени «НАБАТ»: преимущество и опыт применения / В.Б. Кулагов, А.Е. Смирнов // Грани безопасности. – 2009. – №1. – С. 30–32. – Режим доступа: <http://www.giricond.ru/files/izveshateli.pdf>.
79. Излучательные свойства твердых материалов / Справочник. Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. – М. "Энергия". – 1974. – 472 с.
80. Agrawal, D.C. Efficiency and efficacy of incandescent lamps / D.C. Agrawal, H.S. Leff, V.J. Menon // American Journal of Physics, 1996, pp. 649–654.
81. ОАО «НИИ «Гириконд». Фотоэлектрические и оптоэлектронные приборы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.giricond.ru/production/photoelectric/>.
82. BPW 34 F. Silicon PIN Photodiode with Daylight Blocking Filter [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic2/00215978_0.pdf/BPW%2034%20F.pdf.
83. ОАО "ЦКБ Ритм" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ckb-rhythm.narod.ru>.
84. Гаврилов, Г.А. Предельная чувствительность фотоприемного устройства на основе фотодиодов АЗВ5 среднего ИК-диапазона спектра / Г.А. Гаврилов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова // Письма в "Журнал технической физики". – 2011. – Т. 37, вып. 18. – С. 50–57.
85. Гауэр, Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. / Дж. Гауэр. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с: ил.

86. Александров, С.Е. Влияние низкочастотных шумов на пороговую чувствительность фотодиодных фотоприемных устройств среднего ИК-диапазона в широкой полосе частот / С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, Г.Ю. Сотникова // Письма в ЖТФ. – 2014. – том 40. – вып. 16. – С. 58–64.
87. Шаровар, Ф.И. Пожаропредупредительная автоматика: Теория и практика предотвращения пожаров от маломощных загораний / Ф.И. Шаровар. – М.: Специнформатика-СИ, 2013. – 556 с., ил.
88. ГОСТ 26342-84 «Средства охранной, пожарной и охранно-пожарной сигнализации. Типы, основные параметры и размеры» М.: Изд-во стандартов, 1984. – 34 с.
89. Компьютерная программа для расчета 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. // Свидетельство РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2017612062. – 2017.
90. Тупикина, Н.Ю. Способы построения трехканальной оптической системы с отдельными объективами каналов / Н.Ю. Тупикина, Е.В. Сыпин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 6. – С. 143–148. – Режим доступа: [http://s-sibsb.ru/images/articles/2014/2\(6\)/42_143-148.pdf](http://s-sibsb.ru/images/articles/2014/2(6)/42_143-148.pdf).
91. Pavlov, A.N. The system of the methane explosion localization in the coal mine air trunk / A.N. Pavlov, E.V. Sypin, S.A. Terentiev, V.V. Kolpakov, E.S. Povernov, V.G. Kazantsev // Ninth international workshops and tutorials on electron devices and materials EDM'2008: workshop proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2008. – pp. 106–108.
92. Пат. 2318242 Российская Федерация, МПК7 G 08 B 17/12. Пирометрический датчик координат очага возгорания / Сыпин Е.В. [и др.]. – №2006137378/09; заявл. 23.10.06; опубл. 27.02.08, Бюл. № 6. – 4 с.
93. ATmega8 datasheet [Электронный ресурс]. – Datasheet Search System. – Режим доступа: <http://www.alldatasheet.com/datasheet->

- pdf/pdf/ATMEL/ATMEGA8.html.
94. Atmel Studio 6.0 datasheet [Электронный ресурс]. – Datasheet Search System. – Режим доступа: http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-42167-atmel-studio_user%20guide.pdf.
 95. Кураев, А.В. Лабораторный образец многоточечной оптико-электронной системы определения пространственного расположения очага взрыва / А.В. Кураев, С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин. // Южно-сибирский научный вестник. – 2013. – №1 (3). – С. 19–21. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2013/1/4_19-21.pdf.
 96. ОВЕН. Оборудование для автоматизации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.owen.ru/>.
 97. User Manual for PLC Programming with CoDeSys 2.3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://marie-www.ee.pw.edu.pl/~purap/PLC/manuals/m07590333_00000000_1en.pdf.
 98. Кураев, А.В. Программно-аппаратный комплекс для управления многоточечной системой определения координат очага возгорания / А.В. Кураев, С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин. // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 179–182.
 99. Лисаков, С.А. Экспериментальное исследование по проверке адекватности определения пространственных координат пламени многоточечной оптико-электронной системой / С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов. // Южно-сибирский научный вестник. – 2017. – №4 (20). – С. 221–228. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2017/4/45_221-228.pdf.
 100. Лисаков, С.А. Лабораторное исследование точности определения координат очага возгорания многоточечной оптико-электронной системой для одномерного случая / С.А. Лисаков, Е.В. Сыпин, А.В. Кураев, А.Н. Павлов // Южно-сибирский научный вестник. – 2013. – №2 (4). – С. 94–98. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2013/2/21_94-98.pdf.

101. Сидоренко, А.И. Разработка и испытания экспериментального образца помехоустойчивого оптико-электронного прибора для обнаружения очага взрыва: отчет о выполнении НИОКР (заключ. по контракту №261ГС1/7945 от 12.02.2015). / ООО «Экспротект»; рук. Сидоренко, А.И. – Бийск, 2016. – 84 с. – Исполн.: Сыпин Е.В., Лисаков С.А., Павлов А.Н., Повернов Е.С., Тупикина Н.Ю. – Библиогр.: с. 67–70. – Рег. № НИОКР 115072070003.
102. Лисаков, С.А. Определение основных эксплуатационных параметров оптико-электронного датчика многоточечной системы определения пространственного расположения очага возгорания / С.А. Лисаков, А.В. Кураев, Е.В. Сыпин, А.Н. Павлов // Ползуновский вестник. – 2014. – № 2. – С. 107–110.
103. Дробот, П.Н. Теория ошибок и обработка результатов измерений: учеб. Пособие / П.Н. Дробот. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2011. – 84 с.
104. Излучатель в виде модели абсолютно черного тела АЧТ-45/100/1100. Руководство по эксплуатации ДДШ 2.979.005 РЭ. – 26 с.
105. Герасимов, Д.А. Исследование динамических характеристик очага возгорания на начальной стадии в пирометрическом датчике пожарной сигнализации/ Д.А. Герасимов, И.С. Зорин, Е.В. Сыпин // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 2(6). – С. 128–131. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/40_161-164.pdf.
106. Мамаев, В.И. Предупреждение взрывов пылеметановоздушных смесей / В.И. Мамаев. – М.: Недра, 1990. – 159 с.
107. ГОСТ 12.1.044-89 Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 110 с.
108. Сидоренко, А.И. Установка для экспериментального исследования систем взрывоподавления / А.И. Сидоренко, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин // Датчики и системы. – 2013. – №10. – С. 27–31.

109. Автоматизированная система управления экспериментальной установкой для проведения взрывов пылегазовоздушных смесей / Сидоренко А.И. [и др.] // Измерение, контроль, информатизация: материалы XIV международной научно-технической конференции. – Т.2. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. – С. 110–116.
110. ООО «Л КАРД». Индустриальные системы управления и сбора данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lcard.ru>.
111. ГОСТ 8.207–76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – М.: Стандартинформ, 2006. – 8 с.
112. Решетников, М.Т. Планирование эксперимента и статистическая обработка данных: Учебное пособие / М.Т. Решетников. – Томск: Томск, гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2000. – 231 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



Общество с ограниченной
ответственностью
«Экспротект»

(ООО «Экспротект»)

659322, Алтайский край, г. Бийск,
ул. Александра Радищева, д.12, кв.63

Тел./факс: (3854) 432450

E-mail: sai@bti.secna.ru

ОКПО 13961037 ОГРН 1142204005899

ИНН 2234014570 / КПП 223401001

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Лисакова Сергея Анатольевича
«Быстродействующая многоточечная оптико-электронная система контроля
пламени и определения его пространственных координат»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы С.А. Лисакова были использованы в период с 2014 по 2016 г. при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по хозяйственным договорам №06/15 от 31.12.2014 «Разработка экспериментального образца оптико-электронного прибора обнаружения очага взрыва» и № 28-15 от 11.11.2015 «Разработка методики натурных испытаний оптико-электронного прибора обнаружения очага взрыва с целью определения достоверности обнаружения очага взрыва» между ООО «Экспротект» и Бийским технологическим институтом (филиалом) ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Созданный Лисаковым С.А. быстродействующий измерительный стенд и методики для проведения натурных испытаний оптико-электронных приборов и систем контроля пламени были использованы при выполнении государственного контракта №261ГС1/7945 от 12.02.2015 по проекту «Разработка и испытания экспериментального образца помехоустойчивого оптико-электронного прибора для обнаружения очага взрыва», финансируемого Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Директор ООО «Экспротект»



Сидоренко А.И.



МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Бийский технологический
институт (филиал) ФГБОУ ВО
«Алтайский государственный
технический университет
им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ)**
ул. им. Героя Советского Союза
Трофимова, д. 27, г. Бийск, 659305
тел. (3854) 432285, факс: (3854) 435300
E-mail: info@bti.secna.ru
<http://www.bti.secna.ru>



УТВЕРЖДАЮ
Директор БТИ АлтГТУ

Ленский М.А.

«04» июня 2019 г.

«04» 06 2019 г. № 40-521

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**результатов диссертационной работы Лисакова Сергея Анатольевича
«Быстродействующая многоточечная оптико-электронная система контроля
пламени и определения его пространственных координат»
в учебный процесс Бийского технологического института (филиала)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»**

Комиссия в составе заместителя директора по научной работе, д.т.н., профессора Хмелёва В.Н., и.о. первого заместителя директора по учебной работе, к.т.н., доцента Корабельникова Д.В. и заведующего кафедрой методов и средств измерений и автоматизации д.т.н., доцента Шалунова А.В. составила настоящий акт, подтверждающий, что результаты диссертационной работы инженера кафедры методов и средств измерений и автоматизации С.А. Лисакова внедрены в процесс подготовки бакалавров направления 12.03.01 «Приборостроение» в виде:

– разделов лекций и лабораторных работ по курсу «Основы оптико-электронных приборов и систем» для бакалавров направления 12.03.01 «Приборостроение»;

– комплекса компьютерных программ: «Программа расчета координат очага возгорания многоточечной оптико-электронной системой на базе нейросетевого алгоритма» (свидетельство о регистрации № 2015662499), «Программа расчета выходных сигналов оптико-электронных датчиков системы определения координат очага возгорания на основе пространственного многоточечного анализа оптического излучения» (свидетельство о регистрации № 2015662582), «Компьютерная программа для расчета спектральных диапазонов контроля излучения пламени при использовании компенсационного

метода подавления оптических помех» (Свидетельство о регистрации № 2017612062).

Созданы «Лабораторная установка для измерения освещенности с возможностью изменения температуры и расположения эталонного источника излучения» и «Стенд для проведения испытаний лабораторного образца многоточечной оптико-электронной системы определения пространственного расположения очага взрыва в лабораторных условиях», позволившие проводить исследования студентами в рамках выполнения выпускных квалификационных работ.

Внедрение результатов диссертационной работы Лисакова С.А. в учебный процесс кафедры методов и средств измерений и автоматизации БТИ АлтГТУ позволило повысить качество подготовки обучающихся, усовершенствовать научно-исследовательскую часть практик, лабораторных и выпускных квалификационных работ.

Заместитель директора по научной работе,
д.т.н., профессор

В.Н. Хмелёв

И.о. первого заместителя директора по
учебной работе, к.т.н., доцент

Д.В. Корабельников

Заведующий кафедрой методов и средств
измерений и автоматизации
д.т.н., доцент

А.В. Шалунов