

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

На правах рукописи

Тупикина Надежда Юрьевна

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

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

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Сыпин Евгений Викторович

Бийск – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1 Аналитический обзор способов и средств обнаружения очагов возгорания на ранней стадии в газодисперсной системе и факторов, влияющих на их работу....	12
1.1 Возникновение очагов возгорания и средства их обнаружения на ранней стадии в газодисперсной системе.....	12
1.1.1 Физические явления, сопровождающие очаг возгорания	12
1.1.2 Существующие средства обнаружения очагов возгорания в газодисперсной среде (на примере угольной шахты)	14
1.1.2.1 Датчики давления	14
1.1.2.2 Датчики дыма.....	15
1.1.2.3 Датчики контроля газового состава атмосферы.....	16
1.1.2.4 Тепловые контактные датчики	18
1.1.2.5 Оптико-электронные датчики	19
1.2 Влияние промежуточной среды в угольной шахте на обнаружение очага возгорания пирометрическим методом	21
1.2.1 Состав промежуточной газодисперсной среды	22
1.2.2 Оптические свойства промежуточной газодисперсной среды	24
1.2.2.1 Поглощение промежуточной средой	24
1.2.2.2 Рассеяние энергии излучения частицами промежуточной среды.....	27
1.2.2.3 Собственное излучение частиц промежуточной среды	29
1.3 Внешние оптические помехи (на примере угольной шахты).....	30
1.3.1 Источники искусственного освещения шахты	30
1.3.2 Тепловое излучение нагретых объектов шахты	34
1.3.3 Тепловое излучение обслуживающего персонала шахты	36

1.4 Способы повышения достоверности принятия решения о возгорании оптико-электронным прибором контроля взрывоопасной атмосферы	36
1.4.1 Использование программной избыточности.....	37
1.4.2 Использование аппаратной избыточности.....	38
1.4.2.1 Использование дополнительного радиационного канала	38
1.4.2.2 Использование дополнительного монохроматического канала ..	40
1.4.2.3 Использование нескольких спектральных отношений.....	41
2 Разработка теоретических принципов и технических решений построения оптико-электронного прибора двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы	44
2.1 Обзор параметров контролируемого объекта. Технические требования к разрабатываемому прибору.....	44
2.2 Разработка структурной схемы оптико-электронного прибора двух спектральных отношений.....	49
2.3 Оптическая система прибора	50
2.3.1 Выбор схемы построения оптической системы	51
2.3.2 Влияние алгоритма принятия решения о возникновении очага возгорания на структуру оптической системы	56
2.3.3 Компьютерное моделирование оптической системы	58
2.3.3.1 Модель источника излучения.....	59
2.3.3.2 Энергетическая подмодель функционирования оптико-электронного прибора двух спектральных отношений	63
2.3.3.3 Геометрическая подмодель расположения компонентов оптической системы.....	76
2.4 Электронная часть прибора	101
2.4.1 Блок приёма и усиления.....	101

2.4.2	Блок управления и принятия решения.....	102
2.5	Программное обеспечение прибора.....	103
2.5.1	Программа управления прибором.....	103
2.5.2	Компьютерная программа управления лабораторным образцом прибора.....	105
2.6	Техническая реализация оптико-электронного прибора двух спектральных отношений.....	106
3	Исследование основных параметров лабораторного образца оптико-электронного прибора двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы	110
3.1	Разработка стенда для лабораторного исследования оптико-электронных приборов обнаружения начальной стадии возгорания	111
3.2	Методики определения основных параметров оптико-электронного прибора двух спектральных отношений в лабораторных условиях.....	114
3.2.1	Методики определения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех и вероятности ложного срабатывания	116
3.2.2	Методика определения порога чувствительности по температуре ...	121
3.2.3	Методика определения углового поля.....	125
3.3	Результаты исследования лабораторного образца оптико-электронного прибора двух спектральных отношений.....	129
3.3.1	Вероятность обнаружения очага возгорания и вероятность ложного срабатывания	129
3.3.2	Порог чувствительности по температуре.....	131
3.3.3	Угловое поле.....	133

4	Экспериментальное исследование опτικο-электронного прибора двух спектральных отношений для обнаружения очагов возгорания на ранней стадии в газодисперсной среде в условиях, близких к реальным	137
4.1	Методики экспериментального определения параметров опτικο-электронного прибора двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы в условиях близких к реальным.....	142
4.1.1	Методика определения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех	142
4.1.2	Методика определения времени обнаружения очага возгорания	143
4.2	Результаты определения параметров опτικο-электронного прибора двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы в условиях близких к реальным.....	146
	Заключение	149
	Список использованных источников	151
	Приложение А. Акты внедрения	162

ВВЕДЕНИЕ

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

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

источников внешних оптических помех, является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное экономическое и хозяйственное значение.

Степень разработанности темы. Существенный вклад в проработку методов проектирования ОЭП внесли такие учёные, как Свет Д.Я., Поскачей А.А., Чубаров Е.П., Мирошников М.М., Якушенков Ю.Г. Их работы содержат фундаментальные основы проектирования и расчёта ОЭП для различных областей, в том числе рассматривается возможность построения многоканальных ОЭП и систем. Проблемы борьбы со взрывами пыли и газа на горнодобывающих предприятиях освещены в работах Шевцова Н.Р., Нецепляева М.И., Осипова С.Н. и других учёных, работы которых в значительной мере способствовали изучению вопросов возникновения очага возгорания, процессов его развития и способов локализации. В настоящее время работы в области промышленной безопасности горнодобывающих предприятий ведутся в АО «НЦ ВостНИИ» (г. Кемерово). Анализ трудов указанных учёных показал, что в них не рассматриваются вопросы создания ОЭП контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, сочетающих в себе высокое быстродействие, нечувствительность к оптическим помехам и наличию пыли в промежуточной среде.

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

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие частные задачи:

- 1) разработать теоретические принципы построения ОЭП двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы;
- 2) на основе компьютерного моделирования выработать технические решения для построения ОЭП двух спектральных отношений;

3) разработать стенд для исследования спроектированного прибора в лабораторных условиях и определить значения основных параметров прибора, разработав соответствующие методики;

4) проанализировать возможность использования прибора в промышленных условиях, проведя исследование в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

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

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

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

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1) предложен новый принцип построения ОЭП контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, основанный на измерении потока теплового излучения в трёх диапазонах спектра, вычислении двух спектральных отношений, на основе которых принимается решение о наличии или отсутствии очага возгорания в поле зрения ОЭП при времени обнаружения очага возгорания не более 5 мс, вероятности обнаружения не менее 0,95 в условиях запылённой промежуточной атмосферы и присутствии оптических помех;

2) предложена и разработана математическая модель оптической системы ОЭП двух спектральных отношений, позволяющая выполнять энергетический и геометрический расчёты по заданному отношению сигнал-шум и значению угло-

вого поля с учётом параметров очага возгорания, источников помех и промежуточной среды;

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

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

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

Положения, выдвигаемые на защиту:

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

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

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

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

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

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

за работу «Снижение риска и последствий техногенных катастроф на объектах со взрывоопасными газодисперсными средами» (2011 г.).

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

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

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

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ ОЧАГОВ ВОЗГОРАНИЯ НА РАННЕЙ СТАДИИ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ И ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИХ РАБОТУ

1.1 Возникновение очагов возгорания и средства их обнаружения на ранней стадии в газодисперсной системе

Наличие горючей газодисперсной атмосферы характерно для многих промышленных предприятий (нефтегазовая и горнодобывающая промышленность, деревообрабатывающая промышленность, элеваторы, мукомольное производство и др.). Особенностью таких газодисперсных атмосфер является способность к возгоранию и последующему взрыву, что может привести к трагическим последствиям на производстве. Типичным видом предприятий, где присутствует горючая газодисперсная атмосфера, являются горнодобывающие предприятия. Кроме того, с учётом тяжести последствий аварий, произошедших в результате взрывов (вспышек) метана и угольной пыли, разработка средств обнаружения очагов возгорания для угольных шахт становится крайне актуальной.

1.1.1 Физические явления, сопровождающие очаг возгорания

Устройства обнаружения загораний основаны на измерение параметров физических процессов, которые возникают в процессе развития очага возгорания [1]. Совокупность параметров может характеризовать как сам очаг возгорания, так и изменения свойств среды в помещении. Параметры, сопровождающие возникновение и развитие очага возгорания, делят на две группы [1]: связанные с процессом массопереноса (I) и не связанные с процессом массопереноса (II).

Массоперенос при горении возникает вследствие образования конвекционных газовых потоков, которые обеспечивают поступление свежего воздуха в зону горения и отвод продуктов горения из неё. Таким образом, к параметрам группы I относят выделение газообразных продуктов горения (в основном окиси и двуокиси углерода) и твёрдых частиц – дыма. При этом происходит изменение оптиче-

ских свойств газовой среды и становится возможным обнаружение очага возгорания по характерным спектрам излучения продуктов горения.

К параметрам группы II относят спектральный состав и интенсивность излучения, флуктуации интенсивности излучения. Спектральный состав излучения и его интенсивность зависят от мощности очага возгорания, горючего материала и типа горения (тлеющее или пламенное) и меняется по мере развития очага горения. При пламенном горении с течением времени, кроме того, происходит флуктуация интенсивности излучения вследствие «мерцания» пламени. Ранее считалось [1], что обнаружение тлеющего горения практически невозможно, но развитие современной элементной базы, в частности совершенствование приёмников оптического излучения, позволяет решить эту задачу.

Также к информационным параметрам загораний II группы относят изменение температуры как в зоне возникновения очага возгорания, так и в окружающей среде. Кроме температуры информационными параметрами очага возгорания, связанными с температурой, являются скорость роста температуры и её флуктуации.

Ещё одним информационным параметром, указывающим на возникновение очага пожара в помещении, является появление инфранизкочастотных флуктуаций давления воздуха в закрытом объёме. Для изохорного процесса в закрытом помещении изменение давления прямо пропорционально температуре. Для реального пожара изменение давления максимально на начальной стадии развития и зависит от объёма помещения, степени его герметичности, вида и площади открытой поверхности пожарной нагрузки [2]. Это явление позволяет разрабатывать датчики обнаружения очага пожара, основанные на анализе изменения характеристик акустических процессов в воздушной среде охраняемого помещения.

В работе «Разработка способа акустической идентификации горения угля для диагностики очагов пожаров в угольных пластах» Борисенко Д.И. указывает [3]: «непрерывность акустического излучения в течение всего процесса горения угля и критических процессов, предшествующих его возгоранию, отличает его от дискретных акустических импульсов, возникающих при других процессах, происходящих в угольном массиве». Таким образом, частота акустических сигналов

зависит от образца горной породы, но является типичной для каждого угля, что может служить отличительным признаком, позволяющим идентифицировать горение.

1.1.2 Существующие средства обнаружения очагов возгорания в газодисперсной среде (на примере угольной шахты)

Рассмотренные выше факторы, сопровождающие возникновение очага возгорания, могут быть обнаружены с помощью различных датчиков. Далее проанализированы способы их построения и проведён обзор датчиков разработанных и используемых для обнаружения очагов возгорания в настоящее время.

1.1.2.1 Датчики давления

Известен способ определения координат очага пожара в глубине угольного массива и система для его осуществления [4]. Способ состоит в регистрации акустических сигналов, возникающих при горении. Акустические сигналы регистрируются сейсмоприёмниками, разнесёнными по горной выработке, с которых по каналам передачи информации (например, в виде проводящих кабелей или оптоволоконных кабеле или радиоволн) сигнал передают на блок обработки сигнала и принятия решения. В блоке обработки сигнала и принятия решений осуществляется сопоставление образа полученного сигнала с образом эталонного сигнала, установленного при тарировке. К недостаткам описанной системы можно отнести необходимость её предварительной настройки на конкретный угольный пласт.

В литературе [5] указывается невозможность практического применения акустических датчиков вследствие их недостаточной помехозащищённости и низкой надёжности. На момент написания работы данные о технических характеристиках указанной системы и о внедрении системы найдено не было.

1.1.2.2 Датчики дыма

Дым является наиболее характерным признаком пожара, который практически всегда сопровождается образованием большого количества дымовых частиц [1]. Так как дым может появляться на ранних стадиях нагрева вещества, то возможно определение возгорания по наличию аэрозольных следов в воздухе.

Дымовые датчики подразделяются по принципу действия на ионизационные и фотоэлектрические [6]. Работа ионизационных датчиков основана на принципе изменения электропроводности воздуха, облучённого α -лучами радиоактивного источника. Фотоэлектрические дымовые датчики строятся на эффектах поглощения и отражения световой энергии частицами дыма, в результате изменяется и оптическая плотность воздушной среды.

Рабочие характеристики ионизационного (радиоизотопного) и фотоэлектрического с полупроводниковым излучателем датчиков примерно одинаковые. Различие состоит в чувствительности к отдельным видам дыма. Ионизационные (радиоизотопные) датчики имеют большую чувствительность к продуктам горения из мелких частиц. Фотоэлектрические датчики лучше реагируют на продуктах горения из укрупнённых частиц аэрозолей. Их используют, если возможный очаг возгорания будет иметь светлый дым, например, при начальной стадии тления целлюлозосодержащих материалов.

Дымовые ионизационные датчики чувствительны к влажности в помещении (недопустимо покрытие датчика росой или инеем) и к выделяющимся в производственном помещении веществам, приводящим к коррозии. Оптические датчики дыма не используются, если наряду с ними в охраняемом помещении установлены и работают устройства увлажнения воздуха или высокочастотные установки. Влияют на их эффективность и воздушные потоки, создаваемые вентиляцией.

Перечисленные выше ограничения показывают невозможность широкого применения дымовых датчиков для приборов обнаружения очага возгорания в угольных шахтах на ранней стадии его развития.

1.1.2.3 Датчики контроля газового состава атмосферы

Согласно источнику [7] состав атмосферы угольной шахты в основном состоит из трёх газов: кислорода O_2 , азота N_2 и метана CH_4 . Дополнительно в состав атмосферы входят другие предельные и непредельные углеводороды (ацетилен C_2H_2 , этилен C_2H_4 , этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , пропилен C_3H_6 , бутан C_4H_{10}) и другие токсичные горючие газы (оксид углерода CO , сероводород H_2S , сернистый газ SO_2 , аммиак NH_3 и др.). Концентрация токсичных горючих газов в рудничном воздухе никогда не достигает взрывоопасных пределов [7], поэтому они не представляют опасности.

Состав поствзрывной атмосферы отличается от первоначально, тем, что в результате химической реакции взрыва метано–кислородной смеси в атмосфере появляются углекислый газ CO_2 и (или) окись углерода CO . Факт их появления и концентрация зависят от вида реакции взрыва и довзрывной концентрации метана. На контроль концентрации появившихся углеродосодержащих оксидов CO и CO_2 и ориентированы датчики обнаружения очага возгорания.

По принципу действия все газовые датчики можно классифицировать следующим образом [8]:

а) термокаталитические датчики. Принцип действия таких датчиков основан на каталитическом окислении молекул контролируемого газа на поверхности чувствительного элемента датчика и преобразовании выделяющегося тепла в электрический сигнал;

б) электрохимические датчики. В таких датчиках анализируемый газ вступает в химическую реакцию с электролитом ячейки, при этом возникают ионы, и начинает протекать ток. Ток пропорционален концентрации анализируемого компонента в пробе;

в) полупроводниковые датчики. Принцип действия основан на изменении поверхностного сопротивления полупроводникового материала в результате адсорбции детектируемого газа;

г) оптические датчики контроля газового состава атмосферы. Известно, что многие газы имеют характерные спектральные полосы поглощения в области инфракрасного излучения, обусловленного изменениями колебательно-вращательного состояния молекул газа. Принцип работы оптических датчиков определения концентрации газов основан на использовании в составе датчика источника излучения с известным спектром. Проходя через промежуточную среду, излучение ослабляется и по изменению ослабления излучения можно судить о концентрации определяемого газа.

Основной недостаток первых трёх типов датчиков – изменение структуры чувствительного элемента, что в условиях угольной шахты усиливается наличием паров кислотных и щелочных подземных вод, а также так называемых каталитических ядов (некоторые серосодержащие газы, пары силиконовых соединений техногенного происхождения и др.). Как следствие, долговечность датчиков этих типов низкая. Кроме того существует ограничение во времени измерения, которое зависит от времени протекания химических реакций и составляет несколько секунд.

Оптические газоанализаторы свободны от указанного недостатка, как следствие они являются более быстродействующими (быстродействие составляет доли секунды). Тем не менее, оптические газоанализаторы реагируют на вторичные признаки возникновения очага возгорания, поэтому они являются менее быстродействующими, чем датчики, реагирующие на первичные признаки очага возгорания.

В угольных шахтах газовые датчики, как правило, входят в состав комплекса контроля газового состава атмосферы и непосредственно для обнаружения пожара не используются. Примером системы аэрогазового контроля, предназначенной для применения в угольных шахтах является Granch МИС, производимая компанией НПФ «Гранч» [9].

1.1.2.4 Тепловые контактные датчики

В основе принципа действия тепловых контактных датчиков лежат тепловые свойства газов, жидкостей, металлов и полупроводников, явление термоэлектричества.

Обычно в подземных выработках шахт и рудников применяются два типа тепловых датчиков: максимального действия и максимально-дифференциального действия. Датчики максимального действия срабатывают при превышении заданного уровня температуры, а датчики максимально-дифференциального действия в случае повышения температуры окружающей среды на определённую величину за заданный промежуток времени.

Чувствительным элементом контактных тепловых датчиков является термомпара. Основными преимуществами таких датчиков является высокая помехозащищённость и сравнительная простота устройства. Недостатком является то, что для срабатывания датчика необходим непосредственный контакт чувствительного элемента с зоной повышенной температуры. Поэтому расстояние между датчиком и устройством взрывоподавления должно быть значительным (несколько десятков метров) [5]. Также тепловые контактные датчики являются инерционными (несколько секунд), что не позволяет обнаружить очаг возгорания на ранней стадии.

К тепловым датчикам также можно отнести термокабели [10]. Термокабель представляет собой линейный тепловой датчик, который позволяет обнаружить источник перегрева в любом месте на всем его протяжении. Термокабель также является инерционным (время отклика несколько секунд), может реагировать только на локальное повышение температуры (температура срабатывания датчика до 150–180 °С) в непосредственной близости от очага возгорания. Может использоваться в местах затруднённого доступа, например, конвейерные штреки.

1.1.2.5 Оптико-электронные датчики

Наиболее перспективны с точки зрения обеспечения быстродействия оптические датчики, реагирующие на световое излучение пламени в различных областях спектра: от ультрафиолетовой до инфракрасной [5].

Такие датчики получили наибольшее распространение для обнаружения очага возгорания в угольных шахтах. Так, в автоматической системе локализации взрывов СЛВА-1 используется датчик пламени с фотоприёмником инфракрасного излучения [11], реагирующий на пламя, образуемое в результате взрыва метана и угольной пыли, диаметром 0,8 м с расстояния 5 м.

Основные технические характеристики датчика пламени [11]:

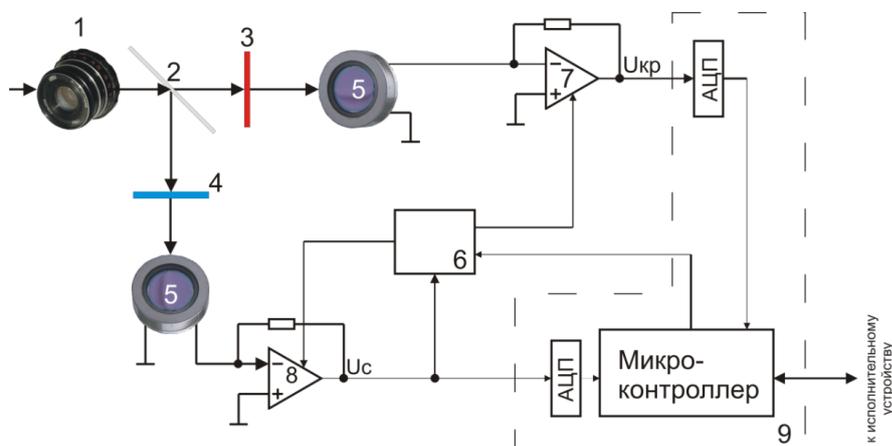
- угол обзора фотоприёмника датчика, градусы, не менее 70,
- быстродействие, с, не более 0,002.

При реализации датчика использован радиационный метод измерения температуры, отсюда вытекает основной недостаток датчика – на показания прибора оказывает влияние оптические свойства промежуточной среды, расстояние до очага возгорания, излучательная способность сгораемого вещества и продуктов горения. В условиях запылённой промежуточной оптической среды в угольной шахте это может привести к пропуску очага возгорания или обнаружению очага возгорания с неприемлемо длительной по времени задержкой.

Недостатки описанного выше датчика устранены в ОЭП обнаружения начальной стадии развития взрыва [12] (рисунок 1.1). Согласно работе «Оптико-электронный прибор обнаружения начальной стадии развития взрыва в газодисперсных системах» Сыпина Е.В. [12]: «Прибор предназначен для обнаружения очага возгорания на ранней стадии и формирования электроимпульса на запуск автоматических средств взрывоподавления в автономном режиме в случае превышения температуры охраняемого объекта». ОЭП обнаружения начальной стадии взрыва в газодисперсных системах имеет следующие параметры [12]:

- порог срабатывания, К 873,
- время срабатывания, мс, не более 1,

- длина охраняемой зоны, м, не более 35,
- предел допускаемой основной погрешности, К 50,
- напряжение питания, В 12.



- 1 – объектив; 2 – разделитель светового потока; 3, 4 – светофильтры;
 5 – фотодетекторы; 6 – блока термостабилизации темновых токов;
 7, 8 – усилители-преобразователи; 9 – блок микроконтроллера

Рисунок 1.1 – Структурная схема ОЭП обнаружения начальной стадии развития взрыва в газодисперсных системах [12]

В работе Сыпина Е.В. «Оптико-электронный прибор обнаружения начальной стадии развития взрыва в газодисперсных системах» автором приводится алгоритм работы разработанного прибора [12]: «Излучение охраняемого объекта приходит на объектив 1 и разделяется светоделительной пластиной 2 на два потока, причём деление происходит пополам. Каждый из этих потоков через светофильтры 3 или 4 с разными спектрами пропускания попадают на фотодетекторы 5. Для упрощения электронной части прибора используются одинаковые фотодетекторы для каждого канала. Конструкция оптической части прибора устроена таким образом, что объектив 1 фокусирует потоки (после деления) на чувствительные окна фотодетекторов. Светофильтры 3 и 4 выделяют из светового потока различные участки спектра. Сигналы с фотодетекторов 5 подаются на усилители 7, 8 и усиливаются ими. Для исключения влияния температуры корпуса датчика на значение сигналов с фотодетекторов в приборе предусмотрен блок термостабили-

зации темновых токов фотодетекторов 6. Сигналы с усилителей подаются в исполнительную схему, которая состоит из блока микроконтроллера 9. Блок микроконтроллера вычисляет отношение двух сигналов с усилителей 7, 8 и по полученному значению принимает решение о начале возгорания.».

Датчик не обладает достаточной помехозащищённостью от внешних оптических помех. По имеющимся данным, достоверность принятия решения датчиком при отсутствии внешних оптических помех не хуже 0,95; при наличии внешних оптических помех не лучше 0,15. Поэтому датчик устанавливается в такое помещение шахты, где отсутствует обслуживающий персонал шахты и возможные источники посторонних засветок. Таким образом, в настоящее время актуальной является задача разработки подобных приборов с повышенной помехозащищённостью, которые могли бы устанавливаться в любое помещение шахты.

1.2 Влияние промежуточной среды в угольной шахте на обнаружение очага возгорания пирометрическим методом

Под промежуточной средой понимают твёрдые, жидкие и газообразные вещества, находящиеся между оптическим датчиком и объектом контроля. В таблице 1.1 приведены полученные в результате экспериментальных исследований погрешности определения температуры тремя видами ОЭП в различных условиях поглощающей среды [13].

Таблица 1.1 – Влияние промежуточной среды на точность трёх типов ОЭП [13]

Тип ОЭП	Погрешность, %, вследствие поглощения слоем толщиной 1 м				
	воды	перегретого пара	конденсированного пара	воздуха с брызгами	углекислого газа
Суммарного излучения	30	8	–	15	1,3
Частичного излучения с кремниевым приёмником излучения	2,5	0,3	2,5	7,5	0
Спектрального отношения с кремниевым приёмником излучения	1	0	1	0,1	0

Согласно данным, приведённым в таблице 1.1, промежуточная среда может оказывать значительное воздействие на показание оптических датчиков, приводить к существенным погрешностям, делать работу последних невозможной. Влияние промежуточной среды также необходимо учитывать при выборе типа ОЭП.

1.2.1 Состав промежуточной газодисперсной среды

Газодисперсная среда представляет собой систему, состоящую из двух и более компонентов, из которых одна, называемая дисперсной фазой, находится в состоянии измельчения и более или менее равномерно распределена внутри другой, имеющей непрерывное строение и носящей название дисперсной среды. Атмосфера угольной шахты – пример газодисперсной системы. Она состоит из смеси газов и мельчайших частиц твёрдого минерального вещества – рудничной пыли.

Рудничный воздух представляет собой смесь атмосферного воздуха, активных газов и смеси газов N_2 и CO_2 – так называемого «мёртвого воздуха».

«Правилам безопасности в угольных шахтах» [14] регламентируют состав рудничного воздуха. Так, при нахождении персонала в выработке объём кислорода должен быть не менее 20 %, объём диоксида углерода – не более 0,5 % на рабочих местах и не более 0,75 % – на исходящей струе. Допустимая концентрация метана согласно [14] не должна превышать:

- в вентиляционной струе, исходящей из шахты, крыла – 0,75 %;
- в вентиляционной струе, исходящей из участка, очистного забоя и подготовительной выработки – 1,0%;
- в вентиляционной струе, поступающей в очистные и подготовительные забои – 0,5 %;
- местные скопления – 2,0 %.

Газовый состав атмосферы подробно рассмотрен в работах [7, 15]. К основным ядовитым примесям рудничного воздуха относят следующие газы:

- 1) окись углерода CO (допустимая концентрация – не более 0,0016 % в течение 6–7 часов и не более 0,008% – при кратковременном воздействии);

- 2) сероводород H_2S (допустимая концентрация – не более 0,00066 %);
- 3) сернистый газ SO_2 (допустимая концентрация – не более 0,00035 %);
- 4) окислы азота (NO , NO_2 , N_2O_4) (допустимая концентрация – не более 0,00026 % в пересчёте на NO_2);
- 5) акролеин CH_2CHCHO (допустимая концентрация – 0,000009 %);
- 6) метан CH_4 . В горных выработках метан выделяется с обнажённых поверхностей угольных пластов, из отбитого угля, выработанного пространства и в небольших количествах с обнажённой поверхностью пород. Метан образует с воздухом горючие и взрывчатые смеси. При концентрации метана в воздухе менее 5 % газ горит около источника тепла, при содержании газа 5–14 % – он взрывается, а более значении 14 % метан не горит и не взрывается, но возможно горение газа у источника тепла при притоке кислорода извне.
- 7) выхлопные газы, которые состоят из многих компонентов и образуются при неполном сжигании топлива, например, окисления серы, разложения сложных эфиров смазочных масел и т.п.

Рудничная пыль состоит в основном из угольных и породных частиц. Она может содержать также незначительные примеси металлов, образующиеся в результате истирания буровых коронок, рельсов и других трущихся металлических поверхностей. Пыль образуется на всех процесса горного производства. Согласно [16] первичными источниками пылеобразования являются: буровые работы, взрывные работы, погрузочно-разгрузочные работы, дробление и транспортирование руды по откаточным выработкам. Вторичными источниками пылеобразования является ранее осевшая пыль. Физические и физико-химические свойства угольной пыли изложены в литературе [15, 17, 18].

Значительное влияние на интенсивность излучения объекта контроля оказывает содержание влаги в промежуточной среде угольной шахты. В среднем в угольных шахтах влажность составляет от 80 до 90 %, в калийных шахтах от 15 до 60 % [15]. Содержание естественной влаги в угле незначительно, но влага действует на угольную пыль как инертная добавка [5], связи с этим применяют специальные методы гидропылевзрывозащиты: побелка выработок известково-

цементным раствором, мокрая уборка пыли (обмывка), связывание пыли водными растворами смачивателей или гигроскопическими смачивающе-связующими составами (жидкими или пастообразными), а также с помощью непрерывно действующих туманообразующих завес.

1.2.2 Оптические свойства промежуточной газодисперсной среды

В результате прохождения излучения через среду оно ослабляется за счёт различных процессов взаимодействия излучения со средой. Условно процессы взаимодействия излучения со средой делят на два вида [19, 20, 21]: поглощение излучения газовыми компонентами среды и ослабление за счёт взаимодействия с твёрдыми и жидкими частицами, находящимися в промежуточной среде. Для угольной шахты такими частицами будут частицы воды и угольная пыль.

1.2.2.1 Поглощение промежуточной средой

Поглощение вызвано наличием в промежуточной среде ряда газообразных веществ, спектральные полосы поглощения которых расположены в оптической области [20, 22]. Поглощение является избирательным и зависит от длины волны излучения. Поглощение для неоднородной среды может быть описано законом Бугера [21]

$$I_l(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp \left[- \int_0^l k_n(\lambda, l) dl \right], \quad (1.1)$$

где I_l – сила излучения, прошедшего путь l ; I_0 – сила излучения в начале трассы; $k_n(\lambda, l)$ – монохроматический коэффициент поглощения.

Монохроматический коэффициент поглощения можно рассчитать на основе учёта влияния поглощения излучения данной длины волны или частоты каждой линии спектра, а также на основе моделей, описывающие поглощение в полосе. Коэффициент поглощения может быть определён экспериментально. В настоящее время имеется достаточное количество спектроскопических баз, содержащих све-

дения о коэффициентах поглощения для различных молекул и газовых смесей, например, спектроскопическая база HITRAN [23] и другие [24].

Избирательность по спектру поглощения описывается спектральным пропусканием и спектральным поглощением среды. Спектральное пропускание среды задаётся функцией вида [21]

$$\tau_{\lambda} = \tau(\lambda) = \frac{I_l(\lambda)}{I_0(\lambda)},$$

где I_l – сила излучения, прошедшего путь l ; I_0 – сила излучения в начале трассы; λ – длина волны. Соответственно спектральное поглощение определяется как

$$\alpha_{\lambda} = \alpha(\lambda) = \frac{[I_0(\lambda) - I_l(\lambda)]}{I_0(\lambda)}.$$

Для участка $\Delta\lambda$ пропускание и поглощение задаются функциями [21]

$$\tau = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\Delta\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda,$$

$$\alpha = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\Delta\lambda} \alpha_{\lambda} d\lambda.$$

Как было указано выше, в газовый состав промежуточной среды угольной шахты входит атмосферный воздух и некоторые газы, специфичные для шахты, из которых метан присутствует в наибольшей концентрации. Из составляющих компонент атмосферного воздуха сильнее всего излучение поглощается парами воды и углекислым газом [22]. На рисунке 1.2 показано спектральное пропускание земной атмосферы в оптическом диапазоне [19].

В атмосфере существует определённое число окон прозрачности – областей, внутри которых поглощение незначительно. Согласно работе «Теория и расчёт оптико-электронных приборов» Якушенкова Ю.Г. [21]: «Эти окна расположены в следующих интервалах длин волн: 0,4–1,0 мкм, 1,2–1,3 мкм, 1,5–1,8 мкм, 2,1–2,5 мкм, 3–5 мкм, 8–13 мкм». Выбор рабочих длин волн оптического датчика должен проводиться таким образом, чтобы они находились внутри окон прозрачности атмосферы.

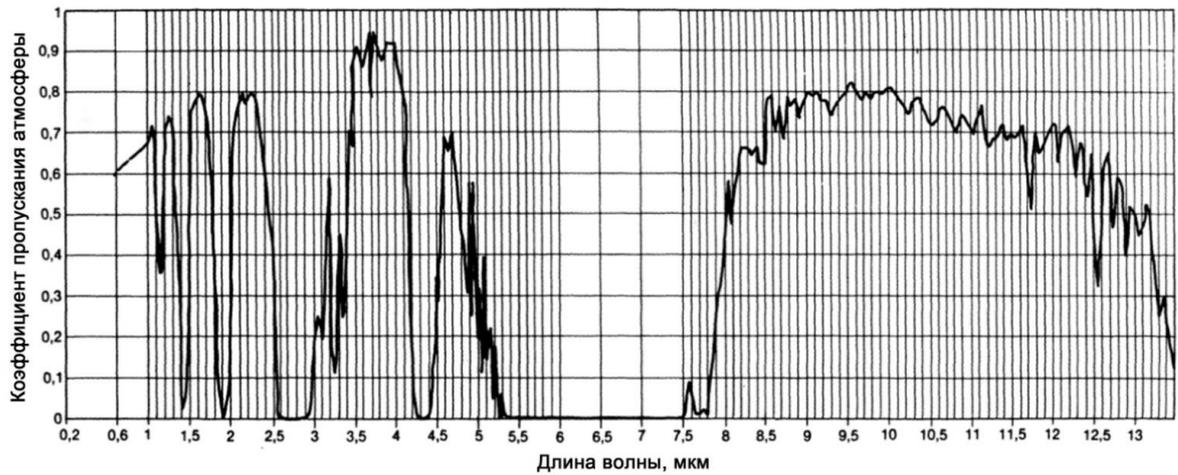


Рисунок 1.2 – Спектральный коэффициент пропускания атмосферы
 (длина трассы 1,852 км; толщина слоя осаждённой воды 17 мм;
 метеорологическая дальность видимости 20 км (при длине волны 0,6 мкм);
 спектральное разрешение 0,025–0,050 мкм)

В угольной шахте кроме атмосферных газов, в достаточном количестве присутствует метан, поэтому необходимо учитывать также поглощение молекулами этого газа. Спектр поглощения метана показан на рисунке 1.3 [25].

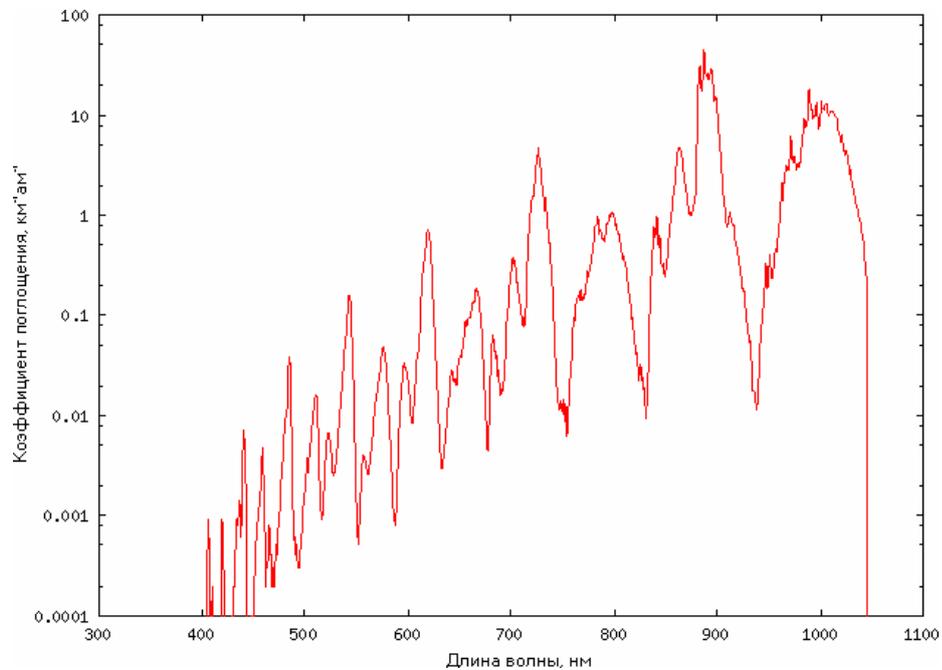


Рисунок 1.3 – Спектр поглощения метана

Наличие в промежуточной среде взвешенных твёрдых частиц (угольной пыли) существенно изменяет поглощающую способность промежуточной среды. Поглощательная способность промежуточной среды будет определяться размерами, концентрацией и физическими свойствами твёрдых частиц [26]. Спектральный коэффициент поглощения среды определяется как

$$k_n(\lambda) = \frac{\mu}{\gamma} k(r_o),$$

где μ – концентрация поглощающих частиц; γ – плотность частиц; $k(r_o)$ – функция, определяемая размерами частиц. При больших значениях оптических размеров частиц r_o величина $k_n(\lambda)$ стабилизируется и перестает зависеть от оптического диаметра частиц.

Таким образом, поглощение является важным процессом при распространении излучения и его необходимо учитывать, вводя соответствующие коэффициенты при расчёте излучения, приходящего на входной зрачок прибора.

1.2.2.2 Рассеяние энергии излучения частицами промежуточной среды

Рассеяние излучения связано с дифракцией электромагнитных волн на аэрозольных частицах и на флуктуациях плотности воздуха [20]. Рассеяние излучения на частице включает в себя не только чистое рассеяние, но и поглощение излучения веществом из которого частица состоит. В связи с этим аэрозольное рассеяние также часто называют аэрозольным ослаблением.

Коэффициент аэрозольного ослабления $\sigma_a(\lambda)$ можно записать как [21]

$$\sigma_a(\lambda) = \sigma_p(\lambda) + \sigma_n(\lambda),$$

где $\sigma_p(\lambda)$ – коэффициент рассеяния (отношение рассеянного частицей излучения к излучению, падающему на частицу); $\sigma_n(\lambda)$ – коэффициент поглощения (отношение количества поглощённой частицей энергии к значению падающей на неё энергии).

Оптические параметры аэрозолей определяются их микрофизическими параметрами (концентрацией, диапазоном размеров, формой и т.д.), которые могут

изменяться даже в пределах одного и того же типа аэрозоля. Все это осложняет проблему разработки оптических моделей аэрозолей. Чаще всего аэрозольное ослабление описывают с помощью теории Ми как рассеяния на частицах сферической формы, которые удовлетворяют условию $\rho_{Ми} = 2\pi r / \lambda \geq \lambda$ [21], где $\rho_{Ми}$ – параметр рассеяния, используемый в теории Ми; r – радиус частицы; λ – длина волны.

В источнике [21] приводятся некоторые значения для коэффициента аэрозольного ослабления для частиц с различными размерами. Для дымки и тумана (размер частиц 0,1 ... 1 мкм) рассеяние уменьшается с ростом длины волны излучения. Если частицы тумана имеют размер частиц 1 ... 30 мкм коэффициент рассеяния остаётся постоянным.

Наряду с аэрозольным ослаблением, имеет место и молекулярное рассеяние. Для определения спектрального коэффициента молекулярного (релеевского) рассеяния используется формула

$$\sigma_{\text{рел}}(\lambda) = \sigma_{\text{рел}} \lambda = 0,83NA^3\lambda^{-4},$$

где N – число молекул в 1 см^3 ; A – площадь поперечного сечения молекулы, см^2 , λ – длина волны излучения, см. Коэффициенты молекулярного рассеяния для $l = 10 \text{ км}$ приведены в таблице 1.2 [21].

Таблица 1.2 – Коэффициенты молекулярного рассеяния для $l = 10 \text{ км}$

λ , мкм	$\sigma_{\text{рел}}(\lambda)$, см^{-1}	τ , %
0,35	$79,3 \cdot 10^{-8}$	45
0,55	$12,3 \cdot 10^{-8}$	89
0,76	$3,30 \cdot 10^{-8}$	97
1,00	$1,09 \cdot 10^{-8}$	99
1,20	$5,25 \cdot 10^{-9}$	–
3,00	$1,33 \cdot 10^{-10}$	–
5,00	$1,73 \cdot 10^{-11}$	–

На основе анализа спектральных коэффициентов молекулярного рассеяния $\sigma_{\text{рел}}(\lambda)$ и коэффициента спектрального пропускания τ , приведённых в табли-

це 1.2, видно, что молекулярным рассеиванием в инфракрасной области можно пренебречь.

1.2.2.3 Собственное излучение частиц промежуточной среды

Если в промежуточной среде присутствуют частицы, нагретые до температуры, сравнимой с температурой объекта контроля, то излучение, воспринимаемое прибором контроля, будет представлять сумму излучения от объекта контроля и излучения от нагретых частиц среды. Сигнал на выходе оптического датчика запишется как [13]

$$U_{\text{н}} = \theta G [(s_0 - s_{\text{ч}})E_0 + s_{\text{ч}}E_{\text{ч}}],$$

где θ – коэффициент преобразования излучения фотоприёмником; G – параметр оптической системы; s_0 – площадь пятна визирования оптического датчика; $s_{\text{ч}} = \pi d_{\text{ч}}^2/4$ – площадь поверхности частицы, $s_{\text{ч}}$ – диаметр частицы; $E_0, E_{\text{ч}}$ – энергетическая яркость объекта и частицы.

В случае отсутствия частиц

$$U_{\text{н}} = U = \theta G s_0 E_0.$$

Погрешность определения температуры запишется как

$$U_{\text{н}} / U = (1 - \eta) + \eta E_{\text{ч}} / E_0,$$

где $\eta = \theta G s_{\text{ч}} E_0$.

Таким образом, промежуточная газодисперсная среда может оказать значительное влияние на работу ОЭП контроля, делая его работу в некоторых случаях невозможной. Поэтому при проектировании прибора оптические свойства промежуточной среды должны учитываться, например, при выборе спектральных диапазонов прибора и разработке алгоритма определения факта возгорания.

1.3 Внешние оптические помехи (на примере угольной шахты)

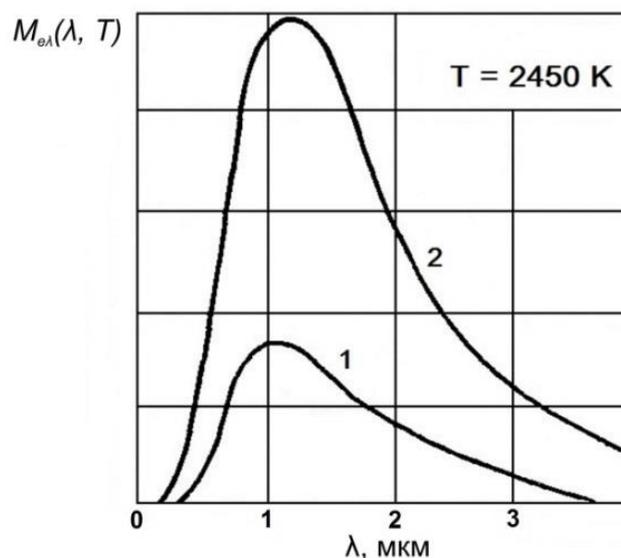
Выбор рабочих спектральных диапазонов длин волн ОЭП контроля взрывоопасной атмосферы должен осуществляться с учётом ряда факторов, в том числе влияния внешних оптических помех.

1.3.1 Источники искусственного освещения шахты

Шахтные светильники – это осветительные приборы, предназначенные для использования в угольных шахтах, рудниках, а также в других отраслях промышленности со взрывоопасными условиями. Основная особенность шахтных светильников – их взрывозащищённость, в шахтах применяются светильники РН, РП и РВ исполнения [16]. В качестве источников света в них могут использоваться: лампы накаливания, компактные люминесцентные лампы. Многие модели взрывозащищённых шахтных светильников нового поколения работают со светодиодами.

Вольфрамовые лампы накаливания являются источниками коротковолнового инфракрасного излучения [27]. Нить лампы имеет температуру около 3000 К, соответственно её максимум мощности излучения находится в области 1 мкм. Средний коэффициент излучения вольфрама при температуре 2800 К составляет 0,23 в диапазоне 2–3 мкм составляет 0,23 [28].

Вследствие зависимости коэффициента излучения вольфрама от длины волны кривы спектрального распределения излучения $M_{e\lambda}(\lambda, T)$ вольфрама будут отличаться от аналогичных кривых для абсолютно чёрного тела при той же температуре (рисунок 1.4).

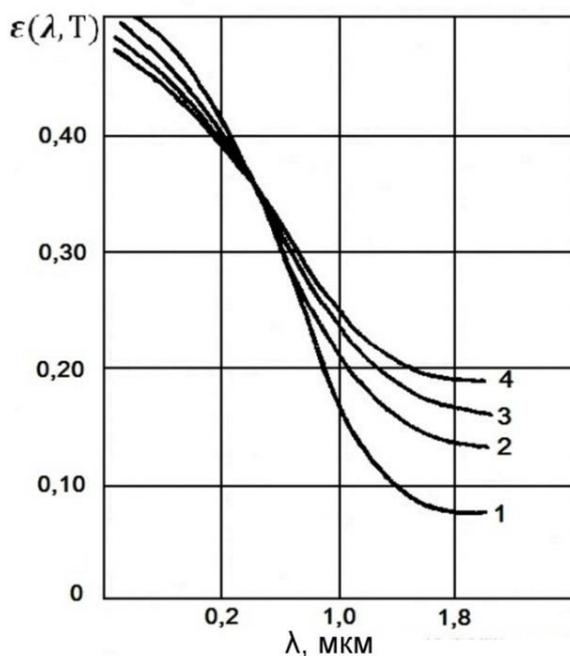


1 – вольфрам, 2 – абсолютно чёрное тело

Рисунок 1.4 – Кривые спектрального распределения излучения $M_{e\lambda}(\lambda, T)$ вольфрама и абсолютно чёрного тела

Для определения величин, характеризующих излучение вольфрама, пользуются законами излучения абсолютно чёрного тела и коэффициентами излучения: спектральным и интегральным. Спектральный коэффициент излучения вольфрама $\varepsilon(\lambda, T)$ зависит от температуры и длины волны (рисунок 1.5). Интегральный (или полный) коэффициент излучения определяется в спектральном диапазоне, охватывающем все длины волн, и согласно работе «Инфракрасная термография. Основы, техника, применение» Госсорга Ж. [19] «представляет собой отношение энергии излучения, испускаемого материалом при температуре T , к энергии излучения, испускаемого чёрным телом при этой же температуре».

Спектр излучения люминесцентных ламп (ЛЛ) включает две составляющие, которые накладываются друг на друга: спектр излучения люминофора (является преобладающим) и спектр излучения ртутного разряда.



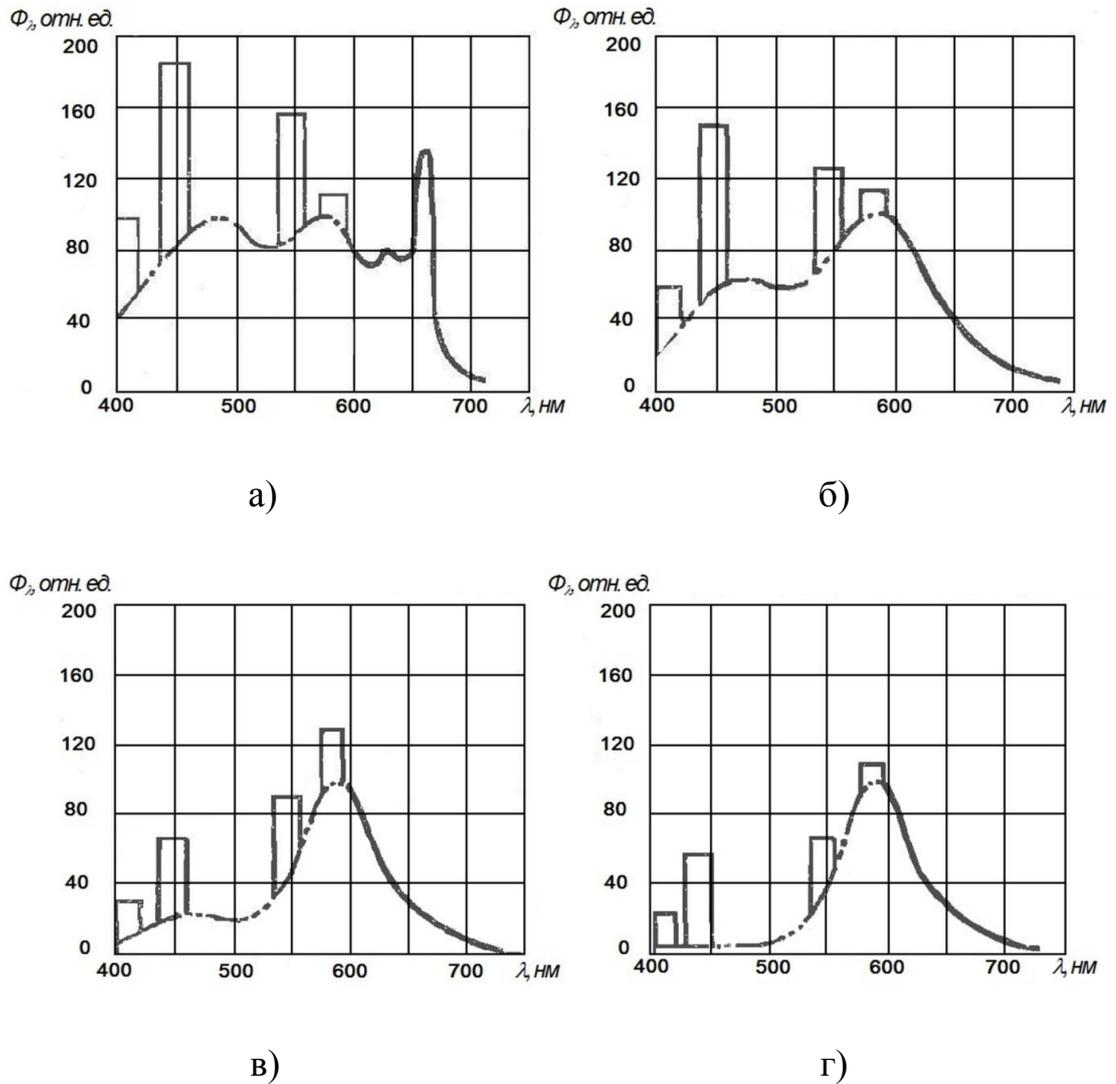
1 – при температуре 300 К; 2 – при температуре 1200 К;
3 – при температуре 1700 К; 4 – при температуре 2100 К

Рисунок 1.5 – Зависимость спектрального распределения излучения вольфрама от длины волны при различных температурах

Излучение разряда в парах ртути сосредоточено главным образом в двух линиях: $\lambda_1 = 0,2537$ мкм и $\lambda_2 = 0,1849$ мкм.

Согласно [29, 30] ЛЛ делятся на четыре типа в зависимости от спектрального состава (рисунок 1.6):

- лампы дневного света ЛД, имеющие цветовую температуру 6000 К;
- лампы холодного белого света ЛХБ, имеющие цветовую температуру 4300 К;
- лампы белого цвета ЛБ, имеющие цветовую температуру 3450 К;
- лампы тёплого белого цвета ЛТБ, имеющие цветовую температуру 2600 К.



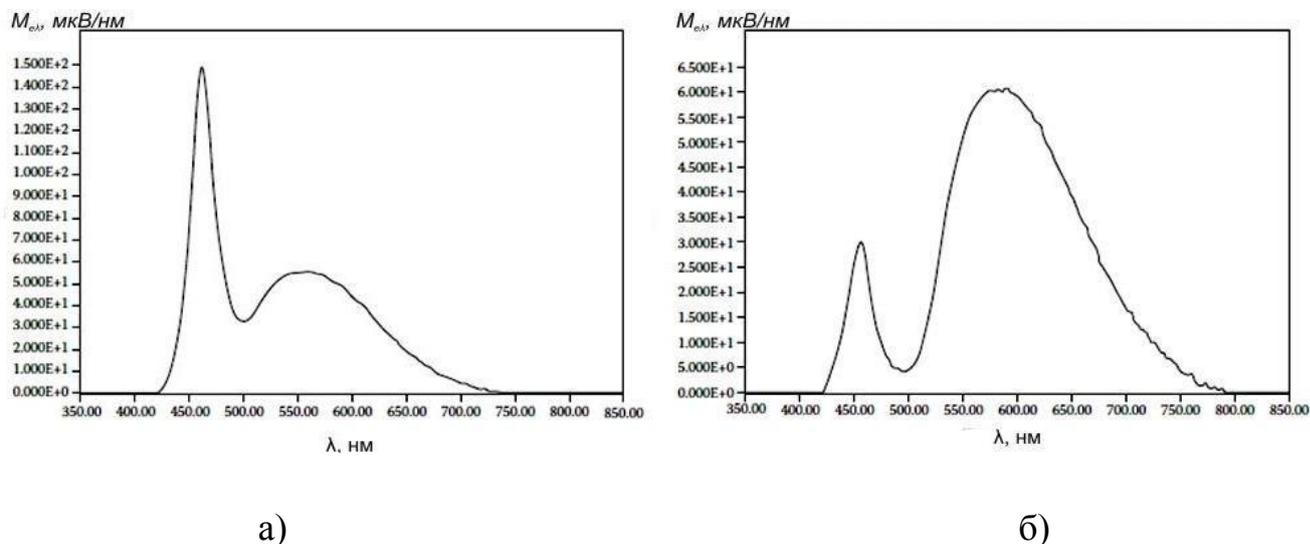
а) – лампа ЛД, б) – лампа ЛХБ, в) – лампа ЛБ, г) – лампа ЛТБ

Рисунок 1.6 – Спектральные характеристики излучения люминесцентных ламп

Конструкция светодиодного фонаря включает один или несколько «белых» светодиодов. Для того чтобы получить белый цвет свечения используются различные способы. Один из них – совмещение с помощью оптической системы цветов трёх светодиодов, размещённых на одной матрице, по RGB-технологии. Во втором случае белый цвет получают за счёт покрытия светодиода люминофором.

На рисунке 1.7 приведены спектры излучения двух типов «белых» светодиода: на основе *p-n*-гетероструктуры InGaAlN и на основе индия-галлия нитрида InGaN («тёплый» белый светодиод) [31]. Показанные спектры излучения светоди-

одов (рисунок 1.7) по внешнему виду схожи со спектром излучения люминесцентных ламп.



а – светодиод на основе InGaAlN, б – светодиод на основе InGaN

Рисунок 1.7 – Спектральное распределение энергии излучения белых светодиодов

Из рассмотренных выше источников искусственного освещения наибольшее влияние на работу ОЭП контроля для обнаружения очага возгорания в газодисперсной атмосфере будут оказывать источники в виде ламп накаливания. Минимизировать возможное влияние других источников искусственного освещения позволяет выбор рабочего диапазона прибора в области свыше 700 нм.

1.3.2 Тепловое излучение нагретых объектов шахты

На показания прибора может оказать влияние тепловое излучение посторонних предметов (узлы оборудования, строительные и металлические конструкции). Чтобы описать распределения энергии по спектру длин волн для таких объектов можно воспользоваться законом Планка [21]:

$$M_{e\lambda} = M_e(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1}, \quad (1.2)$$

где $M_{e\lambda}$ – спектральная плотность энергетической светимости, $C_1 = 3,7415 \cdot 10^{-16}$ Вт·м², $C_2 = 1,43879 \cdot 10^{-2}$ м·К. При $\lambda T < 3000$ мк · К для практических расчётов можно использовать формулу

$$M_{e\lambda} = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1}.$$

Для расчёта потока излучения в выбранном спектральном диапазоне необходимо проинтегрировать выражение (1.2) в пределах $\lambda_1 \dots \lambda_2$. Также можно воспользоваться приближенной формулой, при этом необходимо разбить диапазон $\Delta\lambda$ на n участков

$$M_{\Delta\lambda} = \frac{C_1}{C_2^4} T^4 \left\{ \sum_1^n \frac{1}{n^4} [(n\lambda_n)^3 + 3(n\lambda_n)^2 + 6n\lambda_n + 6] \exp(-n\lambda_n) \right\},$$

где λ_n – значение длины волны в середине каждого участка.

Закон Планка применим только к абсолютно чёрному телу. На практике любой реальный тепловой излучатель имеет коэффициентом излучения (коэффициентом черноты) ε . Как уже было указано в п. 1.3.1, различают спектральный $\varepsilon(\lambda)$ и интегральный ε_T коэффициенты излучения.

В литературе [19, 28, 32] приводятся значения коэффициентов излучения различных материалов. Зависимость спектрального и интегрального коэффициентов излучения от длины волны определяется видом материала: металл или диэлектрик. Спектральный коэффициент излучения диэлектриков в общем случае увеличивается с ростом длины волны, а у металлов, наоборот, уменьшается. Интегральный коэффициент излучения диэлектриков с ростом температуры уменьшается, а металлов – увеличивается. Интегральный коэффициент излучения металлов ε_T зависит от состояния излучающей поверхности и степени её окисления. Для некоторых металлов выявлены функциональные зависимости коэффициента излучения ε_T от характера обработки поверхности, а также от её температуры и степени окисления [32].

1.3.3 Тепловое излучение обслуживающего персонала шахты

При проектировании прибора необходимо учитывать возможность появления в помещении, где установлен прибор обслуживающего персонала, так как человек также является источником теплового излучения. На рисунке 1.8 приведена зависимость спектрального коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda)$ человеческой кожи [19].

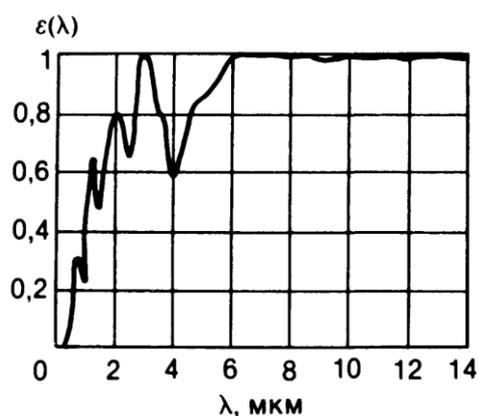


Рисунок 1.8 – Спектральный коэффициент излучения человеческой кожи

Так как кожа человека является диэлектриком, её коэффициент излучения в видимой области мал, а при переходе инфракрасный участок спектра становится достаточно большим. Например, при длине волны более 5 мкм коэффициент излучения имеет значение 0,98–0,99.

Согласно закону Вина максимум спектральной плотности энергетической светимости человеческого тела при 36,6 °С (или 309,6 К) находится на длине волны 9,4 мкм.

1.4 Способы повышения достоверности принятия решения о возгорании оптико-электронным прибором контроля взрывоопасной атмосферы

Одним из основных показателей функционирования приборов контроля является достоверность определения наличия или отсутствия очага возгорания. Частота ложных срабатываний или пропусков возгорания является основной характеристикой, по которой можно судить об устойчивости прибора по отношению к внешним оптическим засветкам.

Для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы широко используют ОЭП на основе метода спектрального отношения. Одним из таких приборов является ОЭП обнаружения начальной стадии развития взрыва в газодисперсных системах, описанный в п. 1.1.2.5. Как уже было рассмотрено выше, на показания прибора существенное воздействие будет оказывать промежуточная среда, а также внешние оптические помехи, исключить которые не представляется возможным. Таким образом, актуальной является задача разработки способов повышения достоверности принятия решения прибором.

1.4.1 Использование программной избыточности

Программная избыточность может служить средством для защиты от помех. Она реализуется программным путём, введением дополнительных алгоритмов при обработке сигналов.

В существующих приборах контроля температуры блок обработки информации выполнен на микропроцессоре [12], что позволяет реализовать достаточно просто алгоритмы обнаружения и принятия решения, в частности, методы, основанные на теории статистических решений [33]. На практике из указанных методов наиболее распространены методы Байеса [34] и Неймана-Пирсона [35].

Недостатком использования программной избыточности является увеличение времени обработки сигналов приборов, что в свою очередь, увеличивает время обнаружения очага возгорания и требует использования в приборе микропроцессоров с высоким быстродействием. Кроме того, использование в ОЭП всего двух каналов (например, как в классическом пирометре спектрального отношения) не всегда достаточно для получения полной информации о контролируемом объекте, поскольку в атмосфере угольной шахты вместе с источником возгорания могут присутствовать ряд других источников излучения. Следовательно, необходимо использовать другие способы повышения достоверности принятия решения прибором, позволяющие получить больше информации о контролируемом объекте.

1.4.2 Использование аппаратной избыточности

Включение в классический двухканальный пирометр спектрального отношения дополнительных каналов повлечёт за собой аппаратную избыточность прибора, но позволит собирать больше информации об объекте контроля.

Создание комбинированных приборов контроля, сочетающих в работе несколько способов обнаружения очага возгорания для производства с промежуточной газодисперсной средой не всегда возможно. Это связано с работой прибора в сложных условиях, где применение отдельных видов датчиков является затруднительным. Кроме того, прибор должен соответствовать ряду требований, в частности, обладать высоким быстродействием и независимостью показаний от свойств промежуточной среды. Поэтому как было установлено в результате проведённого аналитического обзора, наиболее перспективным будет включение в прибор дополнительных оптико-электронных каналов.

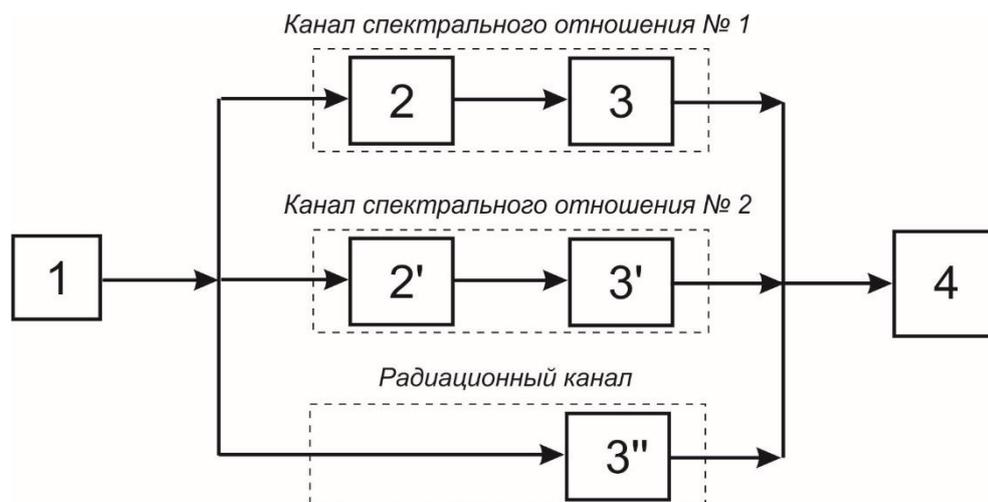
Существуют разработки многоканальных пирометрических приборов, где многоканальность используется как средство повышения точности измерения температуры [36, 37, 38, 39]. Кроме этого, использование многоканальности позволит строить приборы по компенсационному методу, то есть распознавать действующие на вход прибора оптические помехи и в дальнейшем при обработке информации осуществлять фильтрацию полезного сигнала и помехи. Таким образом, с использованием аппаратной и программной избыточности, прибор приобретает интеллектуальные свойства.

В соответствии с классификацией пирометрических приборов можно использовать следующие виды дополнительных каналов [40]: радиационный канал, монохроматический канал, несколько каналов, работающих по методу спектрального отношения.

1.4.2.1 Использование дополнительного радиационного канала

Структурная схема трёхканального пирометрического прибора с двумя каналами спектрального отношения и одним радиационным каналом показана на

рисунке 1.9. Прибор имеет три канала: два работают по методу классического спектрального отношения, а третий является радиационным.



1 – приёмная оптическая система; 2, 2' – светофильтры; 3, 3', 3'' – фотоприёмники;
4 – блок обработки информации

Рисунок 1.9 – Структурная схема трехканального пирометрического прибора с двумя каналами спектрального отношения и одним радиационным каналом

Принцип действия радиационного канала основан на использовании полного излучения нагретого тела. Абсолютное значение потока излучения Φ_e , которое в дальнейшем преобразуется в электрический сигнал определяется по формуле

$$\Phi_e = A \int_0^{\infty} M_{e\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda. \quad (1.3)$$

где A – коэффициент использования потока излучения от объекта, τ_{λ} – коэффициента спектрального пропускания оптической системы, $M_{e\lambda}$ – спектральная плотность энергетической светимости.

Если $M_{e\lambda}$ задано формулой Планка, то для вычисления интеграла в выражении (1.3) используют численные методы или решение графическим путём [21]. Чтобы определить абсолютное значение потока излучения при $\tau_{\lambda} = 1$ используется закон Стефана-Больцмана:

$$\Phi_e = A\sigma T^4, \quad (1.4)$$

где $\sigma = 5,6687 \cdot 10^{-12}$, постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

Достоинствам радиационного канала являются:

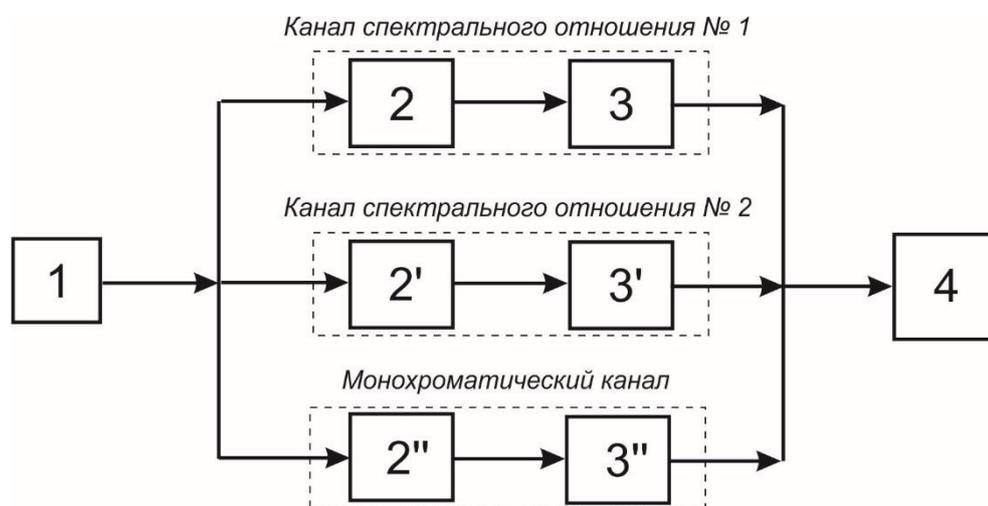
- простота практической реализации канала и его включения в конструкцию прибора,
- высокая разрешающая способность по сравнению с другими возможными видами дополнительных каналов.

Основной недостаток дополнительного радиационного канала – зависимость результатов измерения от излучательной способности ϵ объекта, а определение излучательной способности тела часто является не менее сложной задачей, чем измерение температуры. Недостатком является также зависимость показаний такого канала от расстояния до объекта, формы объекта, свойств промежуточной среды (запылённости и загазованности).

1.4.2.2 Использование дополнительного монохроматического канала

При использовании дополнительного монохроматического канала, в отличие от радиационного, измерение энергии оптического излучения происходит в узком диапазоне длин волн $\Delta\lambda$. Структурная схема трёхканального пирометрического прибора с двумя каналами спектрального отношения и одним монохроматическим каналом показана на рисунке 1.10.

Отличие состоит в использовании дополнительного элемента – оптического фильтра, назначение которого состоит в выделении диапазона длин волн $\Delta\lambda$. Если подходить строго, то часто и радиационные пирометры являются монохроматическими пирометрами: поток излучения от объекта ограничен спектральной характеристикой чувствительности используемого в канале фотоприёмника. Узкий участок спектра излучения объекта, отсекаемый светофильтром, позволяет настраиваться на длину волны, соответствующей максимуму излучения контролируемого объекта. Таким образом, исключаются посторонние засветки, вне диапазона излучения контролируемого объекта, что позволяет повысить достоверность принятия решения прибором.



1 – приёмная оптическая система; $2, 2', 2''$ – светофильтры;
 $3, 3', 3''$ – фотоприёмники; 4 – блок обработки информации

Рисунок 1.10 – Структурная схема трехканального пирометрического прибора с двумя каналами спектрального отношения и одним монохроматическим каналом

Поток излучения, приходящий на фотоприёмник для монохроматического канала, будет определяться формулой

$$\Phi_e = A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda} \tau_\lambda d\lambda, \quad (1.5)$$

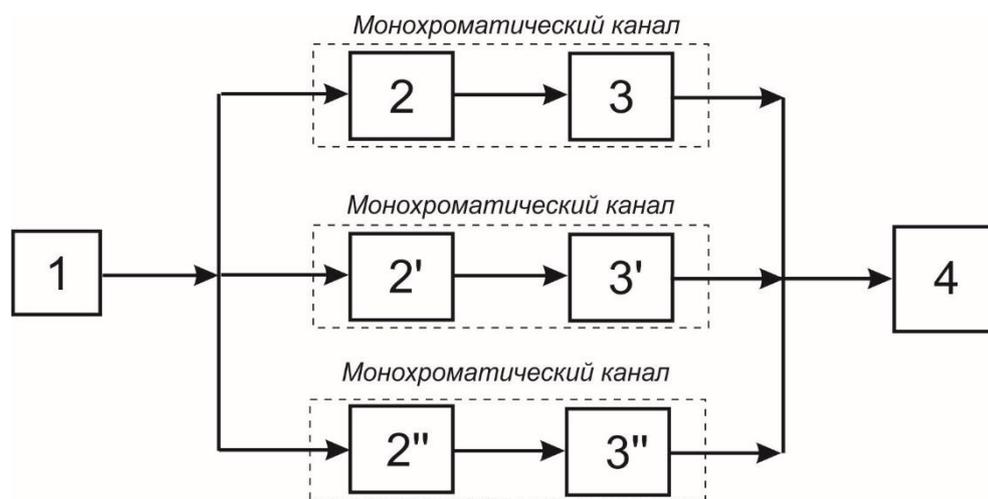
где λ_1, λ_2 – длины волн, определяющие пропускание светофильтра.

Достоинства и недостатки дополнительного монохроматического канала аналогичны достоинствам и недостаткам дополнительного радиационного канала.

1.4.2.3 Использование нескольких спектральных отношений

Измерение температуры по методу спектрального отношения основано на измерении интенсивности излучения в двух и более узких диапазонах спектра [40]. Метод спектрального отношения позволяет исключить все недостатки радиационных и монохроматических пирометров, а именно зависимость показаний прибора от расстояния до объекта и значительно снизить влияние промежуточной среды.

Многоканальный пирометр спектрального отношения включает в себя несколько (N) монохроматических каналов. При этом использование трёх каналов позволяет рассчитать два спектральных отношения, использование четырёх каналов – 6 спектральных отношений, использование пяти каналов – 10 спектральных отношений и т.д. На рисунке 1.11 показана структурная схема трёхканального пирометра двух спектральных отношений.



1 – приёмная оптическая система; $2, 2', 2''$ – светофильтры;
 $3, 3', 3''$ – фотоприёмники; 4 – блок обработки информации

Рисунок 1.11 – Структурная схема трёхканального пирометра двух спектральных отношений

На выходные сигналы каналов спектрального отношения также будет влиять излучательная способность измеряемого объекта, а именно её спектральная зависимость $\varepsilon = f(\lambda)$. Наличие спектральной зависимости может привести к тому, что сигнал на одном из каналов может оказаться заниженным по сравнению с другим каналом. Это приведёт к погрешности в показаниях прибора, но не более чем на 10%.

Указанная погрешность является допустимой при проектировании прибора контроля температуры, поскольку важным является не точное измерение температуры, а её превышение некоторого наперёд заданного порога. В работе «Оптико-электронный прибор обнаружения начальной стадии развития взрыва в газоди-

сперсных системах» Сыпина Е.В. отмечается [12]: «для практического применения в некоторых объектах контроля требуется определить момент времени резкого повышения температуры (возгорание), при этом начальная температура объекта контроля значительно ниже, чем температура после повышения, что позволяет выбрать порог срабатывания значительно ниже верхнего предела повышения температуры. Даже при значительной величине относительной погрешности факт повышения температуры будет обнаружен.». Таким образом, снижение точности прибора не будет влиять на достоверность принятия решения прибором. Снижение точности прибора скажется на увеличении времени принятия решения.

Основной недостаток при проектировании пирометров спектрального отношения – сложность конструкции. В случае проектирования многоканального прибора указанный недостаток не будет являться существенным, так как ввод дополнительного канала спектрального отношения в прибор будет идентичен вводу дополнительного монохроматического канала. Принципиальное отличие будет заключаться в алгоритме работы прибора, это будет реализовано программно в блоке обработки информации.

Из возможных вариантов введение аппаратной избыточности в прибор наиболее перспективным будет использование нескольких спектральных отношений. Это связано с особенностями эксплуатации прибора на предприятиях горнодобывающей отрасли:

- промежуточная газодисперсная среда может значительно ослабить излучение, проходящее на входной зрачок прибора. При определённом значении сигнала на входе прибор может указать на отсутствии очага возгорания, поскольку принимаемый сигнал будет ниже порога чувствительности датчика;

- неизвестны размер и расстояние до очага возгорания.

Дополнительный радиационный канал не может быть использован, поскольку он воспринимает весь поток излучения, в том числе и поток излучения от источников помех.

2 РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА ДВУХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЗРЫВООПАСНОЙ ПЫЛЕГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ

При проектировании ОЭП контроля перед разработчиком стоит ряд задач [41]:

- формулирование исходных требований к разрабатываемому прибору;
- разработка структурной схемы прибора;
- выбор схемы построения оптической системы прибора;
- энергетический и габаритный расчёты оптической системы;
- разработка электронной части прибора и написание программного обеспечения.

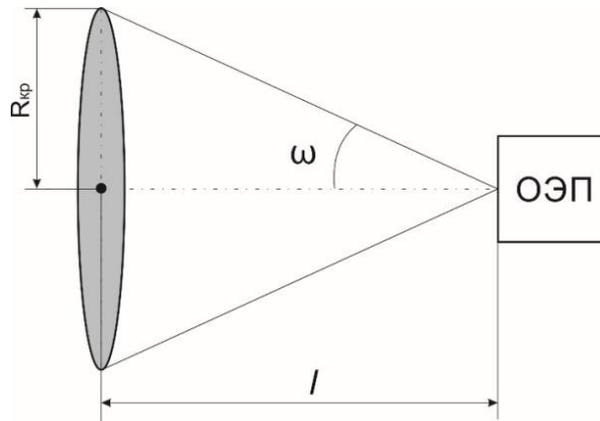
Следующими этапами является непосредственная реализация прибора и проведение испытаний.

2.1 Обзор параметров контролируемого объекта. Технические требования к разрабатываемому прибору

Технические параметры разрабатываемого прибора в первую очередь задаются параметрами контролируемого объекта, в качестве которого в настоящей работе выбрана угольная шахта (см. п. 1.1). Поэтому первым шагом в проектировании прибора должен стать анализ параметров контролируемого объекта, на основе которого будут сформулированы технические требования к разрабатываемому прибору.

Прибор контроля обеспечивает область охраняемой зоны, которая лежит внутри прямого конуса с вершиной в центре входного зрачка объектива прибора. Упрощённо конус, задающий область охраняемой зоны, принимается круговым (рисунок 2.1). Высота конуса l соответствует расстоянию от входного зрачка прибора до плоскости возникновения источника возгорания. Основание конуса

является кругом с радиусом $R_{кр}$ и соответствует площади охраняемой зоны. Далее охраняемую зону будем задавать через расстояние l и площадь охраняемой зоны.



ОЭП – опико-электронный прибор

Рисунок 2.1 – Пояснение к расчёту углового поля оптической системы

В соответствии с рисунком 2.1 выражение для определения углового поля запишется как

$$2\omega = 2\arctg\left(\frac{R_{кр}}{l}\right) = 2\arctg\left(\frac{1}{l}\sqrt{\frac{S_{оз}}{\pi}}\right), \quad (2.1)$$

где l – расстояние до входного зрачка прибора, $S_{оз}$ – площадь охраняемой зоны.

Площадь охраняемой зоны определяется минимально допустимой площадью сечения выработки, установленной Правилами безопасности в угольных шахтах и составляет 1,5–9 м² [14]. Расстояние от входного зрачка прибора до потенциального места возникновения очага возгорания на практике не превышает 10 м [5]. В подготовительной выработке, проводимой буровзрывным способом, это расстояние составляет 7–10 м, а при взрывозащите распределителя с двух сторон – 4–6 м. Согласно действующей нормативной документации на испытания приборов обнаружения очага возгорания [42] прибор должен реагировать на излучение от тестовых очагов ТП-5 и ТП-6 на расстоянии не менее 8 м.

Приняв в качестве площади охраняемой зоны среднее значение площади сечения выработки 5 м² и расстояние до входного зрачка 10 м, угловое поле прибора по формуле (2.1) должно быть равно 14,38 градусов.

Под вспышкой метана понимают «кратковременное и интенсивное сгорание ограниченных объёмов горючих рудничных газов и угольной пыли, не сопровождающееся образованием ударно-воздушной волны и разрушением горных выработок» [43]. Вспышка может перейти в воспламенение или во взрыв, последствия, которых могут быть разрушительными для всего угледобывающего предприятия.

Существует большое количество источников воспламенения в угольных шахтах: детонирующий заряд при проведении взрывных работ, фрикционное искрение, наличие нагретых объектов внутри шахты и т.д. Экспериментально установлено [5, 44], что температура, при которой происходит воспламенение метана, составляет порядка 630–1220 °С. Не меньшую опасность представляет угольная пыль, которая склонна к самовозгоранию и также может являться источником воспламенения метана. Температура воспламенения аэрозвеси пыли каменных углей зависит от стадии их метаморфизма и находится в диапазоне 575–850 °С [5].

Поскольку более 60 % действующих угольных шахт в России относятся к третьей категории опасности, сверхкатегорийным и опасным по внезапным выбросам угля и газа [45, 46], и причиной аварий в большинстве случаев является взрыв газа [47], в качестве характерной температуры контролируемого объекта принята наименьшая температура, при которой происходит воспламенение метана – 630 °С. Указанная температура будет определять пороговую чувствительность проектируемого прибора.

Не менее важным является время перехода вспышки во взрыв, которое составляет по данным исследований [48] от 10 до 20 мс, поэтому быстродействие системы обнаружения и локализации очага возгорания не должно превышать 10 мс. Вместе с тем согласно нормативным документам [49] инерционность срабатывания автоматической системы взрывоподавления должна быть не более 50 мс. С учётом того, что автоматическая система пожаротушения включает как минимум два компонента – прибор контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы и огнетушащее устройство – необходимо оценить быстродействия каждого компонента отдельно. Типичным примером устройства гашения взрывного горе-

ния является пылемётная газодинамическая мортира [50, 51], разработчиком которой является предприятие ООО Научно-производственное предприятие «Система промышленной безопасности». Быстродействие мортиры составляет 5 мс, из чего следует, что время срабатывания прибора для обнаружения очага возгорания не должно превышать 5 мс, или если принимать во внимание действующую в настоящее время нормативную документацию – 45 мс. При выборе параметров быстродействия прибора контроля необходимо ориентироваться на меньшее из указанных значений.

В общем случае на входной зрачок ОЭП контроля будет действовать поток излучения, представляющий сумму полезного сигнала (от очага возгорания) и паразитных сигналов от внешних источников помех. Источниками помех для проектируемого прибора будут являться в первую очередь излучение шахтных светильников и других нагретых объектов. В общем случае возможны четыре варианта принятия прибором контроля решения о виде сигнала, действующем на его вход, каждый из которых характеризуется определённой вероятностью возникновения [52] (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Варианты принятия решения прибором контроля

Вид сигнала	Принимаемое прибором решение	
	Обнаружен очаг возгорания	Очаг возгорания не обнаружен
Полезный сигнал	Правильное обнаружение $p_{по}$	Пропуск $p_{пр}$
Помеха / сигналы отсутствуют	Ложное срабатывание $p_{л}$	Правильное «необнаружение» $p_{но}$

При этом должны соблюдаться равенства

$$p_{по} + p_{пр} = 1,$$

$$p_{л} + p_{но} = 1.$$

В случае если на входной зрачок прибора действуют полезный сигнал и источники помех варианты принятия решения прибором контроля будут аналогичны вариантам при действии на его вход полезного сигнала и будут характеризо-

ваться вероятностями: $p_{\text{по п}}$ – вероятность правильного обнаружения в условиях внешних оптических помех, $p_{\text{пр п}}$ – вероятность пропуска возгорания в условиях внешних оптических помех. Эти параметры необходимо учитывать в случае, когда стоит задача достоверного обнаружения сигнала.

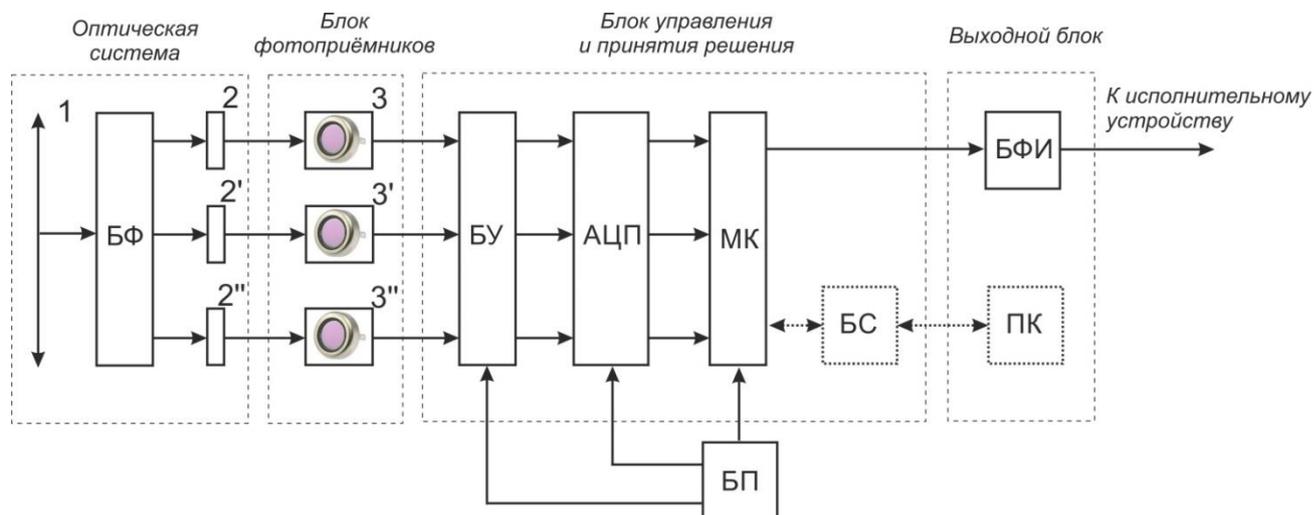
В литературе и нормативных документах, касающихся безопасности угледобывающих предприятий, не содержится информации о необходимом уровне обеспечения достоверности обнаружения сигнала и вероятности его правильного обнаружения. Вместе с тем в нормативных документах [53, 54] по определению расчётных величин пожарного риска вводится понятие вероятности эффективного срабатывания системы пожарной сигнализации, которая определяется технической надёжностью элементов системы пожарной сигнализации, приводимых в технической документации, в случае отсутствия таких сведений значение принимается равным 0,8. Фактически вероятность срабатывания системы определения возникновения пожара задаётся разработчиками. Разработчики современные приборов заявляют более высокую вероятность правильного обнаружения, чем установленное нормативной документацией значение 0,8, и гарантируют практически полное отсутствие ложных срабатываний [55, 56].

В результате анализа параметров контролируемого объекта и разработанных и функционирующих приборов обнаружения очага возгорания в газодисперсной среде [56–59] к проектируемому ОЭП контроля сформулированы следующие требования:

- угловое поле, градусы, не менее 14;
- дальность действия, м, не менее 10;
- порог чувствительности по температуре, °С 630;
- время обнаружения очага возгорания, мс, не более 5;
- вероятность обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех, не менее 0,95;
- вероятность ложного срабатывания, не более 0,05.

2.2 Разработка структурной схемы опико-электронного прибора двух спектральных отношений

На основе обобщённой схемы построения ОЭП [21, 60, 61] предложена структурная схема ОЭП двух спектральных отношений (рисунок 2.2).



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

Рисунок 2.2 – Структурная схема ОЭП двух спектральных отношений

Оптическая система включает объектив 1, блок формирования информационных сигналов БФ и светофильтры 2, 2', 2''. Световой поток от источника возгорания и других источников оптического излучения, находящихся в охраняемой зоне, с помощью объектива 1 фокусируется на чувствительных площадках фотоприёмников 3, 3', 3''. Блок формирования информационных сигналов БФ, находящийся между объективом и фотоприёмниками, осуществляет выделение из исходного потока излучения трёх информационных сигналов. В результате образуются три канала в приборе.

Затем каждый из трёх световых пучков проходит через светофильтры 2, 2', 2'' с различными спектральными диапазонами пропускания и попадает на фотоприёмники. Выходной сигнал каждого фотоприёмника приходит на соответствующий вход блока усиления. После усиления сигналы оцифровываются с помощью блока аналого-цифрового преобразования сигналов и обрабатываются посредством микроконтроллерного блока. Обработка сигналов микроконтроллером в простейшем случае состоит в усреднении по времени сигналов каналов и расчёте двух отношений, например, U_1/U_2 и U_1/U_3 . Таким образом, реализуется метод двух спектральных отношений для трёх каналов.

По результатам сравнения полученных спектральных отношений с заранее заданными значениями микроконтроллерный блок принимает решение о возникновении (или отсутствии) очага возгорания в угловом поле прибора. В случае возникновения возгорания блок формирования управляющего импульса БФИ формирует сигнал активации устройства пожаротушения.

Блок связи с персональным компьютером (БС) является опциональным, он необходим для первоначальной настройки и лабораторного определения параметров прибора.

Блок фотоприёмников является посредником между оптической и электронными частями прибора, поэтому далее блок фотоприёмников будет рассматриваться как в разделе, касающемся проектированию оптической системы прибора, так и в разделе, посвящённом разработке электронной части.

2.3 Оптическая система прибора

Функции оптической системы (ОС) в ОЭП контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы сводятся к обеспечению заданного значения отношения сигнал-шум на выходе приёмника излучения и определению характерных признаков, поступающих на её входной зрачок оптических сигналов, на основе чего становится возможным выделение полезного сигнала на фоне помех [21, 60, 62]. В результате

проектирования ОС прибора должны быть получены значения конструктивных параметров составляющих её компонентов, а также их взаимное расположение.

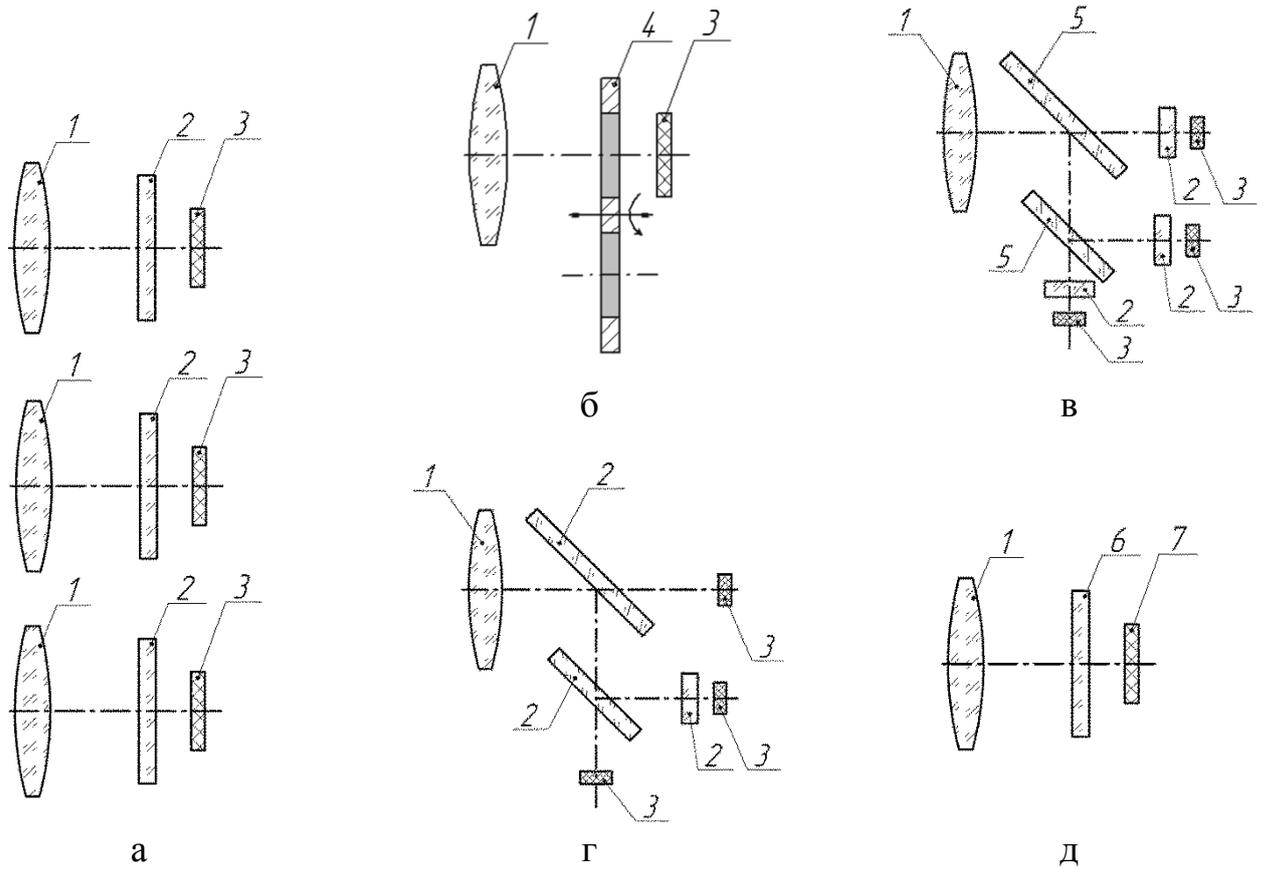
2.3.1 Выбор схемы построения оптической системы

Помимо общих функций, присущих любой ОС оптико-электронного прибора, ОС разрабатываемого ОЭП двух спектральных отношений должна решать задачу разделения светового потока, приходящего на её входной зрачок на три информационных сигнала.

Рассмотрены возможные схемы построения оптических систем [12, 63–68], на основе анализа которых оптические системы многоканальных ОЭП можно классифицировать следующим образом:

- а) с использованием для каждого канала отдельной оптической системы с отдельным входным зрачком (рисунок 2.3, а);
- б) с использованием единой оптической системы:
 - без разделения потока излучения с использованием конструкции со сменными оптическими фильтрами (рисунок 2.3, б);
 - энергетическое разделение потока излучения с последующей фильтрацией (рисунок 2.3, в);
 - спектральное разделение потока излучения с помощью светофильтров (рисунок 2.3, г);
 - спектральное разделение потока излучения с помощью многодиапазонного приёмника излучения (рисунок 2.3, д).

Для оптических систем с раздельными объективами (рисунок 2.3, а) характерен параллакс, возникающий из-за того, что объекты могут наблюдаться под разными углами для каждого из каналов. Возникает также задача совмещения изображений, наблюдаемых разными объективами [65]. Вместе с тем данный способ достаточно просто реализуется на практике.



1 – объектив; 2 – светофильтр с узкой полосой пропускания; 3 – фотоприёмник;
 4 – вращающийся диск с установленными светофильтрами;
 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – светофильтр с широкой полосой пропускания;
 7 – многодиапазонный фотоприёмник

а – с использованием для каждого канала отдельного объектива и отдельной оптической системы; б – без разделения потока излучения с использованием конструкции со сменными оптическими фильтрами; в – энергетическое разделение потока излучения с последующей фильтрацией; г – спектральное разделение потока излучения с помощью светофильтров; д – спектральное разделение потока излучения с помощью многодиапазонного приёмника излучения

Рисунок 2.3 – Способы построения многоканальных оптических систем

Подвижные элементы конструкции (в частности сменные оптические фильтры – рисунок 2.3, б) снижают надёжность прибора, поэтому их использование является нежелательным. Также при таком способе разделения светового потока излучение источника регистрируется в разные моменты времени, что требует

синхронизации сигналов по каналам и ведёт к увеличению быстродействия прибора.

Энергетическое разделение светового потока осуществляется с помощью специальных устройств. Наиболее простым устройством для энергетического разделения светового потока является полупрозрачное зеркало установленного под углом 45 градусов к оптической оси системы [12, 59]. Недостатком использования полупрозрачного зеркала в оптической системе прибора является уменьшение потока излучения на каждом фотоприёмнике в два раза. Для трёх каналов уменьшение потока уменьшится в четыре раза (в худшем случае). Кроме того, использование полупрозрачного зеркала при проектировании ОС требует использование оптических фильтров для спектрального разделения потока излучения, что увеличивает количество элементов в ОС прибора и негативно сказывается на её коэффициенте пропускания.

Для исключения ослабления оптического сигнала можно использовать устройства разделения сигнала по спектру. Таким устройством может служить интерференционный светофильтр. Принцип разделения светового потока посредством интерференционного фильтра основан на его способности не только пропускать падающий поток излучения, соответствующий спектральному диапазону пропускания, но и отражать часть спектра падающего излучения, несоответствующую спектральному диапазону пропускания. Указанный эффект достигается благодаря явлению многолучевой интерференции в тонких диэлектрических плёнках [69, 70].

Оптическая система с использованием многодиапазонного приёмника излучения (рисунок 2.3, д) является простой в изготовлении, что повышает её надёжность. Имеются многочисленные публикации [71–73], свидетельствующие о значительном прогрессе в разработке многодиапазонных фотоприёмников. Разделение на спектральные поддиапазоны в таких фотоприёмниках реализуется путём создания многослойных полупроводниковых структур, каждая из которых пропускает и поглощает поток излучения в определённом спектральном диапазоне. Но оптическая система на основе многодиапазонного приёмника излучения имеет недостат-

ки, в частности ограниченность в выборе определённого требуемого спектрального диапазона и малую площадь чувствительной площадки фотоприёмника.

Выполненное сравнение ОС показало, что наиболее перспективным при проектировании ОЭП двух спектральных отношений является использование оптической системы, в которой каждый канал имеет отдельный объектив, на втором месте – ОС с энергетическим разделением потока излучения и его последующей фильтрацией (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Сравнение оптических систем

Вид ОС	Критерии сравнения		
	Простота изготовления и надёжность конструкции	Минимальное ослабление оптического сигнала при прохождении через оптическую систему	Большая номенклатура подходящих фотоприёмников
Каждый канал ОС имеет отдельный объектив	+	+	+
ОС с разделением светового потока сменными оптическими фильтрами	–	+	+
ОС с энергетическим разделением потока излучения и его последующей фильтрацией	–	–	+
ОС со спектральным разделением потока излучения с помощью светофильтров	±	+	+
ОС со спектральным разделением потока излучения с помощью многодиапазонного приёмника излучения	+	+	–

Угловое поле, обеспечиваемое оптической системой со спектральным разделением потока излучения (рисунок 2.3, г), зависит от фокусного расстояния объектива, которым в простейшем случае является собирающая линза, и размером чувствительной площадки фотоприёмников. Кроме того, на расположение оптических компонентов накладываются определённые ограничения, в частности светофильтры не должны касаться друг друга и создавать препятствий при распространении светового пучка, формируемого оптической системой.

По формулам для габаритного расчёта конструкции оптической системы на основе полосовых интерференционных светофильтров [74] был выполнен расчёт фокусного расстояния приёмной собирающей линзы, при котором обеспечивается корректное размещение всех компонентов оптической системы (таблица 2.3). В качестве исходных данных приняты типичные значения диаметров входных зрачков ОЭП, предназначенных для обнаружения очага возгорания в газодисперсных системах [12, 56, 59] и размеры чувствительных площадок фотоприёмников, выпускаемых в настоящее время [73, 75], толщина используемых светофильтров равна 6 мм.

Угловое поле прибора в соответствии с [21] рассчитывалось по формуле

$$2\omega = 2\arctg\left(\frac{q}{2F}\right), \quad (2.2)$$

где q – характерный размер чувствительной площадки фотоприёмника, F – фокусное расстояние объектива.

Таблица 2.3 – Результаты расчёта параметров оптической системы на основе интерференционных светофильтров

Диаметр входного зрачка, мм	25				40				60			
	1	3	5	10	1	3	5	10	1	3	5	10
Характерный размер фотоприёмника, мм	1	3	5	10	1	3	5	10	1	3	5	10
Фокусное расстояние, мм	51	53	55	59	67	69	72	78	87	90	93	100
Угловое поле, градусы	1,12	3,24	5,21	9,69	0,86	2,49	3,98	7,34	0,66	1,91	3,08	5,72

Из результатов расчёта видно, что ни при одном возможном сочетании параметров компонентов оптической системы не обеспечивается требуемое значение углового поля – 14 градусов. Увеличение углового поля возможно путём введения конденсора в оптическую систему или замену одиночной собирающей линзы на многолинзовый объектив с широким угловым полем. Но оба способа предполагают использование дополнительных оптических компонентов, что усложняет оптическую систему и влечёт потери мощности оптического излучения, проходящего через неё.

В итоге при выборе схемы построения оптической системы предпочтение отдано схеме с использованием для каждого канала отдельного объектива (рисунок 2.3, а). Недостатки присущие указанному способу в большей степени характерны для ОЭП с визуализацией, а проектируемый ОЭП контроля только вычисляет спектральные отношения без визуализации контролируемой области. Тем не менее для проектируемого прибора требуется просчитать погрешность, возникающую вследствие параллакса, что будет выполнено на этапе моделирования оптической системы.

2.3.2 Влияние алгоритма принятия решения о возникновении очага возгорания на структуру оптической системы

Решение, принимаемое разрабатываемым ОЭП двух спектральных отношений о том, присутствует ли в его угловом поле очаг возгорания, должно быть достоверным, то есть прибор должен иметь способность осуществлять различение полезного сигнала и сигналов от оптических помех. Ряд литературных источников посвящён способам различения двух сигналов [21, 76], из которых применительно к ОЭП на практике наиболее часто используются:

- спектральная оптическая фильтрация;
- пространственная фильтрация;
- метод сравнения сцен в разные моменты времени.

Из приведённых выше способов в наибольшей степени для использования в разрабатываемом ОЭП подходит спектральная фильтрация. Причина выбора дан-

ного способа – различение полезного сигнала и сигналов-помех осуществляется на аппаратном уровне путём использования спектральных оптических фильтров, что обеспечивает высокое быстродействие всего прибора, данный способ фильтрации не зависит от размеров источника полезного сигнала и помехи. Тем не менее данный способ имеет недостаток, связанный с тем, что источники полезного сигнала и оптических помех могут иметь одинаковый спектральный состав излучения. В этом случае следует более тщательно подходить к выбору спектральных рабочих диапазонов прибора.

Частным случаем спектральной фильтрации является двухцветовая спектральная фильтрация, суть которой сводится к нахождению отношения сигналов Q , полученных в двух каналах [21]

$$Q = \frac{I_2}{I_1}, \quad (2.3)$$

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

Ранее (п. 1.4) было показано, что для повышения достоверности принятия решения о возникновении возгорания ОЭП контроля взрывоопасной атмосферы эффективным является использование аппаратной избыточности, а именно использование трёх спектральных каналов. Если в приборе имеются три спектральных канала, то для них могут быть найдены три спектральных отношения

$$Q_1 = \frac{I_2}{I_1}, \quad (2.4)$$

$$Q_2 = \frac{I_3}{I_1}, \quad (2.5)$$

$$Q_3 = \frac{I_3}{I_2}, \quad (2.6)$$

при этом отношение Q_3 является избыточным, поскольку может быть получено из двух других.

Как уже было отмечено выше, для эффективной реализации метода спектральной оптической фильтрации необходимо, чтобы сигналы от различных источников излучения имели различные спектры.

На основе проведённого в главе 1 анализа источников искусственного освещения, следует, что источники излучения со светодиодными лампами и люминесцентными лампами не будут влиять на показания прибора, если его спектральные диапазоны имеют длину волны более 700 нм. Максимумы спектров источников излучения на основе ламп накаливания и очага возгорания лежат в разных областях: лампы накаливания – около 1 мкм, очага возгорания в виде вспышки метана – в области 3,3 мкм. Соответственно для реализации метода спектральной фильтрации достаточно использовать спектральные каналы с длинами волн 1 мкм и 3,3 мкм.

Между тем свою эффективность для обнаружения очага возгорания в виде вспышки метана показали ОЭП, работающие в спектральном диапазоне до 1 мкм [12, 66]. В таких приборах используются приёмники на основе кремния, которые имеют достаточно большую площадь чувствительной площадки (размеры до 10 × 10 мм), высокое быстродействие и малый темновой ток. Использование фотоприёмников с меньшим размером не позволяет получить требуемое для прибора значение углового поля.

Поэтому для того чтобы выбрать рабочие спектральные диапазоны каналов прибора и окончательно выбрать его алгоритм работы, необходимо выполнить моделирование сигналов, приходящих на его входной зрачок, получаемых сигналов на выходе из оптической системы и электрических сигналов фотоприёмников.

2.3.3 Компьютерное моделирование оптической системы

Построение компьютерной модели оптической системы ОЭП заключается в получении зависимостей показателей эффективности её работы (выходных критериев качества) от параметров составляющих её компонентов и факторов, влияющих на её работу. Исходными данными для построения модели служат параметры источника излучения (как очага возгорания, так и источника помехи) и параметры промежуточной среды. Компьютерную модель проектируемого ОЭП двух спектральных отношений можно представить в виде схемы, показанной на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Схема компьютерной модели оптической системы ОЭП двух спектральных отношений

Для того чтобы полностью описать оптическую систему ОЭП двух спектральных отношений необходимо составить модель источника излучения, энергетическую подмодель функционирования прибора и геометрическую подмодель расположения компонентов оптической системы. В качестве основы для модели источника излучения и энергетической подмодели функционирования ОЭП могут быть приняты зависимости, приведённые в источнике [21].

2.3.3.1 Модель источника излучения

Модель источника излучения применяется как для определения потока излучения от очага возгорания, так и для определения потока излучения от источников оптических помех.

Делая допущение, что источник излучения является серым излучателем, имеет равномерное распределение потока излучения в пространстве и по поверх-

ности, а также конечную площадь и занимает часть углового поля оптической системы прибора, для расчёта его потока излучения в спектральном диапазоне $\left[\lambda_i - \frac{\Delta\lambda_i}{2}; \lambda_i + \frac{\Delta\lambda_i}{2} \right]$ применимы формулы для площадного излучателя, приведённые в источнике [21]

$$\Delta\Phi_e = \varepsilon_T \frac{D \cdot \Delta A}{4l^2} \int_{\lambda_i - \frac{\Delta\lambda_i}{2}}^{\lambda_i + \frac{\Delta\lambda_i}{2}} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = \text{const}, \lambda) d\lambda, \quad (2.7)$$

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

Формула (2.7) является справедливой, если источник излучения находится на оптической оси прибора. Если источник излучения смещён (рисунок 2.5), тогда площадь входного зрачка такого источника определяется как [77]

$$A'_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} \cdot \cos\theta = A_{\text{вх}} \cdot \cos\alpha, \quad (2.8)$$

где θ – угол между плоскостью входного зрачка и его проекцией на плоскость перпендикулярную направлению распространения излучения, α – угол между нормалью к плоскости расположения источника излучения и направлением излучения.

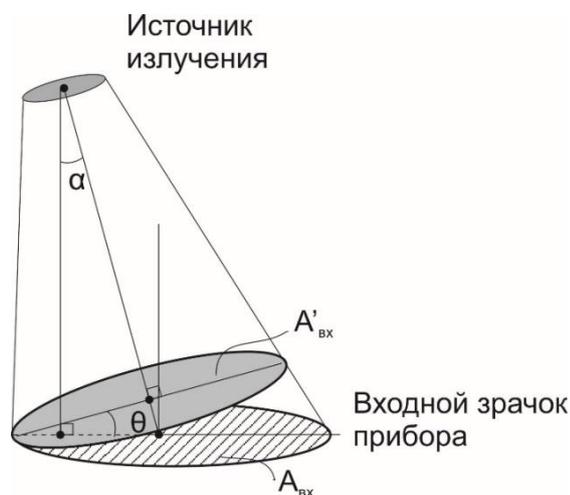


Рисунок 2.5 – К определению площади входного зрачка для излучателя смещённого относительно оптической оси прибора

С учётом формул (2.7) и (2.8) поток излучения источника, смещённого относительно оптической оси в спектральном диапазоне $\left[\lambda_i - \frac{\Delta\lambda_i}{2}; \lambda_i + \frac{\Delta\lambda_i}{2} \right]$, определяется по формуле

$$\Delta\Phi_e = \varepsilon_T \frac{D \cdot \Delta A}{4l^2} \cdot \cos \alpha \cdot \int_{\lambda_i - \frac{\Delta\lambda_i}{2}}^{\lambda_i + \frac{\Delta\lambda_i}{2}} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = \text{const}, \lambda) d\lambda. \quad (2.9)$$

Поток излучения для источника помехи также определяется по формуле (2.9).

В выражение (2.9) входят значения коэффициентов пропускания промежуточной среды $\tau_c(\lambda)$ и оптической системы $\tau_o(\lambda)$. Первый из указанных коэффициентов определяется в соответствии с законом Бугера (см. формула (1.1)), который для однородной среды можно записать как

$$\tau_c(\lambda) = e^{-k_n(\lambda)l}, \quad (2.10)$$

где $k_n(\lambda)$ – показатель поглощения.

Коэффициент пропускания оптической системы рассчитывается в соответствии с формулой [78]

$$\tau_o = (1 - \rho_1) \cdot \dots \cdot (1 - \rho_q) \cdot (1 - \alpha_1)^{h_1} \cdot \dots \cdot (1 - \alpha_m)^{h_m} \cdot R_1 \cdot \dots \cdot R_s \cdot T_1 \cdot \dots \cdot T_p, \quad (2.11)$$

где $\rho = (n - 1)^2 / (n + 1)^2$ – коэффициент отражения от поверхности деталей на границе воздух–стекло для непросветленных деталей из стекла с показателем преломления n ; α – коэффициент поглощения стекла оптических деталей системы; h – длина осевого луча в деталях, см; R – коэффициент отражения зеркальных непрозрачных покрытий и светоделительных покрытий; T – коэффициент пропускания светоделительных покрытий; m – число деталей схемы, кроме зеркал с внешним отражающим покрытием; q – число поверхностей, граничащих с воздухом, кроме поверхностей с зеркальным и светоделительным покрытиями; s – число поверхностей с зеркальным непрозрачным покрытием и светоделительным покрытием в условиях работы на отражение; p – число поверхностей со светоделительным покрытием в условиях работы на пропускание света.

При использовании формулы (2.11) следует учитывать, что входящие в неё величины ρ , α , R и T зависят от длины волны, и расчёт необходимо проводить для конкретного рабочего диапазона длин волн.

Результатом реализации модели источника излучения является поток излучения $\Delta\Phi_e$ в диапазоне $\left[\lambda_i - \frac{\Delta\lambda_i}{2}; \lambda_i + \frac{\Delta\lambda_i}{2} \right]$, который выступает исходными данными для построения энергетической подмодели функционирования ОЭП двух спектральных отношений.

При компьютерном моделировании оптической системы ОЭП двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы в качестве очага возгорания рассматривается абсолютно чёрное тело (коэффициент излучения $\varepsilon_{T_{OB}} = 1$) с температурной $T_{OB} = 630$ °С, площадью $\Delta A_{OB} = 1$ м² и находящееся на расстоянии $l_{OB} = 10$ м от входных зрачков прибора.

Основным источником помех, оказывающим влияние на работу проектируемого ОЭП, является лампа накаливания. Для моделирования лампы накаливания принято, что она имеет коэффициент излучения в диапазоне длин волн 0,7–1 мкм $\varepsilon_{T_{ИП}} = 0,4$; в диапазоне длин волн 1–1,5 мкм – $\varepsilon_{T_{ИП}} = 0,3$ [28]. Температура нити лампы накаливания $T_{ИП} = 2500$ °С и лампа находится на расстоянии $l_{ИП} = 10$ м от входных зрачков прибора. Типичным источником освещения в угольной шахте является головной светильник, например, СГГ.5М.05 [79], фара которого содержит источник излучения и отражатель. В качестве площади источника помехи в виде лампы накаливания принята площадь излучения, создаваемая отражателем, который имеет форму круга с диаметром 75 мм.

Коэффициент пропускания промежуточной среды должен рассчитываться с учётом ослабления, вызванного взвешенными частицами угольной пыли (см. формула (1.1)) и поглощения парами воды и углекислым газом (см. рисунок 1.2).

2.3.3.2 Энергетическая подмодель функционирования оптико-электронного прибора двух спектральных отношений

Целью построения энергетической подмодели функционирования ОЭП двух спектральных отношений является определение конструктивных параметров его оптической системы (диаметр входных зрачков, фокусное расстояние объективов, размеры чувствительной площадки фотоприёмников) и рабочих спектральных диапазонов каналов по требуемым параметрам качества прибора. Основные этапы построения энергетической подмодели функционирования ОЭП двух спектральных отношений:

- 1) составление основного энергетического уравнения;
- 2) получение выражений для входящих в основное энергетическое уравнение величин;
- 3) решение энергетического уравнения.

В качестве критерия качества при построении энергетической подмодели выбрано отношение сигнал-шум на выходе ОЭП $\mu_{\text{вых}}$, которое, согласно [21], для устойчивого обнаружения сигнала, должно составлять не менее 2–2,5. Таким образом, основное энергетическое уравнение запишется как

$$\mu_{\text{вых}} \geq \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{шум}}}, \quad (2.12)$$

где $I_{\text{вых}}$ – ток, протекающий через фотоприёмник и соответствующий полезному сигналу; $I_{\text{шум}}$ – ток, протекающий через фотоприёмник и соответствующий сигналу шума.

Значение $\mu_{\text{вых}}$ в формуле (2) выбирается исходя из требований к параметрам качества ОЭП, а значение $I_{\text{шум}}$ в основном определяется темновым током используемых в приборе фотоприёмников. Разрабатываемый ОЭП двух спектральных отношений является трёхканальным прибором, поэтому основное энергетическое уравнение (2.12) должно быть записано и решено для каждого канала прибора с учётом спектральных диапазонов каналов.

Но для полного описания проектируемого прибора и нахождения его параметров, недостаточно одного энергетического уравнения (2.12). Поскольку в основу прибора положен метод спектрального отношения, следует ввести в качестве критерия качества спектральные отношения [80] Q_1 и Q_2 , которые определяются по формулам (2.4) и (2.5). При этом необходимо обеспечить отличие спектральных отношений Q_1 и Q_2 при воздействии на входной зрачок прибора различных видов сигналов (очаг возгорания, источник оптической засветки, смесь сигналов). Указанное будет достигаться путём выбора соответствующих рабочих спектральных диапазонов каналов прибора. Каждый спектральный диапазон задаётся двумя параметрами: центральной длиной волны λ_i и полушириной диапазона $\Delta\lambda_i$.

Далее, согласно последовательности этапов построения энергетической подмодели, следует найти выражения для токов, протекающих через каждый фотоприёмник прибора I_1, I_2, I_3 и тока, протекающего через фотоприёмники и соответствующий сигналу шума $I_{\text{шум}}$ (см формулы (2.4), (2.5) и (2.12)). Ток $I_{\text{шум}}$ в основном определяется темновым током используемых фотодиодов. Для отечественных кремниевых фотодиодов значение темнового тока составляет до 5 мкА, для импортных фотодиодов – 10–50 нА [71].

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

$$I_i = \int_{\lambda_i - \frac{\Delta\lambda_i}{2}}^{\lambda_i + \frac{\Delta\lambda_i}{2}} S_i(\lambda) \cdot \Delta\Phi_e(\lambda) d\lambda, \quad (2.13)$$

где $S_i(\lambda)$ – функция спектральной чувствительности фотоприёмника, $\Delta\Phi_e(\lambda)$ – поток излучения, приходящий на фотоприёмник, определяемый по выражению (2.9).

Для упрощения выполнения вычислений по расчёту выходных сигналов фотоприёмников I_i и потоков излучения $\Delta\Phi_e$ в диапазоне $\left[\lambda_i - \frac{\Delta\lambda_i}{2}; \lambda_i + \frac{\Delta\lambda_i}{2} \right]$ разработаны специальные программы для ЭВМ [81, 82, 83]. Использование компьютерных

программ позволяет автоматизировать рутинные вычислительные операции и облегчить вычисления при различных исходных данных. Последнее является немаловажным, поскольку большая часть входящих в формулы (2.9) и (2.13) значений параметров неизвестны и их определение является целью энергетического моделирования, но при этом известен диапазон их возможных значений.

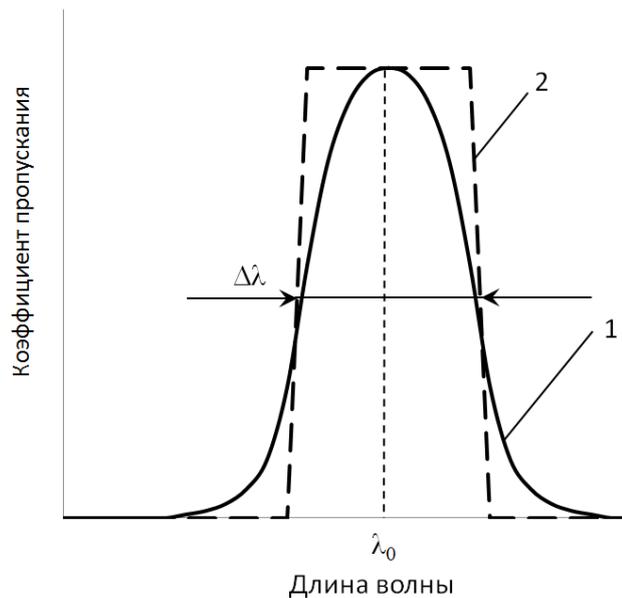
Прежде чем переходить к решению основного энергетического уравнения следует выбрать исходные данные для построения подмодели. Как было указано ранее, исходной информацией для построения энергетической подмодели выступает поток излучения $\Delta\Phi_e$ в диапазоне $\left[\lambda_i - \frac{\Delta\lambda_i}{2}; \lambda_i + \frac{\Delta\lambda_i}{2}\right]$, получаемый из модели источника излучения. Поскольку ОЭП двух спектральных отношений является трёхканальным, необходимо получить поток излучения $\Delta\Phi_e$ в трёх диапазонах, соответствующих рабочим диапазонам каналов прибора: $\left[\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_1}{2}; \lambda_1 + \frac{\Delta\lambda_1}{2}\right]$, $\left[\lambda_2 - \frac{\Delta\lambda_2}{2}; \lambda_2 + \frac{\Delta\lambda_2}{2}\right]$ и $\left[\lambda_3 - \frac{\Delta\lambda_3}{2}; \lambda_3 + \frac{\Delta\lambda_3}{2}\right]$. Помимо этого для построения энергетической подмодели ОЭП двух спектральных отношений следует задать параметры оптической системы: диаметр входного зрачка D , коэффициент пропускания оптической системы τ_0 и рабочие спектральные диапазоны каналов $\left[\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_1}{2}; \lambda_1 + \frac{\Delta\lambda_1}{2}\right]$, $\left[\lambda_2 - \frac{\Delta\lambda_2}{2}; \lambda_2 + \frac{\Delta\lambda_2}{2}\right]$ и $\left[\lambda_3 - \frac{\Delta\lambda_3}{2}; \lambda_3 + \frac{\Delta\lambda_3}{2}\right]$.

На основе анализа литературных источников и опыта разработки ОЭП обнаружения очага возгорания [12, 56, 58] при выполнении компьютерного моделирования значение диаметра входного зрачка будет изменяться в диапазоне от 30 до 100 мм с шагом 10 мм.

Коэффициент пропускания оптической системы на данном этапе компьютерного моделирования не может быть точно учтён, поскольку его значения определяются компонентами оптической системы (толщиной линз и их материалом, коэффициентом пропускания светофильтров и т.д.). Для интерференционных све-

тофильтров, изготавливаемых для фотометрии, коэффициент пропускания в среднем имеет значение 0,6 (или 60 %) [84]. Это значение коэффициента и учитывается при расчёте потока на фотоприёмниках.

Спектральные диапазоны каналов прибора задаются спектральной характеристикой пропускания светофильтра и спектральной характеристикой чувствительности фотоприёмника. Спектральная характеристика полосовых светофильтров имеет куполообразный вид (рисунок 2.6).



1 – типичная характеристика; 2 – представление характеристики в упрощённой форме

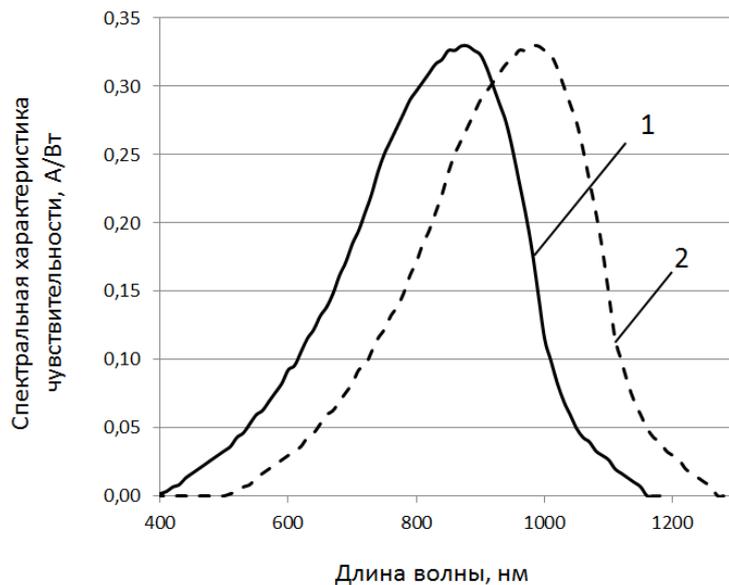
Рисунок 2.6 – Спектральная характеристика полосового светофильтра

При моделировании используется упрощение: принято, что характеристика является прямоугольной (кривая 2 на рисунке 2.6). Ширина полосы пропускания светофильтров $\Delta\lambda$ устанавливается в диапазоне от 30 до 50 нм [12, 84].

Спектральный диапазон чувствительности приёмника излучения должен быть согласован со спектральным диапазоном источника излучения, с которым данный приёмник работает. При использовании селективных источников критерием выбора фотоприёмника является совпадение максимума излучения источника с максимумом спектральной характеристики приёмника.

Спектральная характеристика приёмника излучения входит в формулу для расчёта выходного тока приёмника (2.13), который, в свою очередь, входит в выражения для нахождения спектральных отношений Q_1 и Q_2 – формулы (2.4) и (2.5). Так как одним из критериев качества оптической системы ОЭП двух спектральных отношений является обеспечение отличия спектральных отношений Q_1 и Q_2 при воздействии на входной зрачок прибора различных видов сигналов, необходимо проанализировать значения Q_1 и Q_2 при различных спектральных характеристиках чувствительности приёмников излучения.

Как уже было отмечено выше (раздел 2.3.2) в ОЭП обнаружения очага возгорания на ранней стадии в газодисперсной среде используются фотоприёмники на основе кремния, типичная характеристика чувствительности [71] которых показана на рисунке 2.7.



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

Рисунок 2.7 – Спектральная характеристика чувствительности кремниевого фотодиода

Максимум спектральной чувствительности (рисунок 2.7) приходится на длину волны 880 нм, между тем существует ряд фотоприёмников, максимум чувствительности которых смещён в инфракрасную область (например, на 950 нм). Поэтому

му было принято решение не загружать в программу характеристики существующих фотоприёмников, а использовать типичную характеристику чувствительности кремниевого фотодиода со смещённым максимумом чувствительности (кривая 2 на рисунке 2.7). С учётом проведённого обзора кремниевых фотоприёмников в программе максимумы спектральной характеристики задаются в диапазоне длин волн от 700 до 950 нм с шагом 50 нм. Дополнительно следует провести исследование и для ближней инфракрасной области в диапазоне от 950 до 2000 нм.

На рисунке 2.8 показана блок-схема алгоритма работы программы, позволяющей рассчитать спектральные отношения при различных значениях диаметра входных зрачков и спектральных диапазонов каналов [83].

В блок-схеме приняты следующие обозначения:

- переменная D соответствует диаметру входного зрачка, индексы st и end означают минимальное и максимальное возможные значения переменной D , ΔD – шаг изменения переменной D ;

- переменная λ соответствует длине волны, индексы st и end означают минимальное и максимальное возможные значения переменной λ , $\Delta \lambda$ – шаг изменения переменной λ ;

- массивы I [], Q_1 [], Q_2 [] служат для хранения значений выходного тока через фотоприёмник (см. формула (2.13)) и спектральных отношений Q_1 и Q_2 (см. формулы (2.4) и (2.5)). Используемые при обозначении массивов индексы означают, что значение в массиве относится к источнику очага возгорания (ОВ), источнику помехи (ИП) и совместному действию источника очага возгорания и помехи (Σ);

- массив D_m [] хранит значения диаметра входного зрачка, при которых сигнал на выходе приёмников излучения будет превышать сигнал шума в μ раз, то есть будет выполняться основное энергетическое уравнение для прибора (2.12) на данной длине волны λ ;

- переменные i , k , N_λ являются вспомогательными и используются для организации циклов.

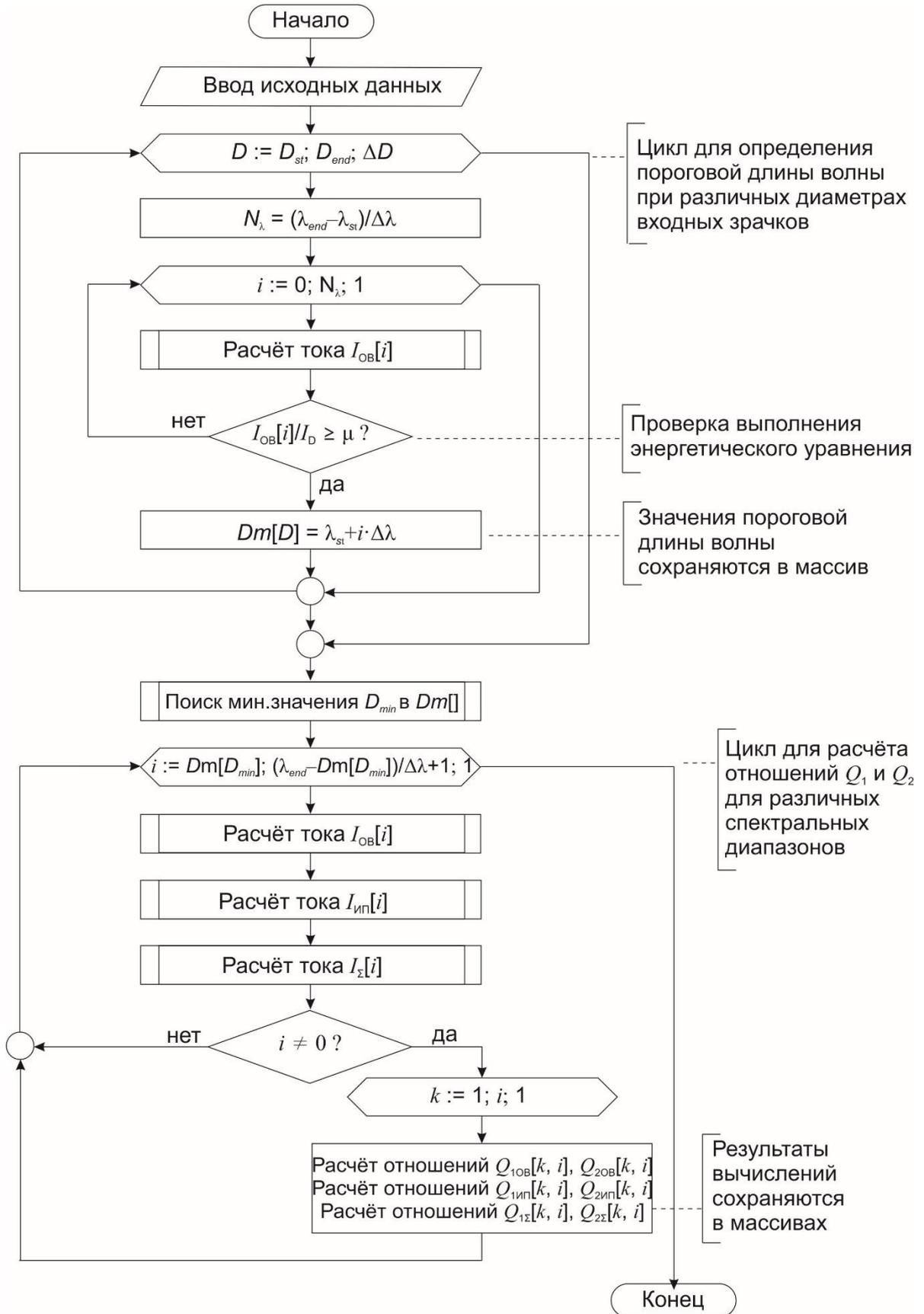


Рисунок 2.8 – Блок-схема алгоритма работы программы расчёта спектральных отношений

Программа состоит из двух циклов. В первом цикле выполняется заполнение массива $D_m[]$. Очевидно, что наибольшее значение отношения сигнал-шум μ будет наблюдаться при наибольшем диаметре входных зрачков. Но, как правило, линзы с большим диаметром имеют и большее значение фокусного расстояния, а увеличение фокусного расстояния ведёт к уменьшению углового поля, что недопустимо. Поэтому далее выполняется поиск минимального элемента в массиве $D_m[]$. Результатам выполнения программы представляются в виде таблиц (рисунок 2.9), анализируя которые осуществляется выбор рабочих спектральных диапазонов.

	λ_1	λ_2	...	λ_N
λ_1	$I_{\lambda_1} / I_{\lambda_2}$			
λ_2	$I_{\lambda_2} / I_{\lambda_1}$	$I_{\lambda_2} / I_{\lambda_2}$		
...	
λ_N	$I_{\lambda_N} / I_{\lambda_1}$	$I_{\lambda_N} / I_{\lambda_2}$...	$I_{\lambda_N} / I_{\lambda_N}$

Рисунок 2.9 – Представление результатов расчёта спектральных отношений

В таблице 2.4 приведены некоторые значения диаметров входных зрачков прибора, а также соответствующие им значение пороговой длины волны $\lambda_{\text{пор}}$, при которой начинает выполняться выражение (2.12). Расчёт проводился при различных положениях максимума спектральной характеристики фотоприёмника на длинах волн от 700 до 2000 нм с шагом по длине волны 50 нм, ширина полосы пропускания $\Delta\lambda$ выбрана равной 40 нм.

Из данных таблицы 2.4 следует, что при использовании фотоприёмников с малым значением темнового тока (менее 10 нА) допустимо использование объективов с диаметром входного зрачка 30 мм. Поэтому далее при компьютерном моделировании используется значение $D = 30$ мм, а при выборе конкретных фотоприёмников учитывается значение темнового тока ($I_D \leq 10$ нА).

Таблица 2.4 – Некоторые результаты энергетического расчёта

Диаметр входного зрачка D, мм	30	50	60	80	100
Темновой ток = 5 мкА					
Пороговая длина волны $\lambda_{\text{пор}}$, нм	1500	1200	1200	1050	1000
Отношение сигнал-шум μ	4,50	3,01	4,34	2,02	2,06
Темновой ток = 10 нА					
Пороговая длина волны $\lambda_{\text{пор}}$, нм	750	700	700	700	700
Отношение сигнал-шум μ	2,53	2,26	3,26	5,79	9,05

В таблицах 2.5–2.7 приведены фрагменты результатов расчёта спектральных отношений при воздействии на входной зрачок прибора сигнала от очага возгорания, сигнала от источника помехи в виде лампы накаливания и совместном действии указанных сигналов. Таблицы соответствуют массивам $Q_{1\text{ОВ}}[]$, $Q_{1\text{ИП}}[]$ и $Q_{1\Sigma}[]$. Выбор спектральных рабочих диапазонов осуществлялся исходя из условия

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

После анализа результатов программы расчёта спектральных отношений выбраны рабочие спектральные диапазоны каналов $\left[\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_1}{2}; \lambda_1 + \frac{\Delta\lambda_1}{2} \right]$, $\left[\lambda_2 - \frac{\Delta\lambda_2}{2}; \lambda_2 + \frac{\Delta\lambda_2}{2} \right]$ и $\left[\lambda_3 - \frac{\Delta\lambda_3}{2}; \lambda_3 + \frac{\Delta\lambda_3}{2} \right]$. Как уже было указано выше, для ОЭП обнаружения очага возгорания свою эффективность показали кремниевые фотоприёмники. Поэтому с учётом возможного расположения максимумов спектральных характеристик чувствительности фотоприёмников на основе кремния для двух каналов были выбраны длины волн 750 и 950 нм. Для выбранных длин волн отношение сигналов $Q_1 = I_{950}/I_{750}$ будет значительно отличаться для различных видов сигналов (см. таблицы 2.5–2.7), что, безусловно, делает возможным достоверное обнаружение очага возгорания при воздействии оптических помех. Но с учётом того, что в диапазоне длин волн 750–950 нм поток излучения (а как следствие и ток, протекающей через фотоприёмники) от источника внешней оптической по-

мехи на несколько порядков больше сигнала от очага возгорания, засветка входного зрачка прибора сигналом от источника помехи может привести к ложному срабатыванию. Для того чтобы свести к минимуму ложные срабатывания прибора, необходимо выбирать рабочую длину волны третьего канала вдали от максимума спектра излучения наиболее влияющего источника оптической помехи, который приходится на диапазон длин волн 1000–1100 нм.

На длинах волн менее 750 нм поток излучения, приходящий на входной зрачок прибора, будет слишком мал, и создаваемый им ток через фотоприёмник будет незначительно отличаться от внутренних шумов последнего. Длины волны для двух выбранных каналов 750 и 950 нм расположены слишком близко, поэтому выбор длины волны для третьего канала в диапазоне 750–950 не даст существенной дополнительной информации. В результате рабочая длина волны третьего канала была принята равной 1550 нм. Увеличение длины волны и смещение ещё дальше в инфракрасную область спектра не является целесообразным: существенного различия спектральных отношений при воздействии на входной зрачок прибора излучения различных источников наблюдаться не будет, кроме того, сужается круг доступных для использования в приборе фотоприёмников.

Расчёт отношения сигналов на длинах волн 950 и 1550 нм – I_{1550}/I_{950} – позволяет определить очаг возгорания, при этом исключается влияние возможных источников оптического излучения (светодиоды, люминесцентные лампы) характеризующиеся высокой цветовой температурой. А расчёт отношения сигналов на длинах волн 750 и 950 нм – I_{950}/I_{750} – позволяет определить наличие источника искусственного освещения в видимом диапазоне. Наличие посторонних источников освещения в видимой области может указывать на возможное присутствие человека.

Ширина пропускания оптических фильтров для каналов с длинами волн 750 и 950 нм принята равной 30–50 нм, а для канала с длиной волны 1550 нм – 15–25 нм. Это сделано для того, чтобы «уровнять» потоки излучения во всех трёх выбранных спектральных диапазонах, поскольку поток излучения при рабочей длине волны 1550 нм значительно превышает потоки излучения при рабочих длинах волн 750 и 950 нм.

Таблица 2.5 – Результаты расчёта спектральных отношений при воздействии на входной зрачок прибора сигнала от очага возгорания

Длина волны λ , нм	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	...	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	...	1950	2000	
750	1,00																				
800	2,63	1,00																			
850	5,26	2,00	1,00																		
900	7,13	2,71	1,36	1,00																	
950	15,80	6,00	3,01	2,22	1,00																
1000	36,76	13,96	6,99	5,16	2,33	1,00															
1050	56,20	21,34	10,69	7,88	3,56	1,53	1,00														
1100	59,23	22,49	11,27	8,31	3,75	1,61	1,05	1,00													
1150	93,43	35,48	17,78	13,10	5,91	2,54	1,66	1,58	1,00												
...											
1350	168,55	64,00	32,07	23,64	10,67	4,58	3,00	2,85	1,80	...	1,00										
1400	15,33	5,82	2,92	2,15	0,97	0,42	0,27	0,26	0,16	...	0,09	1,00									
1450	300,86	114,24	57,24	42,20	19,04	8,18	5,35	5,08	3,22	...	1,79	19,62	1,00								
1500	890,13	337,98	169,35	124,85	56,33	24,21	15,84	15,03	9,53	...	5,28	58,06	2,96	1,00							
1550	1300,06	493,63	247,35	182,34	82,27	35,37	23,13	21,95	13,91	...	7,71	84,80	4,32	1,46	1,00						
1600	1583,73	601,34	301,32	222,13	100,22	43,08	28,18	26,74	16,95	...	9,40	103,30	5,26	1,78	1,22	1,00					
1650	1831,17	695,29	348,40	256,83	115,88	49,81	32,58	30,91	19,60	...	10,86	119,44	6,09	2,06	1,41	1,16	1,00				
...		
1950	243,64	92,51	46,35	34,17	15,42	6,63	4,34	4,11	2,61	...	1,45	15,89	0,81	0,27	0,19	0,15	0,13	...	1,00		
2000	2095,53	795,67	398,69	293,91	132,61	57,00	37,29	35,38	22,43	...	12,43	136,68	6,97	2,35	1,61	1,32	1,14	...	8,60	1,00	

Таблица 2.6 – Результаты расчёта спектральных отношений при воздействии на входной зрачок прибора сигнала от источника помехи в виде лампы накаливания

Длина волны λ , нм	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	...	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	...	1950	2000	
750	1,00																				
800	1,09	1,00																			
850	0,74	0,68	1,00																		
900	0,67	0,62	0,91	1,00																	
950	0,89	0,82	1,20	1,33	1,00																
1000	0,78	0,71	1,05	1,16	0,87	1,00															
1050	0,57	0,53	0,77	0,85	0,64	0,74	1,00														
1100	0,42	0,39	0,57	0,62	0,47	0,54	0,73	1,00													
1150	0,66	0,61	0,89	0,99	0,74	0,85	1,16	1,58	1,00												
...											
1350	0,05	0,05	0,07	0,08	0,06	0,07	0,09	0,13	0,08	...	1,00										
1400	0,08	0,07	0,11	0,12	0,09	0,10	0,14	0,19	0,12	...	1,48	1,00									
1450	0,45	0,41	0,60	0,66	0,50	0,57	0,78	1,06	0,67	...	8,35	5,62	1,00								
1500	0,58	0,54	0,79	0,87	0,65	0,75	1,02	1,39	0,88	...	10,90	7,34	1,31	1,00							
1550	0,61	0,56	0,82	0,90	0,68	0,78	1,06	1,45	0,92	...	11,35	7,65	1,36	1,04	1,00						
1600	0,58	0,53	0,78	0,86	0,65	0,74	1,01	1,38	0,87	...	10,80	7,27	1,29	0,99	0,95	1,00					
1650	0,53	0,49	0,72	0,79	0,60	0,69	0,93	1,27	0,81	...	9,98	6,72	1,20	0,92	0,88	0,92	1,00				
...		
1950	0,13	0,12	0,18	0,20	0,15	0,17	0,23	0,32	0,20	...	2,49	1,68	0,30	0,23	0,22	0,23	0,25	...	1,00		
2000	0,09	0,08	0,12	0,14	0,10	0,12	0,16	0,22	0,14	...	1,71	1,15	0,20	0,16	0,15	0,16	0,17	...	0,69	1,00	

Таблица 2.7 – Результаты расчёта спектральных отношений при воздействии на входной зрачок прибора сигналов от очага возгорания и источника помехи в виде лампы накаливания

Длина волны λ , нм	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	...	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	...	1950	2000		
750	1,00																					
800	3161,87	1,00																				
850	2158,38	0,68	1,00																			
900	1956,62	0,62	0,91	1,00																		
950	2599,31	0,82	1,20	1,33	1,00																	
1000	2290,19	0,72	1,06	1,17	0,88	1,00																
1050	1718,22	0,54	0,80	0,88	0,66	0,75	1,00															
1100	1275,95	0,40	0,59	0,65	0,49	0,56	0,74	1,00														
1150	2015,65	0,64	0,93	1,03	0,78	0,88	1,17	1,58	1,00													
...												
1350	323,69	0,10	0,15	0,17	0,12	0,14	0,19	0,25	0,16	...	1,00											
1400	245,63	0,08	0,11	0,13	0,09	0,11	0,14	0,19	0,12	...	0,76	1,00										
1450	1595,62	0,50	0,74	0,82	0,61	0,70	0,93	1,25	0,79	...	4,93	6,50	1,00									
1500	2580,60	0,82	1,20	1,32	0,99	1,13	1,50	2,02	1,28	...	7,97	10,51	1,62	1,00								
1550	2180,54	0,69	1,01	1,11	0,84	0,95	1,27	1,71	1,08	...	6,74	8,88	1,37	0,84	1,00							
1600	3259,06	1,03	1,51	1,67	1,25	1,42	1,90	2,55	1,62	...	10,07	13,27	2,04	1,26	1,49	1,00						
1650	3379,37	1,07	1,57	1,73	1,30	1,48	1,97	2,65	1,68	...	10,44	13,76	2,12	1,31	1,55	1,04	1,00					
...		
1950	630,07	0,20	0,29	0,32	0,24	0,28	0,37	0,49	0,31	...	1,95	2,57	0,39	0,24	0,29	0,19	0,19	...	1,00			
2000	2360,80	0,75	1,09	1,21	0,91	1,03	1,37	1,85	1,17	...	7,29	9,61	1,48	0,91	1,08	0,72	0,70	...	3,75	1,00		

2.3.3.3 Геометрическая подмодель расположения компонентов оптической системы

Ранее было принято решение о проектировании ОЭП двух спектральных отношений на основе оптической системы с отдельными объективами каналов (см. п. 2.3.1), которая представляет собой несколько взаимно-независимых объективов, определённым образом размещённых на лицевой панели прибора. Количество объективов соответствует количеству каналов прибора.

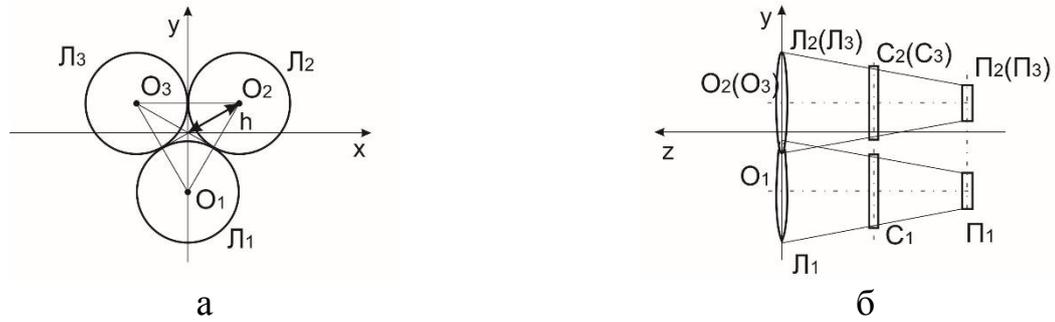
При выборе способа расположения компонентов оптической системы необходимо иметь в виду, что использование оптической системы, обладающей свойством симметрии, позволяет получить симметричную область охраняемой зоны, что часто встречается на практике [85]. Поэтому далее из рассмотрения исключены способы расположения входных зрачков, не обладающие симметрией.

Из сравнения оптических систем, показанных на рисунках 2.10 (центры входных зрачков объективов лежат на прямой) и 2.11 (центры входных зрачков находятся в вершинах равностороннего треугольника), следует, что обе системы обладают центральной симметрией, а оптическая система на рисунке 2.11 дополнительно обладает симметрией относительно точки, что позволяет получить одинаковый поток излучения на всех входных зрачках при нахождении источника излучения на оптической оси системы.



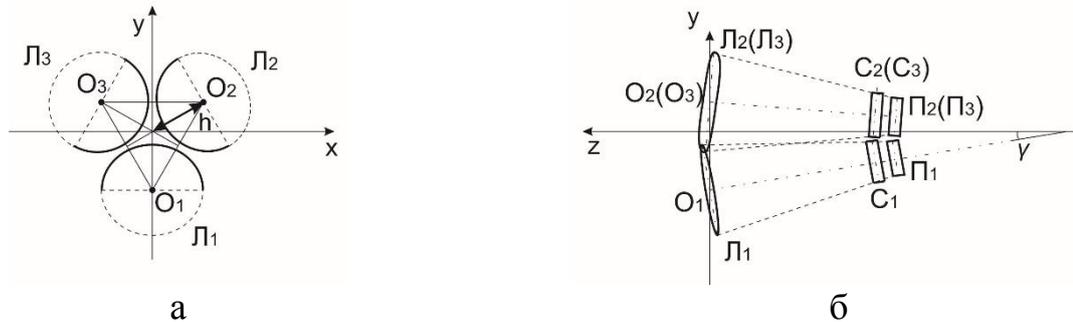
O_1, O_2, O_3 – центры входных зрачков; L_1, L_2, L_3 – входные зрачки объективов каналов прибора; C_1, C_2, C_3 – светофильтры; Π_1, Π_2, Π_3 – приёмники излучения

Рисунок 2.10 – Расположения входных зрачков объективов каналов прибора на прямой: а – вид с плоскости наблюдателя, б – вид справа



O_1, O_2, O_3 – центры входных зрачков; L_1, L_2, L_3 – входные зрачки объективов каналов прибора; C_1, C_2, C_3 – светофильтры; P_1, P_2, P_3 – приёмники излучения

Рисунок 2.11 – Расположения входных зрачков объективов каналов прибора в вершинах равностороннего треугольника: а – вид с плоскости наблюдателя, б – вид справа



O_1, O_2, O_3 – центры входных зрачков; L_1, L_2, L_3 – входные зрачки объективов каналов прибора; C_1, C_2, C_3 – светофильтры; P_1, P_2, P_3 – приёмники излучения

Рисунок 2.12 – Расположения входных зрачков объективов каналов прибора в вершинах равностороннего треугольника, оптические оси каналов наклонены: а – вид с плоскости наблюдателя, б – вид справа

Способ, размещения компонентов оптической системы, показанный на рисунке 2.12, отличается от способа, показанного на рисунке 2.11 тем, что оптические оси каналов дополнительно наклонены. Наклон выполнен таким образом, что оптические оси каналов лежат в плоскости, проходящей через ось симметрии оптической системы z (направлена на наблюдателя) и одну из высот равностороннего треугольника $O_1O_2O_3$ (k – номер канала) и образуют угол γ_k с осью z . По-

сколькx оптичeская система является симметричной, углы γ_k будут для всех каналов равны $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma$.

Для дальнейшего рассмотрения и использования в разрабатываемом приборе выбран способ, показанный на рисунке 2.12. Данный способ характеризуется максимально близким расположением каналов, что приближает выбранный вид оптической системы к оптической системе, имеющей один входной зрачок. Угол γ принят условно положительным, если оптическая ось канала пересекает отрицательную часть оси z , и отрицательным – если положительную часть оси z .

Далее при построении геометрической подмодели расположения компонентов оптической системы приняты обозначения, соответствующие обозначениям на рисунке 2.12, включая номера каналов. Кроме диаметра D и фокусного расстояния F объективов, исходными данными для построения подмодели будут расстояние h и угол γ , которые полностью описывают положение входных зрачков оптической системы. Координаты центров входных зрачков $O_1(x_{O_1}; y_{O_1}; 0)$, $O_2(x_{O_2}; y_{O_2}; 0)$ и $O_3(x_{O_3}; y_{O_3}; 0)$ выражаются через расстояние h как

– координаты центра входного зрачка объектива первого канала $O_1(0; -h; 0)$;

– координаты центра входного зрачка объектива второго канала $O_2\left(\frac{h\sqrt{3}}{2}; \frac{h}{2}; 0\right)$;

– координаты центра входного зрачка объектива третьего канала $O_3\left(-\frac{h\sqrt{3}}{2}; \frac{h}{2}; 0\right)$.

На рисунке 2.13 показана охраняемая зона одного канала прибора (на примере канала 3), которая представляет собой область на некотором расстоянии r от плоскости входного зрачка, ограниченную в пространстве окружностью, излучение каждой точки внутри которой попадает на фотоприёмник. Диаметр охраняемой зоны канала, исходя из геометрических соображений, определяется как

$$D_{O_3} = 2R_{O_3} = 2 \cdot O'_3 E = 2 \cdot (O'_3 K + KE) = D + 2 \cdot r \cdot \operatorname{tg} \omega_1 \quad (2.14)$$

где $R_{о3}$ – радиус окружности, ограничивающей сечение охраняемой зоны канала; ω_1 – половина углового поля зрения канала прибора; D – диаметр входного зрачка канала прибора.

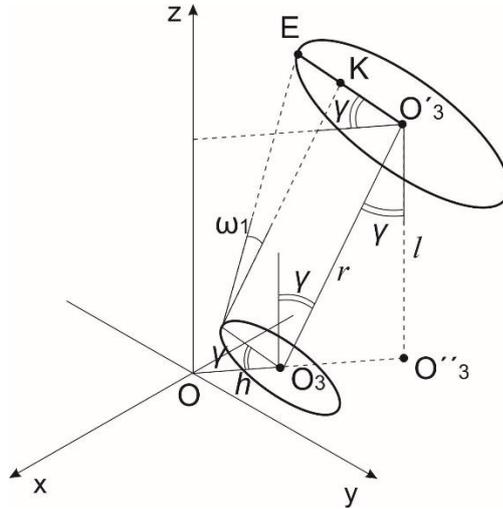


Рисунок 2.13 – Охраняемая зона (показана для канала 3)

Поскольку рассматриваемая оптическая система содержит три входных зрачка, каждый из которых находится в отдельной плоскости, далее под плоскостью входного зрачка исследуемой оптической системы (и соответственно прибора) будет пониматься плоскость, в которой находятся центры входных зрачков, то есть координатная плоскость xOy .

Учитывая, что расстояние r может быть найдено как (рисунок 2.13)

$$r = \frac{l}{\cos \gamma}, \quad (2.15)$$

где l – длина охраняемой зоны, γ – угол наклона оптических осей. Выражение (2.14) запишется следующим образом

$$D_{о3} = 2R_{о3} = D + \frac{2 \cdot l \cdot \operatorname{tg} \omega_1}{\cos \gamma}. \quad (2.16)$$

Из уравнения (2.16) следует, что угол наклона оптических осей каналов γ не может быть равен ± 90 градусов ($\cos \gamma \neq 0$). Действительно, значение угла ± 90 градусов соответствует случаю, когда оптические оси каналов лежат в одной плоскости и охраняемая зона не формируется.

Так как оптические оси каналов образуют угол с осью оптической системы z , сечение охраняемой зоны каждого канала ограничено эллипсом (рисунок 2.14).

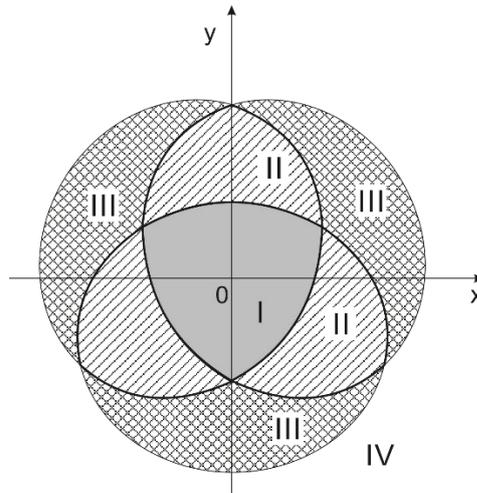


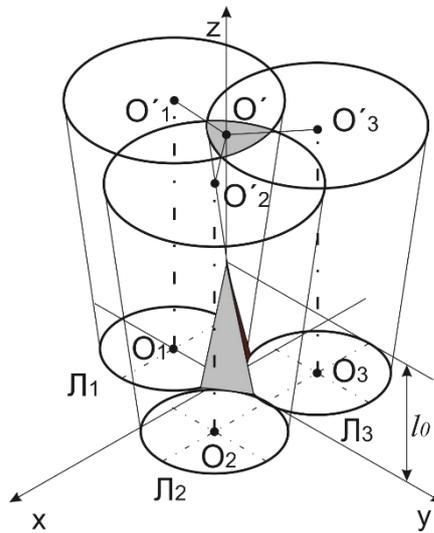
Рисунок 2.14 – Сечение охраняемой зоны, обеспечиваемой трёхканальной оптической системой с отдельными объективами каналов

В зависимости наложения сечений охраняемых зон каналов (рисунок 2.14) выделены следующие области:

- 1) область I, образуемая перекрытием трёх каналов;
- 2) область II, образуемая перекрытием двух каналов;
- 3) область III, образуемая перекрытием одного канала;
- 4) область IV, не перекрываемая ни одним каналом.

Вычисление двух спектральных отношений на основе трёх монохроматических каналов возможно только в области I. В области II может быть вычислено только одно спектральное отношение на основе двух монохроматических каналов. В области III спектральные отношения не могут быть рассчитаны, но возможно определение температуры по одному монохроматическому каналу.

Поток излучения от источника, находящегося на оси z в точке с координатой $z = 0$, не будет попадать ни на один входной зрачок. При увеличении координаты z в некоторой точке $z = l_0$, излучение источника придёт на все входные зрачки. Таким образом, в охраняемой зоне прибора будет присутствовать «мёртвая зона», характеризующаяся протяжённостью l_0 (рисунок 2.15).



$\text{Л}_1, \text{Л}_2, \text{Л}_3$ – входные зрачки каналов прибора; O_1, O_2, O_3 – центры входных зрачков

Рисунок 2.15 – Наличие «мёртвой» зоны внутри углового поля зрения оптической системы с отдельными объективами каналов (угол γ равен нулю)

На рисунке 2.16 показано сечение охраняемой зоны, обеспечиваемое первым каналом прибора (канал 1) в плоскости yOz . Протяжённость мёртвой зоны l_0 будет определяться как

$$l_0 = l_M + (h + l_M \cdot \operatorname{tg} \gamma) \cdot \operatorname{tg} \gamma = l_M \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma) + h \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (2.17)$$

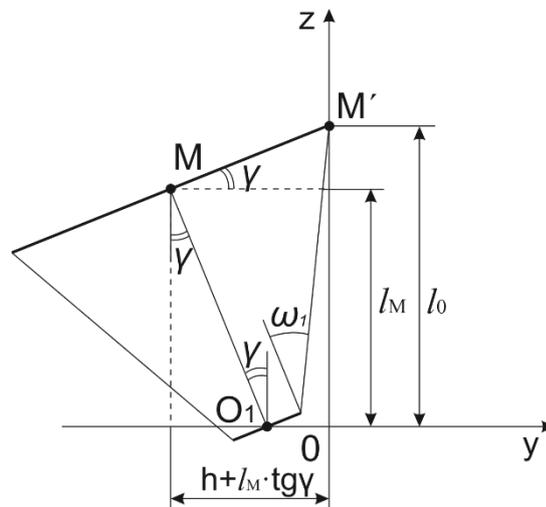


Рисунок 2.16 – Сечение охраняемой зоны, обеспечиваемое каналом 1 прибора в плоскости yOz

Таким образом, для того чтобы найти протяжённость мёртвой зоны необходимо рассчитать расстояние l_M . Найти значение l_M можно из геометрических соображений, так из рисунка 2.16 радиус охраняемой зоны

$$R_{03} = MM' = \frac{h + l_M \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\cos \gamma}.$$

С другой стороны, значение R_{03} может быть найдено из формулы (2.14), поэтому

$$R_{03} = \frac{h + l_M \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\cos \gamma} = \frac{D}{2} + \frac{l_M \cdot \operatorname{tg} \omega_1}{\cos \gamma}. \quad (2.18)$$

Выражая из формулы (2.18) значение l_M и подставляя его в выражение (2.17) получено выражение для расчёта протяжённости «мёртвой» зоны

$$l_0 = \frac{D \cdot \cos \gamma - 2h}{2 \cdot (\operatorname{tg} \gamma - \operatorname{tg} \omega_1)} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma) + h \cdot \operatorname{tg} \gamma. \quad (2.19)$$

Выходным критерием качества при построении геометрической подмодели расположения компонентов оптической системы является угловое поле, которое в том числе определяется площадью охраняемой зоны (см. формула (2.1)).

Максимальное значение площади охраняемой зоны на заданном расстоянии l от входного зрачка прибора достигается при выполнении двух условий:

- 1) центры эллипсов, ограничивающих сечение охраняемых зон каналов, расположены максимально близко друг к другу;
- 2) охраняемые зоны каналов ограничены окружностями, то есть обеспечивается их наибольшее возможное значение.

Исходя из первого условия, центров эллипсов должны располагаться в точке с координатами $(0; 0; l)$. Выполнение второго условия происходит при угле наклона оптических осей равным нуль градусов, то есть центры окружностей, ограничивающих охраняемые зоны каналов, имеют координатами (x_{oi}, y_{oi}, l) , где x_{oi}, y_{oi} – координаты центров входных зрачков в плоскости XOY .

Приведённые условия противоречат друг другу. Таким образом, для того чтобы найти оптимальное положение входных зрачков оптической системы необ-

ходимо выполнить моделирование положения её компонентов для обоих приведённых условий.

На первом этапе построения геометрической подмодели требуется записать уравнения эллипсов, ограничивающих сечение охраняемой зоны. С учётом координат центра эллипса O'_1 , ограничивающего сечение охраняемой зоны первого канала

$$x_{O'_1} = 0; \quad y_{O'_1} = -(h + l \cdot \operatorname{tg} \gamma); \quad z_{O'_1} = l, \quad (2.20)$$

и значения большой a и малой b полуоси эллипсов

$$a = R_{o3}; \quad b = R_{o3} \cdot \cos \gamma, \quad (2.21)$$

уравнение эллипса для первого канала в плоскости параллельной координатной плоскости xOy и расположенной от неё на расстоянии $z = l$ запишется как

$$\frac{x^2}{R_{o3}^2} + \frac{(y + h + l \cdot \operatorname{tg} \gamma)^2}{R_{o3}^2 \cdot \cos^2 \gamma} = 1. \quad (2.22)$$

Вследствие того, что исследуемая оптическая система является симметричной, эллипсы, ограничивающих сечения охраняемой зоны второго и третьего каналов, развёрнуты относительно положения эллипса, ограничивающего сечение охраняемой зоны первого канала, на углы 120 и 240 градусов соответственно.

С эллипсом, ограничивающим сечение охраняемой зоны второго канала, в плоскости параллельной координатной плоскости xOy и расположенной от неё на расстоянии l может быть связана система координат $x'Oy'$, повернутая на угол $\varphi = 120$ градусов относительно системы координат xOy . С учётом симметрии оптической системы уравнение эллипса, ограничивающих сечение охраняемой зоны второго канала, в системе координат $x'Oy'$ запишется как

$$\frac{(x')^2}{R_{o3}^2} + \frac{(y' + h + l \cdot \operatorname{tg} \gamma)^2}{R_{o3}^2 \cdot \cos^2 \gamma} = 1. \quad (2.23)$$

Для системы координат $x'Oy'$ с учётом преобразования декартовых координат на плоскости можно записать [86]

$$x' = x \cdot \cos \varphi + y \cdot \sin \varphi, \quad (2.24)$$

$$y' = -x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi, \quad (2.25)$$

где $(x'; y')$ – координаты центра эллипса, в системе координат $x'Oy'$, поворнутой на угол $\varphi = 120$ градусов относительно системы координат xOy ; $(x; y)$ – координаты центра эллипса, в системе координат xOy .

Подставляя выражения (2.24) и (2.25) в уравнение (2.23), уравнение эллипса в системе xOy запишется как

$$\frac{\left(-\frac{1}{2} \cdot x + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot y\right)^2}{R_{ос}^2} + \frac{\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot y + h + l \cdot \operatorname{tg} \gamma\right)^2}{R_{ос}^2 \cdot \cos^2 \gamma} = 1. \quad (2.26)$$

Уравнение (2.26) является уравнением эллипса, ограничивающего сечение охраняемой зоны второго канала, в плоскости параллельной координатной плоскости xOy и расположенной от неё на расстоянии l . Аналогично записывается уравнение для эллипса, ограничивающего сечение охраняемой зоны третьего канала

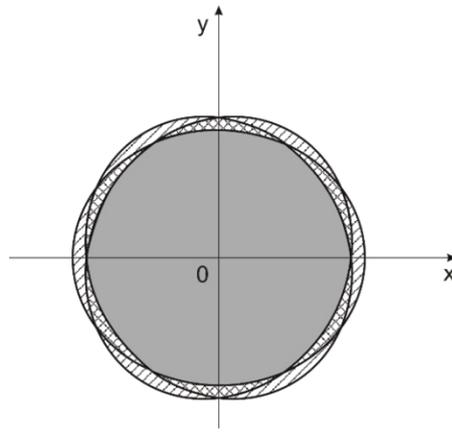
$$\frac{\left(-\frac{1}{2} \cdot x - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot y\right)^2}{R_{ос}^2} + \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot y - h - l \cdot \operatorname{tg} \gamma\right)^2}{R_{ос}^2 \cdot \cos^2 \gamma} = 1. \quad (2.27)$$

Полученные выражения (2.23), (2.26) и (2.27) позволяют приступить к нахождению площадей охраняемой зоны. На рисунке 2.17 показан вид сечения охраняемой зоны на расстоянии l от входного зрачка прибора для случая, когда центры эллипсов, ограничивающих сечение охраняемой зоны каналов, находятся в точке с координатами $(0; 0; l)$.

С учётом положения центров эллипсов, ограничивающих сечение охраняемых зон каналов и с учётом координат точки O'_1 (см. выражения (2.20)) можно записать

$$-(h + l \cdot \operatorname{tg} \gamma_{\text{пред}}) = 0, \quad (2.28)$$

где $\gamma_{\text{пред}}$ – угол наклона оптических осей каналов, соответствующий рассматриваемому положению эллипсов, ограничивающих сечение охраняемой зоны.



■ – область I; ▨ – область II; ▩ – область III;

Рисунок 2.17 – Сечение охраняемой зоны на расстоянии l от входного зрачка прибора (центры эллипсов, ограничивающих сечение охраняемой зоны каналов, находятся в точке с координатами $(0; 0; l)$)

Из выражения (2.28)

$$\gamma_{\text{пред}} = -\arctg\left(\frac{h}{l}\right). \quad (2.29)$$

Таким образом, значения угла наклона оптических осей каналов $\gamma_{\text{пред}}$ будет определяться параметрами h и l . Минимальное значение параметра h соответствует случаю, когда входные зрачки каналов касаются друг друга при заданном угле наклона оптических осей каналов γ , максимальное – определяется конструкцией прибора и на практике ограничено размерами охраняемого помещения.

Для нахождения минимально возможного значения расстояния h следует найти точку пересечения проекции входного зрачка канала 2 (или 3) на плоскость xOy и оси Oy . Проекция входного зрачка канала 2 в плоскости xOy представляет собой эллипс заданный уравнением, в которое необходимо подставить $x = 0$ (уравнение оси Oy) и решить его относительно y с учётом того, что угол γ не может быть равен ± 90 градусов ($\cos \gamma \neq 0$)

$$\frac{\left(-\frac{1}{2} \cdot x + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot y\right)^2}{\left(\frac{D}{2}\right)^2} + \frac{\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot y + h\right)^2}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \cos^2 \gamma} = 1, \quad (2.30)$$

где D – диаметр входного зрачка.

Из решения уравнения (2.30) получено

$$h = \pm D \sqrt{\frac{3 \cos^2 \gamma + 1}{12}}. \quad (2.31)$$

Поскольку параметр h на практике определяет расстояние, отрицательный корень в формуле (2.31) следует исключить из рассмотрения. Очевидно, что значение h , при котором входные зрачки объективов каналов прибора касаются друг друга, будет минимальным при угле γ стремящемся к 90 градусам

$$\text{если } \gamma \rightarrow 90 \text{ градусам, } \cos \gamma \rightarrow 0, h \rightarrow \frac{D}{\sqrt{12}} = \frac{D}{2\sqrt{3}}. \quad (2.32)$$

Максимальное значение параметра h в случае касания входных зрачков при угле γ равном 0 градусов будет

$$h_{\text{max кас.}} = \frac{D}{\sqrt{3}}. \quad (2.33)$$

Для нахождения площади охраняемой зоны представим, что она состоит из шести секторов имеющих площадь S_1 (рисунок 2.18, а).

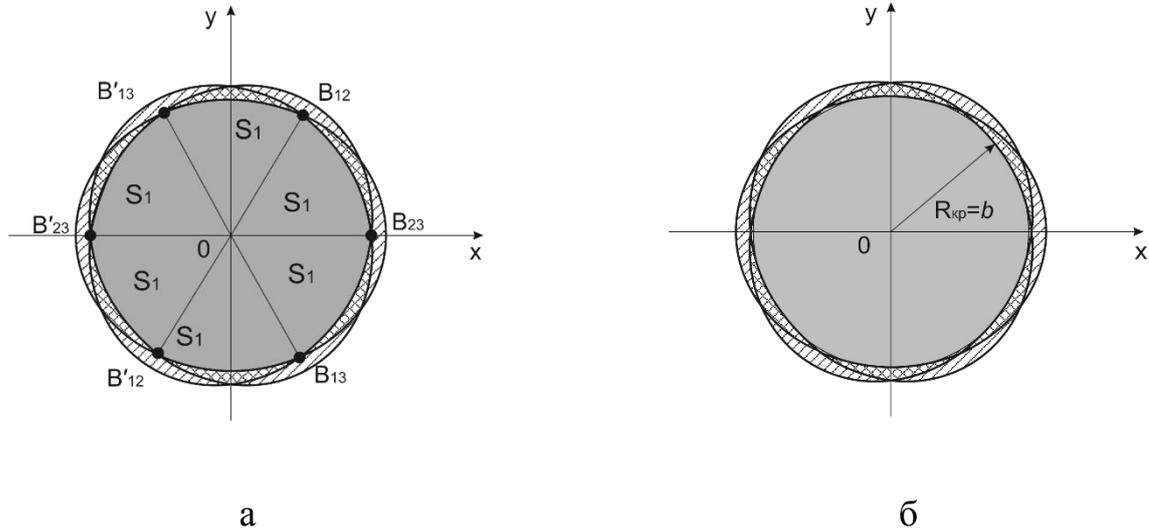
$$S_{\text{оз}} = 6 \cdot S_1. \quad (2.34)$$

Равенство площадей секторов следует из свойства симметрии исследуемой оптической системы и положения эллипсов, ограничивающих сечение охраняемых зон каналов. Точки, пересечения эллипсов, ограничивающих сечения охраняемых зон каналов, обозначены на рисунках как $B_{12}, B'_{12}, B_{13}, B'_{13}, B_{23}, B'_{23}$, при этом подстрочные индексы соответствуют номерам каналов.

Площадь S_1 можно найти как площадь фигуры, заключённой между эллипсом, ограничивающим сечение охраняемой зоны первого канала, и прямыми OB_{12} и OB'_{13}

$$S_1 = \int_{x_{B'_{13}}}^{x_{B_{12}}} (f(x) - g(x) - h(x)) dx = \int_0^{x_{B_{12}}} (f(x) - g(x)) dx, \quad (2.35)$$

где $f(x)$ – функция, задающая уравнение эллипса, ограничивающего сечение охраняемой зоны первого канала; $g(x)$ – функция, задающая уравнение прямой OB_{12} ; $h(x)$ – функция, задающая уравнение прямой OB'_{13} .



а – представление охраняемой зоны в виде шести секторов эллипса;
б – упрощенное представление охраняемой зоны в виде круга

Рисунок 2.18 – К расчёту площади охраняемой зоны

Для вычисления интеграла (2.35) следует найти координаты точки B_{12} , являющейся точкой пересечения эллипсов, ограничивающих сечения охраняемой зоны первого и второго каналов с центрами, находящимися в точке с координатами $(0; 0; l)$

$$\begin{cases} \frac{x^2}{R_{oz}^2} + \frac{y^2}{R_{oz}^2 \cdot \cos^2 \gamma} = 1, \\ \frac{\left(-\frac{1}{2} \cdot x + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot y\right)^2}{R_{oz}^2} + \frac{\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot x - \frac{1}{2} \cdot y\right)^2}{R_{oz}^2 \cdot \cos^2 \gamma} = 1. \end{cases} \quad (2.36)$$

Решение системы уравнений (2.36) с помощью математического пакета Mathcad [87] даёт следующие результаты

$$x_1 = R_{oz} \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{2}{\cos 2\gamma + 7}}, y_1 = R_{oz} \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{6}{\cos 2\gamma + 7}};$$

$$\begin{aligned}
 x_2 &= -R_{oz} \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{2}{\cos 2\gamma + 7}}, y_2 = -R_{oz} \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{6}{\cos 2\gamma + 7}}; \\
 x_3 &= R_{oz} \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{6}{3 \cdot \cos 2\gamma + 5}}, y_3 = -R_{oz} \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{2}{3 \cdot \cos 2\gamma + 5}}; \\
 x_4 &= -R_{oz} \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{6}{3 \cdot \cos 2\gamma + 5}}, y_4 = R_{oz} \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{2}{3 \cdot \cos 2\gamma + 5}}.
 \end{aligned}$$

Исходя из положения точки B_{12} , ей будут соответствовать координаты $(x_1; y_1; l)$.

Уравнением эллипса, ограничивающим сечение охраняемой зоны первого канала, является первое неравенство системы (2.36), а уравнение прямой OB_{12} может быть записано из известных координат точек O и B_{12} как

$$g(x) = \frac{y_{B_{12}}}{x_{B_{12}}} \cdot x = \sqrt{3} \cdot x.$$

С учётом правил вычисления интегралов, полученных ранее координат точки B_{12} , а также выражение для функций $f(x)$ и $g(x)$ выражение (2.35) в итоговом виде можно переписать как

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \cos \gamma \cdot R_{oz}^2 \cdot \left(\cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{2}{\cos 2\gamma + 7}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \gamma \cdot \frac{2}{\cos 2\gamma + 7}} + \right. \\
 &+ \left. \arcsin \left(\cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{2}{\cos 2\gamma + 7}} \right) \right) - \sqrt{3} \cdot R_{oz}^2 \cdot \cos^2 \gamma \cdot \frac{2}{\cos 2\gamma + 7}. \quad (2.37)
 \end{aligned}$$

Упрощённо площадь охраняемой зоны прибора можно рассматривать как площадь круга, радиус которого равен значению малой полуоси b эллипсов (эллипсы, в силу симметрии оптической системы, одинаковы), ограничивающих сечение охраняемой зоны каналов (рисунок 2.18, б)

$$S_{oz \text{ упр.}} = \pi \cdot R_{кр}^2 = \pi \cdot b^2 = \pi \cdot (R_{oz} \cdot \cos \gamma)^2. \quad (2.38)$$

Полученные выражения позволяют выполнить численную оценку параметров оптической системы (таблица 2.8) при различных значениях параметра h . При этом минимально допустимое значение h согласно формуле (2.32) составит

Результаты геометрического моделирования оптической системы (таблица 2.8) показывают, что увеличение расстояния от начала координат до центров входных зрачков каналов h с одновременным увеличением угла наклона оптических осей $\gamma_{\text{пред}}$ увеличивают протяжённость «мёртвой» зоны. Например, при значении $h = 0,25$ м и $\gamma_{\text{пред}} = -1,43$ градуса протяжённость «мёртвой зоны» l_0 составляет 1,58 м, а это более 15 % от расстояния до входного зрачка прибора. Отрицательное значение протяжённости «мёртвой» зоны (при $h = 0,009$ м) указывает, что исходные параметры оптической системы заданы неверно. В данном случае расстояние h имеет недопустимо малое значение.

Вместе с тем необходимо отметить, что с увеличением расстояния от начала координат до центров входных зрачков каналов h , происходит одновременное увеличение угла наклона оптических осей $\gamma_{\text{пред}}$ (по модулю), незначительное увеличение площади охраняемой зоны $S_{\text{оз}}$ и уменьшение площади охраняемой зоны $S_{\text{оз упр}}$, рассчитанной по упрощённой формуле. Такое различие между значениями $S_{\text{оз}}$ и $S_{\text{оз упр}}$ связано с тем, что при увеличении значений параметров h и $\gamma_{\text{пред}}$ эллипсы, ограничивающее сечения охраняемой зоны каналов, становятся все более «узкими» и сечение охраняемой зоны становится более «шестиугольным», в отличие от случая, показанного на рисунке 2.17. Проведённый расчёт площади охраняемой зоны по упрощённой формуле (2.38) показал допустимость её использования, поскольку погрешность расчёта площади охраняемой зоны не превышает 1 %.

Наибольшее значение площади охраняемой зоны $S_{\text{оз упр}}$ обеспечивается при минимально возможном значении параметра h , то есть когда входные зрачки каналов касаются. Такому положению входных зрачков соответствует угол $\gamma_{\text{пред}}$, который, в свою очередь, зависит от значения параметра h . Подставляя выражение (2.31) в выражение (2.29), может быть найдено значение угла $\gamma_{\text{пред}}$ в зависимости от параметров D и l

$$\text{tg}\gamma_{\text{пред}} = -\frac{D}{l} \cdot \sqrt{\frac{3\cos^2\gamma_{\text{пред}} + 1}{12}}. \quad (2.39)$$

В результате решения уравнения (2.39) с учётом того, что значение угла $\gamma_{\text{пред}}$ должно быть отрицательным, выражение для нахождения $\gamma_{\text{пред}}$ запишется следующим образом

$$\gamma_{\text{пред}} = -\arctg \left(\sqrt{\frac{1 - \frac{12 \cdot l^2}{D^2} + \sqrt{1 + \frac{144 \cdot l^4}{D^4} + \frac{168 \cdot l^2}{D^2}}}{\frac{24 \cdot l^2}{D^2}}} \right). \quad (2.40)$$

Далее, при геометрическом моделировании оптической системы и определении её параметров для нахождения угла наклона оптических осей каналов γ следует использовать формулу (2.40), так как она учитывает касание входных зрачков каналов.

Повторный расчёт параметров оптической системы с учётом формулы (2.40) дал следующие результаты:

- угол наклона оптических осей $\gamma_{\text{пред}} = -0,01$ градусов;
- протяжённость «мёртвой» зоны $l_0 = 0,02$ м;
- площадь охраняемой зоны на расстоянии $l = 10$ м от входного зрачка прибора $S_{\text{оз упр}} = 4,853$ м²;
- угловое поле $2\omega = 14,17$ градусов.

Поскольку угол наклона оптических осей $\gamma_{\text{пред}}$ составляет менее одного градуса, сделан вывод, что наклон оптических осей не даёт значительный вклад в увеличение площади охраняемой зоны. Помимо этого, угол γ неравный нулю требует более точного монтажа компонентов оптической системы и затрудняет её юстировку. Ненулевое значение угла наклона оптических осей γ требует проведения проверки корректности положения светофильтров и приёмников излучения оптической системы (светофильтры и фотоприёмники не должны касаться и «накладываться» друг на друга), в случае нулевого угла наклона проверку выполнять не требуется.

Далее следует выполнить анализ параметров оптической системы при максимально возможной площади охраняемой зоны каждого канала, то есть когда угол наклона оптических осей γ равен нуль градусов. На рисунке 2.19 показано

сечение охраняемой зоны, обеспечиваемой оптической системой, при нулевом угле наклона оптических осей.

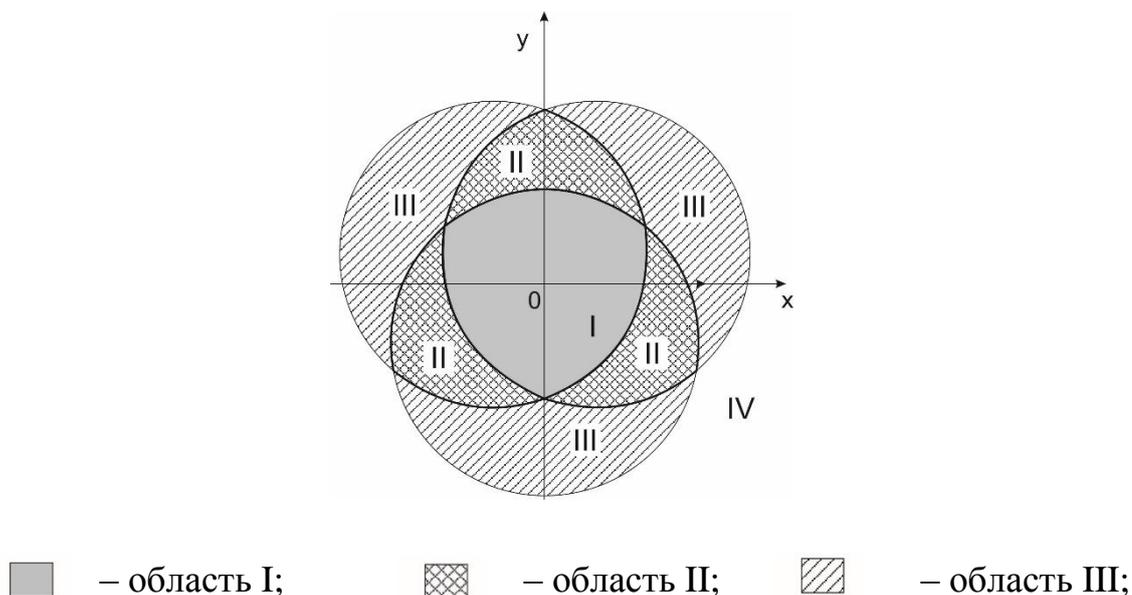


Рисунок 2.19 – Сечение охраняемой зоны на расстоянии l от входного зрачка прибора (угол наклона оптических осей $\gamma = 0$ градусов)

Для рассматриваемого случая также необходимо вывести выражение для нахождения площади охраняемой зоны. При этом площадь охраняемой зоны можно рассматривать как сумму площадей треугольника $B_{12}B_{23}B_{13}$ и трёх сегментов круга, имеющего центр в начале координат и радиус равный $(R_{оз} - h)$ (рисунок 2.20, а)

$$S_{оз} = S_{B_{12}B_{23}B_{13}} + 3S_{сегм},$$

где $S_{B_{12}B_{23}B_{13}}$ – площадь треугольника $B_{12}B_{23}B_{13}$; $S_{сегм}$ – площадь сегмента круга.

С учётом стороны треугольника $B_{12}B_{23}B_{13}$, найденной из геометрических свойств оптической системы

$$c = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left(\sqrt{4 \cdot R_{оз}^2 - 3 \cdot h^2} - h \right). \quad (2.41)$$

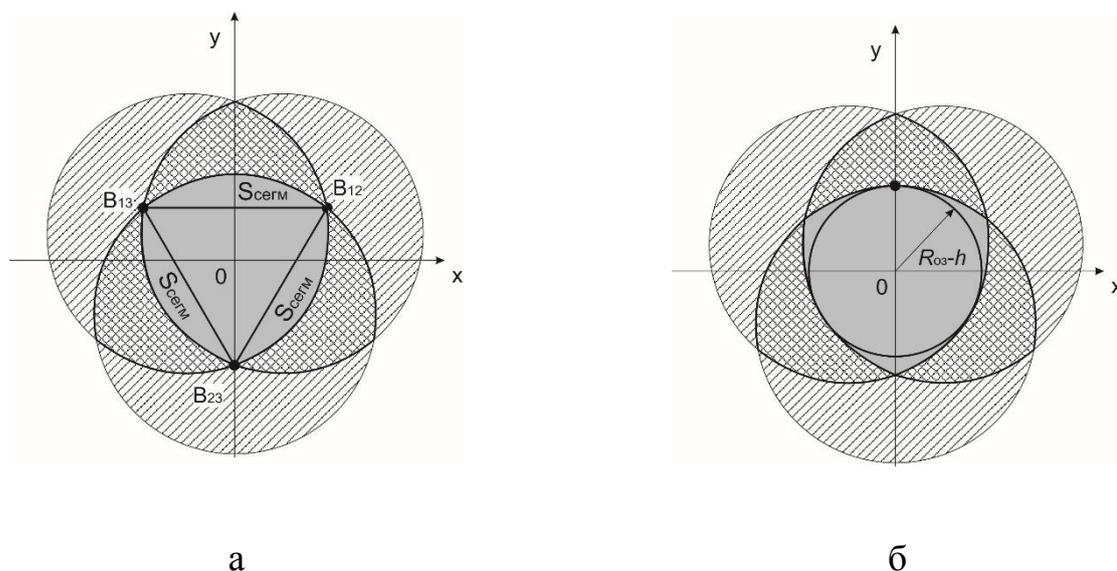
и площади сегмента $S_{сегм}$, определяемой как

$$S_{сегм} = \frac{1}{2} \cdot R_{оз}^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180^\circ} - \sin \alpha \right), \quad (2.42)$$

где $\alpha = 2 \arcsin \left(\frac{c}{2R_{03}} \right)$ – угол дуги сегмента, c – длина стороны треугольника

$B_{12}B_{23}B_{13}$, площадь охраняемой зоны может быть вычислена как

$$S_{03} = \frac{c^2 \sqrt{3}}{2} + \frac{3}{2} \cdot R_{03}^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180^\circ} - \sin \alpha \right). \quad (2.43)$$



а – представление охраняемой зоны в виде треугольника и трёх сегментов круга;
 б – представление охраняемой зоны в виде круга

Рисунок 2.20 – К расчёту площади охраняемой зоны (угол наклона оптических осей $\gamma = 0$ градусов)

В случае нулевого угла наклона оптических осей γ площадь охраняемой зоны также упрощённо можно рассматривать в виде круга (рисунок 2.20, б). Площадь охраняемой зоны в этом случае будет определяться как

$$S_{03 \text{ упр.}} = \pi \cdot (R_{03} - h)^2. \quad (2.44)$$

С увеличением расстояния от начала координат до центров входных зрачков каналов h , длина стороны треугольника $B_{12}B_{23}B_{13}$ будет уменьшаться (см. формула (2.41)), а, следовательно, будет уменьшаться и площадь охраняемой зоны. Для упрощённой формулы (2.44) уменьшение площади охраняемой зоны с увеличением расстояния от начала координат до центров входных зрачков каналов h является

очевидным. Поэтому наибольшее значение площади охраняемой зоны будет в случае такого расположения входных зрачков системы, когда они касаются друг друга.

В таблице 2.9 представлены результаты расчёта параметров трёхканальной оптической системы с отдельными объективами каналов при различных значениях половины углового поля каналов прибора ω_1 для случая, когда угол наклона оптических осей γ равен нулю градусов. В качестве исходных параметров оптической системы приняты те же параметры оптической системы, что и при проверке первого условия достижения максимальной площади охраняемой зоны (см. таблица 2.8), а расстояния от начала координат до центров входных зрачков каналов h определяется по формуле (2.33) и составляет 0,017 м.

Все расчёты проводились с помощью программы Microsoft Office Excel 2010 [88]. Протяжённость «мёртвой» зоны l_0 рассчитывалась по формуле (2.19), площадь охраняемой зоны $S_{\text{оз упр}}$ и $S_{\text{оз}}$ – по формулам (2.44) и (2.43).

Таблица 2.9 – Параметры оптической системы при различных значениях углового поля каналов прибора (угол наклона оптических осей γ равен нулю градусов, расстояние от входного зрачка прибора до источника возгорания l составляет 10 м)

Параметры оптической системы	Угловое поле одного канала прибора $2\omega_1$, градусы					
	10	20	25	30	35	40
Протяжённость «мёртвой» зоны l_0 , м	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Площадь охраняемой зоны $S_{\text{оз упр}}$, м ²	2,39	9,74	15,41	22,52	31,19	41,56
Площадь охраняемой зоны $S_{\text{оз}}$, м ²	2,41	9,77	15,45	22,57	31,24	41,63
Погрешность расчёта площади охраняемой зоны при использовании упрощённой формулы, %	0,67	0,34	0,27	0,22	0,19	0,16
Угловое поле прибора 2ω , градусы	10,01	20,01	25,01	30,01	35,01	40,01

Как видно из результатов геометрического моделирования положения компонентов оптической системы, с увеличением углового поля каналов прибора увеличивается площадь охраняемой зоны и уменьшается протяжённость «мёртвой» зоны. Использование упрощённой формулы (2.44) для расчёта площади яв-

ляется допустимым, так как погрешность при расчёте по указанной формуле не превышает 1 %.

Анализируя результаты геометрического моделирования положения входных зрачков оптической системы с отдельными объективами каналов, можно сделать вывод, что значение площади охраняемой зоны при $\gamma = 0$ градусов в основном определяется угловым полем одного канала $2\omega_1$.

Таким образом, можно сделать вывод, что на практике наиболее рациональным является использование оптической системы с отдельными объективами каналов, для которой входные зрачки расположены в вершинах равностороннего треугольника, входные зрачки касаются друг друга и оптические оси каналов параллельны оптической оси системы. Угловое поле каждого канала при этом должно быть не менее 14 градусов.

Классический пирометр спектрального отношения обычно имеет один входной зрачок и на входы всех спектральных каналов прибора приходит одинаковый поток излучения Φ_0 . Из свойства симметричности исследуемой оптической системы следует, что поток излучения на входных зрачках прибора будет одинаковым, только если очаг возгорания находится в точке с координатами $(0; 0; l)$, то есть лежит на оптической оси системы. Если источник возгорания будет смещён относительно оптической оси системы, поток излучения (при той же температуре источника), приходящий на входные зрачки каналов будет различен. Таким образом, определяемая прибором температура источника возгорания T_i , расположенного в точке с координатами $(x_i; y_i; l)$ будет отличаться от действительной температуры источника возгорания T_0 , находящегося в точке с координатами $(0; 0; l)$, на величину погрешности

$$\Delta T = \pm |T_0 - T_i|, \quad (2.45)$$

где T_0 – действительная температура источника возгорания, температура соответствует температуре источника возгорания, который находится в точке с координатами $(0; 0; l)$; T_i – определяемая прибором температура источника возгорания, который находится в точке с координатами $(x_i; y_i; l)$.

Температура источника возгорания определяется на основе спектральных отношений Q_1 и Q_2 . При этом на практике, как правило, известна обратная зависимость – зависимость спектральных отношений Q_1 и Q_2 от температуры: $Q_1 = f(T)$ и $Q_2 = f(T)$. Указанные зависимости имеют сложный вид и в большинстве случаев содержат интегральную функцию по длине волны, поэтому получение обратных зависимостей $T = f(Q_1)$ и $T = f(Q_2)$ аналитическим способом является сложно решаемой задачей. Между тем существует более простой способ получения указанных зависимостей – численное моделирование очага возгорания с получением таблицы значений функций $Q_1 = f(T)$ и $Q_2 = f(T)$ и последующая аппроксимация функций $T = f(Q_1)$ и $T = f(Q_2)$ по полученным значениям.

Спектральные отношения Q_1 и Q_2 рассчитываются на основе токов по формулам (2.4) и (2.5), которые протекают через приёмники излучения, которые определяются потоком на входных зрачках каналов.

С учётом формул (2.9) и (2.13) выражения для спектральных каналов запишутся как

$$Q_1 = \frac{I_2}{I_1} = \frac{\cos \alpha_2 \cdot \int_{\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_1}{2}}^{\lambda_2 + \frac{\Delta\lambda_2}{2}} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = const, \lambda) \cdot S_2(\lambda) d\lambda}{\cos \alpha_1 \cdot \int_{\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_1}{2}}^{\lambda_1 + \frac{\Delta\lambda_1}{2}} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = const, \lambda) \cdot S_1(\lambda) d\lambda} \quad (2.46)$$

и

$$Q_2 = \frac{I_3}{I_1} = \frac{\cos \alpha_3 \cdot \int_{\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_1}{2}}^{\lambda_3 + \frac{\Delta\lambda_3}{2}} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = const, \lambda) \cdot S_3(\lambda) d\lambda}{\cos \alpha_1 \cdot \int_{\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_1}{2}}^{\lambda_1 + \frac{\Delta\lambda_1}{2}} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = const, \lambda) \cdot S_1(\lambda) d\lambda}, \quad (2.47)$$

где I_k – ток через фотоприёмник канала k , – номер канала.

Если источник возгорания находится в точке с координатами $(0; 0; l)$, вследствие симметричности оптической системы углы α_1 и α_2 будут равны и выражения

(2.46) и (2.47) примут вид, характерный для классического пирометра спектрального отношения

$$Q_{01} = \frac{\int_{\lambda_2 - \frac{\Delta\lambda_2}{2}}^{\lambda_2 + \frac{\Delta\lambda_2}{2}} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = \text{const}, \lambda) \cdot S_2(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_1}{2}}^{\lambda_1 + \frac{\Delta\lambda_1}{2}} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = \text{const}, \lambda) \cdot S_1(\lambda) d\lambda} \quad (2.48)$$

и

$$Q_{02} = \frac{\int_{\lambda_3 - \frac{\Delta\lambda_3}{2}}^{\lambda_3 + \frac{\Delta\lambda_3}{2}} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = \text{const}, \lambda) \cdot S_3(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1 - \frac{\Delta\lambda_1}{2}}^{\lambda_1 + \frac{\Delta\lambda_1}{2}} \tau_c(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot M_e(T = \text{const}, \lambda) \cdot S_1(\lambda) d\lambda}. \quad (2.49)$$

Таким образом, выражения (2.46) и (2.47) можно записать как

$$Q_1 = \frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} \cdot Q_{01}, \quad (2.50)$$

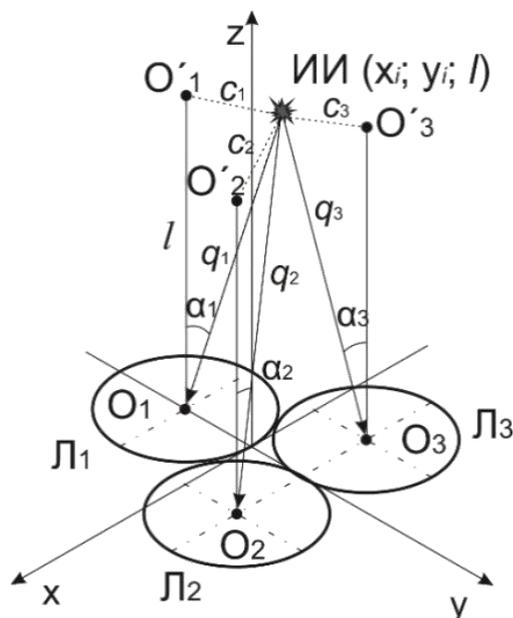
$$Q_2 = \frac{\cos \alpha_3}{\cos \alpha_1} \cdot Q_{02}, \quad (2.51)$$

где Q_{01} , Q_{02} – спектральные отношения, рассчитанные для точки $(0; 0; l)$ и определяемые по формулам (2.48) и (2.49).

Пусть источник возгорания находится в плоскости параллельной плоскости xOy на расстоянии l от плоскости расположения входных зрачков объективов каналов. Косинусы углов α_1 – α_3 между направлениями на источник возгорания q_1 – q_3 и оптическими осями каналов $O_1O'_1$, $O_2O'_2$, $O_3O'_3$ могут быть рассчитаны как (рисунок 2.21)

$$\cos \alpha_k = \frac{l}{\sqrt{c_k^2 + l^2}}, \quad (2.52)$$

где c_k – расстояние от источника возгорания до оптической оси канала k ; l – расстояние от плоскости расположения линз до плоскости, в которой находится очаг возгорания; k – номер канала.



ИИ – источник возгорания; L_1, L_2, L_3 – входные зрачки каналов прибора; O_1, O_2, O_3 – центры входных зрачков каналов; $O_1O'_1, O_2O'_2, O_3O'_3$ – оптические оси каналов

Рисунок 2.21 – Расположение источника возгорания относительно оптических осей каналов прибора

Значение расстояния c_k , рассчитывается по формуле нахождения длины отрезка [86] исходя из известных координат точек $O_1, O'_1, O_2, O'_2, O_3, O'_3$ и координат источника возгорания $(x_i; y_i, l)$.

Таким образом, расчёт погрешности определения температуры для источника возгорания, который находится в точке $(x_i; y_i, l)$ сводится к следующей последовательности действий:

1) расчёту отношений Q_{01} и Q_{02} по формулам (2.48) и (2.49) в диапазоне температур $T_0 \pm \Delta T$ при положении источника в точке с координатами $(0; 0; l)$, где T_0 – действительная температура источника возгорания, а диапазон температур ΔT определяется исходя из допустимой погрешности определения температуры;

- 2) аппроксимации функций $T = f(Q_1)$ и $T = f(Q_2)$ по полученным в п. 1 значениям, например, методом наименьших квадратов;
- 3) нахождению значений косинусов углов α_1 , α_2 и α_3 по формуле (2.52);
- 4) расчёту отношений Q_1 и Q_2 по формулам (2.50) и (2.51), используя известные значения косинусов углов α_1 и α_2 (п. 3) и значения Q_{01} и Q_{02} (п. 1);
- 5) определению по функциональным зависимостям $T = f(Q_1)$ и $T = f(Q_2)$, полученным в п. 2 значения температуры источника возгорания T_i ;
- 6) нахождению погрешности определения температуры по формуле (2.45).

При анализе поля зрения трёхканальной оптической системы с отдельными объективами каналов можно выделить три характерных отрезка, вдоль которых требуется вычислить погрешность определения температуры (рисунок 2.22) – E_1B_1 , E_2B_2 , E_3B_3 . Но так как поле зрения является симметричным, достаточно вычислить погрешность смещения вдоль одного из отрезков, например, E_1B_1 .

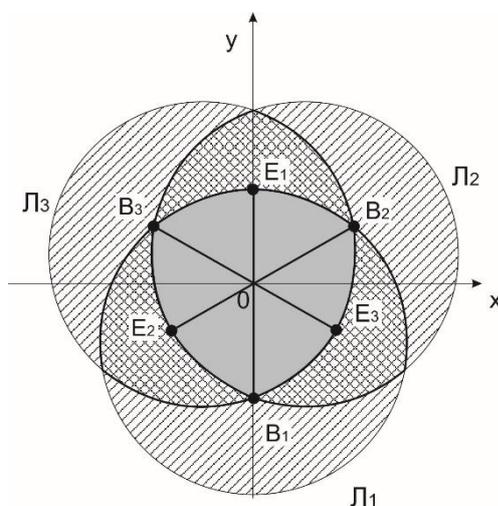
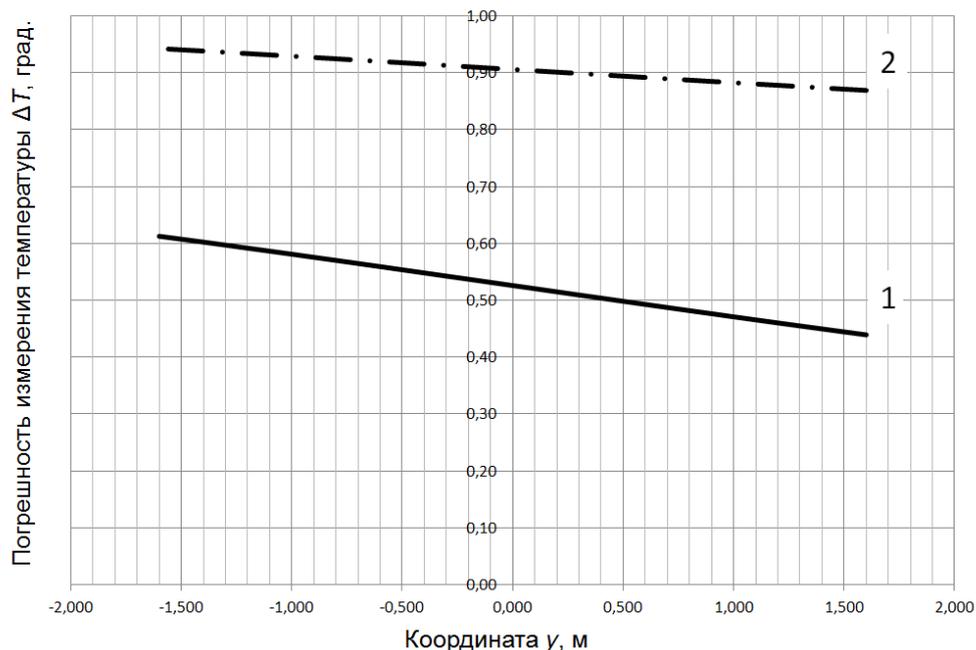


Рисунок 2.22 – Выбор направления расчёта погрешности определения температуры

Очевидно, что наибольшая погрешность измерения температуры будет наблюдаться при максимальном удалении источника возгорания от центра координат, то есть на граничных точках области контроля. В рассматриваемом случае это будут точки E_1 и B_1 .

На рисунке 2.23 показан результат расчёта погрешности определения температуры T_1 по отношению Q_1 .



1 — для отношения Q_1 ; 2 — для отношения Q_2

Рисунок 2.23 – Зависимость методической погрешности определения температуры по спектральным отношениям Q_1 и Q_2 от смещения источника излучения вдоль оси y

Расчёт выполнен в приложении Microsoft Office Excel 2010 [88] по приведённой выше методике. Параметры очага возгорания, параметры промежуточной среды и параметры оптической системы прибора выбраны такие же, как и при построении энергетической модели. Исходя из предварительного моделирования оптической системы прибора, рабочие спектральные диапазоны каналов имеют следующие значения длин волн: 750 ± 40 нм, 950 ± 40 нм, 1550 ± 20 нм. В результате компьютерного моделирования получено, что значение абсолютной погрешности измерения температуры вследствие смещения источника излучения относительно оптической оси не превышает 1 градус. Таким образом, использование в ОЭП двух спектральных отношений оптической системы с отдельными объективами каналов является допустимым.

2.4 Электронная часть прибора

Электронная часть ОЭП двух спектральных отношений обеспечивает выполнение следующих функций:

- 1) преобразование сигналов с фотоприёмников (токов) в напряжение, их усиление и оцифровку;
- 2) вычисление спектральных отношений;
- 3) идентификация поступающего сигнала (полезный сигнал или помеха) и принятие решения об отсутствии/присутствии очага возгорания;
- 4) формирование управляющего импульса на активацию устройства пожаротушения в случае принятия решения о возгорании;
- 5) подключение к персональному компьютеру по стандартному интерфейсу RS-232.

При этом первую функцию выполняют блок усиления и аналого-цифрового преобразования сигналов, остальные – блок микроконтроллера (см. рисунок 2.2).

2.4.1 Блок усиления

Выходным сигналом фотоприёмников, используемых в каналах ОЭП двух спектральных отношений, является электрический ток, который для удобства его дальнейшей обработки следует преобразовать в напряжение и усилить. Классическая схема преобразования электрического тока в напряжения и его усиления, выполненная на базе операционного усилителя [89], приведена на рисунке 2.24. Представленная на рисунке 2.24 схема обеспечивает преобразование тока в напряжение в отношении 1 В на 1 мкА входного тока.

По результатам анализа энергетической подмодели проектируемого прибора и с учётом спектральных характеристик чувствительности выбранных фотодиодов в качестве резисторов обратной связи для каналов 1 и 3 выбраны резисторы, имеющие сопротивление 51 кОм, а для канала 2 резистор сопротивлением 26 кОм.

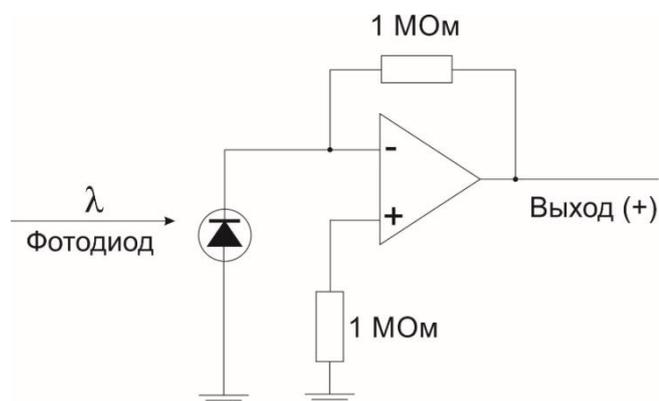


Рисунок 2.24 – Преобразователь-усилитель тока фотодиода в напряжение на операционном усилителе

После анализа рынка микросхем операционных усилителей и с учётом рекомендаций по выбору операционных усилителей [90] для реализации блока приёма и усиления предпочтение отдано микросхеме AD8610 [91], имеющей малую входную ёмкость, высокое входное сопротивление и широкую полосу пропускания. Блок усиления включает три микросхемы AD8610 (по одной на каждый канал).

2.4.2 Блок управления и принятия решения

Основным элементом блока управления и принятия решения является микроконтроллер. Использование микроконтроллера позволяет достаточно просто реализовать алгоритмы по принятию прибором решения, появляется возможность накопления и хранения информации о контролируемом объекте, а также возможность адаптивной настройки прибора на конкретный объект контроля.

Для реализации блока выбран 8-разрядный относительно высокопроизводительный микроконтроллер ATmega8L с малым потреблением и небольшой ценой [92]. Микроконтроллер имеет внутреннюю Flash-память программ в 8 Кбайт, что достаточно для записи в неё программного обеспечения. Микроконтроллер имеет шестиканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с разрядностью 10 бит.

Выходные сигналы блока управления и принятия решения подаются на выходной блок, при этом формируются сигналы двух типов. Первый из них предназначен для активации блока формирования электроимпульса, который в свою очередь, приводит в действие механизм исполнительного устройства, обеспечивающего локализацию и подавление очага возгорания. Второй сигнал предназначен для связи с персональным компьютером и является опциональным. Связь с персональным компьютером осуществляется посредством интерфейса RS-232, поэтому в блоке управления и принятия решения для согласования уровней напряжений последовательного интерфейса RS-232 и микросхем серии TTL используется микросхема ADM232L [93].

2.5 Программное обеспечение прибора

Одним из блоков структурной схемы прибора является блок подключения к персональному компьютеру, поэтому программное обеспечение прибора будет состоять не только из программы управления прибором для микроконтроллера [94], которая будет осуществлять считывание и обработку сигналов с каналов прибора, но и из компьютерной программы управления прибором [95].

2.5.1 Программа управления прибором

Основное назначение компьютерной программы управления прибором сводится к получению сигналов фотоприёмника от микроконтроллера прибора и представлению их в удобном для пользователя виде. Программа управления прибором [94] должна обеспечивать выполнение следующих функций:

- усреднение оцифрованных значений сигналов с каждого канала;
- вычисление спектральных отношений и принятие решения о возникновении очага возгорания;
- формирование сигнала запуска исполнительного устройства пожаротушения в случае принятия решения о возникновении очага возгорания;
- синхронизацию прибора с персональным компьютером;

– приём и отправку данных по последовательному интерфейсу в персональный компьютер.

Усреднение оцифрованных значений с каналов необходимо для того, чтобы исключить случайные шумовые изменения принимаемого сигнала. Для устранения шумовых составляющих могут использоваться не только усреднение сигнала, но и программные фильтры, например, скользящего среднего, медианного и т.д. Но их применение накладывает ограничение на такой параметр разрабатываемого прибора как быстродействие. Поэтому в существующих ОЭП обнаружения очага возгорания используют усреднение принимаемых сигналов по времени [12, 96], что на практике является вполне достаточным.

Для усреднения сигнала необходимо взять N отсчётов и вычислить их среднее значение. Количество отсчётов N определяется временем работы программы, которое определяется таковой частотой микроконтроллера и количеством тактов выполнения программы.

Для того чтобы выбрать количество отсчётов N следует рассчитать быстродействие прибора. Быстродействие ОЭП двух спектральных отношений рассчитывается исходя из времени опроса трёх каналов прибора и постоянной времени используемых фотоприёмников

$$t_{\text{сраб}} = 3t_{\text{к}} + \tau \quad (2.53)$$

где $t_{\text{к}}$ – время опроса одного канала; τ – постоянная времени используемых фотоприёмников.

В свою очередь, время опроса одного канала будет определяться временем выполнения аналого-цифрового преобразования $t_{\text{АЦП}}$ и временем работы программы $t_{\text{прог}}$

$$t_{\text{к}} = t_{\text{АЦП}} + t_{\text{прог}} \quad (2.54)$$

С учётом того что

$$t_{\text{АЦП}} = \frac{N_{\text{АЦП}}}{f_{\text{АЦП}}} \text{ и } t_{\text{прог}} = \frac{N_{\text{такт}}}{f_{\text{МК}}},$$

где $f_{\text{АЦП}}$ – тактовая частота аналого-цифрового преобразования, $N_{\text{АЦП}}$ – количество тактов необходимых для аналого-цифрового преобразования, $N_{\text{МК}}$ – количество тактов микроконтроллера на выполнение программы, $f_{\text{МК}}$ – тактовая частота микроконтроллера.

Для расчётной оценки быстродействия была написана программа для микроконтроллера прибора, в которой выполнялось усреднение значений принимаемого сигнала по трём отсчётам. При тактовой частоте микроконтроллера 8 МГц, настройке АЦП микроконтроллера на тактовую частоту 125 кГц, количестве тактов необходимых для преобразования АЦП равном 14 и количестве тактов для выполнения команд программы микроконтроллера равном примерно 1500 (с учётом циклов) время опроса одного канала составит 299,5 мкс. При значении постоянной времени для используемых в приборе фотодиодов равной 10 мкс, расчётное время срабатывания будет не более 1 мс, что соответствует поставленным требованиям по быстродействию.

2.5.2 Компьютерная программа управления лабораторным образцом прибора

Компьютерная программа управления лабораторным образцом ОЭП двух спектральных отношений [95] реализует алгоритм обмена данными между персональным компьютером и блоком управления и принятия решения.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- получение оцифрованных и усреднённых сигналов фотоприёмников прибора через последовательный порт от микроконтроллера;
- графическое отображение текущих значений сигналов;
- отображение режима работы прибора («НАБЛЮДЕНИЕ» / «ПОЖАР»).

Разработанная программа требуется для настройки прибора, получения и обработки данных при его лабораторном исследовании.

2.6 Техническая реализация оптико-электронного прибора двух спектральных отношений

В результате проведённого компьютерного моделирования ОЭП двух спектральных отношений были определены конструктивные параметры компонентов оптической системы прибора и их взаимное расположение, что позволило выбрать конкретные оптические компоненты. Выбор оптических компонентов осуществлялся по каталогу Edmund Optics Inc. [97].

Для использования в приборе были выбраны двояковыпуклые оптические линзы, имеющие диаметр и фокусное расстояние равные 30 мм, номер линз по каталогу 63-556. Основные параметры линз приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Основные параметры входных собирающих линз

Параметр	Значение
Диаметр, мм	30,00
Фокусное расстояние, мм	30,00
Толщина по центру, мм	6,50
Толщина по краю, мм	1,43
Материал стекла (по каталогу SCHOTT)	N-SF11
Диапазон рабочих длин волн, нм	400–2500

Параметры выбранных светофильтров приведены в таблице 2.11, спектральные характеристики фильтров показаны на рисунке 2.25. При выборе размеров светофильтров учитывались габаритные размеры используемых в приборе приёмников излучения.

Таблица 2.11 – Основные параметры светофильтров

Параметр	Номер канала (номер светофильтра по каталогу)		
	1 (67-843)	2 (65-749)	3 (65-793)
Центральная длина волны, нм	750	950	1550
Ширина полосы пропускания, нм	40	50	12
Диаметр, мм	25		

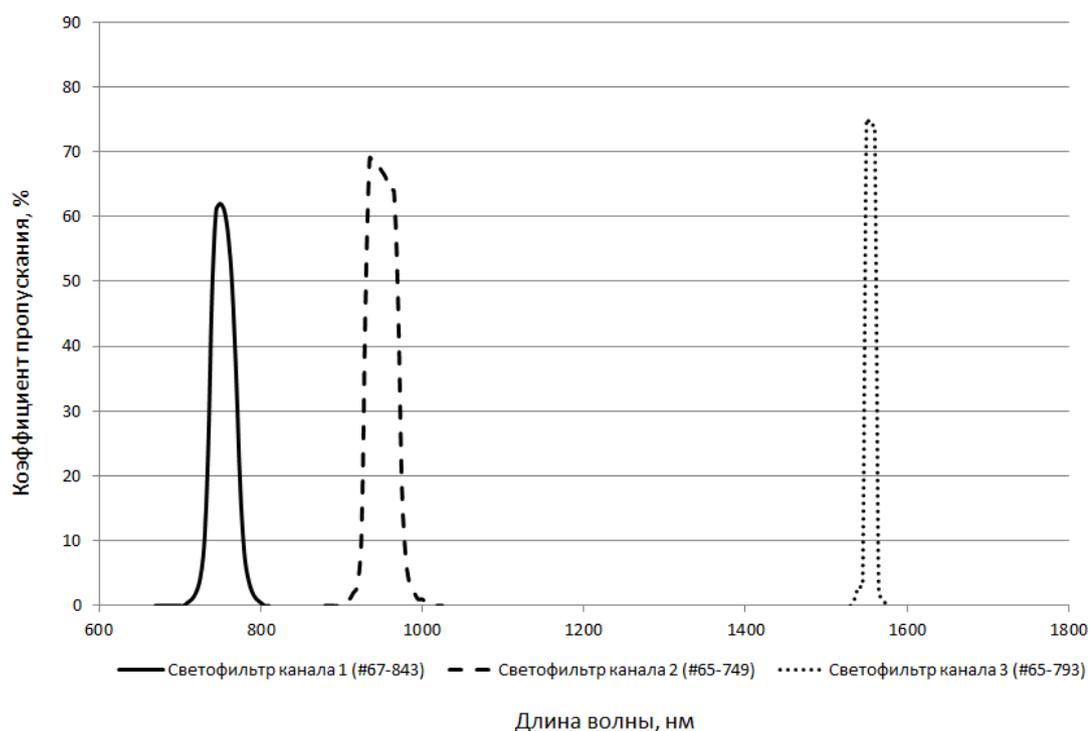


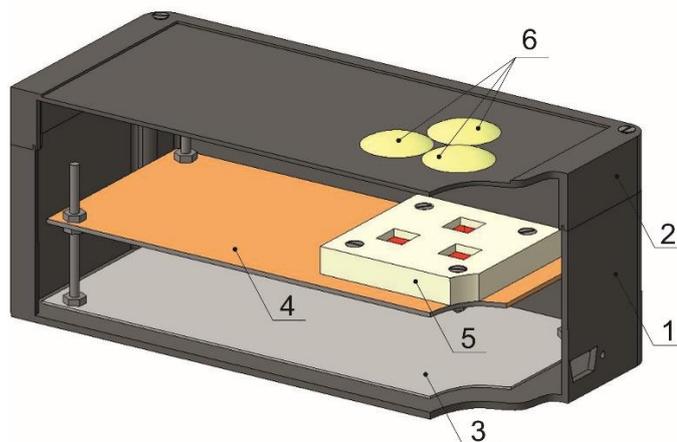
Рисунок 2.25 – Спектральные характеристики пропускания светофильтров

В приборе используются приёмники излучения S1227-1010BR и S1337-1010BR, фирмы Hamamatsu [98] и фотоприёмник ФД «Призма-5» [99]. Параметры выбранных фотоприёмников приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Основные параметры фотоприёмников

Параметр	Номер канала (наименование фотоприёмника)		
	1 (S1227-1010BR)	2 (S1337-1010BR)	3 (ФД «Призма-5»)
Область спектральной чувствительности, нм	340–1000	340–1100	600–1800
Максимум спектральной характеристики, нм	720	960	1550
Токовая монохроматическая чувствительность при максимуме спектральной характеристики, А/Вт	0,43	0,62	0,64
Темновой ток, А	$50 \cdot 10^{-12}$	$200 \cdot 10^{-12}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$
Постоянная времени, с	$7 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}
Размер фоточувствительной площадки, мм	10×10	10×10	5×5

Для ОЭП двух спектральных отношений разработан полный комплект конструкторской документации, включающий сборочный чертёж, чертежи отдельных деталей, схема электрическая принципиальная и топология проводников печатной платы [100]. На рисунке 2.26 показана разработанная трёхмерная модель прибора. Для того чтобы показать детали, установленные внутри корпуса, на рисунке 2.26 не показана боковая стенка.



1 – корпус, 2 – крышка корпуса, 3 – основание, 4 – печатная плата,
5 – крепление светофильтров, 6 – линзы

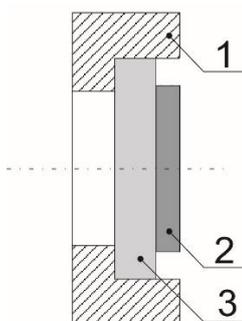
Рисунок 2.26 – Трёхмерная модель прибора

Для установки линз в корпус выполнены три круглых отверстия в крышке корпуса. Диаметр отверстий сделан на 6–8 мм меньше диаметра линзы. Крепление линз осуществляется с помощью клеевого соединения.

Остальные компоненты оптической системы закреплены на деталь *Основание*. Деталь выполнена из оцинкованной стали и устанавливается в корпус с помощью четырёх винтов. На деталь *Основание* на заданной высоте устанавливается печатная плата со впаянными компонентами, на которую, в свою очередь, установлена деталь *Крепление светофильтров*.

Деталь *Крепление светофильтров* представляет собой пластину из оргстекла, в которой выполнены отверстия для установки светофильтров и фотоприём-

ников. Отверстия выполняются с помощью фрезерно-сверлильного станка. Профиль отверстий имеет ступенчатую форму (рисунок 2.27). Светофильтры и приёмники излучения крепятся в отверстие с бóльшим размером. Крепление приёмников излучения и светофильтров осуществляется с помощью клеевого соединения.



1 – деталь *Крепление светофильтров*, 2 – приёмник излучения, 3 – светофильтр

Рисунок 2.27 – Схема закрепления светофильтров и приёмников излучения

На боковой части корпуса выполнено отверстие для установки разъёма типа DB-9F для подключения прибора к устройству пожаротушения и к персональному компьютеру

Для реализации электронной части прибора разработана схема электрическая принципиальная, далее – выполнена расстановка электронных компонентов на печатной плате и разработана топология проводников печатной платы. Все этапы разработки технической реализации электронной части выполнялись в САПР KiCad EDA Suite [101].

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАБОРАТОРНОГО ОБРАЗЦА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА ДВУХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВЗРЫВООПАСНОЙ ПЫЛЕГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ

При компьютерном моделировании ОЭП двух спектральных отношений был сделан ряд допущений, а именно очаг возгорания принят абсолютно чёрным телом, не учитывалась спектральная зависимость коэффициента пропускания оптической системы и т.п. Поэтому следует проверить правильность принятых допущений и достоверность выполненного компьютерного моделирования экспериментально. С этой целью на основе предложенных во второй главе теоретических положений и расчётов был разработан и изготовлен лабораторный образец ОЭП двух спектральных отношений. Разработанный лабораторный образец отличается от реального прибора тем, что представляет собой прибор, позволяющий проводить физическое определение его основных технических параметров, но который имеет некоторые отличия от прибора для промышленного применения – не взрывозащищённое исполнение, возможность подключения к персональному компьютеру, неавтономный блок питания и др.

Согласно п. 2.1 основными техническими параметрами ОЭП двух спектральных отношений являются: угловое поле, дальность действия, порог чувствительности, время обнаружения возгорания, вероятность обнаружения очага возгорания и вероятность ложного срабатывания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех. Перечисленные параметры за исключением дальности действия и времени обнаружения возгорания могут быть определены в лабораторных условиях. Дальность действия является параметром, который может быть косвенно получен при определении порога чувствительности прибора. Определение времени обнаружения очага возгорания требует быстроразвивающегося очага возгорания в виде вспышки метановоздушной смеси, создать такой очаг возгорания в лабораторных условиях не представляется возможным.

Методы испытаний средств пожарной техники стандартизированы и приводятся в соответствующей нормативной документации. Но вследствие существенного отличия конструкции разработанного прибора и специфики его работы, применение известных установок и методик [42], используемых для определения параметров серийно выпускаемых пожарных извещателей, невозможно. Таким образом, для исследования основных параметров лабораторного образца разработанного ОЭП двух спектральных отношений необходим стенд для определения этих параметров. Целесообразно, чтобы разрабатываемый стенд был универсальным, то есть позволял определять все требуемые параметры прибора в лабораторных условиях. Таким образом, для определения параметров разработанного ОЭП двух спектральных отношений в лабораторных условиях необходимо:

- разработать стенд для лабораторного определения основных технических параметров ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания, позволяющий определять угловое поле, порог чувствительности, вероятность обнаружения очага возгорания и вероятность ложного срабатывания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех;

- разработать методики определения перечисленных выше четырёх основных технических параметров разработанного прибора на основе стандартных методик проведения испытаний пожарной техники [42];

- выполнить экспериментальное определение основных параметров ОЭП двух спектральных отношений.

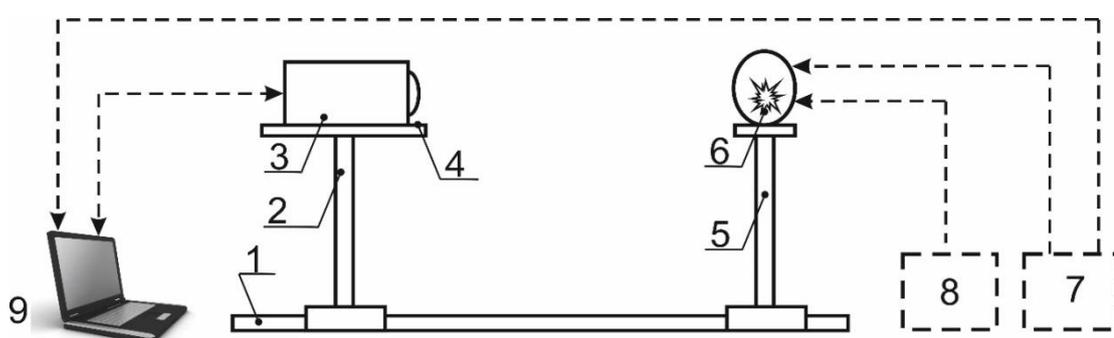
3.1 Разработка стенда для лабораторного исследования оптико-электронных приборов обнаружения начальной стадии возгорания

Стенд для лабораторного исследования ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания должен отвечать следующим требованиям:

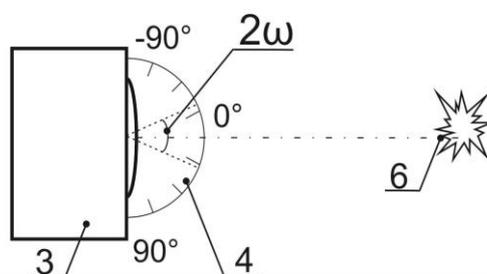
- позволять определять такие параметры ОЭП, как угловое поле, порог чувствительности, вероятность обнаружения очага возгорания и вероятность ложного срабатывания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех;

- работать с различными типами источников излучения;
- иметь возможность подключения исследуемого ОЭП к персональному компьютеру;
- использовать стандартное оборудование для проведения исследований оптических и оптико-электронных приборов (оптическая скамья, штативы, держатели и т.п.).

На рисунке 3.1 показано устройство разработанного стенда для лабораторного исследования ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания [102].



а



б

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

Рисунок 3.1 – Устройство лабораторного стенда: а – общий вид, б – вид сверху (пунктирными линиями показаны опциональные блоки)

Стенд представляет собой оптическую скамью 1, на которой с помощью штатива 2 закрепляется исследуемый прибор 3 и с помощью штатива 5 – источ-

ник-имитатор очага возгорания 6. Транспортёр 4 необходим при измерении углового поля прибора. Прибор 3 устанавливается в центр транспортёра 4 таким образом, чтобы оптическая ось прибора проходила через метку «0 градусов». Исследуемый прибор может подключаться к персональному компьютеру 8, что даёт возможность отслеживать сигналы на выходах прибора, проводить их обработку и анализ. В качестве источника-имитатора очага возгорания 6 в зависимости от цели эксперимента используются различные источники, например, образцовый излучатель в виде модели абсолютно чёрного тела (АЧТ) или газовая горелка. При необходимости источник-имитатор очага возгорания 6 подключается к блоку управления 7 или блоку питания 8.

При проведении экспериментов в стенде применяется образцовый излучатель в виде модели чёрного тела АЧТ-45/100/1000 (далее – излучатель АЧТ), основные технические параметры которого приведены в таблице 3.1 [103].

Таблица 3.1 – Технические параметры излучателя АЧТ-45/100/1000

Параметр	Значение
Диапазон воспроизводимых температур, °С	от 300 до 1100
Размеры излучающей полости, мм: диаметр выходного отверстия; расстояние от переднего торца печи до излучающей вставки	45 (425 ± 5)
Коэффициент излучения полости, не менее	0,99
Время выхода на стационарный режим, мин, не более	120
Дрейф температуры излучателя за 15 минут для стационарных режимов поддержания температуры, °С, не более	0,25
Время перехода на другой стационарный режим, мин, не более	120
Погрешность поддержания температуры излучателя в стационарном режиме, °С, не более	0,5
Доверительная погрешность воспроизведения температуры при доверительной вероятности 0,95, не более	1 °С + 0,6 % от установленной температуры

Температура излучающей полости излучателя АЧТ регулируется с помощью блока управления, а её значение отображается на цифровом табло. Значение

температуры может задаваться как с панели блока управления, так и с персонального компьютера, который подключается к блоку управления через интерфейс RS-232. Эксплуатация излучателя АЧТ-45/100/1000 осуществляется в соответствии с требованиями, изложенными в документации [103].

Газовая горелка при проведении экспериментов является источником-имитатором очага возгорания, которым в реальных условиях будет выступать вспышка метана. В разработанном стенде пропан–бутановая газовая смесь подаётся в горелку из бытового газового баллона, при этом конструкция горелки позволяет регулировать размер пламени с помощью имеющегося вентиля.

Также на штатив 5 крепятся источники возможных засветок. В качестве источников возможных засветок в соответствии с проведённым ранее теоретическим исследованием (см. п. 2.3.3.2) и нормативной документацией [42] в стенде используются лампы накаливания мощностью 60 и 100 Вт и люминесцентные лампы мощностью 20 и 40 Вт. Указанные источники излучения представляют собой бытовые источники освещения, устанавливаемые в электрические патроны для ламп без регулирования освещённости и подключаемые к сети 220 В.

С учётом того что, аналогичный перечень параметров имеют и другие ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания [12, 55–58, 66] предложенный стенд является универсальным средством для лабораторного исследования приборов подобного рода.

3.2 Методики определения основных параметров оптико-электронного прибора двух спектральных отношений в лабораторных условиях

Определение углового поля, порога чувствительности по температуре, вероятности обнаружения очага возгорания и вероятности ложного срабатывания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех ОЭП двух спектральных отношений проводится на описанном в п. 3.1 лабораторном стенде. Исследуемый прибор подключается к персональному компьютеру с установленным на нём разработанным программным обеспечением [95], позволяющем в режиме реального

времени отслеживать изменение сигналов на выходах каналов прибора и сигнал, подаваемый прибором на исполнительное устройство. Последний показывает факт отсутствия/возникновения очага возгорания в угловом поле зрения прибора.

Как правило, все исследования выполняются в тёмной комнате при отсутствии фоновой засветки в виде источников искусственного освещения и солнечного света. Если для проведения экспериментов требуется создание фоновой освещённости, это отдельно оговаривается при описании методики.

В приведённых ниже методиках определения основных параметров ОЭП двух спектральных отношений необходимо провести серию из N измерений. Согласно [104] для удовлетворительной точности в оценке значения измеряемой величины количество измерений должно быть не менее пяти при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

Полуширина доверительного интервала Δ при нормальном законе распределения погрешностей, которое наиболее часто встречается на практике при работе с электронными приборами, и малом числе измерений определяется по формуле

$$\Delta = \frac{t_{\alpha, N} \cdot \sigma}{\sqrt{N}}, \quad (3.1)$$

где $t_{\alpha, N}$ – коэффициент Стьюдента, σ – среднее квадратическое отклонение отдельного измерения, N – количество измерений.

Из формулы (3.1) следует

$$\frac{\Delta}{\sigma} = \frac{t_{\alpha, N}}{\sqrt{N}}. \quad (3.2)$$

Приняв отношение $\frac{\Delta}{\sigma}$ равным, например, 0,5 [105], можно задавая количество измерений в серии N и используя известные значения коэффициента Стьюдента $t_{\alpha, N}$ определить значение N , при котором отношение $\frac{\Delta}{\sigma}$ достигает требуемого значения. Для того чтобы обеспечить значение отношения $\frac{\Delta}{\sigma} = 0,5$ необходимо

провести 18 измерений, но с учётом того, что в экспериментальных данных могут содержаться грубые ошибки, отбрасываемые при обработке результатов эксперимента, количество измерений N должно быть больше 18. Таким образом, количество измерений N должно быть не менее 20 при доверительной вероятности α равной 0,95.

3.2.1 Методики определения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех и вероятности ложного срабатывания

Наиболее очевидный способ определения вероятности обнаружения $p_{по}$ и вероятности ложного срабатывания $p_{л}$ состоит в непосредственном подсчёте количества срабатываний (или несрабатываний) прибора при воздействии на его входной зрачок источника-имитатора очага возгорания и (или) источников внешних оптических засветок. До непосредственного определения вероятности обнаружения и вероятности ложного срабатывания необходимо задать значение отношения сигнал-шум μ , которое записывается в программу управления прибором. Согласно ранее проведённым теоретическим исследованиям (п. 2.3.3.2) отношение сигнал-шум выбрано равным 2. В соответствии с рекомендациями [42] вероятность обнаружения очага возгорания определяется на основе серии экспериментов, каждый из которых заключается в снятии светонепроницаемой перегородки между входным зрачком прибора и источником-имитатором очага возгорания и фиксации срабатывания или пропуска возгорания.

Разработана следующая методика определение вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех:

а) выполнить сборку стенда для лабораторных исследований (см. п. 3.1), в качестве источника излучения установить излучатель АЧТ. Исследуемый прибор установить таким образом, чтобы входной зрачок прибора был направлен на излучатель, и оптическая ось прибора проходила через источник излучения. Для того чтобы поток излучения на входном зрачке прибора соответствовал расчётному

значению порога срабатывания по температуре (который согласно пп. 2.1 и 2.3.3.1 составляет $T_{ОВ} = 630$ °С при расстоянии до входного зрачка прибора $l_{ОВ} = 10$ м и видимой площади очага возгорания $\Delta A_{ОВ} = 1$ м²) излучатель АЧТ устанавливается на расстояние 0,4 м от входного зрачка прибора и выводится на температуру 630 °С. Исследуемый прибор подключить к персональному компьютеру через интерфейс RS-232;

б) измерить радиометром энергетическую освещённость $E_{АЧТ}$, создаваемую излучателем АЧТ на входном зрачке прибора, снять со стенда излучатель АЧТ;

в) установить газовую горелку на расстоянии 1 м от входного зрачка прибора. Регулирую размер пламени добиться, чтобы энергетическая освещённость на входном зрачке прибора была равна $E_{АЧТ}$. В разработанной методике предпочтение отдано настройке источника-имитатора очага возгорания не по расчётному значению энергетической освещённости, а по излучателю АЧТ, т.к. на практике на работу прибора будут влиять ряд факторов, в частности, условия проведения эксперимента. Кроме того, сам радиометр будет вносить погрешность при установке освещённости. В предлагаемой методике эта погрешность будет минимизирована. При дальнейших лабораторных испытаниях значение уровня энергетической освещённости, создаваемой газовой горелкой, не должно отличаться от первоначального значения более чем на 10 % [42]. Уровень энергетической освещённости следует постоянно контролировать радиометром, и при необходимости выполнять его регулировку, уменьшая или увеличивая размер пламени горелки;

г) установить светопроницаемую перегородку между входным зрачком прибора и газовой горелкой;

д) выполнить серию из N опытов (для повышения точности результатов измерений рекомендуется выбрать значение $N = 100$), заключающихся в том, что в одинаковых условиях с перерывами не менее одной секунды [42] убирают перегородку между источником излучения и прибором и фиксируют срабатывание прибора или пропуск возгорания с помощью компьютерной программы или с помощью сигнала, выдаваемого самим прибором;

е) рассчитать вероятность обнаружения очага возгорания на основе полученных экспериментальных данных по формуле

$$P_{no} = \frac{N_{cp}}{N}, \quad (3.3)$$

где N_{cp} – количество срабатываний прибора, N – количество экспериментов в серии;

ж) оценить вероятность обнаружения очага возгорания в каждом отдельном эксперименте на основе интервальной оценки генеральной доли признака [106]

$$w - t_\alpha \sqrt{\frac{w(1-w)}{N}} < p < w + t_\alpha \sqrt{\frac{w(1-w)}{N}}, \quad (3.4)$$

где $w = \frac{M}{N}$ – выборочная доля признака; M – количество объектов выборки, обладающих альтернативным признаком, в данном случае количество срабатываний прибора N_{cp} ; N – количество объектов выборки; t_α – аргумент функции Лапласа при доверительной вероятности α . Формула (3.4) справедлива для большой выборки ($N \rightarrow \infty$), на практике же обычно принимают $N \geq 30$ [106];

з) выполнить определение вероятности обнаружения очага возгорания с установленными на стенд источниками помех (см. п. 2.3.3.2). Дополнительно установить на стенд источник помехи в виде лампы накаливания мощностью 60 Вт таким образом, чтобы на входном зрачке прибора обеспечивалась освещённость 250 лк [42]. Поток излучения, создаваемый лампой накаливания, не должен препятствовать попаданию потока излучения от источника-имитатора очага возгорания и наоборот. При проведении лабораторных опытов значение уровня освещённости, создаваемой источниками излучения, не должно отличаться от первоначального значения более чем на 10 % [42]. Контроль освещённости выполняется с помощью люксметра;

и) повторить пп. г–ж с установленным источником помехи;

к) снять со стенда источник помехи в виде лампы накаливания мощностью 60 Вт и установить на стенд источник помехи в виде лампы накаливания мощностью 100 Вт. Установка указанной лампы выполняется аналогично п. з);

л) повторить пп. г–ж с установленным источником помехи в виде лампы накаливания мощностью 100 Вт;

м) снять со стенда источник помехи в виде лампы накаливания мощностью 100 Вт и установить на стенд источник помехи в виде люминесцентной лампы мощностью 20 Вт таким образом, чтобы на входном зрачке прибора обеспечивалась освещённость 2500 лк [42]. В остальном установка указанной лампы выполняется аналогично п. з);

н) повторить пп. г–ж с установленным источником помехи в виде люминесцентной лампы мощностью 20 Вт;

о) снять со стенда источник помехи в виде люминесцентной лампы мощностью 20 Вт и установить на стенд источник помехи в виде люминесцентной лампы мощностью 40 Вт. Установка указанной лампы выполняется аналогично п. м);

п) повторить пп. г–ж с установленным источником помехи в виде люминесцентной лампы мощностью 40 Вт.

Аналогичным образом определяется вероятность ложного срабатывания. Отличие от описанной выше методики определения вероятности обнаружения очага возгорания состоит в использовании в качестве источника излучения возможных источников помех (см. п. 2.3.3.2). Разработанная методика определения вероятности ложного срабатывания заключается в выполнении следующих действий:

а) выполнить сборку стенда для лабораторных исследований (см. п. 3.1). Сборка стенда выполняется аналогично п. а) методики определения вероятности обнаружения очага возгорания при наличии/отсутствии внешних оптических помех;

б) установить на стенд источник помехи в виде лампы накаливания мощностью 60 Вт таким образом, чтобы на входном зрачке прибора обеспечивалась освещённость 250 лк [42]. При проведении лабораторных исследований значение уровня освещённости, создаваемой источниками излучения, не должно отличаться от первоначального значения более чем на 10 % [42]. Контроль освещённости выполняется с помощью люксметра;

в) установить светопроницаемую перегородку между входным зрачком прибора и источником помехи;

г) выполнить серию из N опытов (для повышения точности результатов измерений рекомендуется выбрать значение $N = 100$), заключающихся в том, что в одинаковых условиях с перерывами не менее одной секунды [42] убирают перегородку между источником излучения помехи и прибором и фиксируют ложное срабатывание прибора или отсутствие срабатывания с помощью компьютерной программы;

д) рассчитать вероятность ложного срабатывания на основе полученных экспериментальных данных по формуле

$$p_{л} = \frac{N_{cp}}{N},$$

где N_{cp} – количество срабатываний прибора, N – количество экспериментов в серии;

е) оценить доверительный интервал для вероятности ложного срабатывания в каждом отдельном эксперименте по формуле [106]

$$w - t_{\alpha} \sqrt{\frac{w(1-w)}{N}} < p < w + t_{\alpha} \sqrt{\frac{w(1-w)}{N}}, \quad (3.5)$$

где $w = \frac{M}{N}$ – выборочная доля признака; M – количество объектов выборки, обладающих альтернативным признаком, в данном случае количество срабатываний прибора N_{cp} ; N – количество объектов выборки; t_{α} – аргумент функции Лапласа при доверительной вероятности α .

ж) снять со стенда источник помехи в виде лампы накаливания мощностью 60 Вт и установить на стенд источник помехи в виде лампы накаливания мощностью 100 Вт. Установка указанной лампы выполняется аналогично п. б);

з) повторить пп. в–е с установленным источником помехи в виде лампы накаливания мощностью 100 Вт;

и) снять со стенда источник помехи в виде лампы накаливания мощностью 100 Вт и установить на стенд источник помехи в виде люминесцентной лампы мощностью 20 Вт таким образом, чтобы на входном зрачке прибора обеспечива-

лась освещённость 2500 лк [42]. В остальном установка указанной лампы выполняется аналогично п. б);

к) повторить пп. в–е с установленным источником помехи в виде люминесцентной лампы мощностью 20 Вт;

л) снять со стенда источник помехи в виде люминесцентной лампы мощностью 20 Вт и установить на стенд источник помехи в виде люминесцентной лампы мощностью 40 Вт. Установка указанной лампы выполняется аналогично п. и);

м) повторить пп. в–е с установленным источником помехи в виде люминесцентной лампы мощностью 40 Вт.

3.2.2 Методика определения порога чувствительности по температуре

Согласно определению, приводимым Ю.Г. Якушенковым в работе «Теория и расчёт оптико-электронных приборов», для ОЭП и систем обнаружения «энергетическая пороговая чувствительность обычно определяется как значение входного сигнала – потока или освещённости на входном зрачке прибора, обеспечивающего заданное отношение сигнал/шум» [21]. Помимо энергетической пороговой чувствительности вводится понятие чувствительности по отслеживаемому параметру, которым для разрабатываемого ОЭП двух спектральных отношений будет температура. Таким образом, порог чувствительности по температуре – это минимальное значение температуры $T_{ОВ}$ исследуемого объекта, имеющего видимую площадь $\Delta A_{ОВ}$ и находящейся на расстоянии $l_{ОВ}$ от входного зрачка прибора, при котором обеспечивается заданное отношение сигнал/шум, необходимое для надёжного срабатывания прибора, например, для обеспечения требуемой вероятности обнаружения очага возгорания.

Поток излучения от очага возгорания на входном зрачке ОЭП зависит от ряда параметров: его температуры, площади, расстояния до него и др. Эталонным источником излучения, используемым для сравнения излучателей различного вида, является излучатель в виде модели АЧТ. Площадь излучающей поверхности определяется конструкцией АЧТ, а расстояние до входного зрачка прибора может

быть принято фиксированным в ходе эксперимента. Таким образом, использование источника излучения в виде модели АЧТ позволяет уйти от привязки к конкретному очагу возгорания и использовать для описания потока излучения только температуру, что удобно, с практической точки зрения, в лабораторных условиях.

Для определения порога чувствительности по температуре ОЭП двух спектральных отношений в рамках диссертационной работы разработана методика, которая сводится к выполнению следующих действий:

а) выполнить сборку стенда для лабораторных исследований (см. п. 3.1). Сборка стенда выполняется аналогично п. а) методики определения вероятности обнаружения очага возгорания при наличии/отсутствии внешних оптических помех (см. п. 3.2.1);

б) вывести образцовый излучатель АЧТ на нижнее значение диапазона воспроизводимых им температур – 300 °С. Время выхода излучателя на заданную температуру составляет 120 минут в соответствии с технической документацией [103];

в) для установленного значения температуры осуществить N измерений напряжений на выходах каналов прибора. Согласно п. 3.2 N составляет не менее 20 измерений, принято $N = 30$. В соответствии с правилами обработки прямых многократных измерений [104, 107] для каждой температуры определить средние значения напряжений на выходах каналов 1–3 \bar{U}_1 , \bar{U}_2 и \bar{U}_3 , которые являются наилучшей оценкой истинного значения напряжения в канале [104]

$$\bar{U}_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{1i}, \quad \bar{U}_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{2i}, \quad \bar{U}_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{3i}, \quad (3.6)$$

где U_{1i} , U_{2i} и U_{3i} – значение напряжений в каналах 1–3 в i -ом измерении.

г) изменяя температуру образцового излучателя в диапазоне воспроизводимых им температур от 300 °С до 1100 °С с шагом 10 °С, выполнить повторение п. в) данной методики. Шаг в 10 °С выбран для упрощения проведения экспериментальных исследований. Выбранный шаг изменения температуры позволит получить достаточно гладкую кривую, кроме того, ошибка в 5 градусов при температуре 630 °С даст относительную погрешность определения температуры менее 1 %, что доста-

точно мало для приборов контроля. Таким образом, будут получены наборы экспериментальных данных $\{\bar{U}_1(T_1), \bar{U}_1(T_2), \dots, \bar{U}_1(T_N)\}$, $\{\bar{U}_2(T_1), \bar{U}_2(T_2), \dots, \bar{U}_2(T_N)\}$, $\{\bar{U}_3(T_1), \bar{U}_3(T_2), \dots, \bar{U}_3(T_N)\}$;

д) определить порог чувствительности по напряжению $U_{\text{пор}}$. Поскольку рабочие спектральные диапазоны каналов прибора различны, и в них используются различные фотоприёмники, пороги чувствительности каналов $U_{i \text{ пор}}$ будут различны. Порог чувствительности прибора $U_{\text{пор}}$ определяется наибольшим значением из порогов чувствительности $U_{i \text{ пор}}$ отдельных каналов.

Для того чтобы определить пороги чувствительности отдельных каналов $U_{i \text{ пор}}$ следует выполнить серию измерений напряжения на выходах каналов прибора при отсутствии сигнала на входном зрачке прибора, то есть когда ток, протекающий через фотоприёмники, соответствует значению темнового тока $I_D - \{U_{1 \text{ пор}1}, U_{1 \text{ пор}2}, \dots, U_{1 \text{ пор}N}\}$, $\{U_{2 \text{ пор}1}, U_{2 \text{ пор}2}, \dots, U_{2 \text{ пор}N}\}$, $\{U_{3 \text{ пор}1}, U_{3 \text{ пор}2}, \dots, U_{3 \text{ пор}N}\}$. Измерение напряжений на выходах каналов прибора осуществляется путём подключения ОЭП к персональному компьютеру, установкой светонепроницаемой перегородки перед его входным зрачком и фиксацией значений напряжений на выходах его каналов.

Далее по результатам проведённых измерений необходимо определить средние значения напряжений в каждом из каналов

$$\bar{U}_{1 \text{ пор}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{1 \text{ пор}i}, \bar{U}_{2 \text{ пор}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{2 \text{ пор}i}, \bar{U}_{3 \text{ пор}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{3 \text{ пор}i},$$

где $N = 30$ – количество измерений в серии.

Оценка абсолютной погрешности измерений пороговой чувствительности $\Delta_{\bar{U}_{i \text{ пор}}}$ в каждом из каналов выполняется стандартным способом, используемым при обработке прямых многократных измерений [104, 107]. Полученные значения необходимо увеличить в μ раз, где μ – заданное отношение сигнал-шум [21]. Таким образом, пороговые значения чувствительности каналов будут $\mu(\bar{U}_{1 \text{ пор}} \pm \Delta_{\bar{U}_{1 \text{ пор}}})$, $\mu(\bar{U}_{2 \text{ пор}} \pm \Delta_{\bar{U}_{2 \text{ пор}}})$ и $\mu(\bar{U}_{3 \text{ пор}} \pm \Delta_{\bar{U}_{3 \text{ пор}}})$, а пороговое значение чувствительности прибора по напряжению $U_{\text{пор}}$

$$U_{пор} = \max \left\{ \mu \left(\bar{U}_{1пор} + \Delta_{\bar{U}_{1пор}} \right), \mu \left(\bar{U}_{2пор} + \Delta_{\bar{U}_{2пор}} \right), \mu \left(\bar{U}_{3пор} + \Delta_{\bar{U}_{3пор}} \right) \right\}. \quad (3.7)$$

е) определить канал, для которого температура $T_{i\text{пор}}$, соответствующая значению напряжению $U_{пор}$, будет иметь наибольшее значение. Порог чувствительности прибора по температуре для условий эксперимента будет определяться по этому каналу. Очевидно, что значению $U_{пор}$ будут соответствовать различные значения температур $T_{1\text{пор}}$, $T_{2\text{пор}}$, $T_{3\text{пор}}$, при которых напряжения на выходах каналов прибора достигают $U_{пор}$ (рисунок 3.2). Для приведённых на рисунке 3.2 наборов экспериментальных данных $\{\bar{U}_1(T_1), \bar{U}_1(T_2), \dots, \bar{U}_1(T_N)\}$, $\{\bar{U}_2(T_1), \bar{U}_2(T_2), \dots, \bar{U}_2(T_N)\}$, $\{\bar{U}_3(T_1), \bar{U}_3(T_2), \dots, \bar{U}_3(T_N)\}$ пороговая чувствительность по температуре будет определяться по каналу 3;

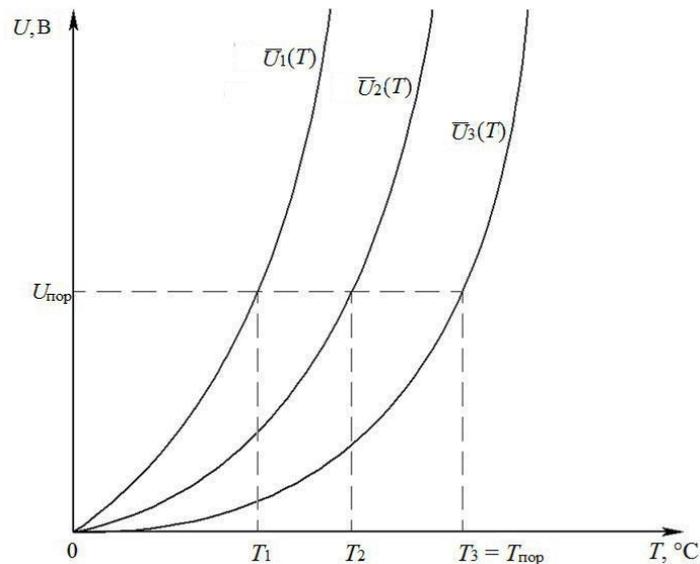


Рисунок 3.2 – Зависимости напряжений на выходах каналов прибора от температуры излучателя АЧТ

ж) на основе набора экспериментальных данных $\{\bar{U}_k(T_1), \bar{U}_k(T_2), \dots, \bar{U}_k(T_N)\}$, полученного в п. д) данной методики (k – номер канала, определяемый в п. ж) методики), получить набор вида $\{\bar{U}_k(\Phi_1), \bar{U}_k(\Phi_2), \dots, \bar{U}_k(\Phi_N)\}$, где Φ_i – это поток излучения на входном зрачке прибора при температуре излучателя T_i . Переход от одного набора данных к другому выполняется с использованием формулы (2.7). Данный переход необходим для того, чтобы на последующих шагах методики

найти температуру реального очага возгорания при заданной видимой площади очага возгорания и расстоянии до него на основе экспериментальных данных, полученных с помощью излучателя АЧТ;

з) выполнить аппроксимацию набора данных $\{\bar{U}_k(\Phi_1), \bar{U}_k(\Phi_2), \dots, \bar{U}_k(\Phi_N)\}$, в результате будет получена зависимость напряжения на выходе канала k от потока на входном зрачке прибора этого канала – $U_k(\Phi)$;

и) подставив значение $U = U_{\text{пор}}$ в функцию $U_k(\Phi)$, найти значение энергетической пороговой чувствительности $\Phi_{\text{пор}}$;

к) определить температуру очага возгорания $T_{\text{ОВ}}$, соответствующую энергетической пороговой чувствительности $\Phi_{\text{пор}}$ при видимой площади очага возгорания $\Delta A_{\text{ОВ}} = 1$ м и расстоянии до входного зрачка прибора $l_{\text{ОВ}} = 10$ м. При нахождении температуры $T_{\text{ОВ}}$ следует воспользоваться формулой (2.7). Полученное значение $T_{\text{ОВ}}$ будет соответствовать порогу чувствительности по температуре $T_{\text{пор}}$ для заданных условий работы прибора (см. п. 2.3.3.1).

3.2.3 Методика определения углового поля

Поскольку угловое поле испытываемого прибора (см. п. 2.3.3.3) обладает осевой и центральной симметриями, оно выражается «значением линейного угла раствора соответствующего пространственного угла» [60].

Определение углового поля ОЭП выполняется на основе экспериментальных исследований в соответствии с рекомендациями [42]. Методика определения углового поля ОЭП двух спектральных отношений сводится к построению угловой диаграммы чувствительности на основе экспериментальных данных и последующему определению по ней углового поля. Поскольку оптическая система прибора состоит из трёх каналов, каждый из которых имеет отдельный входной зрачок, и соответственно обеспечивает собственное угловое поле, угловое поле прибора будет определяться наложением угловых полей его каналов.

Разработанная методика определения углового поля ОЭП двух спектральных отношений состоит из следующих действий:

а) выполнить сборку стенда для лабораторных исследований (см. п. 3.1). Сборка стенда выполняется аналогично п. а) методики определения вероятности обнаружения очага возгорания при наличии/отсутствии внешних оптических помех (см. п. 3.2.1). Дополнительно при измерении углового поля в стенде используется транспортер (поз. 4 на рисунке 3.1). Оптическая ось прибора должна совпадать с меткой «0 градусов» транспортера;

б) перемещая излучатель АЧТ по оптической скамье в направлении от входного зрачка прибора, определить расстояние, на котором наблюдается устойчивое несрабатывание прибора – $l_{н/с}$. Поскольку первоначально прибор устанавливается на расстояние 0,4 м от входного зрачка прибора (согласно п. а) настоящей методики), что позволяет получить на нём поток излучения, соответствующей пороговой энергетической чувствительности прибора, и с учётом размера излучающей поверхности излучателя АЧТ 45 мм, расстояние $l_{н/с}$ будет как минимум в 10 раз, превышать размер излучающей поверхности излучателя АЧТ. Это позволит условно считать излучатель АЧТ точечным источником [62] и избежать погрешности в определении углового поля, как если бы источник излучения был протяжённым;

в) перемещать прибор по оптической скамье, уменьшая расстояние от входного зрачка прибора до источника излучения, до тех пор, пока не произойдёт срабатывание прибора. После срабатывания прибора измерить расстояние l_j между прибором и источником излучения. По практическим соображениям уменьшение расстояния l_j следует выполнять до тех пор, пока l_j не станет равным 5 см. При $l_j = 5$ см и отсутствии сигнала срабатывания, считать, что прибор не сработал;

г) каждый раз устанавливая прибор на расстоянии $l_{н/с}$ от входного зрачка прибора, выполнить серию из N измерений по пункту в) (согласно п. 3.2 N составляет не менее 20 измерений, принято $N = 30$) по п. в), по результатам которой рассчитать среднее расстояние \bar{l}_j

$$\bar{l}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_{ij},$$

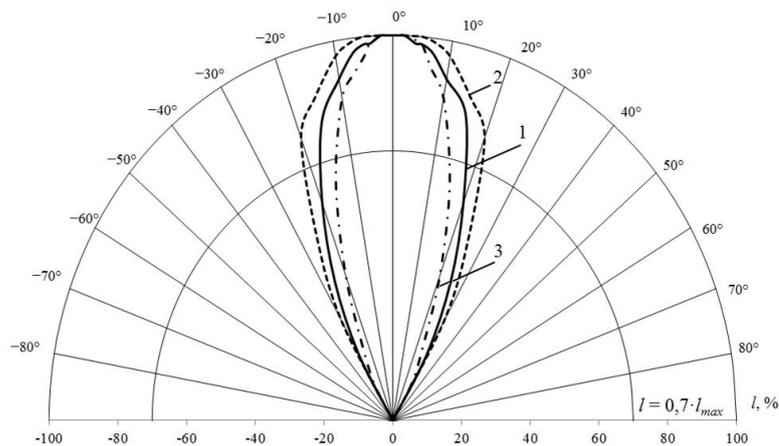
где i – номер измерения в серии, j – соответствует определённому значению угла α_j ;

д) выполнить вычисление абсолютной погрешности определения расстояния \bar{l}_j стандартным способом, используемым при обработке прямых многократных измерений [104, 107] – значение $\Delta_{\bar{l}_j}$;

е) установить прибора на расстоянии $l_{н/с}$ от входного зрачка прибора и увеличить угол α_j между меткой транспорта «0 градусов» и оптической осью на 1 градус и повторить пп. в–д методики. Изменение угла α_j на 1 градус выбрано исходя из практического удобства проведения лабораторных экспериментов. Если при уменьшении расстояния l_j между прибором и источником излучения срабатывания прибора не произошло (см. п. в) настоящей методики), то далее угол α_j увеличивать не следует;

ж) повторить пп. в–е для отрицательных значений углов α_j ;

з) построить по результатам пп. в–ж угловую диаграмму чувствительности, которая представляет собой зависимость расстояния срабатывания прибора \bar{l}_j от угла между оптической осью прибора и меткой транспорта «0 градусов» (рисунок 3.3). Нанести на угловую диаграмму чувствительности кривые, соответствующие значениям расстояний $\bar{l}_j + \Delta_{\bar{l}_j}$ и $\bar{l}_j - \Delta_{\bar{l}_j}$;



I – угловая диаграмма чувствительности; 2 – кривая, построенная для расстояния $\bar{l}_j + \Delta_{\bar{l}_j}$; 3 – кривая, построенная для расстояния $\bar{l}_j - \Delta_{\bar{l}_j}$

Рисунок 3.3 – Графическое представление результатов экспериментального определения углового поля

и) определить значение углового поля. Согласно [42] угловое поле прибора определяется с учётом коэффициента неустойчивости

$$k = \frac{l_{\max}^2}{l_{\min}^2} \leq 2,$$

где l_{\max} – максимальное расстояние между прибором и источником излучения, при котором происходит срабатывание (угол $\alpha = 0^\circ$); l_{\min} – минимальное расстояние между прибором и источником излучения при повороте прибора на угол α_{\max} .

Приняв коэффициент неустойчивости $k = 2$ (для наихудшего случая), расстояние l_{\min} будет

$$l_{\min} = 0,7 \cdot l_{\max}.$$

Таким образом, чтобы определить угловое поле прибора необходимо провести из центра диаграммы чувствительности окружность радиусом равным 70 % от максимального значения l_{\max} и определить точки пересечения окружности с диаграммой чувствительности прибора (кривая l на рисунке 3.3). Далее следует провести прямые через центр диаграммы и полученные точки. Значение угла, образованного этими прямыми, даёт значение углового поле прибора 2ω ;

к) оценить погрешность определения углового поля, для чего по кривым, соответствующим расстояниям срабатывания $\bar{l}_j + \Delta_{\bar{l}_j}$ и $\bar{l}_j - \Delta_{\bar{l}_j}$ (рисунок 3.3) определить значения углового поля $\omega_{+\Delta}$ и $\omega_{-\Delta}$, и рассчитать случайную погрешность определения углового поля как

$$\Delta_{\bar{\omega}} = \frac{\omega_{+\Delta} - \omega_{-\Delta}}{2}.$$

В данном случае определение углового поля (п. л) методики) и случайной погрешности его определения графическим способом является допустимым и позволяет получить требуемые значения с достаточной точностью;

л) записать абсолютную погрешность определения углового поля с учётом погрешности установки прибора под углом к оптической оси Δ_u

$$\Delta\omega = \sqrt{\Delta_u^2 + \Delta_{\bar{\omega}}^2}. \quad (3.8)$$

3.3 Результаты исследования лабораторного образца оптико-электронного прибора двух спектральных отношений

Разработанный стенд для лабораторного исследования (п. 3.1) и методики определения основных параметров ОЭП двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы (п. 3.2) позволяют перейти к последнему этапу лабораторного исследования прибора – экспериментальному определению его параметров.

3.3.1 Вероятность обнаружения очага возгорания и вероятность ложного срабатывания

В таблице 3.2 представлены результаты серии экспериментов по определению вероятности обнаружения очага возгорания. Количество экспериментов в серии N выбрано равным 100, для того чтобы использование формулы (3.4) было допустимым.

Таблица 3.2 – Экспериментальные значения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствии оптических помех

Отношение сигнал-шум	Количество срабатываний	Количество пропусков возгорания	Вероятность обнаружения
2	70	30	0,70
3	96	4	0,96

При отношении сигнал-шум μ равном двум требуемое значение вероятности обнаружения возгорания 0,95 прибором не достигается (см п. 2.1). Низкое значение вероятности обнаружения можно объяснить пульсациями пламени горелки. Далее с целью повышения вероятности обнаружения отношение сигнал-шум μ было увеличено до трёх, после чего проведена повторная серия опытов по определению вероятности обнаружения возгорания. Во втором случае вероятность обнаружения составила 0,96, что соответствует требованиям, поставленным при разработке прибора. Вероятность обнаружения очага возгорания в отдельном экс-

перименте в соответствии с формулой (3.4) составляет $0,92 < p < 0,99$ при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

В таблице 3.3 показаны результаты серии проведённых экспериментов по определению вероятности ложного срабатывания, отношение сигнал-шум μ принято равным трём, количество экспериментов в серии N равно 100. Для ламп накаливания мощность 60 Вт и 100 Вт вероятность ложного срабатывания в отдельном опыте в соответствии с формулой (3.5) при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ составляет $0,01 < p < 0,09$.

Таблица 3.3 – Экспериментальные значения вероятности ложного срабатывания

Вид источника помехи	Количество ложных срабатываний	Количество отсутствия срабатывания	Вероятность ложного срабатывания
Люминесцентная лампа (20 Вт)	0	100	0,00
Люминесцентная лампа (40 Вт)	0	100	0,00
Лампа накаливания (60 Вт)	5	95	0,05
Лампа накаливания (100 Вт)	5	95	0,05

Далее была исследована вероятность обнаружения очага возгорания при наличии внешних помех (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Экспериментальные значения вероятности обнаружения очага возгорания в присутствии внешних оптических помех

Серия измерений	Количество срабатываний	Количество пропусков возгорания	Вероятность обнаружения
1 (помеха – лампа накаливания 60 Вт)	95	5	0,95
2 (помеха – лампа накаливания 100 Вт)	97	3	0,97

В качестве источника помех использовались лампы накаливания мощностью 60 и 100 Вт, отношение сигнал-шум μ принято равным 3. Люминесцентные лампы не использовались в ходе определения параметров прибора, поскольку они не оказывают никакого влияния на принятие прибором решения о присутствии/отсутствии очага возгорания. Таким образом, в результате эксперименталь-

ного определения вероятности обнаружения возгорания в присутствии внешних оптических помех установлено соответствие параметров прибора поставленным требованиям и показана возможность его работы в условиях внешних оптических засветок, в частности, ламп накаливания и люминесцентных ламп. При этом значение отношения сигнал-шум μ должно быть увеличено до трёх.

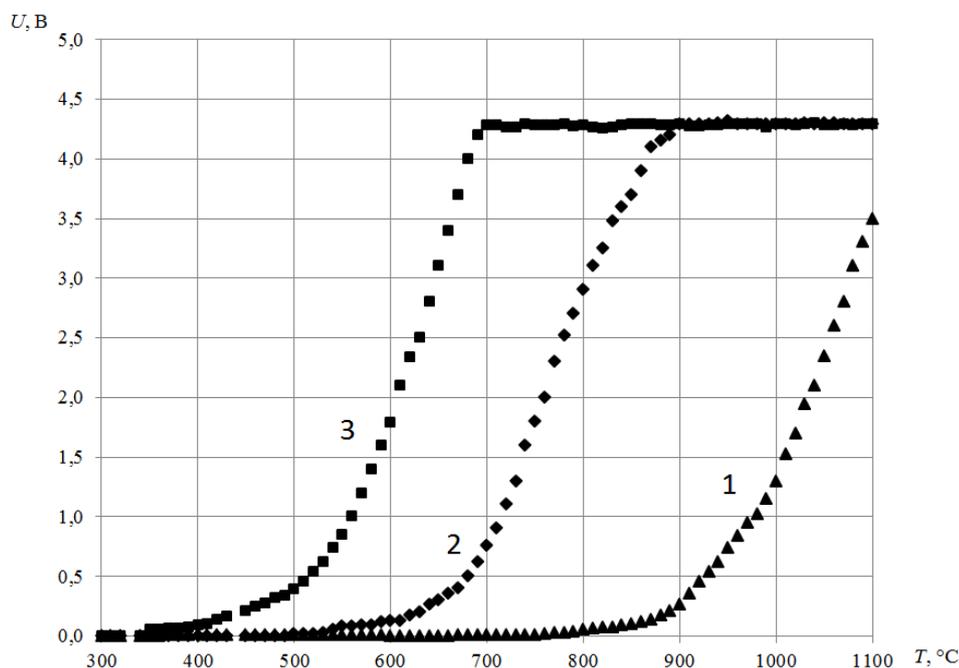
3.3.2 Порог чувствительности по температуре

Для определения порога чувствительности прибора по температуре (см. п. 3.2.2) были найдены значения пороговой чувствительности каналов прибора по напряжению $U_{\text{пори}}$, которые составили для канала с рабочей длиной волны 750 нм 19 мВ, для канала с рабочей длиной волны 950 нм – 13 мВ, для канала с рабочей длиной волны 1550 нм – 16 мВ. Согласно выражению (3.7) порогу чувствительности прибора по напряжению $U_{\text{пор}}$ будет соответствовать значение 19 мВ.

В соответствии с ранее разработанной методикой (см. п. 3.2.2) была выполнена серия измерений напряжений на выходах каналов прибора U_1 , U_2 и U_3 при различных значениях температуры образцового излучателя T . Полученные наборы экспериментальных данных $\{\bar{U}_1(T_1), \bar{U}_1(T_2), \dots, \bar{U}_1(T_N)\}$, $\{\bar{U}_2(T_1), \bar{U}_2(T_2), \dots, \bar{U}_2(T_N)\}$, $\{\bar{U}_3(T_1), \bar{U}_3(T_2), \dots, \bar{U}_3(T_N)\}$ нанесены на координатную сетку (рисунок 3.4).

Из рисунка 3.4 видно, что наибольшее значение при напряжении равном $U_{\text{пор}}$ будет иметь температура $T_{\text{пор}}$, соответствующая каналу 1 с рабочей длиной волны 750 нм. Поэтому в соответствии с разработанной методикой, порог чувствительности по температуре необходимо определять по этому каналу. В результате получено, что порог чувствительности по температуре разработанного прибора составляет 688 °С при площади очага возгорания $\Delta A_{\text{ОВ}} = 1 \text{ м}^2$ и расстоянии от входного зрачка прибора $l_{\text{ОВ}} = 10 \text{ м}$ (см. п. 2.3.3.1). Таким образом, можно утверждать, что прибор обеспечивает дальность действия 10 м при температуре очага возгорания 688 °С и его видимой площади 1 м². В случае других значений

температуры и площади очага возгорания дальность действия прибора может быть пересчитана по выражению (2.7).



1 – канал 1 (рабочая длина волны 750 нм); 2 – канал 2 (рабочая длина волны 950 нм); 3 – канал 3 (рабочая длина волны 1550 нм)

Рисунок 3.4 – Результаты измерения напряжений на выходах каналов прибора при различных температурах образцового излучателя (расстояние до излучателя 0,4 м)

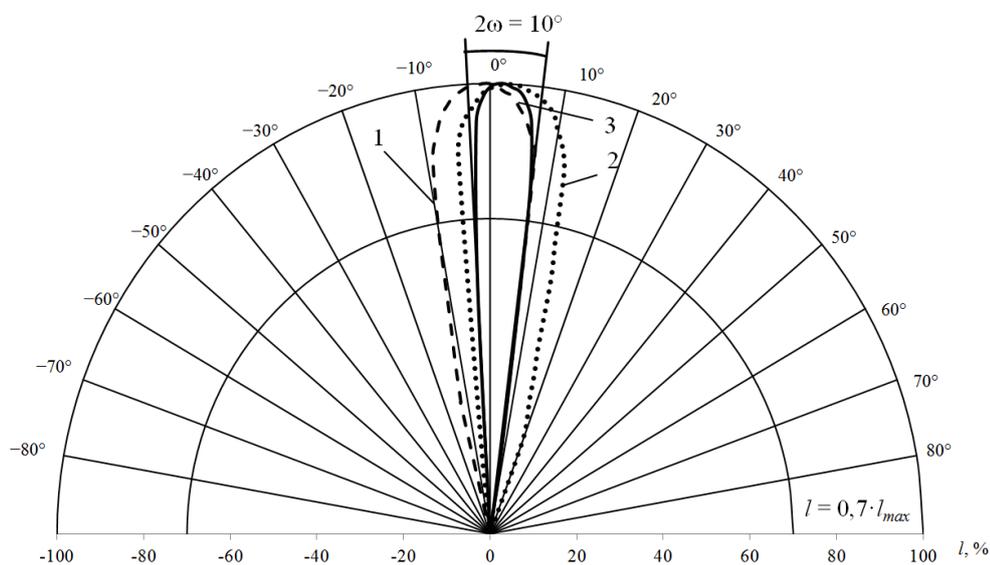
Полученное значение $T_{\text{пор}} = 688 \text{ }^\circ\text{C}$ превышает требуемое ($630 \text{ }^\circ\text{C}$) на $58 \text{ }^\circ\text{C}$. Превышение порога чувствительности по температуре можно объяснить увеличенным отношением сигнал-шум μ до 3 (см. п. 3.3.1) по сравнению со значением $\mu = 2$, принятым при компьютерном моделировании. Завышенное значение порога чувствительности по температуре, безусловно, влияет и на другие параметры разработанного ОЭП, в частности на вероятность обнаружения очага возгорания и вероятность ложного срабатывания (таблицы 3.2–3.4), поэтому следует дополнительно определить эти параметры в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации прибора.

Для приборов контроля точность установки порога чувствительности по температуре не имеет первостепенного значения [12, 21]. Согласно работе «Опти-

ко-электронный прибор обнаружения начальной стадии развития взрыва в газодисперсных системах» Сыпина Е.В. [12]: «скорость нарастания температуры в развивающемся очаге возгорания достаточно велика ... и наличие погрешности даже в ± 100 градусов добавит к времени принятия решения о начале возгорания около 2 мс». Таким образом, находясь в более тяжёлых условиях работы, разработанный ОЭП двух спектральных отношений обеспечил удовлетворительное значение своих параметров.

3.3.3 Угловое поле

По результатам серии экспериментов значение углового поля составило 10 ± 1 градусов. На рисунке 3.5 показана угловая диаграмма чувствительности прибора, демонстрирующая угловые поля всех трёх каналов. Из представленной диаграммы видно, что угловое поле прибора полностью определяется угловым полем канала 3. В этом канале установлен фотоприёмник ФД «Призма-5», имеющий размер чувствительной площадки 5×5 мм.



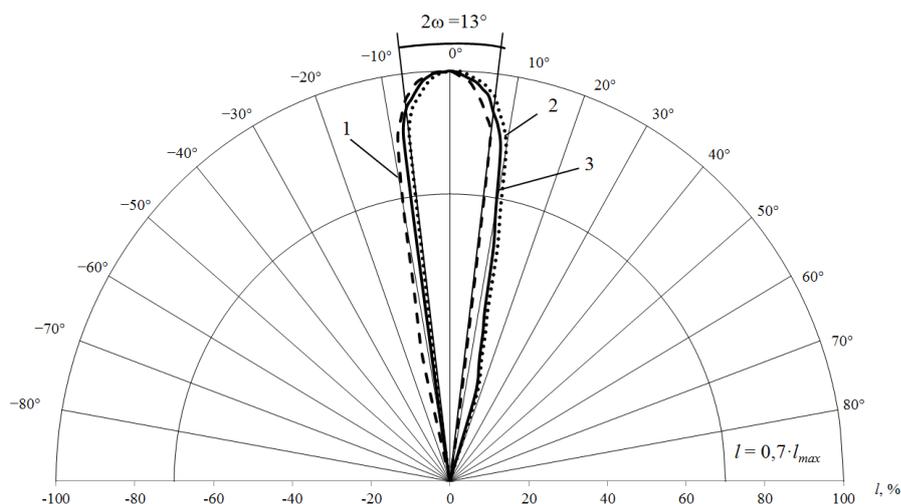
1 – канал 1 (рабочая длина волны 750 нм); 2 – канал 2 (рабочая длина волны 950 нм); 3 – канал 3 (рабочая длина волны 1550 нм)

Рисунок 3.5 – Угловая диаграмма чувствительности прибора

Полученное значение углового поля отличается от расчётного значения ($2\omega = 19,20$ градусов), полученного по результатам предварительно проведённого геометрического моделирования оптической системы (см. п. 2.3.3.3). Расхождение расчётного и полученного на практике значений можно объяснить тем, что при расчётах было принято, что во всех каналах прибора установлены одинаковые фотоприёмники с размером чувствительной площадки равным 10×10 мм, а в действительности, в одном из каналов прибора использовался фотоприёмник с размером чувствительной площадки 5×5 мм. Кроме того, угловое поле каждого канала $2\omega_1$ (при размере чувствительной площадки 10×10 мм) по расчётам составляет $19,26$ градусов, а на практике оказалось равным 17 градусам.

Согласно проведённому моделированию оптической системы ОЭП двух спектральных отношений (см. п. 2.3.3.3), угловое поле прибора определяется размерами чувствительных площадок используемых в приборе фотоприёмников и значением фокусного расстояния, используемых в приборе объективов. При этом чем меньшее фокусное расстояние имеют объективы, тем большее угловое поле будет обеспечивать каждый канал прибора, и соответственно и вся оптическая система прибора. Этот факт использовался при разработке ОЭП двух спектральных отношений, и для прибора были выбраны объективы с наименьшим возможным фокусным расстоянием. Размеры чувствительных площадок фотоприёмников, используемых в приборе, могут быть различны. Поэтому далее было проведено дополнительное исследование углового поля прибора, в котором в каналах устанавливались фотоприёмники с различным размером чувствительной площадки.

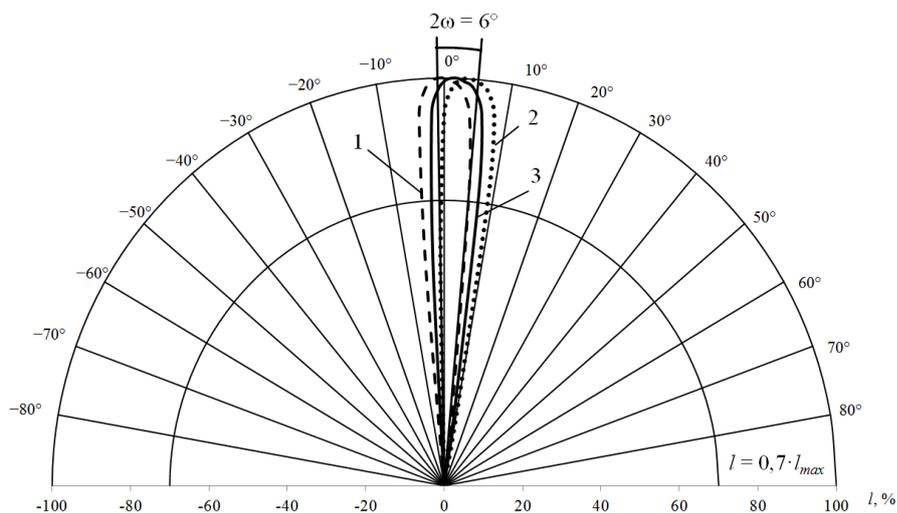
Вначале было выполнено определение углового поля при размере чувствительной площадки фотоприёмников равным 10×10 мм (рисунок 3.6). Если принять угловое поле, обеспечиваемое каждым каналом, равным 17 градусов, то в соответствии с формулами, полученными в п. 2.3.3.3, угловое поле, обеспечиваемое оптической системой прибора, должно составлять $16,94$ градуса. По результатам проведённых экспериментов угловое поле имеет значение 13 градусов (рисунок 3.6), что также значительно отличается от расчётного значения.



1 – канал 1 (рабочая длина волны 750 нм); 2 – канал 2 (рабочая длина волны 950 нм); 3 – канал 3 (рабочая длина волны 1550 нм)

Рисунок 3.6 – Диаграмма чувствительности прибора (все фотоприёмники имеют размер чувствительной площадки 10×10 мм)

На рисунке 3.7 приведены результаты экспериментального определения углового поля для случая, когда во все каналы прибора установлены одинаковые фотоприёмники с размером чувствительной площадки равным 5×5 мм.



1 – канал 1 (рабочая длина волны 750 нм); 2 – канал 2 (рабочая длина волны 950 нм); 3 – канал 3 (рабочая длина волны 1550 нм)

Рисунок 3.7 – Диаграмма чувствительности прибора (все фотоприёмники имеют размер чувствительной площадки 5×5 мм)

В результате угловое поле, обеспечиваемое каждым каналом, составляет 9 градусов (расчётное значение – 9,57 градусов). Угловое поле, обеспечиваемое прибором, составляет 6 ± 1 градус (расчётное значение – 8,94 градусов).

Проведённое экспериментальное исследование углового поля ОЭП двух спектральных отношений позволяет сделать вывод, что отличие между теоретически рассчитанным и практически полученным значениями углового поля является значительным и составляет более 30 % (если все фотоприёмники имеют размер чувствительной площадки 5×5 мм). Несоответствие полученного в ходе экспериментального определения и теоретически рассчитанного значения можно объяснить неточным расположением входных зрачков оптической системы и низкой чувствительностью фотоприёмников на краях чувствительной площадки.

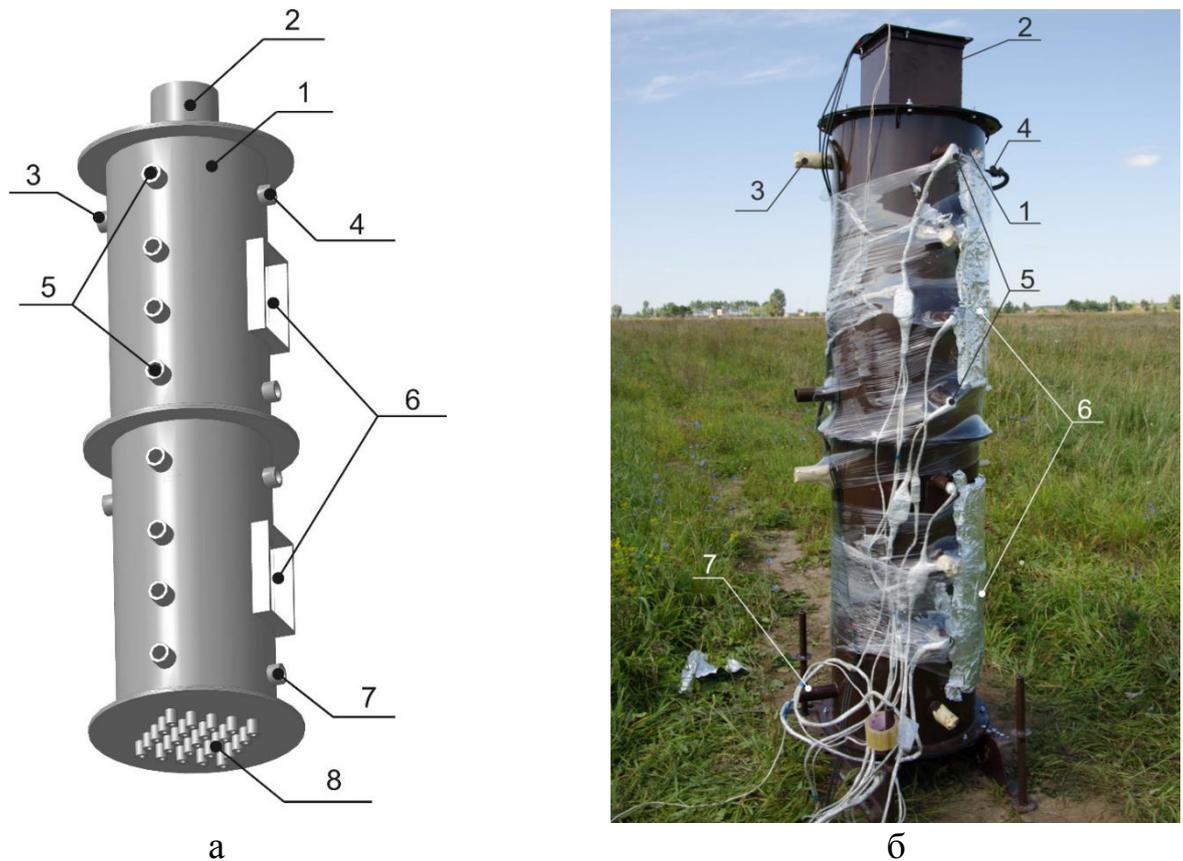
Полученное экспериментальное значение углового поля ОЭП двух спектральных отношений 10 ± 1 градусов (см рисунок 3.5) является несколько меньшим, чем это заложено в требованиях к прибору. Тем не менее, полученное значение сопоставимо с угловым полем других ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания [12, 55–58, 66], значение которого лежит в диапазоне 8–23 градуса. Увеличение углового поля разработанного ОЭП двух спектральных отношений возможно при использовании фотоприёмников с большей площадью чувствительной площадки или иного вида объективов для каналов прибора. Выбор фотоприёмников, имеющих спектральную чувствительность в заданных спектральных диапазонах (п. 2.3.3.2) с большей площадью чувствительной площадки ограничен их производителями. При проектировании прибора использовались фотоприёмники с максимально большой площадью чувствительной площадки из выпускаемых в настоящее время. Использование иного вида объективов, в том числе объективов с несколькими линзами, приведёт к уменьшению потока излучения, приходящего на фотоприёмники вследствие его ослабления при прохождении через оптическую систему, что, в свою очередь, приведёт к увеличению пороговой чувствительности прибора, что недопустимо.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА ДВУХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОЧАГОВ ВОЗГОРАНИЯ НА РАННЕЙ СТАДИИ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ В УСЛОВИЯХ, БЛИЗКИХ К РЕАЛЬНЫМ

Проведённое исследование ОЭП двух спектральных отношений в лабораторных условиях показало правильность теоретических положений, заложенных в его работу, и позволило определить его основные технические параметры – вероятность обнаружения очага возгорания и вероятность ложного срабатывания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех, порог чувствительности по температуре и угловое поле. Но лабораторное исследование не позволило определить время обнаружения очага возгорания прибором. Кроме того, лабораторное определение параметров прибора проводилось без учёта ряда факторов, в частности, не учитывалась нестационарность пламени реального очага возгорания. Поэтому проведено определение времени обнаружения очага возгорания разработанного прибора в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации, и проверена способность прибора к обнаружению реальных быстропротекающих возгораний на ранней стадии, для чего определена вероятность обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех для реального источника возгорания.

В литературе описывается ряд экспериментальных установок для изучения взрывов в угольных шахтах. Такими установками являются металлическая штольня и опытная шахта МакНИИ, опытная штольня ВостНИИ и экспериментальная штольня ВНИИГД «Гранит» [5, 108], экспериментальная установка на базе опытного образца системы взрывозащиты газоотводящей сети СВГСА [109], экспериментальная установка для исследования параметров ОЭП для обнаружения взрыва [96, 110, 111]. Последняя из перечисленных установок разработана и используется на кафедре методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института. Установка представляет собой реакционный сосуд,

располагаемый вертикально и имеющий длину 2 м и внутренний диаметр 0,5 м (рисунок 4.1).



- 1 – реакционный сосуд; 2 – крышка для установки исследуемого ОЭП;
 3 – патрубок для впуска пыли; 4 – патрубок для впуска газа; 5 – восемь патрубков для установки измерительных датчиков; 6 – окна для сброса давления;
 7 – патрубок для ввода поджигателя;
 8 – двадцать пять патрубков для фотоприемников

Рисунок 4.1 – Экспериментальная установка для исследования параметров ОЭП для обнаружения взрыва: а – трёхмерная модель; б – фотография

Подача газа, горючей пыли и ввод поджигателя осуществляется через патрубки 3, 4 и 7, расположенные в корпусе сосуда. В конструкции сосуда предусмотрены окна сброса избыточного давления 6 с установленными предохранительными мембранами, наличие которых предотвращает разрушение реакционного сосуда при взрыве. Исследуемый ОЭП устанавливается в полость крышки реакционного сосуда 2, при этом объектив направляется в сторону дна реакционно-

го сосуда. Для контроля параметров взрыва газопылевоздушной смеси в конструкции сосуда предусмотрены патрубки 5 для ввода измерительных датчиков, патрубки расположены вдоль по высоте сосуда.

Фотография разработанного ОЭП двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы, используемого в ходе экспериментов, показана на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Фотография разработанного ОЭП двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы

Автоматизированная система управления установкой для исследования параметров ОЭП обнаружения взрывов газопылевоздушных смесей (рисунок 4.3) выполнена на основе кейтовой системы сбора данных LTR-U-1, выпускаемой компанией ООО «Л-Кард» [112]. На ноутбук автоматизированной системы управления экспериментальной установкой устанавливается специальный программный комплекс LGraph2 также поставляемый компанией ООО «Л-Кард». Данное программное обеспечение представляет собой программу самописец-визуализатор, работающий в операционных системах семейства Windows или Linux. Основные функции программы заключаются в сборе и визуализации (как в реальном времени, так и в записи) данных с АЦП LTR-11, их сохранение и экспорт в различных форматах. Автоматизированный запуск эксперимента (поджигание горючей смеси в реакционном сосуде) и синхронизация всех блоков системы осуществляется программируемым логическим контроллером ПЛК 150-АМ, выпускаемым фирмой ООО «ОВЕН» [113]. В ПЛК 150-АМ записывается специально разработанное программное обеспечение для выполнения указанных функций.

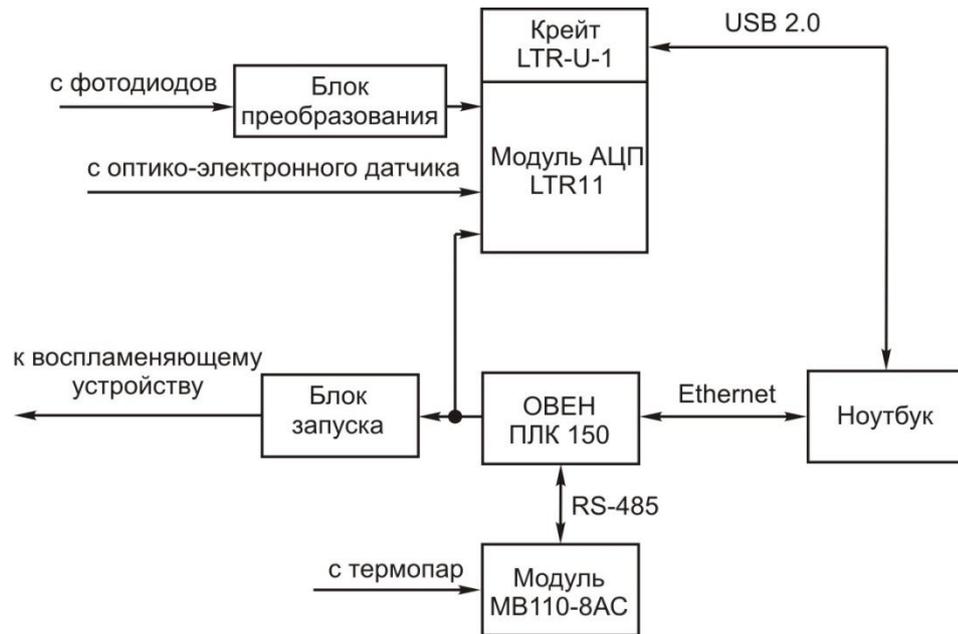


Рисунок 4.3 – Структурная схема автоматизированной системы управления экспериментальной установкой для исследования параметров ОЭП для обнаружения взрыва [96]

Для описываемой установки разработана методика проведения экспериментальных взрывов газопылевоздушных смесей и проведены испытания по определению оптимальных параметров, обеспечивающих эффективное развитие взрывного горения [114]:

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

Таким образом, для того чтобы выполнить экспериментальное исследование ОЭП двух спектральных отношений в условиях близких к реальным достаточно разработать соответствующие методики определения его параметров на базе методики работы с экспериментальной установкой для исследования параметров ОЭП для обнаружения взрыва и выполнить испытания по ним. Обобщённая методика проведения экспериментальных взрывов на установке, приводимая в источниках [96, 114] состоит в выполнении следующих действий:

а) установить основание экспериментальной установки на ровной горизонтальной поверхности и выполнить её сборку в соответствии с техническими требованиями, приведёнными в [96];

б) установить в верхнюю крышку реакционного сосуда 2 исследуемый ОЭП;

в) установить источник воспламенения в виде электроподжигателя (или фейерверочного электровоспламенителя) в нижней части реакционного сосуда. Источник воспламенения должен находиться в угловом поле исследуемого ОЭП;

г) установить в патрубки для установки измерительных датчиков 5 (рисунок 4.1, а) требуемые датчики, подключить к установленным датчикам соответствующие линии автоматизированной измерительной системы установки. Количество датчиков и их вид определяется проводимым экспериментом;

д) через патрубок 4 заполнить реакционный сосуд 1 (рисунок 4.1, а) пропан–бутановой смесью в объёме $(14 \pm 0,5)$ литров [96] и сделать выдержку в 1–2 минуты для равномерного перемешивания пропан–бутановой смеси с воздухом. Расход газа осуществляется датчиком расхода;

е) запустить установленное на компьютере автоматизированной системы управления (рисунок 4.3) программное обеспечение для регистрации измерительной информации;

ж) подать сигнал для включения источника воспламенения с компьютера автоматизированной системы управления;

з) после осуществления взрыва в экспериментальной установке остановить запись измерительной информации на компьютере автоматизированной системы управления;

и) выполнить анализ и обработку полученных экспериментальных данных.

С целью обеспечения требований пожарной безопасности, все работы с разработанной экспериментальной установкой следует проводить на специальном полигоне или в специальном помещении [42].

4.1 Методики экспериментального определения параметров оптико-электронного прибора двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы в условиях близких к реальным

Исходя из особенностей эксплуатации разработанного прибора в условиях пылегазовой атмосферы и возможного присутствия внешних оптических засветок, большое значение имеет вероятность обнаружения очага возгорания прибором в отсутствие/присутствии внешних оптических помех и время обнаружения очага возгорания. Вероятность обнаружения очага возгорания была ранее исследована ранее в лабораторных условиях. Но, несмотря на это, следует проверить указанный параметр ещё раз, но уже при нестационарном источнике возгорания.

4.1.1 Методика определения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех

Для определения вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех на базе экспериментальной установки для исследования параметров ОЭП для обнаружения взрыва разработана методика, включающая следующую последовательность действий:

а) выполнить сборку экспериментальной установки, установить исследуемый ОЭП и источник воспламенения в соответствии обобщённой методикой проведения экспериментальных взрывов (см. п. 4.1). Никакие дополнительные датчики в ходе проведения эксперимента не используются, патрубки 5 закрываются специальными заглушками;

б) выполнить серию из 30 экспериментов, количество экспериментов $N_I = 30$ выбрано исходя из того, чтобы при обработке экспериментальных данных было корректным использование формулы (3.4). В каждом проводимом эксперименте выполняется заполнение реакционного сосуда пропан–бутановой смесью, инициируется поджиг смеси и фиксируется срабатывания прибора или пропуск возгорания с помощью компьютерной программы управления экспериментальной

установкой. Выполняется регистрация следующих сигналов: сигналы каналов прибора 1–3 и сигнал активации устройства взрывоподавления;

в) рассчитать вероятность обнаружения очага возгорания на основе полученных экспериментальных данных по формуле (3.3), вероятность обнаружения очага возгорания в каждом отдельном эксперименте вычислить по формуле (3.4);

г) в один из патрубков установки 5, предназначенный для ввода измерительных датчиков, поместить источник оптической помехи – лампу накаливания РЗ,75-1+0,5 из шахтёрского светильника СГГ.5М.05;

д) выполнить серию из 30 экспериментов ($N_2 = 30$) и их обработку аналогично пп. б–в приводимой методики.

4.1.2 Методика определения времени обнаружения очага возгорания

Время обнаружения очага возгорания разработанным прибором, так же, как и любым другим ОЭП обнаружения очага возгорания, будет определяться временем срабатывания прибора при появлении в его угловом поле очага возгорания. Момент появления очага возгорания можно выбрать несколькими способами:

1) момент появления очага возгорания соответствует моменту поджига газозооушной смеси;

2) момент появления очага возгорания определяется дополнительными техническими средствами, работающими независимо от прибора и фиксирующими момент достижения очага возгорания таких параметров (температура $T_{ОВ}$, видимая площадь $\Delta A_{ОВ}$ и расстояние до входного зрачка прибора $l_{ОВ}$), при которых поток, создаваемый им на входном зрачке прибора, будет соответствовать энергетической пороговой чувствительности прибора $\Phi_{пор}$ (см п. 3.3.2).

Первый из приведённых способов достаточно просто реализуется, но его практическое использование даёт слишком большую погрешность при определении времени обнаружения очага возгорания. Как правило, ОЭП настраивается на обнаружение очага возгорания с определёнными параметрами. Параметры очага возгорания (температура, видимая площадь и расстояние до него) определяют по-

ток излучения на входном зрачке прибора. С развитием очага возгорания в некоторый момент времени поток излучения на входном зрачке прибора будет соответствовать энергетической пороговой чувствительности прибора $\Phi_{\text{пор}}$.

При этом с момента поджига до момента, когда поток излучения на входном зрачке прибора станет равным $\Phi_{\text{пор}}$, может оказаться значительным.

Поэтому более корректно использовать второй из предложенных способов. На практике этот способ реализуется подключением к входам блока АЦП исследуемого ОЭП (см. рисунок 2.2) модуля аналого-цифрового преобразования крейтовой системы сбора данных LTR-U-1, используемой в экспериментальной установке. Таким образом, для определения момента появления в поле зрения прибора очага возгорания с требуемыми параметрами используются фотоприёмники самого прибора. Как только сигналы на выходах фотоприёмников превысят значение пороговой чувствительности по напряжению $U_{\text{пор}}$, можно утверждать, что для прибора в данный момент времени в его угловом поле зрения присутствует очаг возгорания с заданными параметрами.

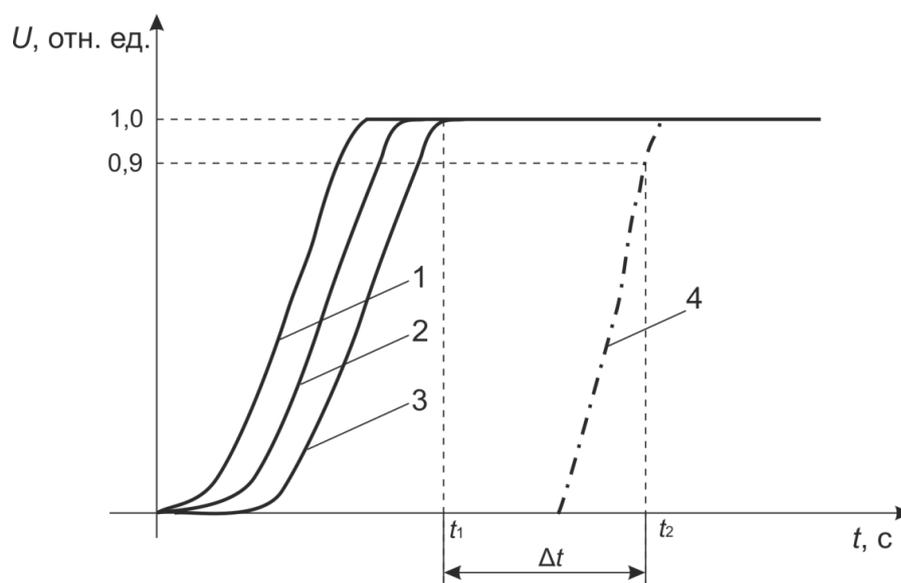
Разработанная в рамках диссертационной работы методика определения времени обнаружения очага возгорания ОЭП двух спектральных отношений состоит из следующих действий:

а) выполнить сборку экспериментальной установки, установить исследуемый ОЭП и источник воспламенения в соответствии обобщённой методикой проведения экспериментальных взрывов (см. п. 4.1). Никакие дополнительные датчики в ходе проведения эксперимента не используются, патрубки 5 закрываются специальными заглушками;

б) выполнить серию не менее чем из 20 экспериментов (см. п. 3.2). В каждом проводимом эксперименте выполняется заполнение реакционного сосуда пропан–бутановой смесью, инициируется поджиг смеси и с помощью компьютерной программы управления экспериментальной установкой регистрируются сигналы модуля АЦП крейтовой системы сбора данных LTR-U-1, используемой в экспериментальной установке. Выполняется регистрация следующих сигналов: сигналы каналов прибора 1–3 и сигнал активации устройства взрывоподавления;

в) по результатам серии экспериментов определить моменты времени t_1 и t_2 . Момент времени t_1 соответствует появлению очага с требуемыми параметрами и определяется наибольшим значением пороговой чувствительности каналов прибора. Как уровень сигнала превысит наибольшее значение пороговой чувствительности, можно утверждать, что очаг возгорания присутствует в поле зрения прибора. Момент времени t_2 соответствует значению 0,9 амплитуды сигнала активации. Значение уровня амплитуды 0,9 для определения момента времени t_2 выбрано, поскольку оно является типичным уровнем для определения времени нарастания сигнала [115].

На рисунке 4.4 результаты серии экспериментов представлены в графическом виде. Согласно разработанной методике момент времени t_1 определяется по кривой 3.



1, 2, 3 – сигналы каналов прибора; 4 – сигнал активации устройства
взрывоподавления

Рисунок 4.4 – К определению времени обнаружения очага возгорания

г) выполнить определение время обнаружения очага возгорания прибором по результатам серий проведённых экспериментов. В каждом конкретном экспе-

рименте серии измерений время обнаружения очага возгорания определяется как разность

$$\Delta t_i = t_{2i} - t_{1i}. \quad (4.1)$$

д) выполнить обработку полученных значений времени обнаружения очага возгорания стандартным способом, используемым при обработке косвенных многократных измерений с учётом правил суммирования погрешностей [104, 107] для того чтобы определить время обнаружения очага возгорания по проведённой серии измерений.

4.2 Результаты определения параметров оптико-электронного прибора двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы в условиях близких к реальным

Поскольку проведение испытаний в условиях приближенных к реальным является трудоёмким и сопряжено с большими финансовыми затратами, связанными в том числе с подготовкой горючей газопылевоздушной смеси, взрыв которой осуществляется в каждом конкретном эксперименте, для минимизации количества экспериментов принято решение выполнять одновременное определение времени обнаружения очага возгорания и вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии оптических помех.

Испытания ОЭП двух спектральных отношений в условиях близких к реальным выполнялись при следующих условиях:

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

Для обеспечения безопасности проведения определения параметров разработанного ОЭП все эксперименты проводились за городом в удалении от мест, где возможно появление посторонних лиц. Все линии связи установки имеют длину, позволяющую исследователю находиться на безопасном расстоянии от установки при проведении экспериментов. Для питания компонентов экспери-

ментальной установки в качестве независимого источника энергии использовался бензогенератор.

В таблице 4.1 приведены полученные по результатам серии экспериментов значения вероятностей обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех. В соответствии с разработанной методикой (п. 4.1.1) в качестве оптической помехи использовалась лампа накаливания РЗ,75-1+0,5 из шахтёрского светильника СГГ.5М.05.

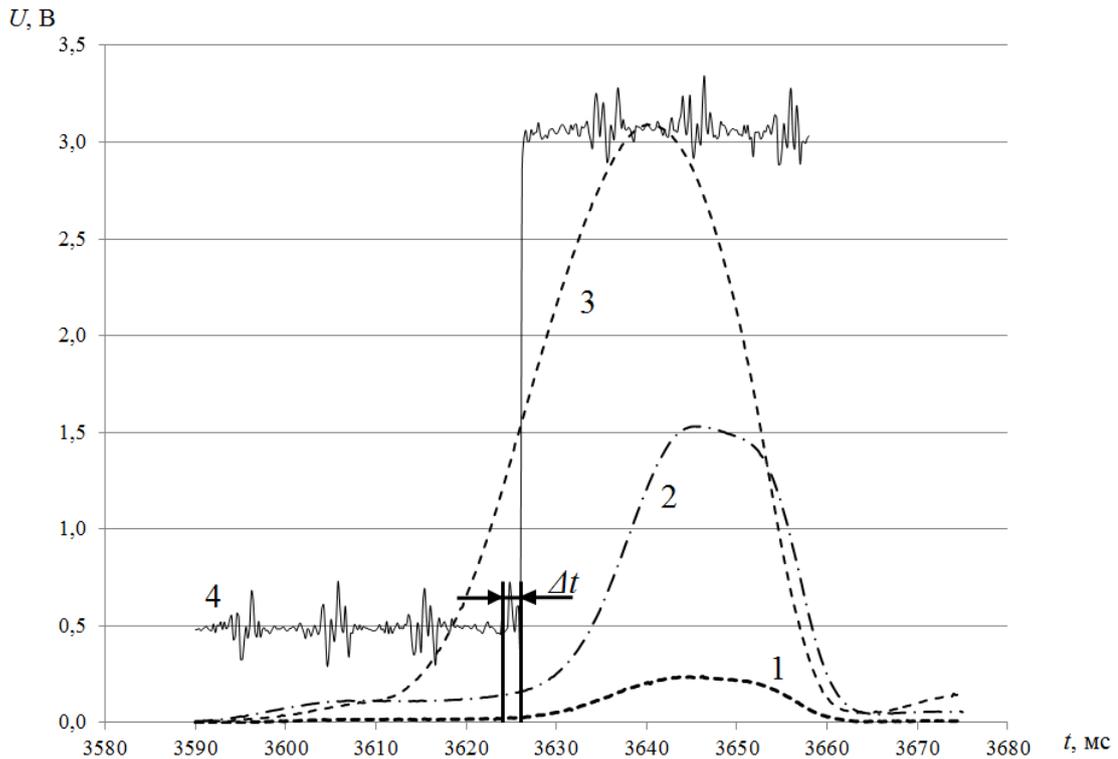
Таблица 4.1 – Вероятности обнаружения очага возгорания в отсутствие/присутствии внешних оптических помех, определённая в условиях, близких к реальным

Серия экспериментов	Оптическая помеха	Вероятность обнаружения	Вероятность обнаружения в отдельном эксперименте*
$N_1 = 30$	Отсутствует	0,95	$0,9 < p < 1,0$
$N_2 = 30$	Лампа накаливания РЗ,75-1+0,5	0,95	$0,9 < p < 1,0$

* При доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

Сигналы каналов прибора и сигнал активации устройства взрывоподавления полученные в результате одного из экспериментов показаны на рисунке 4.5. Из приведённого рисунка видно, что с течением времени, по мере развития очага, возгорания происходит нарастание сигналов на выходах всех каналов. Согласно разработанной методике (см. п. 4.1.2) определение времени обнаружения очага возгорания следует выполнять по экспериментальным данным канала 1.

По результатам проведённой серии экспериментов значение времени обнаружения очага возгорания составляет $2,9 \pm 0,7$ мс при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.



- 1 – канал 1 (рабочая длина волны 750 нм);
 2 – канал 2 (рабочая длина волны 950 нм);
 3 – канал 3 (рабочая длина волны 1550 нм); 4 – сигнал активации

Рисунок 4.5 – Сигналы каналов прибора и сигнал активации устройства взрывоподавления

Проведённые экспериментальные исследования ОЭП двух спектральных отношений для обнаружения очагов возгорания на ранней стадии в условиях, близких к реальным, показали, что данный прибор удовлетворяет требованиям по вероятности обнаружения очага возгорания как в отсутствии внешних оптических помех, так и в их присутствии. Время обнаружения очага возгорания прибором также соответствует требованиям. Таким образом, разработанный прибор может использоваться на различных промышленных предприятиях, имеющих взрывоопасную пылегазовую атмосферу, в составе автоматических систем обнаружения и локализации возгорания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе диссертационного исследования:

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

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

3) Проведено исследование спроектированного и изготовленного ОЭП двух спектральных отношений в лабораторных условиях, для чего был разработан стенд для исследования ОЭП обнаружения начальной стадии возгорания и разработаны следующие методики:

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

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

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

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Шаровар, Ф.И. Методы раннего обнаружения загораний / Ф.И. Шаровар. – М.: Стройиздат, 1988. – 336 с.
- 2 Пузач, С.В. Обоснование возможности раннего обнаружения возгорания в помещении с помощью датчиков давления / С.В. Пузач, Ю.А. Поляков // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1999. – Вып. 3. – С. 53–56.
- 3 Борисенко, Д.И. Разработка способа акустической идентификации горения угля для диагностики очагов пожаров в угольных пластах: дис. ...канд. техн. наук: 25.00.20, 05.26.03 // Борисенко Дмитрий Иванович. – Москва, 2007. – 134 с.
- 4 Пат. 2393506 Российская Федерация, МПК G01V 1/00. Акустический способ определения координат очагов пожаров в глубине угольного массива и система для его осуществления / Д.И. Борисенко, Н.Ф. Кусов, Р.И. Харитонов. – № 2007120165/28; заявл. 30.05.2007; опубл. 27.06.2010, Бюл. № 18. – 7 с.
- 5 Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев [и др.]. – М.: Недра, 1992. – 298 с.: ил.
- 6 Нормы пожарной безопасности НПБ 76-98 «Извещатели пожарные. Общие технические требования. Методы испытаний» (утв. приказом ГУГПС МВД России от 24 декабря 1998 г. № 77). – Документ опубликован не был. – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
- 7 Айруни, А.Т. Взрывоопасность угольных шахт / А.Т. Айруни, Ф.С. Клебанов, О.В. Смирнов. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. – 264 с.: ил., табл. – (Серия «Библиотека горного инженера». Т. 9 «Рудничная аэрология». Кн. 2).
- 8 Кулаков, М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: учебник для вузов / М.В. Кулаков. – М.: Машиностроение, 1983. – 464 с.
- 9 НПФ «Гранч» – Granch МИС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.granch.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=79&Itemid=7.
- 10 Азбель, М.Д. Волоконно-оптический термокабель для раннего обнаружения пожаров на ленточных конвейерах в угольных шахтах / М.Д. Азбель,

Б.А. Анненков, Б.Г. Горшков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2004. – № 11. – С. 289–292.

11 Нецепляев, М.И. Автоматическая система взрывобезопасности и защиты сети горных выработок от взрывов метана и угольной пыли / М.И. Нецепляев, О.И. Кашуба // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 1999. – № 4. – С. 236–237.

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

13 Поскачей, А.А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.

14 Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 ноября 2013 г. № 550. Документ опубликован не был. – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

15 Аэрология горных предприятий / под ред. Ушакова К.З. – М.: Недра, 1987. – 421 с.

16 Справочник по горнорудному делу / под ред. В.А. Гребенюка. – М.: Недра, 1983. – 816 с.

17 Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / Петунин П.М., Гродель Г.С., Жиляев Н.И. и др. – М.: Недра, 1981. – 271 с.

18 Таубкин, С.И. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки / С.И. Таубкин, И.С. Таубкин. – М.: Химия, 1976. – 264 с.

19 Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с франц. / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988. – 416 с.

- 20 Тимофеев, Ю.М. Теоретические основы атмосферной оптики / Ю.М. Тимофеев. – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
- 21 Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник / Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 2011. – 568 с.
- 22 Зуев, В.Е. Проблемы атмосферной оптики. Том 2. Оптические модели атмосферы / В.Е. Зуев, Г.М. Креков. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 256 с.
- 23 HITRAN on the Web [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://hitran.iao.ru/>.
- 24 Спектроскопия атмосферных газов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spectra.iao.ru/>.
- 25 Bowles Neil. Long path length measurements of the 600nm to 2 μ m / Neil Bowles, John Barnett // MSF. – 2006.
- 26 Теплообмен излучением: справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжиков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
- 27 Основы конструирования электрических источников света: учебник для техникумов / П.В. Пляскин [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
- 28 Излучательные свойства твердых материалов: справочник / Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.
- 29 Гуторов, М.М. Основы светотехники и источники света: Учеб. пособие для вузов / М.М. Гуторов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.
- 30 Афанасьева, Е.И. Источники света и пускорегулирующая аппаратура / Е.И. Афанасьева, В.М. Скобелев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
- 31 Yoshizawa, T. Handbook of Optical Metrology: Principles and Applications / Tory Yoshizawa. – [S.I.]: CRC Press, 2009. – 730 p.
- 32 Крискунов, Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л.З. Крискунов. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.
- 33 Справочник по инфракрасной технике: В 4 т. / У.Волф, [др.]; Ред.: У.Волф, Г.Цисис; Ред. пер. с англ.: М.М.Мирошников, Н.В.Васильченко. – М.: Мир, 1999. – Т.4: Проектирование инфракрасных систем. – 472 с.: ил.

- 34 Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.: ил.
- 35 Цыпкин, Я.З. Основы теории обучающихся систем / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1970. – 251 с.
- 36 Пат. 2365883 Российская Федерация, МПК G01J 5/60. Способ пирометрических измерений / Д.Я. Свет. – № 2007145705/28; заявл. 11.12.2007; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. – 6 с.
- 37 Пат. 2253845 Российская Федерация, МПК G01J 5/60. Многоканальный радиационный пирометр / А.В. Фрунзе. – № 2003136859/28; заявл. 23.12.2003; опубл. 10.06.2005, Бюл. № 16. – 10 с.
- 38 Пат. 2347198 Российская Федерация, МПК G01J 5/00. Трихроматический пирометр / С.С. Сергеев. – № 2007136344/28; заявл. 01.10.2007; опубл. 20.02.2009, Бюл. № 5. – 5 с.
- 39 Пат. 2377511 Российская Федерация, МПК G01J 5/00. Полихроматический пирометр / С.С. Сергеев. – № 2008128632/28; заявл. 14.07.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл. № 36. – 6 с.
- 40 Олейник, Б.В. Приборы и методы температурных измерений / Б.В. Олейник [и др.]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 296 с.
- 41 Шехонин, А.А. Методология проектирования оптических приборов: учеб. пособие / А.А. Шехонин, В.М. Домненко, О.А. Гаврилина. – СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2006. – 91 с.
- 42 ГОСТ Р 53325-2012. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования. Методы испытаний. – Введён 01-01-2014. – М.: Стандартинформ, 2013. – 270 с.
- 43 ГОСТ Р 54776-2011 Оборудование и средства по предупреждению и локализации взрывов пылевоздушных смесей в угольных шахтах, опасных по газу и пыли. – М.: Стандартинформ, 2012. – 20 с.
- 44 Kissell N. Fred. Handbook for Methane Control in Mining [Text] / Fred N. Kissell. – Pittsburgh: Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 2006 – 191 p.

45 Анализ и управление риском аварий, травм и заболеваний на предприятиях по добыче и переработке угля / А.Ф. Павлов [и др.]. – Кемерово: 2011. – 81 с.

46 Костеренко, В.Н. Факторы, оказывающие влияние на возникновение взрывов газа метана и угольной пыли в шахтах / В.Н. Костеренко, А.Н. Тимченко // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 7. – С. 368–377.

47 Голоскоков, С.И. Состояние и основные направления снижения крупных аварий на угольных шахтах / С.И. Голоскоков, Д.А. Трубицина // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 1. – С. 122–130.

48 Осипов, С.Н. Взрывчатые свойства и нейтрализация паро-газо-пылевых смесей / С.Н. Осипов. – Киев: Техшка, 1977. – 199 с.

49 ГОСТ Р 54777–2011 Автоматические системы взрывоподавления – локализации взрывов метанопылевоздушных смесей в угольных шахтах. Общие технические требования. Методы испытаний. – Введён впервые, введ. 13 декабря 2011.– М.: Стандартинформ, 2012. – 24 с.

50 Патент 2457333 Российская Федерация, МПК E21F 5/14. Мортира пылемётная газодинамическая / Казанцев В.Г., Золотых С.С., Куимов Р.Н., Золотых М.С., Кулявцев Е.Я., Дурнин М.К.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие «Система промышленной безопасности». – № 2011102377/03, заявл. 21.01.2011; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21.

51 Мортира пылемётная газодинамическая (МПП) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.methanesafety.ru/document/97.html>.

52 Богданович, В.А. Теория устойчивого обнаружения, различения и оценивания сигналов / В.А. Богданович, А.Г. Вострецов. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 320 с.

53 ГОСТ 12.1.004–91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – Издание (сентябрь 2006 г.) с Изменением № 1, утверждённым в октябре 1993 г. (ИУС 1–95). – Взамен ГОСТ 12.1.004-85, введ. 01.07.92. – М.: Стандартинформ, 2006. – 68 с.

54 Методика определения расчётных показателей величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: прил. к приказу МЧС России № 382 от 30 июня 2009 г. – Документ опубликован не был. – Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

55 Решетко, Д.А. Извещатели пламени «НАБАТ». Высокое быстродействие без ложных срабатываний» / Д.А. Решетко // Мир и безопасность. – 2012. – № 2. – С. 16–17.

56 Сидоренко, А.И. Разработка лабораторного образца пирометрического датчика координат очага возгорания с полевой диафрагмой / А.И. Сидоренко, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин // Датчики и системы. – 2014. – № 1 (176). – С. 48–53.

57 Датчик обнаружения возгорания метана в воздуховоде угольной шахты / Е.В. Сыпин [и др.] // VII Всероссийская выставка научно-технического творчества молодёжи НТТМ-2008. Всероссийский конкурс научно-технического творчества молодёжи. Сборник материалов. – М.:ОАО «ГАО ВВЦ», 2008. – С. 62–63.

58 Датчик координат очага возгорания на ПЗС-линейках / А.Н. Павлов [и др.] // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2-2. – С. 121–126.

59 Проектирование лабораторного образца пирометрического датчика с цилиндрическими линзами / С.А. Терентьев [и др.] // Ползуновский вестник – 2012. – № 3-2. – С. 3–6.

60 Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учебное пособие / М.М. Мирошников. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб: Издательство «Лань», 2010. – 704 с.: ил. (+ вклейка, 16 с.).

61 Порфирьев, Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах: учебник / Л.Ф. Порфирьев. – 2-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 400 с.

62 Заказнов, Н.П. Теория оптических систем: учебник для студ. приборостроит. спец. вузов / Н.П. Заказнов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 447 с.: ил.

63 Driggers, Ronald G. Encyclopedia of Optical Engineering / Ronald G. Driggers, Craig Hoffman, Ronald Driggers. – [S.I.]: CRC Press, 2003. – 2800 p.

- 64 Pyrometer-Handbook. Work of IMPAC Infrared GmbH. – Frankfurt am Main, Germany: IMPAC Infrared GmbH, 2004. – 78 p.
- 65 Тарасов, В.В. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приёмниками излучения / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 192 с.
- 66 Герасимов Д.В., Построение быстродействующего многопорогового пирометрического прибора контроля температуры объекта / Д.В. Герасимов, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин // Датчики и системы. – 2010. – № 8. – С. 51–54.
- 67 Сажин, С.Г. Средства автоматического контроля технологических параметров: учебник / С.Г. Сажин. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 368 с.
- 68 Beam splitters [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.dorotek.de/cms/upload/pdf/optik/englisch/7_Beam_Splitter.pdf.
- 69 Baumeister Philip W. Optical Coating Technology / Philip W. Baumeister. – [S. I.]: SPIE Press, 2004. – 840 p.
- 70 Macleod Angus H. Thin-Film Optical Filters / H. Angus Macleod. – 4th edition. – [S. I.]: CRC Press, 2010. – 800 p.
- 71 Бараночников, М.Л. Приёмники и детекторы излучений: справочник / М.Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 640 с.
- 72 Two color detectors | Hamamatsu Photonics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/4007/4146/index.html>.
- 73 Фотодиоды для средней инфракрасной области спектра (2-6 мкм) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ioffeled.com/index.php?option=com_content&view=article&id=50&Itemid=104#b6.
- 74 Tupikina, N.Y. The Optical System for the Three-channel Pyrometric Device of Two Spectral Ratios / N.Y. Tupikina, E.S. Povernov, E.V. Sypin // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM`2011: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2011. – P. 354-361.
- 75 Optical sensors | Hamamatsu Photonics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/3100/index.html>.

76 Якушенков, Ю.Г. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах / Ю.Г. Якушенков, В.Н. Луканцев, М.П. Колосов. – М.: Радио и связь, 1981. – 180 с.

77 Ишанин, Г.Г. Источники и приёмники излучения: учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов/ Г.Г. Ишанин, Э.Д. Панков, А.Л. Андреев, Г.В. Польщиков. – СПб.: Политехника, 1991. – 240 с.

78 Справочник конструктора оптико-механических приборов / Под общ. ред. В.А. Панова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1980. – 742 с.

79 Светильники шахтные головные СГГ.5М.05. Паспорт 0.06.468.081 ПС / ООО «Завод «ГОРЭКС-Светотехника». – Прокопьевск: [б.м.], 2014. – 15 с.

80 Торшина, И.П. Особенности компьютерного моделирования многодиапазонных оптико-электронных систем обнаружения / И.П. Торшина // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 10. – С. 75–79.

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

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

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

84 Фотооптик фильтры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.photoptic-filters.com/>.

85 Тупикина, Н.Ю. Методика расчёта параметров оптической системы трёхканального пирометрического прибора с отдельными объективами каналов / Н.Ю. Тупикина, Е.В. Сыпин, Е.Я. Кулявцев // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2015. – № 1. – С. 36–42.

86 Ильин, В.А. Аналитическая геометрия: учеб. для вузов. / В.А. Ильин, Э.Г. Поздняк. – 7-е изд. стер. – М.: Физматлит, 2004. – 224 с.

87 Охорзин, В.А. Прикладная математика в системе MATHCAD: учебное пособие / В.А. Охорзин. – 3-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 352 с.

88 Васильев, А.Н. Числовые расчёты в Excel: учебное пособие / А.Н. Васильев. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 608 с.

89 Хоровиц П. Искусство схемотехники: пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 2-е изд. – М.: Бином, 2014. – 704 с.

90 Пол Ли. Руководство по выбору малошумящего усилителя / Ли Пол. – Компоненты и технологии. – 2010. – № 1. – С. 46–51.

91 AD8610 | datasheet and product info Precision, Low Input Bias Current, Wide BW JFET Single Op Amp | Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/en/products/amplifiers/operational-amplifiers/high-voltage-amplifiers-greaterthanequalto-12v/ad8610.html#product-overvie>.

92 ATmega8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atmel.com/devices/atmega8.aspx>.

93 ADM232L | datasheet and product info Low Power, +5V CMOS RS-232 100k BPS Transceiver with 2 Drivers/Receivers | Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.analog.com/en/products/interface-isolation/rs-232-rs-422-rs-485/interface-rs-232/adm2321.html#product-overview>.

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

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

96 Сидоренко, А.И. Оптико-электронное устройство для обнаружения очагов возгорания и определения их двумерных координат: дис. ...канд. техн. наук: 05.11.13 / Сидоренко Антон Игоревич. – Бийск, 2015. – 154 с.

97 Online Catalog of Precision Optical Components | Edmund Optics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.edmundoptics.co.uk/products/>.

98 Si photodiodes:Si photodiodes | Hamamatsu Photonics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/eu/en/product/category/3100/4001/4103/index.html>.

99 Германиевые фотодиоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ckb-rhythm.narod.ru/tab1Ge.htm>.

100 Тупикина, Н.Ю. Разработка и исследование экспериментального образца активной системы раннего обнаружения и подавления очага возгорания: отчёт о НИОКР (заключ.) по контракту 12502р/23958 от 28.02.2014) / ООО «Светоток»; рук. Тупикина Н.Ю. – Бийск, 2015. – 64 с. – Исполн.: Сыпин Е.В., Повернов Е.С., Герасимов Д.А., Павлов А.Н., Лисаков С.А. – Библиогр.: с. 54–56. – Рег. № НИОКР 01201462203. – Рег. № ИКРБС 215040140017.

101 KiCad EDA Software Suite - Kicad EDA - KiCad EDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kicad-pcb.org/display/KICAD/KiCad+EDA+Software+Suite>.

102 Тупикина, Н Ю. Разработка стенда для исследования параметров оптико-электронных приборов обнаружения начальной стадии возгорания / Н.Ю. Тупикина, Е.В. Сыпин // Датчики и системы. – 2013. – № 10 (173). – С. 32–35.

103 Излучатель в виде модели абсолютно черного тела АЧТ-45/100/1100. Руководство по эксплуатации ДДШ 2.979.005 РЭ. – 26 с.

104 Дробот П.Н. Теория ошибок и обработка результатов измерений / П.Н. Дробот. – Томск: Изд-во Томск.гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2011. – 84 с.

105 Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / Зайдель А.Н. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1967. – 88 с.

106 Пучков, Н.П. Математическая статистика. Применение в профессиональной деятельности: учебное пособие / Н.П. Пучков. – Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 81 с.

107 Грановский, В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Синая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

108 Лебецки, К.А. Пылевая взрывоопасность горного производства / К.А. Лебецки, С.Б. Романченко. – М.: Издательство «Горное дело» «ООО Киммерийский центр», 2012. – 464 с., табл., ил. – (Библиотека горного инженера. Т. 6. «Промышленная безопасность», Кн. 10).

109 Павлов, А.Н. Оптико-электронная система определения трехмерных координат очага взрыва в газодисперсных системах на начальной стадии: дис. ...канд. техн. наук: 05.11.13 / Павлов Андрей Николаевич. – Бийск, 2010. – 134 с.

110 Сидоренко, А.И. Установка для экспериментального исследования систем взрывоподавления / А.И. Сидоренко, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин // Датчики и системы. – 2013. – № 10. – С. 27–31.

111 Автоматизированная система управления экспериментальной установкой для проведения взрывов пылегазо-воздушных смесей / Сидоренко А.И. [и др.] // Измерение, контроль, информатизация: материалы XIV международной научно-технической конференции. – Т. 2. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013. – С. 110–116.

112 ООО «Л КАРД». Индустриальные системы управления и сбора данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lcard.ru>.

113 ОВЕН. Оборудование для автоматизации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.owen.ru/>.

114 Проведение испытаний автоматизированной установки для проведения взрывов пылегазовоздушных смесей / И.С. Зорин [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – № 2(6). – С. 135–137. – Режим доступа: [http://s-sibsb.ru/images/articles/2014/2\(6\)/40_135-137.pdf](http://s-sibsb.ru/images/articles/2014/2(6)/40_135-137.pdf).

115 Дьяконов, В.П. Генерация и генераторы сигналов / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 384 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ



МИНИСТЕРСТВО
ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

**Бийский технологический
институт (филиал) ФГБОУ ВО
«Алтайский государственный
технический университет
им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ)**
ул. имени Героя Советского Союза
Трофимова, 27, г. Бийск, 659305
тел.(3854)432285, факс:(3854)435300
E-mail: info@bti.secna.ru
<http://www.bti.secna.ru>
ОКПО 05151790, ОГРН 1022201517854
ИНН/КПП 2224017710/220443001
об использовании результатов
диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ
Директор БТИ АлтГТУ
М.А. Ленский
_____ сентября _____ 2016 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

**результатов диссертационной работы Тупикиной Надежды Юрьевны
«Опτικο-электронный прибор двух спектральных отношения для контроля
взрывоопасной пылегазовой атмосферы» в учебный процесс
Бийского технологического института (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»**

Комиссия в составе заместителя директора по научной работе, д-ра техн. наук, профессора Хмелева В.Н., декана технологического факультета, канд. техн. наук, доцента Павлова А.Н. и заведующего кафедрой методов и средств измерений и автоматизации, д-ра техн. наук, доцента Шалунова А.В., составила настоящий акт, подтверждающий, что результаты диссертационной работы старшего преподавателя кафедры методов и средств измерений и автоматизации Тупикиной Надежды Юрьевны внедрены в процесс подготовки бакалавров направления 12.03.01 «Приборостроение» (профиль подготовки – «Информационно-измерительная техника и технологии») в виде:

– комплекса компьютерных программ – «Программа поиска оптимальной центральной длины волны и полуширины полосы пропускания светофильтров для пирометра двойного спектрального отношения (разные типы фотоприёмников для каналов)» (свидетельство о регистрации № 2011613733), «Программа поиска оптимальной центральной длины волны и полуширины полосы пропускания светофильтров для пирометра двойного спектрального отношения (один тип фотоприёмника для каналов)» (свидетельство о регистрации № 2011613734), «Программа расчёта выходных сигналов различных фотоприёмников пирометра двойного спектрального отношения с учётом влияния оптических помех» (свидетельство о регистрации № 2011613735);

– разделов курсов лекций и лабораторных работ учебной дисциплины «Основы оптико-электронных приборов и систем», читаемого для бакалавров направления подготовки 12.03.01 «Приборостроение».

Тупикина Надежда Юрьевна является одним из авторов методических рекомендаций к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы оптико-электронных приборов и систем» (Сыпин, Е.В. Основы оптико-электронных приборов и систем:

методические рекомендации по выполнению лабораторных работ по курсу «Основы оптико-электронных приборов и систем» для студентов направления 12.03.01 (200106.62) «Приборостроение» / Е.В. Сьпин, Н.Ю. Тупикина, А.Н. Павлов, И.А. Ускова, А.И. Сидоренко. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. – 76 с.).

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

Заместитель директора по научной работе
д-р техн. наук, профессор



В.Н. Хмелев

Декан технологического факультета,
канд. техн. наук, доцент



А.Н. Павлов

Заведующий кафедрой
методов и средств измерений и автоматизации
д-р техн. наук, доцент



А.В. Шалунов



Общество с ограниченной
ответственностью
«Экспротект»
(ООО «Экспротект»)
659363, Алтайский край, Бийский р-н.,
с. Первомайское, Алтайская ул., д.1
Тел./факс: (3854) 432450
E-mail: sai@bti.secna.ru
ОКПО 13961037 ОГРН 1142204005899
ИНН 2234014570 / КПП 223401001

Акт
о внедрении результатов научной работы Тупкиной Надежды Юрьевны
«Оптико-электронный прибор двух спектральных отношений
для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы»

Настоящим актом подтверждается, что результаты научной работы Тупкиной Н.Ю. «Оптико-электронный прибор двух спектральных отношений для контроля взрывоопасной пылегазовой атмосферы» были использованы на предприятии ООО «Экспротект» в виде:

- стенда для лабораторного определения основных технических параметров оптико-электронных приборов обнаружения начальной стадии возгорания;
- комплекса методик определения технических параметров оптико-электронных приборов обнаружения начальной стадии возгорания в лабораторных условиях.

Использование результатов научной работы Тупкиной Н.Ю. позволило повысить качество процедуры лабораторного исследования оптико-электронных приборов.

Директор



А.И. Сидоренко