БИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Кафедра Методов и средств измерений и автоматизации

УДК 622.8

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка научных основ построения многокритериальных оптико-электронных приборов контроля аварийных и предаварийных ситуаций (в том числе эндогенных и экзогенных пожаров) в угольных шахтах

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ, № МК-868.2017.8.

Исполнители С.А. Лисаков, А.И. Кин, А.Ю. Сидоренко, И.С. Зорин, А.И. Сидоренко

Руководитель				
работы	доцент,	К.Т.Н.		Е.В. Сыпин
-	должность,	ученая степень	подпись	и.о. фамилия

ΡΕΦΕΡΑΤ

Разработка научных основ построения многокритериальных оптико-электронных приборов контроля аварийных и предаварийных ситуаций (в том числе эндогенных и экзогенных пожаров) в угольных шахтах

Лисаков С.А., Кин А.И., Сидоренко А.Ю., Зорин И.С., Сидоренко А.И., Сыпин Е.В.

Пояснительная записка содержит 74 листа, 27 рисунков, 9 таблиц, список использованных источников содержит 60 наименований.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР, МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОНТРОЛЬ, МЕТАН, ОКСИД УГЛЕРОДА, ДИОКСИД УГЛЕРОДА, УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ, ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ, ПОРОГ ОБНАРУЖЕНИЯ

Цель НИР: Разработка научных основ построения многокритериальных интеллектуальных оптико-электронных приборов контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах, выполняющих мониторинг рудничной атмосферы и обеспечивающих пожарную безопасность.

Сформулированы необходимые и достаточные параметры контроля и определены их диапазоны изменения. Разработана математическая модель и выполнено компьютерное моделирование прибора. Сформулированы рекомендации по выбору оптимальных датчиков контроля. Разработан нейросетевой алгоритм контроля предаварийной или аварийной ситуации. Изготовлен экспериментальный образец многокритериального оптико-электронного прибора. Проведены испытания, подтверждающие адекватность математической модели и алгоритма работы прибора.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ, № МК-868.2017.8.

Введени	ле	. 5
1 Анали	из состояния проблемы	. 8
2 Модел	пирование многокритериального оптико-электронного прибора контроля аварийных и	
предава	рийных ситуаций в угольных шахтах	11
2.1 Пост	гановка задачи моделирования	11
2.1.1	Предаварийные и аварийные ситуации в угольных шахтах	11
2.1.2	Параметры контроля предаварийных и аварийных ситуаций в угольных шахтах	14
2.1.3	Диапазоны изменения контролируемых параметров	15
2.1.4	Структурная схема многокритериального оптико-электронного прибора	18
2.1.5	Подходы к моделированию многокритериального оптико-электронного прибора	21
2.1.6	Исходные данные для моделирования	23
2.2 Мод	селирование оптико-электронных датчиков концентрации газов и угольной пыли	24
2.2.1 концент	Аналитические зависимости для моделирования оптико-электронных датчиков грации газов и пыли	25
2.2.2	Проверка адекватности компьютерной модели	31
2.2.3	Моделирование спектральных коэффициентов пропускания газов и пылевоздушной смес 34	си
2.2.4	Выбор элементной базы для оптико-электронных датчиков концентрации газов и пыли.	35
2.3 Мод	елирование оптико-электронного датчика обнаружения пламенного горения и тления	40
2.3.1	Математическая модель ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения	41
2.3.2	Проверка адекватности компьютерного моделирования	44
2.3.3 горения	Моделирование потока излучения на входном зрачке ОЭД обнаружения пламенного и и тления	44
2.3.4	Выбор элементной базы для ОЭД обнаружения пламенного горения и тления	46
3 нейро многокр	сетевой алгоритм обнаружения предаварийных или аварийных ситуаций ритериальным оптико-электронным прибором	49
3.1 Под	ходы и способы определения предаварийных и аварийных ситуаций	49
3.2 Опр	еделение предельно допустимых концентраций для ситуаций в угольной шахте	53
3.3 Под шахте	ход к построению нейросетевого алгоритма для прогнозирования ситуаций в угольной	55
3.4 Мат	ематическое описание нейросетевого алгоритма	56
3.5 Иссл	педование по определению архитектуры нейронных сетей	59

СОДЕРЖАНИЕ

4 Разработка экспериментального образца многокритериального оптико-электронного прибора	
контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах	. 61
4.1 Структурная схема прибора	. 61
4.2 Выбор элементной базы	. 62
4.3 Проведение испытаний МКОЭП	. 63
5 Направление дальнейших исследований	. 66
Заключение	. 67
Список использованных источников	. 69

введение

Современная промышленность насчитывает несколько десятков процессов, являющихся взрывоопасными: переработка, хранение и транспортировка углеводородного сырья, добыча и переработка угля и т.п. Наиболее частыми и тяжелыми по своим последствиям по-прежнему остаются аварии, связанные с горением метана и угольной пыли в угольных шахтах, которые в большинстве случаев носят характер катастроф. Шахтные экзогенные и эндогенные пожары, даже в начальной стадии своего развития, представляют большую угрозу жизни людей, находящихся на пути распространения пожарных газов. Количественное соотношение экзогенных и эндогенных пожаров в различных геолого-промышленных районах существенно отличается, и зависит, в основном, от удельного веса добычи в них склонных к самовозгоранию углей. Основными горючими компонентами в горных выработках являются деревянная крепь, конвейерная лента, кабели, уголь, метан. Экзогенные пожары больше всего (до 70%) происходят в конвейерных выработках. Эндогенные пожары в основном происходят в выработанном пространстве очистных забоев [1].

На поверхностном комплексе часто наблюдается самовозгорание угля на шахтных складах в виде отдельных небольших очагов эндогенных пожаров. Практически во всех угольнопромышленных районах самовозгораются отвальные породы. В процессе добычи, складирования и транспортировки самовозгораются торфы, бурые и каменные угли, антрациты, горючие сланцы. В известных работах нет единого мнения о причинах самовозгорания угля, хотя решающая роль кислорода атмосферного воздуха в этих процессах признается авторами всех без исключения гипотез [1].

Для обеспечения пожарной, взрывной или взрывопожарной безопасности объектов угольной промышленности, где возможно возникновение пожаро- и взрывоопасных сред используются многофункциональные системы безопасности.

Многофункциональные системы безопасности являются сложными и состоят из большого количества подсистем выполняющих поддержание устойчивого проветривания; выявление источников высокой температуры; обеспечение газопылевзрывозащиты (пожарной безопасности); мониторинг рудничной атмосферы; мониторинг горного массива; мониторинг подземного персонала (позиционирование). Подсистемы в свою очередь состоят из различных приборов контроля, которые постоянно совершенствуются [2].

Несмотря на применяемые меры, количество аварий в угольных шахтах не уменьшается.

Сложности при предотвращении аварий обусловлены многообразием причин и сложностью механизмов возникновения и развития горения газопылевоздушных смесей.

Практическое применение получили следующие способы обнаружения экзогенных пожаров: по наличию дыма, содержанию СО и нагреванию воздуха в шахтной вентиляционной сети.

Эндогенные пожары имеют свою специфику развития и методы обнаружения очагов самонагревания и самовозгорания угля для различных стадий пожара: стадии самонагревания, ранней стадии самовозгорания и стадию горения угля. Как правило, контролируется изменение температуры очага пожара и изменение состава рудничного воздуха: снижается концентрация кислорода, увеличивается растут концентрации оксидов углерода, водорода, углеводородов [1].

В работах [3, 4, 5] рассмотрены проблемы связанные с обеспечением безопасности угольных шахт.

Используемые в угольных шахтах датчики концентрации метана выдают сигналы тревоги при концентрации меньше нижнего концентрационного предела горения метановой смеси (2%). Однако воспламенение смеси происходит даже при показаниях датчиков со значениями за границей нижнего концентрационного предела воспламенения.

Одной из причин являются залповые выбросы метана из угольной породы. При залповых выбросах метана возникают локальные зоны, в которых смесь может воспламениться от различных источников (искры, нагретые поверхности, тление угля). Однако при этом средняя концентрация метана по штреку вне нижнего концентрационного предела и датчики метана не срабатывают.

Другая причина заключается в том, что газовоздушная смесь имеет сложный состав, включающий метан, водород, тяжелые углеводороды и других примеси, т.е. присутствуют другие вещества с меньшими, чем у метана значениями энергий воспламенения. В результате изначально воспламеняются компоненты с минимальными энергиями, а затем от них уже метановые смеси.

В свою очередь существует также возможность воспламенения мелкодисперсной угольной пыли, взвешенной в воздухе при определенных концентрациях.

Развитие горения при этом может развиваться стремительно и при определенных условиях горение может перейти в детонацию, что приведет к катастрофическим последствиям.

Таким образом, стационарные датчики метана, не обеспечивают достоверные измерения концентрации метана в местах работы шахтеров. Контроль концентрации метана необходимо осуществлять не точечно, а по всей протяженной выработке. Также необходимо контролировать другие вещества в смеси (водород, тяжелые углеводороды) и концентрацию угольной пыли и оценивать взрывоопасность рудничной атмосферы по взаимосвязи этих факторов.

При обнаружении эндогенных пожаров для выделения кратковременных и долговременных тенденций изменения СО в выработках используют величину скорости нарастания концентрации СО за определенный интервал времени. Рекомендуемые значения скорости нарастания для распознавания эндогенных пожаров в ранней стадии развития требуют уточнения по мере накопления практического опыта в процессе эксплуатации систем контроля. Известные исследования развития эндогенного пожара показывают, что при скоростях самонагревания, меньших 2 °C в сутки, значение объемной доля СО будет примерно на полтора порядка ниже чувствительности используемых газоанализаторов.

Одновременно необходимо контролировать наличие пожаров по их тепловому излучению. В крайней ситуации необходимо обеспечить достоверное обнаружение и ликвидацию возможного внезапно возникшего пламенного горения смеси.

Контроль факторов, сопровождающих предаварийные и аварийные ситуации необходимо проводить комплексно (взаимосвязано).

Разработка и совершенствование средств достоверного контроля по различным факторам предаварийных и аварийных ситуаций в угольных шахтах является актуальной задачей.

В связи с вышеизложенным была сформулирована цель НИР – Разработка научных основ построения многокритериальных интеллектуальных оптико-электронных приборов контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах, выполняющих мониторинг рудничной атмосферы и обеспечивающих пожарную безопасность.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) Выполнить аналитический обзор по теме исследования и сформулировать необходимые и достаточные физические параметры контроля предаварийных и аварийных ситуаций и определить диапазоны измерения контролируемых факторов (критериев) для рудничной атмосферы.

2) Разработать математическую модель и выполнить компьютерное моделирование многокритериального оптико-электронного прибора на основе известных физических закономерностей распространения оптического излучения и тепломассопереноса в рудничной атмосфере для последующей разработки алгоритма контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах.

3) На основе анализа существующей технической и элементной базы сформулировать рекомендации по выбору оптимальных датчиков для регистрации необходимых физических параметров контроля (оптических датчиков теплового излучения (пламени) и оптических датчиков измерения концентрации газов).

4) Разработать нейросетевой алгоритм принятия решения о наличии предаварийной или аварийной ситуации на основании сигналов датчиков и формирования управляющих воздействий для приведения охраняемого объекта к нормальному режиму функционирования.

5) Изготовить экспериментальный образец пространственно-распределенного многокритериального оптико-электронного прибора и выполнить экспериментальное исследование для проверки адекватности предложенной математической модели и эффективности предложенных принципов построения и алгоритмов функционирования.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время на российском рынке существуют фирмы, выполняющие проектирование отдельных подсистем многофункциональной системы обеспечения безопасности в угольных шахтах. К ним относятся ООО «Ингортех», НПФ «Гранч», ЗАО «ПРОМТЕХ», ООО «АК СНАБ», ЗАО НВИЦ «Радиус». К иностранным компаниям, производящим аналогичные подсистемы относятся: Aeroscout (США); Cisco Systems (США); Ekahau (США); Active Control; KJ361 (КНР); Ultima Plus Digital Network System (США); Emag (Польша) ISS International Ltd (ЮАР). Однако присутствие иностранных компаний на российском рынке крайне ограничено.

Большинство выпускаемых газоаналитических систем (например, система «Микон 1Р» фирмы ООО «Ингортех», система Granch МИС фирмы НПФ «Гранч», АГК и АГЗ) принимает меры по предотвращению аварии при достижении предельно допустимых значений одного из контролируемых параметров (концентрации взрывоопасных газов и пыли). Недостатком таких систем, является то, что решение о предаварийной ситуации принимается по отдельным критериям и не рассматривается взаимодействие критериев в комплексе.

При проведении контроля пожара в системы безопасности угольных шахт адаптируются широко распространенные многокритериальные извещатели пожара общегражданского назначения, определяющие наличие продуктов горения (CO2, CO, H2) и дыма [6, 7]. Однако такие извещатели не всегда учитывают специфику влияния рудничной атмосферы (запыленность среды) на показания и достоверность обнаружения пожара снижается. Например, проблемой всех дымовых извещателей, применяемых в угольных шахтах, является быстрое накопление пыли, которая приводит их в неработоспособное состояние.

Ранее, задачи обнаружения эндогенных и экзогенных пожаров рассматривались отдельно, под которые разрабатывались различные датчики и газоанализаторы. При переходе к автоматизированным подсистемам эти задачи объединяются в рамках общей задачи обнаружения ранних стадий подземных пожаров. При этом используются общие технические средства (набор датчиков различных признаков пожара) и рассматриваются не эндогенные и экзогенные пожары, а проводится анализ изменения долговременных и кратковременных тенденций соответственно [8].

Разная динамика развития процессов горения угля (динамика изменения концентраций газов) в выработанном пространстве и материалов в выработке позволяет ограничиться разработкой отдельных подалгоритмов обнаружения эндогенных и экзогенных пожаров в программном обеспечении единой автоматизированной подсистемы. Известные системы являются универсальными и поэтому их отнесение к эндогенным или экзогенным – часто условное.

Для обнаружения эндогенных пожаров в системах контролируется изменение микроконцентраций угарного газа в атмосфере горных выработок, а также изменение температуры массива.

Обнаружение эндогенных пожаров по повышению температуры массива, не находит широкого практического применения. Это обусловлено необходимостью бурения шпуров глубиной до 10 м и установкой в них тепловых датчиков. При подвигании забоя весь комплекс работ необходимо повторять. Кроме того, рост температуры массива на несколько градусов соответствует, как правило, уже развитой стадии эндогенного пожара. Таким образом, чувствительность метода измерения температуры к самовозгоранию угля значительно хуже, чем контроль микроконцентраций угарного газа [8].

Известные алгоритмы обнаружения эндогенных и экзогенных пожаров различаются по методам обработки информации и распознавания причин возрастания микроконцентраций угарного газа. Общими недостатками известных алгоритмов являются [8]:

 – отсутствует совместная обработка измерительных данных от нескольких пространственно распределенных датчиков и от нескольких датчиков различного типа (комплексирование методов контроля);

– отсутствует учет изменения во времени скорости воздуха в выработках;

– не предусмотрено прогнозирование пожароопасных ситуаций;

 отсутствует выдача решений на исполнительные органы и механизмы систем, в том числе систем пожаротушения.

Анализ отечественного и зарубежного опыта ориентирует на создание в настоящее время автоматизированных систем обнаружения и тушения подземных пожаров, работающих в режиме советчика оператора.

Создание автоматизированной подсистемы обнаружения и тушения эндогенных или экзогенных пожаров требует проведения научных исследований в нескольких направлениях [8]:

– изучение физики развития пожаров в горных выработках на ранней стадии и построение математических моделей для расчетов параметров;

– изучение технологии ведения горно-добычных работ для оценки возможностей участия рабочего персонала шахт в ликвидации пожаров, обнаруженных подсистемой;

 изучение вопросов обработки аналоговых сигналов для определения элементов оптимальной процедуры обнаружения и распознавания вида подземного пожара;

 постановка и решение системных задач по взаимодействию разработанных программных модулей и обеспечению работы подсистемы в режиме реального времени.

Проведенные исследования процессов развития экзогенных и эндогенных пожаров показывают, что по скорости распространения пламени они могут быть разделены на три группы:

 – быстро развивающиеся пожары на ленточных конвейерах в выработках, проветриваемых за счет общешахтной депрессии;

 пожары на крепи выработок, проветриваемых за счет общешахтной депрессии, на ленточных конвейерах и крепи тупиковых выработок;

 медленно развивающиеся пожары, вызванные самовозгоранием угля в выработанном пространстве и в целиках.

Для каждой группы пожаров рассчитано критическое время, за которое пожар разовьется до такой степени, что потушить его введенными в действие средствами будет невозможно: для быстроразвивающихся пожаров < 22 мин; для пожаров на крепи выработок и пр. критическое время находится в интервале от 45 до 180 мин; для эндогенных пожаров > 24 ч [8].

Оптико-электронные датчики обнаружения пламени применяются в угольных шахтах в составе автоматических систем взрывоподавления и не взаимодействуют с приборами контроля загазованности (запыленности) рудничной атмосферы. Для исключения влияния на показания промежуточной среды оптико-электронные датчики пламени строятся по принципу пирометра спектрального отношения [9, 10].

Современные исследования, касающиеся разработки и совершенствования многокритериальных приборов и систем безопасности в угольных шахтах заключаются в комплексном анализе газов рудничной атмосферы, продуктов горения [11, 12, 13]. Газовый анализ выполняется на основе нейросетевых и генетических алгоритмов обработки данных [12, 13].

В исследованиях влияние пыли на порог воспламеняемости газопылевоздушной смеси не рассматривается, однако учитывается влияние пыли на погрешность измерения газовых и дымовых датчиков.

Связь критериев, обуславливающих наличие предаварийных (взрывоопасная смесь) и аварийных ситуаций (тление, пламенное горение), в известных работах не рассматривается.

Перспективным при реализации многокритериального прибора является применение оптического контроля.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА КОНТРОЛЯ АВАРИЙНЫХ И ПРЕДАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

2.1 Постановка задачи моделирования

Постановка задачи моделирования многокритериального оптико-электронного прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах предусматривает решение следующих задач:

 провести аналитический обзор по теме исследования и по его результатам выбрать необходимые и достаточные физические параметры контроля предаварийных и аварийных ситуаций в угольных шахтах;

 – определить диапазоны изменения контролируемых параметров (критериев) для рудничной атмосферы;

 предложить структурную схему многокритериального оптико-электронного прибора и возможные варианты технических решений для прибора;

 сформулировать подходы к моделированию многокритериального оптико-электронного прибора;

– определить исходные данные для моделирования.

2.1.1 Предаварийные и аварийные ситуации в угольных шахтах

Определение необходимых факторов, связанных с возникновением предаварийных и аварийных ситуаций проводилось на основе анализа нормативных документов и литературных источников [4, 14, 15, 16].

Согласно нормативному документу «Положение об аэрогазовом контроле в угольных шахтах» [14] «Ситуация аварийная – ситуация, когда произошла авария и возможен дальнейший ход ее развития, а также ситуация, которая может вызвать воздействие на работающих опасных и вредных производственных факторов. ... к аварийным ситуациям относятся: прорывы и внезапные выбросы и выделения газа, аварийные загазирования, эндогенные и экзогенные пожары, взрывы, вспышки, горение газа и пыли, разрушение узлов и деталей вентиляционного, дегазационного и другого оборудования, обеспечивающего промышленную безопасность.»

В многокритериальном оптико-электронном при боре предполагается контролировать следующие аварийные ситуации – взрывы, вспышки, горение газа, аварийные загазирования, эндогенные и экзогенные пожары. Выбор контролируемых аварийных ситуаций осуществлялся исходя

из того, что по статистике взрывы газа и пыли являются наиболее частыми и тяжелыми по последствиям авариями в угольных шахтах и происходят по причине возникновения аварийного загазирования (выделение метана) и при наличии источника воспламенения с высокой температурой.

Источниками воспламенения метана по статистике наиболее часто выступают неисправное электрооборудование, взрывные работы и пожары. При этом доля взрывов, вызванных пожарами существенно увеличивалась в последние годы [4].

Основными причинами аварийного загазирования выработок метаном до взрывных концентраций являются: нарушение вентиляции; внезапное выделение газа; отсутствие контроля за режимом проветривания и газовыделением; длительная остановка вентилятора главного проветривания.

Протекание взрывов, вспышек, горения метана связано с выделением продуктов горения в виде водяных паров, углекислого и/или угарного газа (в зависимости от вида реакции горения) и оптическим излучением продуктов горения.

Согласно [14] «Эндогенный пожар, возникает от самонагревания угля в результате окислительных процессов, происходящих в нем». При развитии эндогенного пожара происходит самонагревание и воспламенение углей в целиках, обрушенных пространствах. Термические процессы происходят при недостатке кислорода, поэтому продукты горения, попадающие в основные горные выработки и распространяющиеся вместе с вентиляционным потоком, содержат оксид углерода. Умеренное нарастание концентрации СО в шахтной атмосфере является характерным признаком развития эндогенного пожара.

Процесс самонагревания угля подразделяется на две стадии: самонагревание и эндогенный пожар. Эндогенный пожар, в свою очередь, разделяется на раннюю стадию, стадию пламенного горения и стадию остывания.

Стадия самонагревания угля начинается, как только создаются условия для аккумуляции тенла окисления. Температура поднимается до 30 – 40 °C, и начинается интенсивное испарение влаги из угля. Стадии выпаривания влаги длятся несколько недель или месяцев, после чего начинается интенсивное окисление угля. Этот процесс протекает в течение нескольких дней или недель. При этом температура поднимается с 25 – 80 до 150 °C. В это время газовый состав шахтной атмосферы претерпевает значительные изменения [8].

Концентрация СО превышает фоновое значение, изменяясь в пределах 1,0-60,0 млн⁻¹. Стадия самонагревания при температурах угля 80-150 °С переходит в раннюю стадию эндогенного пожара. Продолжительность стадии при благоприятных условиях аккумулирования тепла и притоке кислорода для окислительных реакций может составить всего несколько часов. При этом в окружающей атмосфере наблюдается увеличение содержания СО от 60 до 1200 млн⁻¹ [8].

Экзогенный пожар возникает от внешних тепловых импульсов. Основными причинами экзогенных пожаров является: нарушение правил эксплуатации электрооборудования, ведения огневых и взрывных работ, неудовлетворительного содержания ленточных конвейеров и др. В результате происходит как тление, так и пламенное горение деревянных элементов крепи, конвейерной ленты, разрыхленного угля и других материалов.

Эндогенные и экзогенные пожары сопровождаются: увеличением температуры; выделением индикаторных газов (CO, CO₂, H₂); наличием дыма; увеличением мощности оптического излучения в инфракрасном диапазоне [17].

Согласно [14] «Ситуация предаварийная – ситуация, при которой нарушение технологического режима или состояние оборудования приводят к выходу за предаварийные уставки и вызывают срабатывание системы противоаварийной защиты, предотвращая возникновение и развитие аварийной ситуации».

Предаварийная уставка согласно [14] определяется как – «граничное значение параметра, при преодолении которого срабатывает противоаварийная защита и осуществляется предаварийная сигнализация.»

Предаварийные ситуации связаны, прежде всего, с наличием в рудничной атмосфере опасных и вредных газов и пыли и обусловлены характером протекания технологического процесса и функционированием оборудования.

Контроль предаварийных ситуаций связан с тем, что накопление негативных факторов происходит постепенно и вероятность возникновения аварии значительно возрастает [18].

Определение предаварийных ситуаций необходимо для выполнения превентивных мероприятий, направленных на предотвращение негативной тенденции.

В многокритериальном оптико-электронном приборе должны контролироваться следующие предаварийные ситуации – выделение опасных и вредных газов (метан, оксид и диоксид углерода), выделение угольной пыли.

Выбор обусловлен тем, что накопление метана, оксида углерода, взвешенной в воздухе угольной пыли может привести к возникновению взрывоопасной смеси. Наличие оксида и диоксида углерода характеризует пригодность для дыхания рудничного воздуха.

В предаварийных ситуациях изменение параметров рудничной атмосферы (концентрации опасных и вредных газов, пыли) имеет стохастический характер и обусловлено в основном особенностями угольного пласта, вмещающих пород, режимом работы оборудования.

Флуктуации интенсивности выделения метана происходят [19]:

– в периоды подачи выемочной машины, когда происходит отбивание угля и обнажается пласт породы, который подхватывается вентиляционной струей. Выделение метана зависит от концентрации метана в пласте, сорбционных свойств угля и происходит: - в моменты остановки и пуска выемочного агрегата;

– при выполнении посадки кровли.

Повышение концентрации метана связано с неэффективным проветриванием выработок [4].

В технологическом процессе интенсивно происходит выделение вредных оксидов. Главным образом повышается концентрация углекислого газа и оксида углерода вследствие взрывных работ, работы двигателей внутреннего сгорания, выделения газов из горных пород [19].

Содержание пыли в воздухе определяется способами разработки, интенсивностью проведения горных работ и пылеобразующей способностью угольных пластов. Запыленность зависит от эффективности применения на шахте способов и средств борьбы с пылью [4].

2.1.2 Параметры контроля предаварийных и аварийных ситуаций в угольных шахтах

На основе анализа литературы и нормативных документов [4, 14, 15, 16] были выбраны параметры контроля предаварийных и аварийных ситуаций в рудничной атмосфере связанных с возникновением взрывоопасных смесей, пожаров, взрывов (рисунок 1).

Многокритериальный оптико-электронный прибор контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах, должен контролировать следующие параметры:

- концентрации метана, оксида углерода, диоксида углерода;

- концентрацию угольной пыли в рудничной атмосфере;

 поток оптического излучения тления угольной пыли и пламенного горения метановоздушной смеси.



Рисунок 1 – Параметры контроля аварийных и предаварийных ситуаций МКОЭП

Контроль параметров концентрации CH₄, CO₂, CO обусловлен тем, что они одновременно характеризуют возникновение различных предаварийных (выделение газа) и аварийных ситуаций (авариное загазирование, взрывы, вспышки, пожары).

Согласно [14] в рудничной атмосфере помимо CH₄, CO₂, CO могут контролироваться концентрации кислорода, и дополнительных газов – оксида азота, диоксида азота, сернистого ангидрида, сероводорода, водорода. Контроль концентрации кислорода не рассматривается, поскольку содержание кислорода характеризует, прежде всего, пригодность для дыхания, а наличие аварийных ситуаций, связанных с горением по содержанию кислорода выполняется косвенно [14].

Наличие дополнительных контролируемых газов обусловлено характером конкретного технологического процесса, и их контроль осуществляется при необходимости [14].

Концентрация угольной пыли характеризует наличие предаварийной ситуации и контролируется для оценки состояния рудничной атмосферы по возникновению взрывоопасной пылегазовой среды [14]. Выбор контроля концентрации угольной пыли связан с тем, что наличие взвешенной угольной пыли в рудничной атмосфере влияет на допустимую концентрацию метана выделяющегося при добыче породы. Комплексный контроль концентрации метана и угольной пыли позволит предотвратить возникновение взрывоопасной газопылевой смеси.

Контроль потока оптического излучения связанного с возникновением излучения тления угольной пыли и пламенного горения метано-воздушной смеси обусловлен тем, что пожары и взрывы должны контролироваться на начальной стадии их развития. Тление угольной пыли характеризует начальную стадию пожара, когда происходит возгорание (самовозгорание) отложившейся угольной пыли без возникновения пламени. Начальная стадия взрывного горения характеризуется воспламенением метановоздушной смеси. Контроль пламенного горения выполняется с учетом того, что на начальной стадии развития взрывного горения (до образования ударной волны) угольная пыль не участвует, и в процессе воспламенения участвует только метановоздушная смесь [4].

При контроле оптического излучения необходимо учитывать, что параметры концентрации газов и пыли характеризуют промежуточную среда в виде газопылевоздушной смеси (CH4, CO2, CO, угольная пыль, воздух). Промежуточная среда ослабляет контролируемое оптическое излучение от очагов тления и пламенного горения и влияет на возможность их обнаружения.

2.1.3 Диапазоны изменения контролируемых параметров

Для выбранных параметров контроля определены диапазоны их изменения.

Диапазоны изменения концентрации метана и угольной пыли определяются исходя из данных о нижних концентрационных пределах воспламенения метана и угольной пыли, а также о до-

пустимом содержании метана и взвешенной пыли (в том числе в случае одновременного их присутствия в воздухе), приведенных в литературе и в нормативных документах [4, 14, 15, 16].

Допустимая величина концентрации (предаварийная уставка) контролируемого компонента определяется величиной нижнего предела воспламенения какого-либо компонента и запасом надежности К.

Величина запаса надежности зависит от конкретного участка горной выработки и регламентирована правилами безопасности в угольных шахтах [15].

Нижний концентрационный предел воспламенения метана в смеси с воздухом составляет 5 %. Согласно [15] допустимые концентрации метана в горных выработках для различных участков находятся в пределах от 0,5 до 2% (по объему) при запасе надежности от 10 до 2,5. Контроль концентрации метана должен осуществляться в диапазоне от 0 до 2,5 % (по объему).

Нижний концентрационный предел воспламенения угольной пыли определяется зольностью угольной пыли, дисперсностью и объемом выхода летучих горючих веществ.

Расчетные значения нижнего предела воспламенения угольной пыли изменяются от 20 до 200 г/м3, экспериментальные – в пределах от 10 до 100 г/м³. Нижний предел воспламенения угольной пыли определяют для каждого шахтопласта [4].

Допустимая концентрация угольной пыли в шахтах составляет 150 мг/м³ и достигается за счет применения способов и средств борьбы с пылью [14]. При отсутствии средств борьбы с пылью допустимая концентрация, как правило, может достигать 5 г/м³ [4].

Допустимые концентрации метана в воздухе с взвешенной пылью определяются с учетом более легкой воспламеняемости метана по сравнению с пылью [4].

Допустимые концентрации смеси метана и пыли определяют, принимая для метана запас надежности контроля К=5, а для пыли – К=1, т.е. без запаса (рисунок 2):

$$\frac{X_{CH4}}{1} + \frac{n}{P} = 1,$$

где X_{CH4} – допустимая (максимальная) концентрация метана в воздухе со взвешенной пылью (об. %); n – концентрация пыли в воздухе (г/м³); Р – нижний предел взрывчатости (воспламенения) данной пыли (г/м³).



Рисунок 2 – Номограмма для определения допустимой концентрации метана в воздухе с взвешенной пылью

Исходя из данных представленных в номограмме (рисунок 2), можно сделать вывод о том, что допустимая концентрация метана существенно снижается при наличии пыли с концентрацией в диапазоне от 0,5 до 20 г/м³.

На практике концентрацию пыли измеряют в диапазоне от 0 до 7 г/м³ [3, 15, 16].

Допустимые концентрации по объему (предаварийные уставки) оксида углерода, диоксида углерода, определяются требованиями безопасности для персонала (пригодность для дыхания).

Максимально допустимая концентрация диоксида углерода в зависимости от участка горной выработки составляет от 0,5 до 1% (по объему). Максимально допустимая концентрация ок-

сида углерода равна 0,0017 %. Согласно [15] на практике диапазон контроля диоксида углерода составляет от 0 до 2% (по объему), оксида углерода от 0 до 0.01.

Параметрами, характеризующими поток оптического излучения при пламенном горении метановоздушной смеси и тлении угольной пыли являются температура и степень черноты.

Исследования показывают [20], что температура тления угольной пыли в зависимости от недостатка или избытка кислорода воздуха в очаге находится в пределах от 350 до 550 °C. Угольная пыль излучает, как серое тело с интегральной степенью черноты 0,7-0,85 (в данном диапазоне температур), излучение не имеет спектрально выраженных полос. ИК-излучение очага самовозгорания имеет максимум спектральной плотности в диапазоне от 3,52 от 4,65 мкм [17, 21].

Параметры и характеристики потока оптического излучения при пламенном горении метано-воздушной смеси на начальной стадии развития получены ранее и описаны в работе [21]. Температура горения стехиометрической метано-воздушной смеси составляет 1933 °C. Максимумы спектральной энергетической светимости соответствуют следующим длинам волн для углекислого газа – 1.34, 4.26, 7.45 мкм, для паров воды – 1.29, 1.87, 2.66, 2.74 и 6.27 мкм. Значения интегральной энергетической светимости находятся в диапазоне от 20 до 210 кВт/м² для огненных шаров с диаметрами от 0,1 до 5 м. Интегральная степень черноты огненного шара изменяется в диапазоне значений от 0,015 до 0,21 для значений диаметров шаров от 0,1 до 10 м [21].

Таким образом, были определены диапазоны изменения контролируемых параметров (критериев) для рудничной атмосферы:

- концентрация метана от 0 до 2,5 % (по объему);

- концентрация диоксида углерода от 0 до 2% (по объему);

- концентрация оксида углерода от 0 до 0.01 % (по объему);

- концентрация угольной пыли от 0 до 7 г/м³;

– поток оптического излучения при пламенном горении метановоздушной смеси и тлении угольной пыли характеризуемый температурой и степенью черноты. При этом, температура горения метано-воздушной смеси принимается равной 1933 °C, а интегральная степень черноты огненного шара горения метано-воздушной смеси – от 0,015 до 0,21. температура тления угольной пыли принимается от 350 до 550 °C, а интегральная степень черноты 0,7-0,85.

2.1.4 Структурная схема многокритериального оптико-электронного прибора

Исходя из данных о диапазонах изменения параметров контроля предаварийных и аварийных ситуаций, а также с учетом практических подходов к реализации приборов контроля аварий в угольных шахтах установлено, что комплексный контроль может быть организован с использованием совокупности оптико-электронных датчиков концентраций CH₄, CO₂, CO, угольной пыли, оптических излучений тления и пламени, объединенных в многокритериальный оптикоэлектронный прибор [4, 14, 15, 16, 22].

Принцип работы оптико-электронных датчиков концентрации CH₄, CO₂, CO основан на изменении степени поглощения инфракрасного излучения в зависимости от концентрации газа в анализируемой среде.

Преимуществами оптико-электронных датчиков концентрации газов является высокая чувствительность, селективность и быстродействие, работа в широком диапазоне концентраций. Датчики не отравляются высокими концентрациями контролируемых и сопутствующих газов.

На практике для контроля концентрации метана при измерении степени поглощения инфракрасного излучения метановоздушной смесью используется спектральный диапазон 3,2-3,4 мкм [22]. Концентрация диоксида и оксида углерода контролируется в спектральном диапазоне 4.2 – 4.3 мкм для CO2 и 4,4–4,8 мкм для CO [22]. Данные диапазоны принимаются в качестве исходных данных для моделирования датчиков.

Принцип работы оптико-электронных датчиков концентрации угольной пыли основан на регистрации интенсивности поглощенного и/или рассеянного ИК-излучения, которая пропорциональна массовой концентрации аэрозольных частиц. Концентрация взвешенной угольной пыли контролируется оптико-электронным датчиком с учетом ее дисперсного состава, характерного для выработок угольных шахт.

Преимуществами оптико-электронных датчиков концентрации угольной пыли являются высокая чувствительность, простота монтажа и обслуживания.

На практике контроль концентрации угольной пыли выполняется оптико-электронными приборами по поглощению и/или рассеянию излучения пылью с учетом ее дисперсного состава (ИКВЧ, ИЗСТ-01, ИДИП-01П) [3, 15, 16].

В рамках моделирования и, исходя из практических соображений, принимается, что оптико-электронный датчик измеряет концентрацию пыли по поглощению излучения пылью в диапазоне длин волн от 0,6 мкм до 1,1 мкм [3, 15, 16].

Принцип работы оптико-электронных датчиков пламени заключается в контроле возникновения тления и пламенного горения на начальной стадии путем регистрации потока оптического излучения в инфракрасной области спектра на охраняемом объекте.

Поток оптического излучения при пламенном горении и тлении определяется на основе данных о температуре и степени черноты при горении метановоздушной смеси, тлении угольной пыли.

Преимуществом оптико-электронных датчиков является высокое быстродействие при обнаружении быстро развивающегося пламенного горения [3, 4].

На практике поток оптического излучения контролируется фотоприемниками со спектральной чувствительностью, соответствующей максимумам спектральной энергетической светимости очагов тления и пламенного горения. При моделировании будет использован оптикоэлектронных датчиков пламени

Предлагаемая структурная схема многокритериального оптико-электронного прибора построенного с использованием совокупности оптико-электронных датчиков метана, оксида углерода, диоксида углерода, угольной пыли, оптического излучения тления и пламени приведена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Структурная схема многокритериального оптико-электронного прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах

В многокритериальном оптико-электронном приборе сигналы с датчиков посредством сети передачи данных поступают на блок обработки данных.

Блок обработки данных прибора анализирует информацию, сигнализирует о наличии предаварийных или аварийных ситуаций и выдает управляющие сигналы для приведения охраняемого объекта к нормальному режиму функционирования. Алгоритм обработки данных с оптикоэлектронных датчиков должен учитывать связь критериев, обуславливающих наличие предаварийных и аварийных ситуаций.

В многокритериальном оптико-электронном приборе предлагается учитывать взаимное влияние следующих критериев:

– влияние концентрации взвешенной угольной пыли на допустимую концентрацию метана;

 – влияние других (посторонних) газов на показания оптико-электронного датчика, контролирующего концентрацию отдельного газа (перекрестная чувствительность);

 – влияние промежуточной среды в виде газопылевоздушной смеси на возможность обнаружения тления и пламенного горения и выбор спектральных диапазонов контроля оптикоэлектронного датчика пламени.

2.1.5 Подходы к моделированию многокритериального оптико-электронного прибора

Моделирование многокритериального оптико-электронного прибора заключается в получении зависимостей выходных сигналов оптико-электронных датчиков от входной физической величины – контролируемого параметра.

А. Моделирование оптико-электронных датчиков измерения концентрации метана, оксида углерода и диоксида углерода

При моделировании оптико-электронных датчиков измерения концентраций CH₄, CO₂ и CO для каждого оптико-электронного датчика входной величиной является концентрация газа, а выходным сигналом интегральный (по спектральному диапазону) коэффициент пропускания кюветы с газом (передаточная функция датчика) [22]. Для моделирования датчиков концентрации газов используется единый подход, применяемый для исходных данных, связанных с конкретным газом.

Подход к моделированию оптико-электронного датчика измерения концентрации газа заключается в расчете спектрального коэффициента пропускания с использованием закона Бугера-Ламберта-Бера на основе данных о спектральном коэффициенте поглощения газа [22]:

$$\tau(\lambda) = \Phi(\lambda) / \Phi_0(\lambda) = e^{-k(\lambda)LC}$$

где $\Phi_0(\lambda)$ – поток монохроматического зондирующего излучения, Вт; $\Phi(\lambda)$ – поток монохроматического излучения (Вт) прошедшего через газ с концентрацией исследуемого газа С (объемная доля), длиной пути поглощения L (м) и спектральным коэффициентом поглощения газовой смеси $k(\lambda)$ (м⁻¹).

Для вычисления спектрального коэффициента поглощения k(λ) может быть использована информационная система «Спектроскопия атмосферных газов» использующая банки данных о спектрах поглощения атмосферных газов HITRAN и GEISA-97 [23].

В основу расчета спектрального коэффициента поглощения k(λ) положен метод полинейного счета спектрального контура поглощения (распределение интенсивности поглощения в спектральной линии) веществ в газовой фазе, который представляет собой суммирование стандартных контуров поглощения изолированных спектральных линий (поглощение в изолированных линиях связано с поглощением фотонов строго определенной длины волны) [23]. При выполнении моделирования датчиков концентрации газов объемный состав газовой смеси необходимо задавать с учетом замещения выделяющимися газами кислорода и азота в нормальном атмосферном воздухе. Например, уменьшение концентрации кислорода в шахтной атмосфере в результате выделения метана определяется по формуле [4]:

$$C_{02} = 0.21(1 - C_{CH4})$$
,

а азота по формуле:

$$C_{N2} = 0.79(1 - C_{CH4}).$$

На основе данных о спектральном коэффициенте пропускания выбирается соответствующая элементная база (источник и приемник излучения) для оптико-электронных датчиков концентрации газов. Моделируется передаточная функция оптико-электронного датчика в виде интегрального коэффициента пропускания в зависимости от концентрации газа.

Моделирование выполняется для диапазона спектра, определяемого спектральными характеристиками источника и приемника излучения (спектральный поток излучения источника и спектральная чувствительность фотоприемника).

Выбор источника и приемника излучения осуществляется из набора компонентов (совокупность пар источник – приемник) на основе оценки погрешности измерения по данным о передаточной функции и отношении сигнал-шум датчика.

С учетом выбранной элементной базы определяется длина пути поглощения, обеспечивающая минимальную погрешность измерения для заданного диапазона концентраций.

Б. Моделирование оптико-электронного датчика концентрации угольной пыли

При моделировании оптико-электронного датчика концентрации угольной пыли входной величиной является концентрация угольной пыли, а выходным сигналом интегральный (по спектральному диапазону) коэффициент пропускания (передаточная функция датчика).

Задача моделирования спектрального коэффициента пропускания в газодисперсной системе угольная пыль-воздух решалась научным коллективом ранее [24]. Подходы и результаты этой работы будут использованы при моделировании коэффициента пропускания. Подходы к моделированию спектрального коэффициента пропускания основаны на теории Ми [24].

При этом коэффициент пропускания рассчитывается для газодисперсной системы угольная пыль-воздух с дисперсным составом характерным для угольных шахт с учетом влияния эффекта рассеяния на перенос энергии излучения [24].

На основе данных о спектральном коэффициенте пропускания выбирается соответствующая элементная база для оптико-электронных датчиков концентрации угольной пыли.

Моделируется передаточная функция оптико-электронного датчика в виде интегрального коэффициента пропускания в зависимости от концентрации угольной пыли.

Выбор источника и приемника излучения осуществляется аналогично оптико-электронным датчикам газа. Определяется длина пути поглощения, обеспечивающая минимальную погрешность измерения для заданного диапазона концентраций угольной пыли.

В. Моделирование оптико-электронного датчика пламени

При моделировании оптико-электронного датчика пламени входной величиной является поток излучения от очага тления или пламенного горения, а выходным сигналом – сигнал на выходе предварительного усилителя сигнала с фотоприемника.

Моделирование оптико-электронного датчика пламени включает следующие этапы:

 Моделирование потока излучения, поступающего на входной зрачок оптикоэлектронного датчика пламени при тлении угольной пыли и горении стехиометрической метановоздушной смеси с учетом влияния промежуточной среды.

При расчете используются подходы, представленные в работах [21], основанные на уравнении переноса излучения и использовании угловых коэффициентов, характеризующих излучение, поступающее от очага горения на входной зрачок оптико-электронного датчика.

При этом для расчета оптического излучения пламени принимается допущение о том, что горение стехиометрической метано-воздушной смеси представляет огненный шар. Для расчета тления принимается, что горение отложившейся угольной пыли происходит на площадке квадратной формы [18].

2) выбор элементной базы (фотоприемники) для оптико-электронных датчиков контроля излучения тления и пламени с учетом влияния спектрального коэффициента пропускания промежуточной среды.

Выбор осуществляется на основе определения из набора фотоприемника с наибольшим значением отношения сигнал-шум.

При выполнении расчета в качестве промежуточной среды выступает газовоздушная смесь с коэффициентом пропускания, полученным при моделировании датчиков концентрации газов и пылевоздушная смесь, полученная при моделировании оптико-электронного датчика концентрации угольной пыли.

2.1.6 Исходные данные для моделирования

Исходные данные для моделирования были выбраны для каждого оптико-электронного датчика (ОЭД) прибора в зависимости от диапазона изменения контролируемого параметра, принципа работы датчика и подхода к моделированию датчика (таблица 1).

Таблица 1 – Исходные данные для моделирования

Параметр	Значение			
ОЭД концентрации основных газов	0.25			
Концентрация СН4, об. %	0-2,5			
	0-2			
Концентрация СО ₂ , об. %				
Концентрация СО, об. %	0-0.01			
	Берутся из информационной системы			
Спектральные коэффициента поглощения k(λ) для CH4, CO2, CO	«Спектроскопия атмосферных газов» [23].			
	3,2-3,4 для CH4; 4.2-4.3 для CO2 и 4,4-4,8			
Диапазон длин волн излучения λ, мкм	для СО.			
ОЭД концентрации угольной пыли				
	0-7			
Концентрация угольной пыли, г/м'				
Диапазон длин волн излучения λ, мкм	0,7 – 1,1			
ОЭЛ обнаружения пламенного горения и тления				
	1933			
Температура горения метано-воздушной смеси, °С				
	0,015-0,21			
Интегральная степень черноты огненного шара горения метано-воздушной смеси				
	1-5			
Диапазон длин волн излучения				
пламенного горения л, мкм	250 550			
Температура тления угольной пыли, °С	350-550			
Интегральная степень черноты тления	0,7-0,85			
	от 1 до 4 2			
Диапазон длин волн излучения тления λ, мкм				

Дальнейшая работа направлена на выполнение моделирования многокритериального оптико-электронного прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах.

2.2 Моделирование оптико-электронных датчиков концентрации газов и угольной пыли

Моделирование предполагается проводить в два этапа:

1) Моделирование ОЭД концентрации газов и пыли, входящих в состав прибора.

2) Моделирование ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения.

На данном этапе целью работы является моделирование ОЭД концентрации газов и пыли.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– определить основные аналитические зависимости для моделирования ОЭД концентрации газов и пыли и на их основе разработать компьютерную модель;

– выполнить проверку адекватности компьютерной модели на экспериментальных данных, приведенных в литературе;

провести моделирование спектрального коэффициента пропускания газов и пылевоздушной смеси (газодисперсная система угольная пыль-воздух) и проанализировать влияние перекрестной чувствительности для ОЭД газов и угольной пыли с целью уточнения спектральных диапазонов контроля;

– выбрать элементную базу (источник и приемник излучения) для ОЭД концентрации газов и пыли.

2.2.1 Аналитические зависимости для моделирования оптико-электронных датчиков концентрации газов и пыли

А. Математическая модель ОЭД измерения концентрации основных газов

При моделировании оптико-электронных датчиков измерения концентрации газов для каждого ОЭД входной величиной является концентрация газа, а выходным сигналом интегральный (по спектральному диапазону) коэффициент пропускания оптического излучения кюветы с газом (передаточная функция датчика) [25].

Структурная схема ОЭД концентрации газа приведена на рисунке 4.

В ОЭД концентрации газа используется источник (светодиод) и приемник излучения (фотодиод) со спектральными характеристиками в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, газовая кювета, преобразователь ток-напряжение на базе операционного усилителя (ОУ).

Источник и приемник располагаются на одной оптической оси, а выходной зрачок светодиода направлен на входной зрачок фотодиода – схема расположения «face-to face» («лицом к лицу») [26]. Фотодиод включен в фотогальваническом режиме.

Дополнительно датчик может содержать светофильтр для снижения перекрестной чувствительности к посторонним газам.

Моделирование ОЭД концентрации газов выполняется с учетом аналитических зависимостей, представленных в работах [22, 26].



Рисунок 4 – Структурная схема оптико-электронного датчика концентрации газа

Подход к моделированию ОЭД измерения концентрации газа заключается в расчете спектрального коэффициента пропускания с использованием закона Бугера-Ламберта-Бера на основе данных о спектральном коэффициенте поглощения газовой смеси [22]:

$$\tau(\lambda) = \Phi(\lambda) / \Phi_0(\lambda) = e^{-k(\lambda)LC}$$

где $\Phi_0(\lambda)$ – спектральный поток зондирующего излучения, Вт; $\Phi(\lambda)$ – спектральный поток излучения (Вт), прошедшего через газ с концентрацией С (в объемной доле), спектральным коэффициентом поглощения газовой смеси $k(\lambda)$ (м⁻¹) при длине пути поглощения L (м).

Передаточная функция ОЭД концентрации газа определяется формулой [22]:

$$\tau(C) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda) \cdot \tau_{c\phi}(\lambda) \cdot e^{-k(\lambda)LC} \cdot \prod_1^N e^{-k_i(\lambda)LC_i} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda) \cdot \tau_{c\phi}(\lambda) d\lambda}$$

где S_i(λ) – спектральная чувствительность фотоприемника (фотодиода), А/Вт; $\Phi_0(\lambda)$ – спектральный поток зондирующего излучения источника (светодиода), Вт; $\tau_{c\phi}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания светофильтра; k(λ) – спектральный коэффициент поглощения исследуемого газа, м⁻¹, L – длина поглощающего слоя газа, м; С – концентрация исследуемого газа, объемная доля; k_i(λ) – спектральный коэффициент поглощения i-го постороннего газа, м⁻¹; C_i – концентрация i-го постороннего газа, объемная доля.

На основе передаточной функции ОЭД концентрации газа оценивается чувствительность, абсолютная и относительная погрешность измерений концентрации газа и порог обнаружения.

Наклон передаточной характеристики определяет чувствительность ОЭД $S(C) = d\tau/dC$. Значение чувствительности определяется как $dC = d\tau/S(C)$ (об. доля). При заданном отношении сигнал-шум ОЭД µ минимальное регистрируемое изменение dt равно 1/µ, при этом абсолютная погрешность измерений и порог обнаружения (LOD – limit of detection) рассчитываются по формулам [22]:

$$\Delta C = \frac{1}{\mu \cdot S(C)};$$
$$LOD = \frac{1}{\mu \cdot S(C \to 0)}$$

Значение относительной погрешности полученного результата определяется как – $\delta = \Delta C/C$. Для расчета передаточной функции и погрешности измерения ОЭД необходимы данные о спектральном потоке от источника излучения, спектральной чувствительности фотоприемника, спектральном коэффициенте поглощения исследуемого газа, а также необходимо рассчитать отношение сигнал-шум.

Данные о спектральном потоке источника излучения и спектральной чувствительности фотоприемника берутся из технической документации на используемую элементную базу. Спектральный поток излучения от светодиода $\Phi_{e0}(\lambda)$ необходимо получить на основе данных из документации об интегральном потоке излучения светодиода и спектральном потоке излучения в относительных единицах.

Спектральный коэффициент поглощения k(λ) рассчитывается методом полинейного счета (line-by-line method) с помощью информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов» [23].

При выполнении моделирования датчиков концентрации основных газов объемный состав газовой смеси задается с учетом замещения выделяющимися газами кислорода и азота в нормальном атмосферном воздухе. Например, уменьшение концентрации кислорода в шахтной атмосфере в результате выделения метана определяется по формуле [4]:

$$C_{O2} = 0.21(1 - C_{CH4}),$$

а азота по формуле:

$$C_{N2} = 0.79(1 - C_{CH4})$$

Отношение сигнал-шум на выходе ПТН ОЭД концентрации газа рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{U_{\Pi TH}}{U_{III}},$$

где U_{ПТН} – полезный сигнал на выходе ПТН при воздействии на вход фотодиода излучения от источника (при отсутствии поглощающей среды), В; U_ш – среднее квадратическое значение шума на выходе ПТН, определяемое шумом фотодиода и шумом ПТН, В.

Сигнал на выходе ПТН может быть рассчитан на основе формулы:

$$U_{\Pi TH} = K_{\Pi TH} \cdot I_{\phi},$$

где I_T – темновой ток фотодиода, А; I_Ф – фототок, обусловленный внешним излучением, А; К_{ПТН} – коэффициент преобразования ПТН, В/А.

Фототок, генерируемый фотодиодами ОЭД, рассчитывается по формуле:

$$I_{\phi} = k_{_{90c}} \cdot k_{L} \cdot \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} S_{I}(\lambda) \cdot \Phi_{e0}(\lambda) \Delta \lambda,$$

где $\lambda_1...\lambda_2$ – спектральный диапазон, в котором происходит прием излучения фотодиодом; S_I(λ) – спектральная токовая чувствительность фотоприёмника, A/BT; $\Phi_{e0}(\lambda)$ – спектральный поток излучения от светодиода, BT; k_{эос}=0.1 – коэффициент эффективности оптической системы из работы [25]; k_L – коэффициент определяющий зависимость фототока от расстояния l между светодиодом и фотодиодом (от 0 до 1).

Коэффициент k_L получают на основе данных, приведенных в технической документации для оптопар (светодиод-фотодиод). Например, на рисунке 5 приведена зависимость фототока от расстояния между светодиодом Led34 и фотодиодом Pd34 выпускаемых фирмой ООО «Иоффе-ЛЕД» при схеме расположения «face-to face» при различном токе питания взятая из работы [26].



Рисунок 5 – Зависимость фототока от расстояния между светодиодом Led34 и фотодиодом Pd34

На рисунке 6 показан k_L приведенный к диапазону от 0 до 1.



Рисунок 6 – Коэффициент kL

Среднее квадратическое значение шума на выходе ПТН U_Ш описывается выражением [27]:

$$U_{III} = \sqrt{\left\{ (U_y^*)^2 \left[\left(1 + \frac{R_{oc}}{R} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} (\Delta f)^2 C_{_{3KB}}^2 R_{oc}^2 \right] + R_{oc}^2 \left(I_{ou}^* \right)^2 + 4k T R_{oc}^2 \right\} \cdot \Delta f}, \qquad (10)$$

где $(U_y^*)^2$ – спектральная плотность шума по напряжению ОУ, В²/Гц; R – эквивалентное сопротивление, определяемое входным сопротивлением ОУ и дифференциальным сопротивлением фотодиода, Ом; R_{oc} – сопротивление обратной связи, Ом; С_{экв} – эквивалентная емкость, определяемая входной ёмкостью ОУ и ёмкостью фотодиода, Ф; $(I_{out}^*)^2$ – общая спектральная плотность шума тока (источник общего шумового тока I_{out} учитывает шум тока ОУ и тепловой шум эквивалентного сопротивления R), A²/Гц; k – постоянная Больцмана, 1,38064852·10⁻²³, Дж·K⁻¹, T – температура фотодиода, K, Δf – ширина полосы частот схемы, Гц.

Согласно рекомендациям, приведенным в работе [28], для моделирования выбран усилитель AD797 на биполярных транзисторах фирмы Analog Device с параметрами U_y*=0,9 нB/ $\sqrt{\Gamma}$ ц, I_y*=2 пA/ $\sqrt{\Gamma}$ ц, R_{вх}=100 MOм. Входная емкость ОУ равна 5 пФ. Значение сопротивления R_{oc} определяет коэффициент К_{ПТН}, который при выполнении моделирования принимается равным К_{птн}=10⁶.

Б. Моделирование ОЭД концентрации угольной пыли

При моделировании ОЭД концентрации угольной пыли входной величиной является концентрация угольной пыли, а выходным сигналом интегральный (по спектральному диапазону) коэффициент пропускания (передаточная функция датчика).

Структурная схема оптико-электронного датчика концентрации угольной пыли аналогична схеме датчика концентрации газа (рис. 1), однако в кювету поступает пылевоздушная смесь.

Расчет коэффициента пропускания выполняется с использованием закона Бугера-Ламберта-Бера на основе данных о спектральном безразмерном коэффициенте ослабления k_Π(λ) излучения газодисперсной системы угольная пыль-воздух и средней удельной поверхности пыли F, м²/г [24]:

$$\tau(C) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda) \cdot \tau_{c\phi}(\lambda) \cdot e^{-k_{\Pi}(\lambda)FLC} \cdot \prod_1^N e^{-k_i(\lambda)LC_i} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda) \cdot \tau_{c\phi}(\lambda) d\lambda},$$

где S_i(λ) – спектральная чувствительность фотоприемника (фотодиода), A/BT; $\Phi_0(\lambda)$ – спектральный поток зондирующего излучения источника (светодиода), BT; $\tau_{c\phi}(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания светофильтра; L – длина поглощающего слоя пыли, м; C – концентрация угольной пыли, г/м³; k_i(λ) – спектральный коэффициент поглощения i-го постороннего газа, м⁻¹; C_i – концентрация i-го постороннего газа, объемная доля.

Безразмерный коэффициент поглощения определен на основе ранее полученных на безе теории Ми данных о спектральной поглощательной способности *а* газодисперсной системы угольная пыль-воздух из работы [24]:

$$k_n(\lambda) = \frac{-\ln(1-a)}{FLC}$$

Значение $k_{\Pi}(\lambda)$ находится в пределах от 0,56 до 0,61 в диапазоне длин волн от 0,7 до 5 мкм (рисунок 7) [24]. Значение средней удельной поверхности пыли составляет F=0,34 м²/г.



Рисунок 7 – Спектральный безразмерный коэффициент ослабления k_Π(λ) излучения газодисперсной системы «угольная пыль-воздух»

Чувствительность ОЭД, абсолютная и относительная погрешность измерений концентрации угольной пыли и порог обнаружения оцениваются аналогично ОЭД концентрации газа.

На основе сформулированных аналитических зависимостей для моделирования оптикоэлектронных датчиков концентрации газов и пыли была разработана компьютерная модель, которая была реализована в виде программного обеспечения для персонального компьютера.

2.2.2 Проверка адекватности компьютерной модели

А. Проверка адекватности компьютерного моделирования ОЭД измерения концентрации газов

Проверка адекватности выполняется путем сравнения данных моделирования передаточной функции датчиков с экспериментальными данными, приведенными в работах Сотниковой [29, 30] для ОЭД СО₂, СО, С₂Н₄.

Для проверки адекватности компьютерной модели вместо данных для метана могут быть использованы доступные экспериментальные данные для этилена C₂H₄ [29, 30], поскольку этилен имеет характерный для углеводородов спектральный коэффициент поглощения подобный метану и экспериментальные данные приводятся в выбранном для контроля диапазоне длин волн излучения от 3,2 до 3,4 мкм.

Экспериментальные данные для CO₂ получены с помощью ОЭД на базе светодиода типа LED42Sc и фотодиода типа PD42Sc. Исследования проводились на калиброванных смесях CO₂ в N₂ для концентраций диоксида углерода от 0.01 до 50 об. % при длине газовой кюветы 4 см. Рабочая температура датчика составляла 30 °C. Поток излучения светодиода составляет 50 µW при токе 200mA (квазинепрерывный режим при частоте 20 кГц) [29, 30].

Для датчика CO экспериментальные данные получены при использовании светодиода типа LED47Sc и фотодиода типа PD47Sc. Исследования проводились на калиброванных смесях для концентраций оксида углерода от 0.01 до 100 об. %. Длина газовой кюветы составляла 2.7 см. Рабочая температура датчика – 30 °C. Поток излучения светодиода равен 8 µW при токе 200mA (квазинепрерывный режим при частоте 20 кГц) [29, 30].

Для датчика C₂H₄ использовались светодиод типа LED34Sc и фотодиод типа PD34Sc. Исследования проводились на калиброванных смесях для концентраций C₂H₄ от 0.01 до 50 об. %. Длина газовой кюветы равна 4.5 см. Рабочая температура датчика – 37 °C. Поток излучения светодиода составляет 200 µW при токе 200 mA (квазинепрерывный режим при частоте 20 кГц) [29, 30].

В результате проверки адекватности проведено сравнение передаточных функций, полученных на базе моделирования и экспериментальным путем (рисунок 8).

Данные о передаточных функциях датчиков CO₂, CO, C₂H₄, полученные при экспериментальном исследовании, и результаты моделирования хорошо согласуются друг с другом. Относительная погрешность моделирования датчика CO₂ не превышает 5 %, CO – 5 %, C₂H₄ – 4 %.

Проведено сравнение расчетных значений отношения сигнал-шум с экспериментальными данными.

При расчете учитывалось, что экспериментальные данные для датчика CO₂ получены при усреднении сигнала на его выходе в течении 100 мс, при этом значение полосы частот ∆f при рас-

чете устанавливалось 10 Гц. Для датчика CO усреднение проводилось в течение 1 с – значение полосы частот $\Delta f=1$ Гц. Для датчика C₂H₄ значение полосы частот принималось равным $\Delta f=20$ кГц.

Расчетное значение отношения сигнал-шум μ для датчика CO₂ составляет 2626, CO – 900, C₂H₄ – 2979. Расчетные значения соответствуют экспериментальным данным приведенным в работах [29, 30] которые находятся в диапазоне от 10³ до 10⁴ и зависят от времени усреднения сигнала. В рассматриваемых экспериментах для датчиков C₂H₄ и CO₂ измеренное значение μ составляет 3000, для датчика CO – 2000 [29, 30].



Рисунок 8 – Передаточные функции, полученные на базе моделирования и экспериментов для датчиков CO2 (а), CO (б), C2H4 (в)

Таким образом, исходя из хорошего соответствия результатов моделирования передаточных функций и отношения сигнал шум экспериментальным данным подтверждается адекватность компьютерной модели. Б. Проверка адекватности компьютерного моделирования ОЭД измерения концентрации угольной пыли

Проверка адекватности моделирования ОЭД концентрации угольной пыли выполняется для данных моделирования и собственных экспериментальных данных об ослаблении излучения газодисперсной системой угольная пыль-воздух из работы [31].

При поведении экспериментального исследования коэффициента пропускания оптического излучения в газодисперсной системе использовалась угольная пыль с дисперсным составом близким к угольным шахтам [31].

Концентрация частиц угольной пыли изменялась в диапазоне 1 – 10 г/м³. Толщина поглощающего слоя равна 0,3 м. Диапазон длин волн излучения составлял от 1 до 4 мкм [31]. В качестве источника излучения использовалась модель абсолютно-черного тела АЧТ-45/100/1000. В качестве фотодиодов в спектральном диапазоне от 0,7 до 5 мкм использовались: кремниевый фотодиод S1337, для приема излучения в диапазоне 0,7-1,1 мкм; инфракрасный фотодиод PD24-10 [32] для приема излучения в диапазоне 1,1-2,4 мкм; инфракрасный фотодиод PD42-SR [33] для приема излучения в диапазоне 2,4-4,5 мкм. Для выделения монохроматического излучения в спектральном диапазоне от 1 до 5 мкм использовались в спектральном диапазоне 0,7-206 [31].

Компьютерное моделирование проводилось с учетом вышеприведенных условий эксперимента. При моделировании данные о безразмерном коэффициенте получены из работы [24] (рис. 3), длина волны излучения принималась равной 1 мкм. Значение средней удельной поверхности пыли составляло F=0,22 м²/г и определялось дисперсным составом пыли, используемой в эксперименте.

Коэффициенты пропускания газодисперсной системы угольная пыль-воздух, полученные при моделировании и экспериментальном исследовании [31], представлены на рисунке 9.



Рисунок 9 – Коэффициенты пропускания газодисперсной системы угольная пыль-воздух, полученные при моделировании и экспериментальном исследовании

Относительная погрешность моделирования датчика концентрации угольной пыли не превышает 7 %.

Данные о коэффициенте пропускания газодисперсной системы угольная пыль-воздух, полученные при экспериментальном исследовании, и результаты моделирования хорошо согласуются друг с другом, что подтверждает адекватность компьютерной модели.

2.2.3 Моделирование спектральных коэффициентов пропускания газов и пылевоздушной смеси

Исходные данные для проведения моделирования спектральных коэффициентов пропускания представлены в таблице 1. Моделирование выполнялось на базе формулы (1).

Результаты моделирования спектральных коэффициентов пропускания чистых газов (метана, оксида и диоксида углерода) приведены на рисунке 10. Длина поглощающего пути при моделировании составляет 1 м.



Рисунок 10 – Спектральные коэффициенты пропускания чистых газов (метана, оксида и диоксида углерода) при длине поглощающего пути 1 м

Проведен анализ спектральных коэффициентов на предмет влияния посторонних газов на показания ОЭД контролирующего концентрацию отдельного газа (перекрестная чувствительность).

Исходя из анализа спектральных коэффициентов пропускания газов (рис. 7) видно, что при контроле ОЭД концентрации метана в спектральном диапазоне от 3,2 до 3,7 мкм влияние посторонних газов в виде оксида и диоксида углерода является незначительным. При контроле ОЭД концентрации диоксида углерода необходимо учитывать влияние на его показания посторонних газов метана и оксида углерода и с учётом перекрестной чувствительности выбирать диапазон контроля от 4,2 до 4,4 мкм. Для ОЭД концентрации оксида углерода существенное влияние оказы-

вает наличие постороннего диоксида углерода, а влияние метана является незначительным. Концентрацию оксида углерода с учетом перекрестной чувствительности необходимо контролировать в диапазоне от 4,5 до 4,7 мкм.

Результаты моделирования спектрального коэффициента пропускания газодисперсной системы угольная пыль–воздух при длине поглощающего пути 1 м в спектральном диапазоне от 0,6 до 1,5 мкм приведены рис. 8. На рис. 8 также приведен спектральный коэффициент пропускания газов – CH₄, CO₂, CO.

Проанализировано влияние на показания ОЭД концентрации пыли – пропускания газов, являющихся посторонними. Для этого рассчитаны спектральные коэффициенты пропускания чистого метана, оксида и диоксида углерода в спектральном диапазоне от 0,6 до 1,5 мкм при длине поглощающего слоя 1 м рисунке 11. Существенное влияние на показания ОЭД оказывает наличие постороннего метана, наличие посторонних оксида и диоксида углерода является несущественным.



Рисунок 11 – Спектральный коэффициент пропускания газодисперсной системы угольная пыльвоздух при длине поглощающего пути 1 м

Контроль концентрации пыли с учетом перекрестной чувствительности необходимо осуществлять в диапазоне от 0,6 до 1,1 мкм.

2.2.4 Выбор элементной базы для оптико-электронных датчиков концентрации газов и пыли

А. Выбор элементной базы ОЭД измерения концентрации основных газов

Для проведения расчетов при выборе элементной базы были определены исходные данные.

С учетом данных о спектральном коэффициенте пропускания и перекрестной чувствительности ОЭД определена совокупность пар инфракрасных светодиодов и фотодиодов, из которой будут выбраны наиболее подходящие для построения ОЭД концентрации метана, оксида углерода и диоксида углерода (таблица 2). Элементная база представлена российскими производителями ООО «ИоффеЛЕД» [33], ООО «АИБИ» [32], ООО «ЛЕД Микросенсор НТ» [34].

При расчете диапазоны концентраций газов берутся из таблицы 1. Параметры и характеристики светодиодов и фотодиодов (таблица 2) берутся из технической документации. Расстояние от светодиода до фотодиода принималось равным 5 см и определялось с учетом того, что, как правило, расстояние находится в пределах от 1 до 10 см [29, 30].

Поток излучения светодиодов для ОЭД СО₂ и СН₄ рассчитывается для их работы в квазинепрерывном режиме при токе 200 мА. Рабочая температура ОЭД принимается 20 °С. С учетом рекомендаций [29, 30] полоса частот при расчете отношения сигнал-шум для датчика СО₂ устанавливалась 10 Гц, для датчика СН₄ полоса частот – 20 кГц.



Рисунок 12 – Передаточные функции для ОЭД концентрации метана (а), оксида углерода (б), диоксида углерода (в)

Отличительной особенностью ОЭД СО является более низкое по сравнению с ОЭД СО₂ и СН₄ значение верхнего предела измерений концентраций 0,01 % (меньше в 200 раз), а порог обнаружения не должен превышать 0,0017 % [14]. Для обеспечения измерения малых концентраций СО и порога обнаружения при расчете было предложено использовать исходные значения потока излучения светодиода для его работы в импульсном режиме при токе 1 А, а полосу частот задавать
0,1 Гц (при усреднении сигнала в течении 10 с) с учетом рекомендаций, представленных в работе [29, 30]. Расстояние от светодиода до фотодиода принималось равным 2 см.

В результате выполнения исследования проведено моделирование передаточных функций для ОЭД метана (рисунок 12 а), оксида углерода (рисунок 12 б), диоксида углерода (рисунок 12 в) для предложенных пар светодиод-фотодиод.

Полученные данные о передаточных функциях позволили сравнить чувствительность ОЭД построенные на различной элементной базе по наклону передаточной характеристики. Наибольшая чувствительность для ОЭД метана достигается для оптопары LED34-PD34, для ОЭД оксида углерода – LED47- PD47NB, для ОЭД диоксида углерода – LED43-PR- PD48-03-NS-PR.

В результате моделирования получены данные об отношении сигнал-шум для исследуемых оптопар, которые позволили рассчитать порог обнаружения и абсолютную погрешность ОЭД.

В таблице 2 представлены результаты расчета параметров µ и LOD для исследуемых пар светодиод-фотодиод.

Контролируемый	Пара светодиод-фотодиод		μ	LOD, об. доля
Газ				
Метан	LED34	PD34	2538	0,00013
Wielan	LED34HP-PR	PD36-03-PR	967	0,00034
	Lms34LED-CG	Lms36PD-05-CG	2433	0,00015
Оксид углерода	LED47	PD47NB	3672	0,00017
	LED46-PR	PD48-03-NS-PR	126013	0,000083
Лиоксил	LED42	PD42	2013	0,00002
углерода	LED43-PR	PD48-03-NS-PR	1871	0,000013
	Lms43LED-CG	Lms43PD-05-CG	1567	0,00004

Таблица 2 – Результаты расчета параметров µ и LOD для исследуемых пар светодиод-фотодиод

Результаты оценки абсолютной погрешности измерения концентрации газа для предложенных пар светодиод-фотодиод приведены на рисунке 13.

На основе данных о значениях абсолютной погрешности измерения были выбраны оптопары для ОЭД концентрации газа с наименьшей погрешностью.

ОЭД концентрации метана предлагается реализовать на базе оптопары LED34 – PD34 обеспечивающей порог обнаружения 0.013 об. %. Для ОЭД концентрации оксида углерода предлагается использовать оптопару LED46-PR – PD48-03-NS-PR, поскольку только она обеспечивает порог обнаружения 0.00083 об. % не превышающий требуемый – 0,0017 об. %. Данная оптопара обеспечивает низкий порог обнаружения за счет высокого значения потока излучения 55мкВт и низкого значения шума фотодиода 4,5 мкВ для полосы частот 0,1 Гц.



Рисунок 13 – Абсолютные погрешности измерений концентрации для ОЭД метана (a), оксида углерода (б), диоксида углерода (в)

ОЭД диоксида углерода предлагается построить на базе оптопары LED43-PR – PD48-03-NS-PR, обеспечивающей порог обнаружения 0,0013 об. %.

Б. Выбор элементной базы ОЭД измерения концентрации угольной пыли

На основе данных о коэффициенте пропускания газодисперсной системы угольная пыльвоздух и диапазона длин волн излучения 0,6 – 1,1 мкм определена совокупность светодиодов и фотодиодов для ОЭД концентрации угольной пыли, представленная зарубежными и отечественными производителями из которой будут выбраны наиболее подходящие элементы (таблица 3).

При расчете диапазоны концентраций газов составлял 0 – 7 г/м³. Параметры и характеристики светодиодов и фотодиодов (таблица 3) берутся из технической документации. Расстояние от светодиода до фотодиода принималось равным 0,5 м и определялось с учетом того, что, как правило, для оптических пылемеров, работающих на основе метода поглощения излучения расстояние находится в пределах от 0,1 до 1 м. Полоса частот при расчете отношения сигнал-шум для ОЭД угольной пыли устанавливалась 1 МГц.

В таблице 3 представлены результаты расчета параметров µ и LOD для исследуемых пар светодиод-фотодиод для ОЭД угольной пыли.

Пара светодиод-фотодиод		μ	LOD, г/м ³
SFH 4550	SFH 203 FA	31471	0,00031
VSLY5850	BPV10NF	28191	0,00037
LED07HP-PR	ФДУК-11	1178	0,0089
ADL-78901TL	SFH 203	50459	0,0002

Таблица 3 – Результаты расчета параметров µ и LOD

Наименьший порог обнаружения (0,0002 г/м³) обеспечивает оптопара ADL-78901TL – SFH 203, что обусловлено наибольшим потоком оптического излучения светодиода.

Передаточная функция для ОЭД концентрации угольной пыли на базе оптопары ADL-78901TL – SFH 203 приведена на рисунке 14.



Рисунок 14 – Передаточная функция для ОЭД концентрации угольной пыли на базе оптопары ADL-78901TL – SFH 203

Проведена оценка абсолютной погрешности измерения концентрации угольной пыли по данным о передаточной функции и отношении сигнал-шум для исследуемых пар светодиодфотодиод (рисунок 15).



Рисунок 15 – Абсолютные погрешности измерений концентрации угольной пыли для исследуемых ОЭД

На основе данных об абсолютной погрешности измерения была выбрана оптопара ADL-78901TL – SFH 203 для реализации ОЭД концентрации газа характеризующаяся наименьшей абсолютной погрешностью.

2.3 Моделирование оптико-электронного датчика обнаружения пламенного горения и тления

На данном этапе целью работы является моделирование ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения, входящего в состав МКОЭП.

Особенностью при моделировании является учет спектрального коэффициента пропускания промежуточной среды при выборе спектральных диапазонов контроля ОЭД.

При моделировании ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения, входящего в состав МКОЭП необходимо решить следующие задачи:

 – сформулировать основные аналитические зависимости для моделирования ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения и разработать компьютерную модель на основе этих зависимостей;

 выполнить проверку адекватности компьютерного моделирования на экспериментальных данных, приведенных в литературе; – провести моделирование потока излучения, поступающего на входной зрачок ОЭД при тлении угольной пыли и пламенном горении с учетом влияния промежуточной среды;

– выбрать элементную базу для ОЭД с учетом результатов моделирования потока излучения, поступающего на входной зрачок ОЭД при тлении угольной пыли и пламенном горении.

2.3.1 Математическая модель ОЭД оптического излучения тления и пламенного горения

При моделировании ОЭД пламени и тления входной величиной является поток излучения от очага пламенного горения метановоздушной смеси или тления угольной пыли, а выходной величиной – сигнал на выходе предварительного усилителя сигнала с фотоприемника.

При расчете используются подходы, представленные в работе [21], при этом для расчета оптического излучения пламени принимается допущение о том, что горение стехиометрической метановоздушной смеси представляет собой огненный шар.

Спектральный поток излучения на входном зрачке ОЭД (Вт) определяется излучением пламени, спектральным коэффициентом пропускания атмосферы и взаимным расположением ОЭД и огненного шара [21]:

$$\Phi_{e}(\lambda) = \frac{\pi d_{ex}^{2}}{4} \cdot F_{c\phi} \cdot M_{ec\phi}(\lambda) \tau_{c}(\lambda),$$

где $M_{ec\phi}(\lambda)$ – спектральная энергетическая светимость Bt/m^2 ; $F_{c\phi}$ – угловой коэффициент, определяющий поток излучения со сферической поверхности огненного шара на входном зрачке с диаметром $d_{Bx}(M)$; $\tau_c(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания промежуточной среды.

Спектральная энергетическая светимость M_{ecф}(λ) (Вт/м²) с поверхности огненного шара, определяется формулой [35]:

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

где λ – длина волны излучения, м; $M_{eb}(\lambda)$ – спектральная энергетическая светимость абсолютно черного тела; D – диаметр огненного шара, м; $k(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения продуктов горения, м⁻¹.

Коэффициент k(λ) вычисляется методом полинейного счета с использованием информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов» [23].

Угловой коэффициент F_{сф} определяется для элементарной площадки dA (входной зрачок) и излучающей сферы радиусом г согласно формуле (2) [36]:

$$F_{c\phi} = \frac{\cos\alpha}{L^2},$$

где L=l/r – безразмерный параметр; α – угол между нормалью *n* к площадке dA и прямой, соединяющей центр площадки dA с центром сферы; l – расстояние от площадки dA до центра сферы [6].

Моделирование оптического излучения от очага тления выполняется при условии, что тление отложившейся угольной пыли происходит на площадке квадратной формы [18].

Спектральная энергетическая светимость M_{етл}(λ) (Вт/м²) с поверхности очага тления, определяется формулой:

$$M_{emn}(\lambda) = \varepsilon_{mn}(\lambda)M_{eb}(\lambda)$$
,

где ε_{тл}(λ) – спектральная степень черноты поверхности очага тления угольной пыли.

Спектральный поток излучения от очага тления на входном зрачке ОЭД рассчитывается в соответствии с формулой (1) для М_{етл}(λ), при угловом коэффициенте F_{пл} для элементарной площадки dA₁ (входной зрачок) и поверхности конечных размеров A₂ (очаг тления) (рисунок 16) [37]:

$$F_{n\pi} = \frac{dA_1}{A_2} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{\pi l^2} dA_2,$$

где s – расстояние между элементарной площадкой dA₁ и элементом поверхности dA₂; β₁ и β₂ – углы между линией l и нормалями к dA₁ и dA₂ соответственно.



Рисунок 16 – Определение углового коэффициента F_{пл} для элементарной площадки dA₁ и поверхности конечных размеров A₂

Расчет τ_c(λ) выполняется для промежуточной среды в виде смеси газов присутствующих в атмосфере угольной шахты.

Коэффициент пропускания пылевоздушной смеси, слабо зависит от длины волны в исследуемом диапазоне и существенно не повлияет на выбор элементной базы исходя из спектральных характеристик чувствительности фотоприемников [24]. Следовательно, влияние промежуточной среды в виде пылевоздушной смеси не рассматривается.

Спектральный коэффициент пропускания газовоздушной смеси τ_c(λ), вычисляется для заданного состава атмосферы в соответствии с формулой [22]:

$$\tau_c(\lambda) = \prod_{i=1}^N e^{-k_i(\lambda)LC_i}$$

k_i(λ) – спектральный коэффициент поглощения i-го газа в смеси, м⁻¹; C_i – концентрация i-го газа, объемная доля; L – длина поглощающего слоя газа, м; N – число газов в смеси.

Расчет коэффициентов поглощения k_i(λ) выполняется методом полинейного счета с использованием информационной системы, представленной в работе [23].

Выбор элементной базы (фотодиоды) для ОЭД выполняется путем определения из возможных вариантов фотодиода с максимальным значением отношения сигнал-шум.

Выходной сигнал определяется на выходе предварительного усилителя сигнала с фотоприемника при воздействии на него излучения пламени (тления). Предварительный усилитель представляет преобразователь ток-напряжение (ПТН) построенный на базе операционного усилителя (ОУ).

Расчет отношения сигнал-шум выполняется по формуле [38]:

$$\mu = \frac{U_{IIIH}}{U_{III}}$$

где U_{ПТН} – полезный сигнал, В; U_ш – среднее квадратическое значение шума на выходе ПТН, рассчитываемое на основе данных о шуме фотодиода и шуме ПТН, В.

Выходной сигнал ПТН вычисляется по формуле [38]:

$$U_{IIIH} = K_{IIIH} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_I(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \Delta \lambda,$$

где К_{ПТН} – коэффициент преобразования ПТН, В/А; $\lambda_1 ... \lambda_2$ – спектральный диапазон чувствительности фотодиода; S_I(λ) – спектральная токовая чувствительность фотодиода, А/Вт; $\Phi_e(\lambda)$ – спектральный поток излучения на входном зрачке ОЭД, Вт.

Среднее квадратическое значение шума на выходе ПТН U_Ш описывается выражением [27]:

$$U_{III} = \sqrt{\left\{ \left(U_{y}^{*}\right)^{2} \left[\left(1 + \frac{R_{oc}}{R}\right)^{2} + \frac{4\pi^{2}}{3} (\Delta f)^{2} C^{2} R_{oc}^{2} \right] + R_{oc}^{2} \left(I_{out}^{*}\right)^{2} + 4kTR_{oc}} \right\} \cdot \Delta f^{*}$$

где $(U_y^*)^2$ – спектральная плотность шума по напряжению ОУ, В²/Гц; R – эквивалентное сопротивление, определяемое входным сопротивлением ОУ и дифференциальным сопротивлением фотодиода, Ом; R_{oc} – сопротивление обратной связи, Ом; C – эквивалентная емкость, определяемая входной ёмкостью ОУ и ёмкостью фотодиода, Ф; $(I_{out}^*)^2$ – общая спектральная плотность шума тока (источник общего шумового тока I_{out} учитывает шум тока ОУ и тепловой шум эквивалентного сопротивления R), A²/Гц; k – постоянная Больцмана, 1,38064852·10⁻²³, Дж·K⁻¹, T – температура фотодиода, K, Δf – ширина полосы частот схемы, Гц.

На основе сформулированных аналитических зависимостей для моделирования ОЭД пламенного горения и тления была разработана компьютерная модель, реализованная в виде программного обеспечения для персонального компьютера.

2.3.2 Проверка адекватности компьютерного моделирования

Проверка адекватности компьютерного моделирования интегральной энергетической светимости огненного шара выполнялась раннее в работе [21] путем сопоставления с экспериментальными данными из работ Браун [39], Харди [40], Фей [41]. Расчетные и экспериментальные значения интегральной энергетической светимости огненных шаров составляют от 20 до 210 кВт/м² для диаметров от 0,1 до 5 м и хорошо согласуются с экспериментальными данными [21]. Корректность расчета оптического излучения от очага тления подтверждается согласованностью данных о степени черноты использованных при расчете с данными других авторов [42, 43].

2.3.3 Моделирование потока излучения на входном зрачке ОЭД обнаружения пламенного горения и тления

Спектральный поток излучения пламени на входном зрачке ОЭД рассчитывался на основе исходных данных о коэффициенте поглощения продуктов горения k(λ) и параметрах D, d_{вх}.

Расчет $k(\lambda)$ выполняется для реакции продуктов горения стехиометрической метановоздушной смеси с объемными долями в воздухе равными для CO₂ – 9,5% и для H₂O – 19 % в диапазоне длин волн от 1 до 5 мкм. Спектральный коэффициент поглощения $k(\lambda)$ рассчитывается при температуре продуктов горения метана T=1933 °C и атмосферном давлении 101 кПа [21].

Значение диаметра огненного шара принято равным 0,25 м, что соответствует начальной стадии развития горения. Огненный шар данного размера возникает через 45 мс после зажигания при видимой скорости распространения пламени (2,82 м/с) [21]. Расстояние 1 от очага пламени принималось равным 25 м, угол α =90°. Спектральный поток излучения тления на входном зрачке ОЭД определяется на основе данных о спектральной степени черноты очага тления $\varepsilon_{\text{тл}}(\lambda)$. Экспериментальные данные о спектральной степени черноты при тлении и горении отложившейся угольной пыли для температур от 200 до 1000 °C взяты из работы [44] и представлены на рисунке 17.



Рисунок 17 – Спектральная степень черноты тления отложившейся угольной пыли

Температура тления угольной пыли при расчете устанавливается равной 550 °C [17]. Площадь очага тления принята равной 0,1 м². Расстояние 1 от очага тления равно 25 м. Угол β₁ =β₂=0.

Диаметр входного зрачка при расчете потока излучения от очагов пламенного горения и тления принят равным 1 мм, исходя из характерного диаметра чувствительной площадки для инфракрасных фотодиодов.

Расчет τ_c(λ) выполняется с учетом оценки влияния газов шахтной атмосферы CH₄, CO₂, CO на коэффициент пропускания среды для двух составов атмосферы:

1) состав характерный для нормального атмосферного воздуха – воздух средних широт на высоте H=0 м летнего сезона на основе модели атмосферы ИОА СО АН СССР, представленный в системе [23]. Смесь имеет следующий состав (объемные доли %): N₂ – 77,7; O₂ – 20,7; H₂O – 1,56; CO₂ – 0,03; CH₄ – 1,48·10⁻⁴; CO – 4,7·10⁻⁵; N₂O – 2,8·10⁻⁵; SO₂ – 8·10⁻⁶; O₃ – 2·10⁻⁶; NH₃ – 1·10⁻⁶.

2) шахтный воздух с составом, полученным с учетом замещения части кислорода и азота в нормальном атмосферном воздухе выделяющимися газами CH₄, CO₂, CO с объемными долями в воздухе равными CH₄ – 2,5 %, CO₂ – 2% и для CO – 0,01 %.

Результаты расчета спектрального потока на входном зрачке ОЭД от очага пламенного горения с учетом коэффициента пропускания для разных составов атмосферы приведены на рисунке 18.



а – нормальный атмосферный воздух; б – шахтный воздух с наличием CH₄ – 2,5 %, CO₂ – 2% и для CO – 0,01 %

Рисунок 18 – Спектральный поток на входном зрачке ОЭД от очага пламенного горения

Влияние промежуточной среды в виде нормального атмосферного воздуха на поток излучения на входной зрачке ОЭД определяется, главным образом, поглощением излучения углекислого газа в спектральных полосах 2.65 и 4.2 – 4.3 мкм и паров воды в полосах 2.6 – 2.85 и 1.86 – 1.94 мкм (рисунок 18 а). Для шахтного воздуха пропускание среды определяется с учетом допол-

нительного поглощения излучения метаном – полосы поглощения 1.65, 2.30, 3.2 – 3.45 мкм) и CO (2.24, 4.4 – 4.8 мкм) (рисунок 18 б).

Выбор спектральных диапазонов контроля излучения пламени выполняется исходя из спектрального потока излучения на входном зрачке ОЭД, полученного для промежуточной среды в виде шахтной атмосферы, наиболее сильно поглощающей поток излучения пламени. Контроль излучения пламени может выполняться в двух спектральных диапазонах – от 2,45 до 3,2 мкм и от 4,3 до 4,6 мкм.

Результаты расчета спектрального потока на входном зрачке ОЭД от очага тления для разных составов атмосферы приведены на рисунок 19.



а – нормальный атмосферный воздух; б – шахтный воздух с CH₄ – 2,5 %, CO₂ – 2% и CO – 0,01 % Рисунок 19 – Спектральный поток на входном зрачке ОЭД от очага тления для разных составов атмосферы

Контроль излучения тления пропускания выполняется в спектральном диапазоне – от 3,5 до 4,2 мкм, где излучение тления несущественно поглощается промежуточной средой.

2.3.4 Выбор элементной базы для ОЭД обнаружения пламенного горения и тления

По результатам выбора спектральных диапазонов контроля излучения пламени определена совокупность фотоприемников для контроля излучения пламени и тления. Из совокупности фотоприемников выбираются наиболее подходящие, т.е. фотоприемники, обеспечивающие наибольшее отношение сигнал-шум.

В качестве фотоприемников, применяемых в оптико-электронном датчике пламенного горения и тления, применяются инфракрасные фотодиоды, включенные в фотогальваническом режиме [18].

В таблице 4 приведены данные об отечественных фотодиодах контроля излучения пламени и тления. Фотодиоды PD24-20, PD36-10, PD48, ФЭ722, ФЭ723, ФЭ724, можно использовать для излучения пламени и тления в характерных полосах излучения.

Фотодиод	Спектральный	Длина волны в	Производитель
	диапазон	максимуме	
	чувствительности,	чувствительности,	
	МКМ	МКМ	
PD24-20	0,9–2,5	2,1	ООО «АИБИ» [20]
PD36-10	1,0–3,8	3,4	ООО «АИБИ»
PD48	2,5–4,9	4	ООО «АИБИ»
ФЭ722	1-3,5	2,6	ОАО «НИИ "ГИРИКОНД"»
			[21]
ФЭ723	1-4,2	3,2	ОАО «НИИ "ГИРИКОНД"»
ФЭ724	1–4,7	3,7	ОАО «НИИ "ГИРИКОНД"»

Таблица 4 – Параметры фотодиодов

Параметры фотодиодов, используемые при расчете отношения сигнал-шум, берутся из документации на фотодиоды.

Преобразователь ток-напряжение (ПТН) для фотодиодов среднего ИК диапазона строится на базе малошумящего ОУ, например, AD797 фирмы Analog Device в соответствии с рекомендациями [28]. Параметры ОУ используемые при расчете шума равны Uy*=0,9 нB/√Гц, Iy*=2 пA/√Гц. Входное сопротивление ОУ Rbx составляет 100 МОм, входная емкость – 5 пФ.

Значение ширины полосы частот схемы Δf при расчете шума составляет 1 МГц, исходя из требований к быстродействию приборов.

Результаты выбора элементной базы контроля излучения пламени и тления для промежуточной среды различными составами атмосферы представлены в таблице 5.

Наличие промежуточной среды в виде шахтной атмосферы приводит к снижению значений отношения сигнал-шум при контроле излучения пламени и тления приблизительно на 10% по сравнению с нормальным атмосферным воздухом для исследуемых фотодиодов.

Значения отношения сигнал-шум полученные для очага тления превышают значения, полученные для пламенного горения.

Фотодиод	μ _{вых}			
Контроль пламенного горения				
Нормальный атмосферный воздух				
PD24-20	13			
PD36-10	60			
ФЭ722	69			
ФЭ723	59			
ФЭ724	57			
PD48	20			
Шахтная атмосфера				
PD24-20	12			
PD36-10	55			
ФЭ722	60			
ФЭ723	50			
ФЭ724	35			
PD48	10			
Контроль излучения тления				
Нормальный атмосферный воздух				
PD36-10	90			
ФЭ722	148			
ФЭ723	197			
ФЭ724	148			
PD48	23			
Шахтная атмосфера				
PD36-10	85			
ФЭ722	136			
ФЭ723	178			
ФЭ724	132			
PD48	19			

Таблица 5 – Результаты выбора элементной базы для ОЭД

В результате выбора элементной базы установлено, что при контроле излучения пламенного горения могут быть использованы фотодиоды ФЭ722 и PD36-10. Для контроля излучения тления может быть использован фотодиод ФЭ723.

З НЕЙРОСЕТЕВОЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕДАВАРИЙНЫХ ИЛИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫМ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРОМ

Для разработки нейросетевого алгоритма обнаружения предаварийных или аварийных ситуаций необходимо решить ряд следующих задач:

 провести анализ подходов и способов определения предаварийных и аварийных ситуаций;

 провести аналитический обзор по теме исследования, на основе которого определить подход к классификации ситуаций в угольной шахте и предельно допустимые концентрации контролируемых газов, соответствующих этим ситуациям;

- разработать математическое описание нейросетевого алгоритма;

– разработать и реализовать нейросетевой алгоритм в виде компьютерной модели;

 провести исследование по определению архитектуры нейронной сети двух типов, обеспечивающей достоверную классификацию ситуаций в угольной шахте;

провести тестирование выбранной нейронной сети двух типов с использованием данных с
 ОЭД концентрации пыли.

3.1 Подходы и способы определения предаварийных и аварийных ситуаций

Для определения предаварийных и аварийных ситуаций в угольной шахте используются следующие способы:

– прогнозирование ситуаций в угольной шахте;

– распознавание ситуаций в угольной шахте в режиме реального времени.

А. Прогнозирование ситуаций в угольной шахте

Прогнозирование ситуаций в угольных шахтах базируется на использовании различных математических методов: функциональный анализ, теория вероятности, математическая статистика, регрессионный анализ, нейронные сети [45].

Одним из существующих подходов к прогнозированию ситуации является методология ARIMA [46].

ARIMA предполагает стационарность анализируемого временного ряда. Если ряд не стационарный, он должен быть дифференцирован до достижения стационарности. Данная модель содержит авторегрессионные параметры и учитывает влияние случайных коэффициентов.

По данной методологии предлагается устанавливать количество компонентов авторегрессии на основе автокорреляции и частичной автокорреляции. При проведении исследований [46] использовались данные, полученные в добычных забоях шахт. В качестве исследуемого газа выбран метан. Эксперименты проводились с помощью пакета статистических вычислений «Statictica» и инженерных вычислений «Matlab». Результат показал, что методология ARIMA с точностью в 6,1 % может спрогнозировать возникновение аварийной ситуации.

Вторым подходом прогнозирования ситуации в угольной шахте является прогнозирование на основе многослойных нейронных сетей.

Использование моделирования на основе нейронных сетей является обоснованным и особенно эффективным при прогнозировании процессов, обладающих следующими свойствами:

 отсутствие возможности аналитического описания связей между прогнозируемыми процессами;

- исследуемый процесс характеризуется большими объемами входной информации;

– имеющиеся данные по процессу являются не полными, избыточными, зашумленными и частично противоречивыми [47].

В качестве решения задачи прогноза метанообильности горных выработок действующего выемочного участка угольной шахты, в источнике [45], используется многослойная нейронная сеть обратного распространения ошибки. Для получения адекватной модели и повышения надежности прогнозируемого значения метанообильности разработан алгоритм фильтрования незначащих исходных данных. Результат показал, что разработанный комплекс позволяет обеспечить точность прогнозирования в 97,8 %.

В источнике [48] описана модель прогнозирования газодинамических ситуаций, где в качестве основного инструмента моделирования использована рекуррентная нейронная сеть Элмана (рисунок 20).

Данная сеть представляет собой синхронную, бинарную двухслойную сеть с обратной связью от выхода к входу скрытого слоя.

Результат моделирования показал, что средняя ошибка при прогнозировании составила 5,1%, что является приемлемым не только для имитационного моделирования исследуемых процессов и явлений, но и для практики прогнозирования в реальных результатах.

Рассмотрены подходы к прогнозированию ситуации: авторегрессия и нейронные сети. Все подходы к прогнозированию ситуации являются точными и могут быть применены на практике, однако использование нейронных сетей более перспективно. Это обусловлено тем, что нейронные сети более гибкие, обладают способностью адаптации под изменение среды, позволяют решать задачу при неизвестных закономерностях, что при прогнозировании ситуаций в угольной шахте является важным достоинством.

50



Рисунок 20 – Структурная схема рекуррентной нейронной сети Элмана

Б. Распознавание ситуации в угольной шахте в режиме реального времени.

В литературе описаны два подхода к распознаванию ситуаций в угольной шахте:

1) По динамике изменения концентрации отдельного газа;

2) По соотношению концентраций нескольких газов.

1. По динамике изменения концентрации отдельного газа

Для распознавания эндогенных пожаров на начальной стадии, в источнике [8], предложено контролировать концентрацию СО. Сигнал тревоги возникает, если за определенный период времени концентрация СО не опускается ниже заданной величины на заданном отрезке времени.

В источнике [48] описана модель распознавания газодинамических ситуаций по динамике концентрации метана.

Для этого определен набор индикативных параметров, с помощью которых построена работоспособная система распознавания. К набору параметров относятся:

1) Р1 – максимальная амплитуда опасного превышения уровня концентрации;

2) Р2 – время нарастания от начала опасного превышения уровня до величины Р1;

3) РЗ – время спада до постоянного уровня;

4) Р4 – длительность процесса;

4) Р5 – градиент нарастания концентрации метана.

Набор вышеприведенных параметров поступает на вход нейронной сети. На выходе нейронной сети определяется класс газодинамической ситуации.

На основе данной модели нейронной сети проведены компьютерные эксперименты для трех классов газодинамических ситуаций, для которых ошибка при распознавании ситуации составила: 2,4% для буровзрывных работ, 7,2% для нарушения режима вентиляции и 8,3% для фильтрации газа из выработанного пространства выемочного участка. Данные подходы к распознаванию ситуации учитывают динамику изменения концентрации только одного газа, что может негативно сказаться на точности распознавании ситуации.

2. По соотношению концентраций нескольких газов

Распознавание ситуации может выполняться по соотношению концентраций нескольких газов, контролируемых одновременно.

Одним из принципов распознавания ситуации, в источнике [8], описан алгоритм, предусматривающий предварительную установку двух пороговых значений для каждого газа. Контроль превышения пороговых значений концентраций СО и CH₄ осуществляется по каждому каналу.

По контролируемым газам имеется два уровня предупреждения:

 предупредительная сигнализация, если превышен первый порог у одного из контролируемых газов;

 – аварийная сигнализация, когда произойдет превышение второго порога одного из контролируемых газов.

Для предотвращения пожара на начальной стадии, в источнике [8], описан принцип совместной обработки информации от датчиков различных физических процессов. В качестве признаков возникновения пожара выделены:

– концентрация СО;

– появление дыма;

– появление продуктов пиролиза и хлористого водорода;

– повышение температуры и увеличение скорости воздушного потока.

Данный принцип используется в зарубежных системах, для защиты конвейерных выработок.

В источнике [4] приведены концентрации СО и СО₂ возникающие при пожарах или при работе двигателей внутреннего возгорания.

Классификация ситуаций на основе концентраций данных газов не представляется возможным, поскольку в двигателях внутреннего сгорания, при хорошей карбюрации, CO₂ образуется в 2,5 раза больше, чем CO. В обратном случае концентрация CO превышает объем CO₂ в 2,6 раза. Это не позволяет различить ситуацию пожара и ситуацию работы двигателей внутреннего сгорания. Однако это можно сделать на основе концентраций основного токсичных компонентов выхлопа шахтных дизелей – окислах азота.

Для определения текущей ситуации по совокупности информации с датчиков контроля CO, CO₂ и окислов азота, в источнике [49], применяется нейросетевой алгоритм, который соотносит между собой сигналы с датчиков CO, CO₂ и окислов азота, на основании которых принимается решение.

Рассмотрены два подхода к распознаванию ситуаций в угольной шахте: по динамике изменения концентрации одного газа и по соотношению концентраций нескольких газов.

В обоих подходах по распознаванию ситуации используются нейросетевые алгоритмы, что говорит о актуальности применения нейронных сетей для решения задач, связанных с отсутствием полной информации о протекающем процессе.

3.2 Определение предельно допустимых концентраций для ситуаций в угольной шахте

Определение классификации ситуаций в угольной шахте проводилось согласно нормативно-правовым документам и литературным источникам.

Согласно руководящему документу «Методические рекомендации о порядке составления планов ликвидации аварий при ведении работ в подземных условиях» [50] ситуации в шахте классифицируются следующим образом: штатная ситуация; аварийная ситуация; ликвидация аварии; ликвидация последствий аварии.

В источнике [19], для оценки ситуации, выделены шесть возможных ситуаций, возникающих в угольной шахте:

– штатная ситуация;

- тревожная ситуация;

– предаварийная ситуация;

– аварийная ситуация;

– ликвидация аварии;

– ликвидация последствий аварии.

Приведенная классификация является дополненной классификацией из нормативного документа [50] и позволяет более точно определить степень риска при переходе от штатной ситуации к аварийной или предаварийной.

В соответствии с нормативно-правовыми документами и литературными источниками, определены допустимые предельные концентрации для контролируемых газов:

– метан CH₄. В зависимости от типа выработки содержание метана в рудничной атмосфере не должна превышать от 0,5 до 2% объемной доли [51, 52];

– оксид углерода СО. При содержании оксида углерода 0,0017% объемной доли и более должны быть прекращены все работы и приняты меры по проветриванию загазованного производственного помещения [51, 52];

– диоксид углерода CO₂. ПДК диоксида углерода (углекислого газа) в рудничном воздухе составляет (% объемной доли): на рабочих местах и в исходящих струях выемочных участков и тупиковых выработок – 0,5; в выработках с исходящей струей крыла, горизонта и шахты – 0,75; при проведении и восстановлении выработок по завалу – 1 [51, 52];

– угольная пыль. 150 мг/м³ в исходящих вентиляционных потоках очистных и подготовительных выработок, а также в 5 – 7 м от пунктов перегруза угля по движению вентиляционной струи воздуха; 10 мг/м³ ПДК в основных транспортных выработках с рельсовой и дизельной откаткой и в выработках околоствольного двора [51, 52, 53].

Для определения исходных данных нейросетевого алгоритма для МКОЭП, сопоставлены: данные из нормативно-правовых документов [51, 52, 53], классификация ситуаций в угольной шахте, приведенная в источнике [19], требования для отображения состояния контролируемых параметров [54].

В результате получены следующие предельные допустимые концентрации при определенных режимах работы (ситуациях) в угольной шахте:

– штатный режим работы, допускается до 85% от максимально допустимой концентрации контролируемых параметров МКОЭП;

– тревожный режим работы, при котором допускается от 85 до 90% от максимально допустимой концентрации контролируемых параметров МКОЭП;

– предаварийный режим работы, при котором уровень контролируемых параметров находится в диапазоне от 90 до 100% от предельно допустимой концентрации для МКОЭП;

 – аварийный режим работы, при котором уровень концентрации одного или нескольких параметров превышает предельно допустимую норму;

 – ликвидация аварий и ликвидаций последствий аварий, при которых значения контролируемых параметров приходят в норму (штатный режим).

В соответствии с вышесказанным для МКОЭП составлена таблица с максимально допустимыми концентрациями газов при определенной ситуации в угольной шахте (таблице 6).

Таблица 6 – Предельно допустимые значения контролируемых параметров для ситуаций в угольной шахте

Контролируемый	Ситуация в шахте				
параметр	Штатная	Тревожная	Предаварийная	Аварийная	
Концентрация метана СН4*, %	<0,425 ÷ <1,7	$0,425-0,45 \div 1,7-$ 1,8	0,45-0,5 ÷ 1,8-2	>0,5 ÷>2	
Концентрация оксида углерода CO, %	<1,445×10 ⁻³	1,445×10 ⁻³ - 1,53×10 ⁻³	1,53×10 ⁻³ - 1,7·10 ⁻³	>1,7×10 ⁻³	
Концентрация диоксида углерода CO ₂ **, %	<0,425 ÷ <0,85	0,425-0,45 ÷ 0,85- 0,9	0,45-0,5 ÷ 0,9-1	>0,5 ÷ >1	
Концентрация угольной пыли***, мг/м ³	<8,5 ÷ <127,5	8,5-9 ÷ 127,5-135	9-10 ÷ 135-150	>10 ÷ >150	

*- в зависимости от типа выработки концентрация метана меняется;

** – в зависимости от типа выработки концентрация диоксида углерода меняется;

*** – в зависимости от типа выработки концентрация угольной пыли меняется.

3.3 Подход к построению нейросетевого алгоритма для прогнозирования ситуаций в угольной шахте

На начальном этапе разработки планируется создание нейросети для прогнозирования и принятия решения по предельно допустимым концентрациям газов. В дальнейшем, возможна реализация нейросети для распознавания аварийных и предаварийных ситуаций.

На основе анализа известных подходов и способов [45, 46, 47, 48] определения ситуаций в угольной шахте планируется использование среды разработки «Matlab» с пакетом «Neural Network Toolbox». В рамках исследования будут использованы следующие архитектуры нейронных сетей:

– нелинейная нейронная сеть по типу вход-выход, которая имеет одностороннее соединение от входных до выходных слоев;

– нелинейная авторегрессионная сеть, которая не имеет внешнего входа (генератор);

– нелинейная авторегрессионная сеть с внешним входом. В своей структуре использует память и рекурентные обратные связи для распознавания пространственных и временных закономерностей в данных [55].

Для каждого вида архитектуры нейронных сетей будет проведен анализ результатов по точности прогнозирования.

Для МКОЭП, будет использоваться совокупность нейронных сетей для каждого отдельного контролируемого параметра. Перед поступлением сигналов датчиков МКОЭП в нейронную сеть, будет происходить предварительная обработка с целью нормирования сигналов датчиков и учёта влияния одного контролируемого параметра на остальные.

Предварительная обработка в МКОЭП будет выполняться с учетом взаимного влияния следующих критериев:

– влияние концентрации взвешенной угольной пыли на допустимую концентрацию метана;

 – влияние других газов на показания оптико-электронного датчика, контролирующего концентрацию отдельного газа (перекрестная чувствительность).

Допустимые концентрации метана в воздухе с взвешенной пылью определяются с учетом [4]:

$$\frac{X_{CH4}}{1} + \frac{n}{P} = 1,$$

где *X*_{CH4} – допустимая (максимальная) концентрация метана в воздухе со взвешенной пылью (об. %); n – концентрация пыли в воздухе (г/м³); P – нижний предел взрывчатости данной пыли (г/м³).

Ранее получены передаточные характеристики, где в качестве посторонних газов использовались метан и диоксид углерода, которые существенно влияли на передаточную характеристику СО и не позволяли обнаружить малые концентрации СО. Для исключения данного фактора, в блоке пред-

55

варительной обработки, будут приняты меры, направленные на компенсацию влияния других газов на показания оптико-электронного датчика, контролирующего концентрацию отдельного газа.

Датчики пламени и тления МКОЭП не включены в структуру нейронной сети. Это обусловлено тем, что у данных датчиков прогнозирование не выполняется, а наличие пожара контролируется по порогу срабатывания. Когда порог превышен, то выполняется активация устройств взрывоподавления пожаротушения.

Сигналы с независимых друг от друга нейронных сетей будут поступать в блок прогнозирования, где будет приниматься решение о том, какая ситуация протекает на данный момент, а также исследование тенденций изменения каждого контролируемого параметра с целью сигнализирования о возможных предаварийных и аварийных ситуациях.

Таким образом, структура насчитывает в себе четыре независимых нейронных сети, входными нейронами которых будут нормированные показания с датчиков МКОЭП (рисунок 21).



NARX – нелинейная авторегрессионная нейронная сеть с внешним входом
 Рисунок 21 – Структура нейросетевого алгоритма для прогнозирования ситуаций в угольной шахте на основе нелинейной авторегрессионной нейронной сети с внешним входом

3.4 Математическое описание нейросетевого алгоритма

Математическое описание нейросетевого алгоритма представлено в соответствии с этапами выполнения алгоритма и его структурой: предварительная обработка данных с ОЭД МКОЭП; нормирование сигналов с ОЭД; прогнозирование значений концентраций газов и пыли с использованием нейронных сетей; принятие решения о возникновении ситуации путем сравнения прогнозируемых значений с пороговыми.

Согласно подходу, к разработке нейросетевого алгоритма принятия решения о наличии предаварийной или аварийной ситуации МКОЭП, используются следующие ранее выбранные архитектуры нейронных сетей:

- нелинейная авторегрессионная нейронная сеть без внешнего входа (NAR);

- нелинейная авторегрессионная нейронная сеть с внешним входом (NARX);

1. Нелинейная авторегрессионная нейронная сеть без внешнего входа

Нейронная сеть NAR (рис. 2a) прогнозирует значение y(t), принимаемое исследуемым параметром в момент времени t на основе предыдущих значений y(t-p) [55, 56, 57].

На рисунке 22 представлена архитектура нейронной сети типа NAR, которая строится на базе многослойного персептрона.



y(t) – выход нейронной сети; Z⁻¹ – элемент задержки на один временной шаг; W₁ – массив весовых коэффициентов скрытого слоя; W₂ – массив весовых коэффициентов выходного слоя; В – порог представляющий синаптический вес связи с фиксированным входным сигналом, N – число нейронов в скрытом слое

Рисунок 22 – Схема нелинейной авторегрессионной нейронной сети без внешнего входа (NAR)

Модель NARX (рисунок 23) прогнозирует значение, принимаемое исследуемым параметров в момент времени t, на основе предыдущих значений, однако, в отличии от NAR, NARX обладает внешним входом, который предназначен для введения дополнительного параметра x(t), влияющего на прогнозируемое значение y(t) [56, 57, 58]. Например, на изменение концентрации метана влияют внешние параметры вентиляционного режима – скорость (поток) воздуха, давление в угольной шахте. Учет представленных факторов позволяет повысить точность прогнозирования концентрации метана [48, 59].

Так же возможен вариант, когда данные о дополнительном параметре неизвестны и на внешний вход могут поступать предыдущие по времени значения исследуемого параметра y(t) [48, 59].

На рисунке 23 показана архитектура нейронной сети типа NARX, построенной на базе многослойного персептрона.



x(t) – вход нейронной сети; y(t) – выход нейронной сети; Z⁻¹ – элемент задержки на один временной шаг; W₁ – массив весовых коэффициентов скрытого слоя; W₂ – массив весовых коэффициентов выходного слоя; B – порог представляющий синаптический вес связи с

фиксированным входным сигналом, N – число нейронов в скрытом слое Рисунок 23 – Схема нелинейной авторегрессионной нейронной сети с внешним входом (NARX)

Для исследования представленных нейронных сетей была разработана компьютерная модель при помощи программного комплекса Matlab с использованием пакета управления нейронными сетями Neural network toolbox [55].

3.5 Исследование по определению архитектуры нейронных сетей

Исследование заключается в определении архитектуры нейронной сети, обеспечивающей достоверную классификацию ситуаций в угольной шахте с минимальной ошибкой прогнозирования.

Исходные данные для проведения исследования взяты из работы [19] и представляют данные об изменения концентрации метана во времени при возникновении различных ситуаций в выработке шахты (1 – штатная, 2 – тревожная, 3 – предаварийная, 4 – аварийная), связанных с накоплением метана в выработке (рисунок 24).



1 – штатная, 2 – тревожная, 3 – предаварийная, 4 – аварийная Рисунок 24 – Временные интервалы, характеризующие ситуацию в шахте

В ходе проведенного исследования выявлены наилучшие архитектуры для каждой нейросети с учетом прогнозируемой ситуации. Результат представлен в таблице 7.

Архитектура наилучшей нейронной сети типа NAR включает 11 нейронов в скрытом слое, задержка в 120 временных отсчетов (75% от общего числа элементов в обучающем множестве) для тревожной и предаварийной ситуации, 60 временных отсчетов для аварийной ситуации (38% от общего числа элементов).

Архитектура	Ситуация	Число нейронов	Задержка	
	Тревожная		120	
NAR	Предаварийная 11			
	Аварийная		60	
	Тревожная	10	30	
NARX	Предаварийная		90	
	Аварийная	7	30	

Таблица 7 – Архитектуры сетей с наименьшей MSE прогнозирования

Для NARX прогнозирование тревожной и предаварийной ситуации выполняется наилучшим образом с использованием следующей архитектуры: 11 нейронов в скрытом слое; 30 и 90 временных отсчетов задержки соответственно (18% и 57% от общего числа выборки на обучение соответственно). Прогнозирование аварийной ситуации выполнялось нейросетью NARX с 7 нейронами в скрытом слое и 30 временными отсчетами задержки (7% от общей выборки на обучение).

В результате проведенного исследования выявлено, что, значения среднеквадратической ошибки обучения (MSE) не выше 1, а ошибки прогноза – не выше 2. Средняя абсолютная ошибка (MAPE) для наилучших конфигураций сети NAR при прогнозировании тревожной ситуации составила 5,4%, при предаварийной ситуации – 7,1%, при аварийной – 3,4%. МАРЕ для наилучших конфигураций сети NARX: тревожная ситуация – 4,2%, предаварийная – 4,9%, аварийная – 3,9%.

Рекомендации по построению архитектуры нейронных сетей для реализации алгоритма определения ситуаций в угольной шахте: число нейронов в скрытом слое 7-11, задержка более 20% от общего числа выборки на обучение.

Для тестирования возможности прогнозирования с использованием данных с ОЭД концентрации пыли выбрана сеть NAR с архитектурой – 11 нейронов в скрытом слое, временная задержка 100 отсчетов. Значение MSE для сети NAR составило 7,2, для сети NARX – 10,7. Значение MAPE для сети NAR составило 0,79 %, для сети NARX – 1,5 %.

4 РАЗРАБОТКАЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГООБРАЗЦАМНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГООПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГОПРИБОРАКОНТРОЛЯАВАРИЙНЫХ И ПРЕДАВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Разработка экспериментального образца многокритериального оптико-электронного прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах предусматривает решение следующих задач:

– разработать структурную схему экспериментального образца МКОЭП;

– выбрать элементную базу для МКОЭП;

– выполнить проектирование и изготовление экспериментального образца МКОЭП;

– провести испытания МКОЭП подтверждающие возможность обнаружения очагов пламенного горения и тления.

4.1 Структурная схема прибора

Структурная схема экспериментального образца МКОЭП разработана с учетом результатов моделирования прибора (рисунок 25).



Рисунок 25 – Структурная схема МКОЭП

Экспериментальный образец МКОЭП состоит из следующих блоков:

```
- блок ОЭД концентрации газов (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO);
```

- блок ОЭД концентрации угольной пыли;
- блок ОЭД оптического излучения пламени и тления;
- блок обработки данных (БОД).

4.2 Выбор элементной базы

На основе результатов моделирования ОЭД концентрации газов и пыли, полученных на предыдущих этапах работы были выбраны светодиоды и фотодиоды для построения ИК оптопар, обеспечивающих наименьшую погрешность измерения концентрации (таблица 8). Фотодиоды снабжены интерференционными светофильтрами. Преимуществом использования светофильтров является стабильность формы спектрального распределения чувствительности фотодиодов от температуры.

	Интерференционный	Пара	светодиод-	
Контролируемый	светофильтр,	фотодиод		Произволитель
газ	центральная длина	Светолиол	Фотолиол	inponobodinion
	волны	Светодиод	Фотодиод	
Метан	INBP3295, 3,3 мкм	LED34Sr	PD34Sr	ООО «ИоффеЛЕД»
Оксид углерода	INBP4660, 4,7 мкм	LED47Sr	PD47Sr	ООО «ИоффеЛЕД
Диоксид углерода	INBP4260, 4,2 мкм	LED42Sr	PD42Sr	ООО «ИоффеЛЕД
Опорный	INBP3900, 3,9 мкм	LED38Sr	PD38Sr	ООО «ИоффеЛЕД»

Таблица 8 – Инфракрасные светодиоды и фотодиоды для ОЭД концентрации газа

Спектральный диапазон контроля от 3,8 до 4 мкм для опорного канала в блоке ОЭД концентрации газов выбирался в диапазоне спектра, в котором отсутствует поглощение ИК излучения контролируемыми газами. Опорный канал построен с использованием светодиода LED38Sr, фотодиода PD38Sr и светофильтра INBP3900.

С выбранными светодиодами, входящим в состав ОЭД концентрации газов, были использованы драйверы светодиодов mD-1c, обеспечивающие импульсы на их входе в виде меандра с амплитудой 150 мА и длительностью 500 мкс.

В результате моделирования ОЭД концентрации угольной пыли определен спектральный диапазон контроля поглощения излучения угольной пылью от 0,6 до 1,1 мкм и выбраны светодиод

SFH4550 и фотодиод SFH 203 обеспечивающие наименьшую абсолютную погрешность измерения концентрации пыли.

Выбор спектральных диапазонов контроля излучения пламени и тления осуществлялся с учетом проведенных ранее исследований [60]. Для построения ОЭД пламени и тления были выбраны инфракрасные фотодиоды, выпускаемые российской фирмой ООО «ИоффеЛЕД» (см. таблицу 9).

	Интерференционный		Диапазон	
Контролируемый	светофильтр,	Фотолиол	спектральной	Произродитон
параметр	центральная длина	Фотодиод	чувствительности	производитель
	волны		фотодиода	
_	-	PD27Sr	2,68-2,78 мкм	000
Горение	INBP4260, 4,2 мкм	PD42Sr	3,15-4,75 мкм	«ИоффеЛЕД»
Тление	INBP3900, 3,9 мкм	PD38Sr	3,2-3,7 мкм	[33]

Таблица 9 – Инфракрасные фотодиоды для ОЭД пламенного горения и тления

Выбранные для изготовления ОЭД концентрации газа и ОЭД пламенного горения и тления фотодиоды имеют низкое дифференциальное сопротивление, что обуславливает использование операционных усилителей AD797 при построении ПТН для данных фотодиодов с учетом рекомендаций [8]. В ОЭД концентрации угольной пыли использовались кремниевые ИК фотодиоды с высоким дифференциальным сопротивлением и для реализации ПТН были выбраны четырехканальные малошумящие операционные усилители OP484.

Проектирование экспериментального образца МКОЭП включало разработку оптических частей для различных типов ОЭД и разработку электронных блоков для соответствующих блоков прибора.

4.3 Проведение испытаний МКОЭП

Испытания МКОЭП включали определение возможности обнаружения прибором следующих аварийных ситуаций:

А) обнаружение пожара по наличию характерных газов при тлении угольной пыли;

Б) обнаружение пожара по наличию оптического излучения при тлении угольной пыли и при пламенном горении газовоздушной смеси.

А. Обнаружение пожара по наличию характерных газов при тлении угольной пыли

МКОЭП испытывается с использованием очага тления угольной пыли организованного с учетом рекомендаций [60]. Очаг пожара организуется с использованием электрической плиты и

установленного на неё стального поддона с помещенной в него навеской угольной пыли. Нагрев поверхности плиты осуществляется до 600°С за время не более 660 с. Контроль температуры на поверхности плиты осуществляется инфракрасным пирометром TemPro-2200. На заданной высоте от поддона устанавливается тестируемый МКОЭП 5.

Зависимости изменения концентрации газов от времени для разной высоты расположения МКОЭП представлены на рисунок 26.







Из анализа результатов следует, что при увеличении высоты расположения МКОЭП уровень начальной концентрации всех газов уменьшается. При проведении испытания по обнаружению пожара МКОЭП по наличию характерных газов при тлении угольной пыли установлено, что время достижения порогового значения концентраций CH4 не превышает 150 с, CO – 125 с и CO2 – 60 с.

Б. Обнаружение пожара по наличию оптического излучения при тлении угольной пыли и при пламенном горении пропано-воздушной смеси

Установка для проведения испытаний, направленных на обнаружение МКОЭП пожара по наличию оптического излучения при тлении угольной пыли, содержит тестируемый МКОЭП, закрепленный на одной оптической оси с поддоном с нагретой угольной пылью, который установлен на электрической плите.

Установка для проведения огневых испытаний представляет собой оптическую скамью с закрепленным на ней МКОЭП и источником излучения – пропановой горелкой. МКОЭП и источник излучения устанавливаются на одной оптической оси 4.

В результате проведения испытания при обнаружении МКОЭП очага тления установлено, что порог срабатывания 0,5 В достигается всеми сигналами с каналов ОЭД пламени и тления, выполняющих контроль излучения в спектральных диапазонах 2,68-2,78, 3,15-4,75 и 3,2-3,7 мкм. Это обусловлено, тем что тление угольной пыли имеет непрерывный спектр излучения (рисунок 27). При регистрации горения пропано-воздушной смеси, порог срабатывания достигают два сигнала с каналов (2,7 мкм и 4,2 мкм), что обусловлено спектром излучения продуктов горения пропановоздушной смеси.



Рисунок 27 – Выходные сигналы ОЭД пламенного горения и тления МКОЭП для каналов, контролирующих излучения в спектральных диапазонах 2,68-2,78, 3,15-4,75, 3,2-3,7 мкм

Таким образом, установлена возможность обнаружения пожара МКОЭП по наличию оптического излучения при тлении угольной пыли и пламенном горении газо-воздушной смеси.

5 НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для обеспечения достоверной и эффективной работы МКОЭП в условиях угольной шахты необходимо проведение дополнительных, продолжающихся по данной тематике, исследований, направленных на определение подходов к адаптации прибора под заданный охраняемый объект. Адаптация заключается в определении способа размещения отдельных оптико-электронных датчиков МКОЭП на охраняемом объекте в учетом характера изменения контролируемых параметров (концентрации газов и угольной пыли, поток излучения при горении и тлении) в пространстве при протекании аварийных и предаварийных ситуаций по различным сценариям:

 возникновение загазованности метаном и запыленность выработки взвешенной угольной пылью тупиковой выработки угольной шахты при различных нарушениях работы вентиляции (остановка вентилятора местного проветривания, отставание вентиляционных труб);

 возникновение эндогенных и экзогенных пожаров, связанных с пламенным горением метана и тлением угольной пыли в тупиковой выработке угольной шахты.

Рассматриваемые сценарии определяются наиболее вероятным характером и условиями протекания ситуаций: выбором охраняемых объектов, где наиболее часто происходят ситуации с учетом их геометрии (например, тупиковой выработки шахты); местом возникновения ситуации, влиянием аэрогазодинамики, обусловленной режимом работы вентиляции. Выполнение исследований предполагается с использованием компьютерного моделирования (пакеты программ вычислительной гидродинамики) с дальнейшим подтверждением результатов на базе экспериментальных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения НИР разработаны научные основы построения многокритериальных интеллектуальных оптико-электронных приборов контроля аварийных и предаварийных ситуаций в угольных шахтах (в том числе эндогенных и экзогенных пожаров), выполняющих мониторинг рудничной атмосферы и обеспечивающих пожарную безопасность.

Сформулированы необходимые и достаточные параметры контроля и определены их диапазоны изменения. Контролируемыми параметрами являются: концентрация метана (от 0 до 2,5 % по объему); концентрация диоксида углерода (от 0 до 2% по объему); концентрация оксида углерода (от 0 до 0.01 % по объему); концентрация угольной пыли (от 0 до 7 г/м3); поток оптического излучения при пламенном горении метановоздушной смеси и тлении угольной пыли.

Многокритериальный оптико-электронный прибор предлагается построить с использованием совокупности оптико-электронных датчиков метана, оксида углерода, диоксида углерода, угольной пыли, оптического излучения тления и пламени.

Разработана математическая модель и выполнено компьютерное моделирование прибора. Сформулированы рекомендации по выбору оптимальных датчиков контроля.

Подход к моделированию оптико-электронных датчиков измерения концентрации газов заключается в расчете спектрального коэффициента пропускания с использованием закона Бугера-Ламберта-Бера. Подходы к моделированию оптико-электронного датчика измерения концентрации пыли основаны на расчете спектрального коэффициента пропускания газодисперсной среды на базе теории Ми. Подходы, основанные на уравнении переноса излучения и использовании угловых коэффициентов, применяются для расчета излучения, поступающего от очага горения на входной зрачок оптико-электронного датчика пламени.

ОЭД концентрации газов предлагается реализовать на базе следующих выбранных оптопар:

- контроль метана – оптопара LED34-PD34 (порог обнаружения 0,013 об. %).

– контроль оксида углерода – оптопара LED46-PR- PD48-03-NS-PR (порог обнаружения 0,00083 об. %)

– контроль диоксида углерода – оптопара LED43-PR-PD48-03-NS-PR (порог обнаружения 0,0013 об. %).

Для реализации ОЭД концентрации газа была выбрана оптопара ADL-78901TL – SFH 203 (порог обнаружения 0,0002 г/м³).

Моделирование оптического излучения пламени выполнялось при допущении о том, что горение стехиометрической метановоздушной смеси представляет огненный шар. Оптическое излучение от очага тления моделировалось с учетом того, что горение отложившейся угольной пыли происходит на площадке квадратной формы. Расчет коэффициента выполняется для промежуточ-

ной среды с двумя составами характерными для нормального атмосферного воздуха и шахтного воздуха.

Выбор спектральных диапазонов контроля излучения пламени выполнен по результатам спектрального потока излучения на входном зрачке ОЭД, полученного для промежуточной среды в виде шахтной атмосферы, наиболее сильно поглощающей поток излучения пламени. Контроль излучения пламени может выполняться в двух спектральных диапазонах – от 2,45 до 3,2 мкм и от 4,3 до 4,6 мкм. Контроль излучения тления пропускания выполняется в спектральном диапазоне – от 3,5 до 4,2 мкм, где излучение тления несущественно поглощается промежуточной средой.

В результате выбора элементной базы, исходя из наибольшего отношения сигнал-шум установлено, что при контроле излучения пламенного горения могут быть использованы фотодиоды ФЭ722 и PD36-10. Для контроля излучения тления может быть использован фотодиод ФЭ723.

Разработан нейросетевой алгоритм контроля предаварийной или аварийной ситуации. Разработано математическое описание нейросетевого алгоритма, включающее в себя предварительную обработку сигналов с ОЭД, нормирование сигналов с ОЭД, математическое описание нейронных сетей. При предварительной обработке данных учтено влияние концентрации взвешенной угольной пыли на допустимую концентрацию метана. Определено влияние посторонних газов на показания ОЭД, контролирующего концентрацию отдельного газа. Нормирование сигналов ОЭД требуется для приведения в соответствие их диапазонов измерения с диапазоном изменения значений входных данных для нейронных сетей. Математическое описание нейронных сетей проведено для двух типов: NAR и NARX.

Изготовлен экспериментальный образец многокритериального оптико-электронного прибора. Разработана структурная схема и выбрана элементная база экспериментального образца МКОЭП. Выполнено проектирование и изготовление экспериментального образца МКОЭП. Проведены испытания, подтверждающие адекватность математической модели и алгоритма работы прибора. При проведении испытаний установлена возможность обнаружения пожара МКОЭП по наличию оптического излучения при тлении угольной пыли и пламенном горении газо-воздушной смеси.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ, № МК-868.2017.8.

68

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Охрана труда в угольной нромышленности: Учебное пособие для студентов горных специальностей высших учебных заведений / Под общей ред. Ю.Ф. Булгакова. - Донецк: РИА ДонНТУ, 2012.-480 с.
- Многофункциональные системы безопасности угольных шахт / Азбель М.Д., Кобылкин С.С. // Горная техника. №13. – С. 52-55.
- 3. Шевцов Н.Р. Взрывозащита горных выработок (курс лекций): Учебное пособие для вузов [Текст] / Н.Р. Шевцов 2-е изд., перераб. и доп. Донецк : ДонНТУ, 2002. 280 с.
- Айруни, А.Т. Взрывоопасность угольных шахт [Текст] / А.Т. Айруни, Ф.С. Клебанов, О.В. Смирнов. – М.: Издательство "Горное дело" ООО "Киммерийский центр", 2011. – 264 с.
- Оценки условий возбуждения и гашения взрывных волн при шахтных взрывах / А.А. Васильев и др. // // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. №2. – С. 91-105.
- 6. Сайдулин Е.Г., Соколов А.В., Васильев А.А., Лукьянченко А.А. Извещатели пожарные газовые. часть 3. использование. виды ИПГ http://www.ervist.ru/stati/izveschateli-pozharnye-gazovye.-chast-3.-ispolzovanie.-vidy-ipg.html.
- Fire detection in underground workings by Frank Taylor, Trolex Ltd // Plant & Equipment January. February 2013.
- Смирнов А.М. Основы геоэкологического мониторинга уголь-ных шахт [Текст]. / А.М. Смирнов. М.: Издательство Москов-ского государственного горного университета, 2003. 286 с.: ил.
- 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.
- 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.
- 11. EUR 25364 Early Detection and Fighting of Fires in Belt Conveyor (Edaffic) Luxembourg:
 Publications Office of the European Union, 2013, 142 pp.
- 12. Mine fire detector Combined smoke and NOx/CO sensors / M.A. Hemingway, P.T. Walsh // Health and Safety Laboratory Harpur Hill, Buxton, Derbyshire, 2012, 46 p.

http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr918.pdf.

- 13. Knowledge-based Genetic Algorithms Data Fusion and its Application in Mine Mixed-gas Detection / H. Li, D. Wang, Y. Zhang // Journal of software, vol. 7, no. 2, 2012, pp. 303-307.
- Положение об аэрогазовом контроле в угольных шахтах. Серия 05. Выпуск 23. М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2013. – 110 с.
- 15. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». Серия 05. Выпуск 40. – М.: Закрытое акционерное общество «Научнотехнический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 200 с.
- 16. ГОСТ Р 55154-2012. Оборудование горно-шахтное. Системы безопасности угольных шахт многофункциональные. Общие технические требования. М: Стандартинформ. 2014. 27 с.
- 17. Захаренко Д.М. Особенности развития теплофизических процессов самовоз-горания и взрыва пыли бурых углей [Текст] : Дис. канд. тех. наук : 01.04.14 / Захаренко Дмитрий михайлович. Красноярск, 2001.
- 18. Горбунов, Н.И. Оптоэлектронные приборы для обнаружения и регистрации электромагнитного излучения / Горбунов Н.И. [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. 2008. №1. С. 47–55.
- 19. Чудинов, С.Г. Модели и алгоритмы прогнозирования аэрогазовой ситуации для информационно-аналитической системы безопасности шахты : диссертация. кандидата технических наук : 05.13.01. – Москва, 2009. – 156 с. : ил.
- 20. Захаренко Д.М. Особенности развития теплофизических процессов самовозгорания и взрыва пыли бурых углей : диссертация. кандидата технических наук : 01.04.14. – Красноярск, 2001. – 137 с.: ил.
- 21. Лисаков, С.А. Компьютерное моделирование излучения пламени при горении метановоздушных 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.
- 22. Моделирование характеристик оптических газовых сенсоров на основе диодных оптопар среднего ИК-диапазона спектра / С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова, М.А. Ременный // Журнал технической физики, 2009, том 79, вып.. 6. С.112-188. pp.
- 23. Михайленко, С.Н. Информационно-вычислительная система "Спектроскопия атмосферных газов". Структура и основные функции / С.Н. Михайленко, Ю.Л. Бабиков, В.Ф. Головко // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т.18, № 09. – С. 765–776.

- 24. 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.
- 25. Матвеев Б.А., Высокотемпературные датчики углекислого газа для систем безопасности в энергетике на основе поверхностно облучаемых фотодиодов на основе InAsSb // Глобальная ядерная безопасность. 2011. №1 (1). С. 110-115.
- 26. Low voltage episide down bonded mid-IR diode optopairs for gas sensing in the 3.3-4.3 μm spectral range. Remennyi M.A. Sensors and Actuators B: Chemical. 2003. Vol. 91. No 1-3. pp. 2556-261.
- 27. Гауэр, Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. / Дж. Гауэр. М.: Радио и связь, 1989. 504 с: ил.
- 28. Гаврилов, Г.А. Предельная чувствительность фотоприемного устройства на основе фотодиодов A3B5 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.
- 29. Low voltage CO2-gas sensor based on III-V mid-IR immersion lens diode optopairs: where we are and how far we can go? Sot-nikova G.Y. IEEE Sensors Journal. 2010. Vol. 10. No2. pp. 225-234.
- 30. Performance analysis of diode optopair gas sensors. Sotnikova G.Yu. Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering Optical Sensors 2009. Cep. "Optical Sensors 2009" sponsors: SPIE Europe. Pra-gue, 2009. C. 73561T.
- 31. Lisakov S.A. Experimental Research of Optical Radiation Attenuation in Dispersed System «Coal Dust-Air», 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Conference proceedings, Novosibirsk: NSTU. 2016, pp. 380-385. pp.
- 32. 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.
- 33. ИоффеЛЕД. Светить и видеть в темно-красном [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ioffeled.com/.
- 34. ООО «ЛЕД Микросенсор НТ». Оптоэлектронные приборы среднего инфракрасного диапазона [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ru.lmsnt.com.
- 35. Морозов, Д.О. Баротермическое действие взрыва: ударная волна и терми-ческое поражение / Д.О. Морозов, К.Л. Степанов // Горение и плазмохимия. 2013. том 11. № 1. С. 57–70.
- 36. Блох, А.Г. Теплообмен излучением: Справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
- 37. Зигель, Р. Теплообмен излучением / Р. Зигель, Дж. Хауэлл. М.: Мир, 1975. 934 с.

- 38. Якушенков Ю.Г. Теория и расчёт оптико-электронных приборов: Учебник для студентов вузов [Текст] / Ю.Г. Якушенков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 1999. – 480 с.: ил.
- 39. Brown, L.E., Wesson, H.R., and Welker, J.R. (1974). Predict LNG fire radiation. Hydrocarbon Processing, pp. 141–143.
- 40. Hardee H.C., Lee D.O., Benedick W.B. Thermal hazards from LNG fireballs. Comb. Sci. and Techn., 1978, v. 17, pp. 189–197.
- 41. Fay J.A., Desgroseilliers G.J., Lewis D.H. Radiation from burning hydrocarbon clouds. Comb. Sci. and Techn., 1979, v. 20, pp. 141–151.
- 42. Solomon P.R., Carangelo R.M., Best P.E., Markham J.R., Hamblen D.G. The spectral emittance of pulverized coal and char. Symp Combust, 1988, 21, pp. 437–446.
- Baxter L.L., Fletcher T.H., Ottesen D.K. Spectral emittance meas-urements of coal particles. Energy Fuels, 1988; 2, pp. 423–430.
- 44. Bhattacharya S.P., Wall T.F. Development of emittance of coal particles during devolatilisation and burnoff. Fuel, 1999, v. 78, pp. 511–519.
- 45. Денисенко, В.П. Проблемы текущего прогнозирования метано-выделения в горных выработках угольных шахт / В.П. Денисенко, Р.В. Верба, Е.В. Абакумова // Transactions of UkrNDMI NAN Ukraine. – 2011. – № 8. – С. 138-148.
- 46. Применение гибридного метода машинного обучения для описания и непрерывной оценки уровня метановой опасности в горной выработке / М. Цикора [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – №4.– С. 95-107.
- 47. Денисенко, В.П. Выбор структуры нейросети для прогнозиро-вания метановыделения в горных выработках угольных шахт / В.П. Денисенко, Р.В. Верба, Е.В. Абакумова // Научный вестник НГУ. – 2008. – №10. – С. 15–20.
- 48. До Чи Тхань. Разработка алгоритмов управления вентиляционной системой метанообильных шахт Вьетнама с использованием моделей прогнозной аналитики [Текст]: диссертация кандидата технических наук: 05.13.06. – Москва, 2018. – 148 с.: ил.
- 49. Real-time neural network application to mine fire nuisance emis-sions discrimination / J.C. Edwards, R.A. Franks, G.F. Friel, C.P Lazzara // Mine ventilation: Proceedings of the 10th U.S./North American Mine Ventilation Symposium: Conference proceedings.. Lisse, Netherlands: Balkema, 2004. pp. 425–431. pp.
- 50. РД-15-11-2007. Методические рекомендации о порядке со-ставления планов ликвидации аварий при ведении работ в под-земных условиях. Введ. 2007–06–01. –М.: Федераль-ная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2007. 31 с.
- 51. РД-15-06-2006 Положение об аэрогазовом контроле в угольных шахтах. Введ. 2006–07–10.
 М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2013. 110 с.
- 52. Правила безопасности в угольных шахтах. Введ. 2013-12-31. М: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору 2014. 94 с.
- 53. Инструкция по локализации и предупреждению взрывов пылегазовоздушных смесей в угольных шахтах. – Введ. 2012-11-06. М: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору 2013. – 52 с.
- 54. РД 05-429-02 Инструкция по система аэрогазового контроля в угольных шахтах. Введ. 2002-07-01. М: Федеральный горный и промышленный надзор России 2002. – 23 с.
- 55. Matlab [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mathworks.com/.
- 56. Ruiz LG An application of non-linear autoregressive neural networks to predict energy consumption in public buildings. / LG Ruiz, M Cuellar, M Calvo-Flores, M Jimenez // Energies: Granada: Department of Computer Science and Artificial Intelligence. University of Granada, 2016. – P. 1–21. pp.
- 57. Maier H Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications / H. Maier, G. Dandy // Environmental Modelling & Software: Adelaide: Department of Civil and Environmental Engineering. The University of Adelaide, 1999. P. 101–124. pp.
- 58. Potdar K. A non-linear autoregressive neural network model for forecasting indian index of industrial production / K. Potdar, R, Kinnerkar // 2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP), Kochi, India, 2017.
- 59. Федоров, Е. Е. Разработка способа прогноза содержания взрывоопасных газов в горных выработках [Текст] / Е. Е. Федоров, Ю. Л. Дикова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. 2015. –. № 1 (28). С. 97–104. рр.
- 60. ГОСТ Р 53325 2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования. Методы испытаний. [Текст]. – М.: Стандартинформ, 2012. – 270 с.