

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

На правах рукописи



Параскун Артур Сергеевич

ПРИБОРЫ И МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ
В ПОМЕЩЕНИИ ДЛЯ РАННЕГО СЕЛЕКТИВНОГО
ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ВОЗГОРАНИЯ

Специальность 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики
материалов, изделий, веществ и природной среды

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент
Василий Иванович Казаков

Санкт-Петербург 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 Анализ методов и приборов раннего обнаружения возгораний	14
1.1 Вводные замечания	14
1.2 Нормативная классификация пожаров и устройств пожарной сигнализации в контексте ранней диагностики	18
1.2.1 Нормативные документы, определяющие классификацию пожаров и требования к извещателям.....	18
1.2.2 Физико-химические признаки горения, регистрируемые приборами	19
1.2.3 Общие методы раннего обнаружения возгораний	21
1.3 Методологические основы применения радиофизических подходов для раннего обнаружения очагов возгораний	23
1.3.1 Зондирующие и естественные сигналы как основа диагностики физических сред и раннего обнаружения возгораний	23
1.3.2 Аналитические формы представления сигналов: временная, спектральная и корреляционная	24
1.4 Спектроскопические методы диагностики физических сред и процессов	26
1.4.1 Спектральные признаки очага горения в оптическом диапазоне ..	26
1.4.2 Эмиссионный анализ в задачах обнаружения очагов горения	28
1.4.3 Альтернативные спектроскопические подходы при ограничениях ИК-детектирования	29
1.5. Информативные параметры второй группы, связанные с динамикой газовоздушной среды при горении	30
1.5.1 Динамика газовоздушной среды и турбулентные признаки очага горения	30
1.6 Выводы по разделу	32
2 Матричный спектральный прибор как средство диагностики	

газовой среды замкнутого помещения	34
2.1 Спектроскопическое обоснование метода раннего обнаружения признаков горения	34
2.2 Сущность методики, архитектура реализации и физико-техническое обоснование задачи спектральной диагностики	36
2.2.1 Обзор, классификация и математическая формализация спектральных методов анализа сигналов в задачах диагностики термодинамических процессов	36
2.2.2 Обоснование выбора методов обработки сигналов	43
2.3 Архитектура и физико-математическая реализация матричного спектрального прибора	43
2.3.1 Архитектура и принцип работы матричного спектрального прибора	43
2.3.2 Спектральная модель резонаторного блока матричного спектрального прибора	47
2.3.3 Теоретический анализ работы резонаторной системы матричного спектрального прибора	50
2.3.4 Действие фотодетектора и энергетическая модель фототока на основе теоремы Пойнтинга	55
2.3.5 Модель временного усреднения фототока	57
2.4 Архитектура электронного блока и физическая реализация матричного спектрального прибора	60
2.4.1 Обоснование выбора фотодетектора для регистрации спектроскопической информации в матричном спектральном приборе ..	61
2.4.2 Структурная, принципиальная схема и реализация электронного блока матричного спектрального прибора	65
2.4.3 Программная реализация управляющего микрокода для контроллера	70
2.4.4 Программное средство визуализации полученных спектроскопических данных	70

2.5 Выводы по разделу	73
3 Лазерно-оптический прибор как средство диагностики газовой среды замкнутого помещения	75
3.1 Обоснование методики в рамках обнаружения теплового конвекционного потока и дыма в воздушной среде	75
3.1.1 Спектральные характеристики теплового конвекционного потока и аэрозольных возмущений	78
3.2 Архитектура и физико-математическая реализация лазерно-оптического прибора, реализующего методику выявления теплового конвекционного потока и дыма в газовой среде	80
3.2.1 Архитектура и принцип работы лазерно-оптического прибора ...	80
3.2.2 Модель временного усреднения фототока	82
3.2.3 Математическая формализация спектральных методов анализа сигналов в условиях динамически изменяющейся среды	83
3.2.4 Архитектура алгоритма спектральной диагностики термодинамической активности	92
3.2.5 Реализация алгоритма спектральной диагностики в системе MATLAB и моделирование процесса горения	97
3.2.6 Архитектура электронного блока и физическая реализация лазерно-оптического прибора	103
3.2.7 Программная реализация управляющего микрокода для микроконтроллера электронного блока лазерно-оптического прибора ...	112
3.2.8 Программное средство визуализации спектроскопических данных, полученных с электронного блока лазерно-оптического прибора	112
3.2.9 Программное средство интегрированной обработки спектральных сигналов	116
3.2.10 Физическая реализация устройства диагностики воздушной среды для раннего селективного обнаружения признаков возгорания	117
3.2.11 Соответствие архитектуры прибора нормативным признакам	

горения и типам пожарных извещателей.....	119
3.3 Выводы по разделу	122
4 Результаты экспериментальных исследований обнаружения	
возгораний с помощью разработанных приборов и оценка	
состоительности предложенной методики устройств	124
4.1 Критерии оценки: чувствительность, селективность,	
устойчивость к ложным срабатываниям	125
4.1.1 Количественная оценка диагностической состоятельности	128
4.2 Результаты экспериментальной оценки эффективности	
разработанных приборов в задаче раннего обнаружения горения	131
4.2.1 Экспериментальные исследования с использованием	
матричного спектрального прибора	133
4.2.2 Экспериментальные исследования динамики взаимодействия	
лазерного пучка с тепловым конвекционным потоком	138
4.3 Экспериментальная оценка характеристик приборов	156
4.4 Сравнительный анализ с существующими приборами пожарной	
диагностики	159
4.5 Выводы по разделу.....	162
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	164
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	167
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Патенты и свидетельства о государственной	
регистрации программы для ЭВМ	180
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Скан-копия акта о внедрении в ФГАОУ ВО ГУАП	181
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Скан-копия акта о внедрении в	
ООО «НПП Адвент»	182
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Скан-копия акта о внедрении в ООО «НПФ	
Полисервис»	183
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Скан-копия акта о внедрении в	
ООО «Холдинг Гефест»	184
БЛАГОДАРНОСТИ	185

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Несмотря на широкое распространение промышленных извещателей, ущерб от пожаров в замкнутых помещениях остаётся стабильно высоким. Существующие приборы обнаружения (тепловые, дымовые, пламенные) обладают высокой инерционностью и реагируют преимущественно на поздние стадии возгорания – появление дыма, пламени и повышение температуры. На ранней стадии формируется тепловой конвекционный поток – устойчивое газодинамическое явление, сопровождающееся колебаниями показателя преломления среды в диапазоне 2–20 Гц. Этот признак не сопровождается выраженными оптическими эффектами и не входит в зону чувствительности стандартных сенсоров, что делает его недоступным для традиционных систем пожарной автоматики.

Таким образом, возникает противоречие: ранние признаки термической активности существуют, но средства обнаружения не способны их зафиксировать. Для его разрешения требуется методика селективной диагностики, основанная на математических алгоритмах обработки сигнала, способных выявлять слабые признаки активности до появления визуальных эффектов. В рамках диссертационной работы предложен подход, обеспечивающий регистрацию тепловых неоднородностей на докритических стадиях с использованием спектрального анализа и пространственно-временной интерпретации сигнала.

Степень разработанности проблемы

Разработке методов регистрации теплового конвекционного потока и анализа термических неоднородностей посвящён ряд работ. М.А. Котов, С.Ю. Лаврентьев и Н.Г. Соловьев предложили методику лазерной калибровки сенсоров с учётом тепловых градиентов в турбулентной среде. Г.Н. Лукьянов, И.С. Ковальский и др. разработали сенсоры на основе сегнетоэлектриков, чувствительные к слабым тепловым потокам. M.J. Evans и P.R. Medwell

систематизировали лазерные методы диагностики пламени и температурных градиентов (PLIF, CARS, Rayleigh scattering). A. Secilmis и соавт. исследовали применение нейросетевых алгоритмов для классификации признаков пожара. J. Mao, J. Zhao и др. продемонстрировали возможность регистрации оптической турбулентности в прозрачной среде с помощью лидаров и лазерных систем. R.S. Allison и соавт. обосновали необходимость комплексных сенсорных платформ для раннего обнаружения возгораний.

Несмотря на имеющиеся результаты, остаётся недостаточно разработанным комплексный подход к ранней регистрации признаков горения, сочетающий пространственно-спектральный анализ и аппаратную реализацию с высокой чувствительностью. Это определяет актуальность настоящего исследования.

Цель работы. Разработка приборов и методики для раннего обнаружения теплового конвекционного потока, дыма и пламени в газовой среде закрытого помещения со временем отклика менее 0.3 с и повышением достоверности диагностики до 98%.

Указанная цель определила постановку и решение следующих задач:

1. Анализ физических процессов начальной стадии возгорания и выделение информативных признаков.
2. Разработка матричного спектрального и лазерно-оптического приборов диагностики газовой среды на наличие признаков возгораний с учётом метрологических требований.
3. Разработка методики комбинированной диагностики газовой среды в пределах закрытого помещения для устойчивой дифференциации признаков термодинамической активности с адаптацией ко внешним возмущениям.
4. Экспериментальная проверка работоспособности приборов и корректности методики для раннего обнаружения теплового конвекционного потока, дыма и пламени в газовой среде закрытого помещения.

Объект исследования. Газовая среда в пределах контролируемого пространства закрытого помещения, ограниченного диаграммой

направленности лазерно-оптического прибора, в котором происходят физические изменения, сопровождающие начальные стадии возгорания.

Предмет исследования.

Предметом исследования являются оптические и спектроскопические характеристики газовой среды, параметры лазерного излучения, процессы взаимодействия с тепловыми и аэрозольными неоднородностями, архитектуры диагностических устройств и алгоритм обработки сигналов.

Положения, выносимые на защиту

1. Матричный спектральный прибор, обеспечивающий селективную регистрацию спектральных признаков пламени и теплового конвекционного потока.

2. Лазерно-оптический прибор диагностики газовой среды, реализующий регистрацию признаков дыма и теплового потока с возможностью их дифференциации.

3. Методика диагностики газовой среды, основанная на алгоритмическом комплексе спектрально-временного анализа оптических сигналов, обеспечивающая устойчивое выделение признаков пламени, дыма и теплового потока с их дифференциацией на фоне оптических и тепловых возмущений.

4. Результаты исследований по применению методики, направленной на классификацию спектрально-временных признаков газовой среды в задаче раннего обнаружения признаков возгорания.

Методы решения задач

Методологическая основа работы включает теоретический анализ, математическое моделирование, схемотехническое проектирование и алгоритмическую обработку данных, направленные на реализацию комбинированной системы диагностики газовой среды. Исследование базируется на анализе тепловой конвекции, аэрозольного насыщения и спектральных характеристик пламени, с использованием положений волновой оптики и энергетических соотношений.

Система реализована на основе фотоприёмных элементов, оптических фильтров и усилительных каскадов, с параллельной обработкой спектральных, аэрозольных и тепловых признаков. Алгоритм включает ряд математических методов: быстрое преобразование Фурье (БПФ), вейвлет-преобразование, кепстральный анализ, суммарно-разностный метод, взаимную корреляционную функцию дискретного сигнала и пороговую фильтрацию. Совокупное применение указанных процедур обеспечивает выделение информативных признаков и предиктивную классификацию активности.

Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность системы и обоснованность технических решений. Применённый комплекс методов обеспечил формирование архитектуры прибора, способного к раннему обнаружению признаков возгорания с высокой надёжностью и устойчивостью к внешним возмущениям.

Научная новизна

1. Архитектура матричного спектрального прибора, обеспечивающая селективную регистрацию спектральных признаков пламени и теплового конвекционного потока, **отличающаяся от известных решений реализацией многоканального спектрального анализа в расширенном диапазоне 190–1000 нм и интеграцией с алгоритмами фильтрации признаков в реальном времени, что обеспечивает достоверное извлечение информативных компонент при фоново-оптических помехах и переменных условиях наблюдения.**

2. Архитектура лазерно-оптического устройства диагностики газовой среды, обеспечивающая регистрацию аэрозольных и тепловых признаков с возможностью их дифференциации в условиях внешних оптических и тепловых возмущений.

Предложена программно-аппаратная реализация устройства, **отличающаяся интеграцией ПЗС-линейки с программным модулем синхронизированной экспозиции и адаптивной коррекции по фоновым параметрам среды, реализующей селективную регистрацию**

пространственно-мощностной модуляции сигнала и позволяющая на этой основе выделять слабовыраженные признаки ранних стадий термодинамической активности.

3. Алгоритмический комплекс обработки полученных данных, основанный на математических моделях анализа энергетического спектра, пространственных характеристик, и их временной динамики, включающий, быстрое преобразование Фурье (БПФ), вейвлет-преобразование, кепстральный анализ, суммарно-разностный метод, взаимную корреляционную функцию дискретного сигнала и пороговую фильтрацию, обеспечивающий устойчивое выделение признаков термодинамической активности и дифференциацию источников теплового излучения, отличающийся от известных подходов интеграцией многомерных признаков и реализацией устойчивой дифференциации источников теплового излучения на фоне шумов и помех.

4. Алгоритмы классификации активности газовой среды, обеспечивающие интеллектуальное реагирование системы на изменения параметров, адаптацию к внешним возмущениям и повышение точности диагностики, отличающиеся от известных систем управления использованием динамической модели активности и адаптивных порогов реагирования, что обеспечивает повышение достоверности до 98%.

Область исследования

Область исследования соответствует пунктам паспорта научной специальности – 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды»: 1, 3, 4 и 6.

Методы исследования:

Методы спектроскопического анализа, численного моделирования тепловых потоков, схемотехнического проектирования, цифровой фильтрации, корреляционного анализа, оценки энергетического спектра, Фурье-анализа, вейвлет-преобразования, кепстрального анализа, суммарно-

разностного метода, взаимной корреляционной функции дискретного сигнала, пороговой фильтрации и предиктивной классификации активности среды.

Программные средства реализации диссертационного исследования: Microsoft Word, CorelDRAW, MATLAB, LaTeX, MathType, DipTrace, Autodesk Inventor и Visual Studio.

Практическая значимость диссертационной работы

Предложенная многоканальная система (спектральный, аэрозольный, тепловой каналы) обеспечивает устойчивость к фоновым помехам, снижая ложные срабатывания на 71–75% и повышая точность классификации до 93–96%. Применение алгоритма, включающего методы анализа по Фурье, вейвлет-преобразования, кепстрального анализа, суммарно-разностного метода, взаимной корреляционной функции дискретного сигнала и пороговой фильтрации позволило обеспечивать устойчивое выделение признаков теплового конвекционного потока, аэрозольных включений (дыма) и пламени, сократив время реагирования на 52% и расширив спектральную селективность до 190–1000 нм. Соблюдение метрологических требований обеспечило воспроизводимость с погрешностью менее 5%, снижение ложных тревог на 60–65% и достоверность диагностики до 98%. Конструкция совместима со стационарными и мобильными комплексами, сокращая сроки адаптации и затраты на обслуживание на 30–35%. Методика адаптируема к различным объектам и сценариям, включая промышленную безопасность, экологический мониторинг и автономные системы.

Достоверность результатов диссертационной работы

Достоверность полученных результатов подтверждается их непротиворечивостью ранее известным положениям, применением в процессе исследований адекватных физических и математических моделей, корректным использованием современных методов компьютерного моделирования и физического эксперимента, а также экспериментальным подтверждением полученных теоретических результатов.

Личный вклад автора

Основные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Во всех работах, которые выполнены в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, обсуждении методов их решения, получении и анализе результатов исследований.

Реализация работы

Результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность следующих организаций: ФГАОУ ВО ГУАП, ООО «НПП Адвент», ООО «НПФ Полисервис» и ООО «Холдинг Гефест», что подтверждается соответствующими актами.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах в период с 2018 по 2025 гг.

- Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы», 2018-2025 гг., ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия;
- Шестая Всероссийская научная конференция «Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации» Санкт-Петербург, 07–18 апреля 2025 года;
- 17-ая Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2024», Минск, 26–29 ноября 2024 года;
- XVII Международная научно-техническая конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», Сузdalь, 23–26 сентября 2024 года;
- VI Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий», Санкт-Петербург, 01 марта 2024 года;
- 15-ая Международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», Астрахань, 03–07 октября 2022 года;

- Международный научный форум «Наука и инновации - современные концепции», Москва, 03 декабря 2021 года;
- Международная конференция SPIE Optical measurement systems for industrial inspection XI 2019, Мюнхен, Германия, 24–27 июня 2019.

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

Материалы, отражающие основное содержание и результаты диссертационной работы, опубликованы в 19 печатных работах. Из них 2 – патента РФ, 1 – регистрация программы для ЭВМ, 3 статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 3 – в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, а также 10 работ опубликованы в материалах российских и международных научных конференций, входящих в РИНЦ.

Гранты и НИР

Исследования в рамках данной диссертационной работы проводилось в рамках грантов: Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных, МК-297.2022.4, государственное задание РФ 8.9203.2017/БЧ (соисполнитель НИР), РФФИ №17-07-00554, РФФИ № 16-07-00549 А, РФФИ № 17-07-00826, РНФ № 19-79-10110.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, четырёх разделов заключения, списка литературы и приложений. Общий объём работы составляет 185 страниц, включая 49 рисунков, 4 таблицы и 120 источников. Структура работы отражает последовательность решения поставленных задач: от теоретического анализа до экспериментальной верификации и практических рекомендаций.

1. Анализ методов и приборов раннего обнаружения возгораний

1.1 Вводные замечания

Необходимость рационального использования сырьевых и материально-технических ресурсов, обеспечение сохранности национального богатства страны остро ставят вопросы безопасности городов, населённых пунктов, объектов народного хозяйства и личной собственности граждан. Развитие научно-технического прогресса, приведение к внедрению новых пожароопасных технологических процессов, широкое применение полимерных материалов, увеличение этажности зданий и сооружений, возрастающая концентрация материальных ценностей на 1м^2 производственных площадей усложняет проблему борьбы с пожарами. При этом современная экологическая обстановка, формируемая под воздействием антропогенной деятельности, характеризуется высокой степенью уязвимости объектов народного хозяйства, промышленных и стратегических объектов к техногенным и природным катастрофам, среди которых пожары занимают особое место.

Масштабные возгорания, возникающие как в природных экосистемах, так и на промышленных объектах, приводят к тяжёлым экологическим последствиям, усугубляя деградацию окружающей среды и нанося ущерб, который зачастую невозможно выразить в денежном эквиваленте. В условиях усиливающегося техногенного воздействия и нестабильности климатических процессов задачи, связанные с обеспечением пожарной и экологической безопасности, приобретают особую актуальность и выходят за рамки локальных инженерных подходов, формируя устойчивую повестку в международной научно-технической среде.

Согласно данным ФГБУ ВНИИПО МЧС России [1], в период с 2018 по 2022 год общее количество пожаров в нежилом секторе сохраняется на стабильно высоком уровне, несмотря на отдельные периоды снижения. Наибольшая доля инцидентов приходится на производственные, торговые и

складские помещения, что подчёркивает уязвимость ключевых категорий городских объектов (рисунок 1).

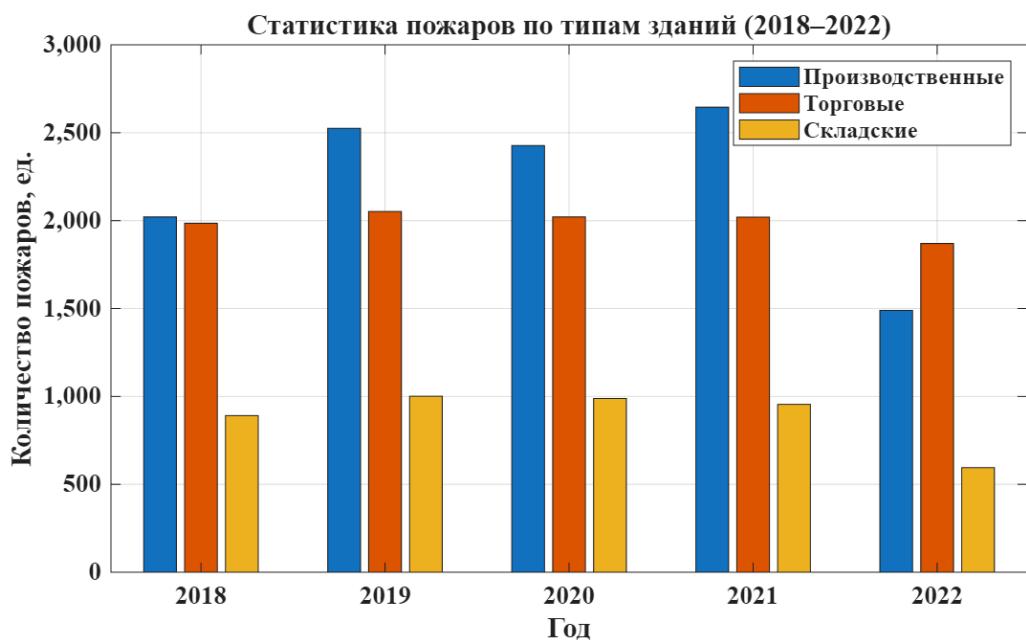


Рисунок 1 - Распределение числа пожаров в городах по основным видам объектов пожаров (2018–2022 г.) для производственных, торговых и складских помещений, источник - ФГБУ ВНИИПО МЧС

Особую обеспокоенность вызывает рост материального ущерба от одного пожара. В 2022 году средний ущерб составил 53 051,4 рубля, что на 37 % выше, чем в 2019 году (38 543,4 рубля). При этом общее количество пожаров за тот же период сократилось более чем в шесть раз – с 471 426 до 352 509 случаев (рисунок 2). Такая динамика свидетельствует о повышении интенсивности теплового воздействия и усложнении условий локализации очагов возгорания.



Рисунок 2 - Материальный ущерб от одного пожара в РФ (2018–2022г.),
источник - ФГБУ ВНИИПО МЧС

В условиях роста удельного ущерба и сохранения высокой плотности пожаров в критических секторах экономики возникает необходимость внедрения новых методик обнаружения слабо выраженных признаков теплового конвекционного воздействия. Традиционные приборы, предназначенные для мониторинга, не обеспечивают достаточной чувствительности к ранним признакам пожаров, особенно в условиях слабой турбулентности и нестабильной геометрии источника.

Таким образом, разработка и подтверждение работоспособности методики регистрации слабо выраженных тепловых возмущений, представляет собой актуальную научно-практическую задачу, направленную на повышение эффективности превентивной диагностики и снижение совокупного ущерба от пожаров.

Известно, что в основе предотвращения пожара лежит раннее обнаружение очага возгорания, а одним из эффективных методов предотвращения крупных пожаров и убытков от них является применение противопожарной автоматики.

При этом применяемые на практике системы автоматического обнаружения очагов возгорания демонстрируют ряд функциональных ограничений: недостаточную чувствительность к ранним признакам термической активности, замедленную реакцию на динамику процесса и ограниченную способность к дифференциации по типу источника. Особенно критично это проявляется при обеспечении безопасности промышленных предприятий, транспортных узлов и энергетических комплексов, где даже незначительная задержка в выявлении очага термической активности может привести к серьёзным экономическим, социальным и экологическим последствиям. Несмотря на широкое распространение промышленных извещателей, уровень ущерба от пожаров в замкнутых пространствах остаётся стабильно высоким, что свидетельствует о необходимости совершенствования методов раннего обнаружения и повышения селективности по характеру источника.

В диссертационной работе основное внимание сосредоточено на применении радиофизических методов диагностики газовой среды в замкнутых помещениях для раннего выявления очагов термодинамической активности. Исследование направлено на анализ динамики тепловых и аэрозольных возмущений, регистрируемых в оптическом канале, а также на разработку диагностических подходов, обеспечивающих высокую чувствительность к ранним признакам термодинамической активности, сопровождающей начальные стадии горения. Предложенные решения по своей физической природе относятся к области радиофизики и оптической диагностики, что определяет их применимость в задачах мониторинга газовой среды в замкнутых помещениях и автоматизированного выявления ранней термодинамической активности.

В рамках исследования особое внимание уделено тепловому конвекционному потоку (ТКП), возникающему уже на стадии тления материала и сопровождающемуся низкочастотными колебаниями показателя преломления в диапазоне 2–20 Гц. Данный признак не фиксируется

стандартными сенсорными приборами, что делает его недоступным для большинства существующих систем автоматического обнаружения. Разработка методики селективной диагностики, основанной на спектральном анализе и пространственно-временной обработке сигнала, позволяет выявлять слабые ранние признаки термодинамической активности до появления визуальных эффектов. Применение лазерно-оптических технологий, активно используемых в системах локации и экологического мониторинга, демонстрирует высокий потенциал в задачах регистрации ТКП и существенно повышает быстродействие систем обнаружения.

Была поставлена цель охватить большее число новых методов и приборов, это и определило характер и отбор материала, представляемого в данной диссертации.

1.2 Нормативная классификация пожаров и устройств пожарной сигнализации в контексте ранней диагностики

1.2.1 Нормативные документы, определяющие классификацию пожаров и требования к извещателям

Построение приборов для раннего обнаружения очагов возгорания требует строгого соответствия действующим нормативным документам, регламентирующим требования к системам противопожарной защиты, классификации пожаров, а также к техническим характеристикам и функциональным возможностям приборов обнаружения. Нормативная база в данной области имеет многоуровневую структуру и включает федеральные законы, своды правил, национальные стандарты (ГОСТ Р), а также ведомственные методики, утверждённые МЧС России.

Важнейшее значение для проектирования и классификации приборов обнаружения имеют положения сводов правил, утверждаемых МЧС России. В контексте настоящей работы основным документом является СП 484.1311500.2020 «Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и автоматического пожаротушения. Нормы проектирования» [2], утвержденный Приказом МЧС России № 582 от 31.07.2020. Этот документ

регламентирует типы пожарных извещателей, критерии их выбора, принципы размещения, а также требования к функциональной совместимости с другими элементами систем противопожарной автоматики. В частности, в СП 484.1311500.2020 содержится классификация извещателей по типу регистрируемых признаков (тепловые, дымовые, пламенные, газовые, многофакторные и др.), что имеет прямое отношение к архитектуре разрабатываемых приборов. Дополнительную нормативную основу составляют национальные стандарты, в том числе: ГОСТ Р 53325-2012 «Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования и методы испытаний» [3], который определяет требования к чувствительности, надёжности, устойчивости к внешним воздействиям и методам испытаний пожарных извещателей; ГОСТ Р 53284-2009 «Пожарная техника. Извещатели пожарные. Общие технические требования и методы испытаний» [4], который содержит методики оценки чувствительности к различным типам модельных очагов пожара; ГОСТ Р 59137-2020 [5], который регламентирует методы спектральной регистрации пламени и продуктов горения, включая диапазоны излучения и параметры фотоприёмных устройств. Таким образом, нормативная база, на которую опирается настоящая диссертационная работа, охватывает как правовые аспекты классификации пожаров, так и технические требования к приборам обнаружения возгораний. Это обеспечивает возможность нормативной проверки и соответствия архитектуры устройства, его отнесения к конкретному типу пожарных извещателей, а также последующей сертификации в рамках действующего законодательства.

Таким образом, нормативная база охватывает правовые, проектные и метрологические аспекты, необходимые для классификации пожаров и приборов их обнаружения.

1.2.2 Физико-химические признаки горения, регистрируемые приборами

Указанные проявления термодинаической активности лежат в основе функционирования приборов, предназначенных для диагностики и выявления

начальных стадий термодинамической активности, и используются при построении алгоритмов ранней диагностики.

К числу таких признаков относятся [2–5]:

- Термовой конвекционный поток – вертикальные турбулентные перемещения, возникающие при локальном нагреве воздуха.
- Аэрозольные компоненты (дым) – взвешенные частицы продуктов неполного сгорания, влияющие на оптическую прозрачность среды.
- Оптическое излучение (пламя) – спектральная эмиссия в диапазоне 190–1000 нм.
- Температурные градиенты – локальные повышения температуры, фиксируемые тепловыми сенсорами или спектральным сдвигом.
- Изменение состава газовоздушной смеси – появление летучих органических соединений.

Одним из ключевых направлений раннего обнаружения пожара является идентификация газовых маркеров, характерных для ранних стадий развития возгорания. На этапе тления, предшествующем появлению визуальных признаков, фиксируется выделение угарного газа (CO); озона (O₃) при искрении в электросистемах; углекислого газа (CO₂) при переходе к активному горению. Эти компоненты обладают выраженными спектральными характеристиками в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах, что позволяет использовать методы спектрального анализа для их обнаружения.

Каждый из перечисленных признаков обладает различной диагностической значимостью в зависимости от стадии развития пожара, типа горючего материала и условий вентиляции. В совокупности они формируют многофакторную картину, позволяющую реализовать селективную и устойчивую к ложным срабатываниям систему обнаружения. В таблице 1 приведено сопоставление между признаками, регистрируемыми прибором, и признаками, формализованными в нормативных документах.

Таблица 1 – Сопоставление признаков горения с нормативными аналогами

Признак горения	Нормативное соответствие	Источник
Тепловой конвекционный поток	Повышение температуры	ГОСТ Р 53325-2012
Аэрозольные компоненты (дым)	Наличие дыма, изменение оптических свойств	ГОСТ Р 53284-2009, СП 484.1311500.2020
Оптическое излучение (пламя)	Наличие пламени, спектральные характеристики	ГОСТ Р 59137-2020
Температурные градиенты	Повышение температуры	ГОСТ Р 53325-2012
Изменение состава газовоздушной смеси	Изменение газового состава	ГОСТ Р 53325-2012, ГОСТ Р 53284-2009

Таким образом, все признаки, реализуемые в рамках архитектуры приборов, имеют нормативные аналоги и могут быть интерпретированы как расширенные реализации требований, предъявляемых к многофакторным пожарным извещателям. Это обеспечивает нормативную совместимость и возможность последующей сертификации устройства в соответствии с положениями ГОСТ Р 53325-2012 [3] и СП 484.1311500.2020 [2].

1.2.3 Общие методы раннего обнаружения возгораний

Любое возгорание, возникшее как в замкнутой части пространства (помещение), так и на открытом месте, неизбежно ведёт к изменению тех или иных физических и химических параметров вблизи очага возгорания. К таким параметрам следует отнести: изменение характеристик электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, в частности, в инфракрасной (ИК) его части, увеличение температуры тех или иных тел и газовоздушной смеси в непосредственной близости от очага возгорания, изменение параметров движения газовоздушной смеси – появление турбулентностей, увеличение скоростей и изменения вектора скоростей движения этой смеси, изменение давления в соответствующих точках помещения, образование продуктов горения, то есть дыма и конкретных веществ, характеризующих горящие

материалы (например, угарный газ, диоксид углерода, оксины азота, летучие органические соединения) и другие.

Совокупность перечисленных параметров целесообразно разделить на две группы [6]. К первой из них следует отнести параметры, не связанные с процессом движения и распространения продуктов горения, т.е. с процессом массопереноса, обусловленного очагом горения как источником восходящего конвекционного струйного течения. Ко второй группе относят параметры, связанные с процессом движения газовоздушной смеси очага горения.

Очевидно, задачей раннего обнаружения возгораний является установление информативных признаков любого из параметров, перечисленных выше. Очевидно также, что известные методы радиофизики, применяемые для диагностики состояния тех или иных физических сред (плазмы, ионосферы и др.) заслуживают тщательного рассмотрения с целью применения к проблеме раннего обнаружения возгораний.

Таким образом, физико-химические параметры, изменяющиеся вблизи очага возгорания, формируют совокупность признаков, потенциально доступных для регистрации и анализа. Установление информативных характеристик этих параметров требует привлечения методов, способных выявлять слабые проявления термодинамической активности на ранних стадиях. В этом контексте особый интерес представляют подходы, разработанные в радиофизике для диагностики состояния физических сред, включая плазму, атмосферу и ионосферу, где активно используются зондирующие и естественные сигналы. Применение аналогичных принципов к задаче раннего обнаружения возгораний позволяет сформировать новую диагностическую парадигму, основанную на анализе электромагнитных проявлений очага горения.

1.3 Методологические основы применения радиофизических подходов для раннего обнаружения очагов возгораний

1.3.1 Зондирующие и естественные сигналы как основа диагностики физических сред и раннего обнаружения возгораний

Зондирующие и естественные сигналы являются предметом активного изучения в радиофизике для диагностики состояния физических сред и объектов, где они используются для анализа плазмы, ионосферы, атмосферы (в том числе турбулентной).

Аналогичная ситуация наблюдается и при решении задачи раннего обнаружения очагов возгорания. Электромагнитное излучение, возникающее в процессе загорания, по своим характеристикам соответствует естественным сигналам, аналогичным тем, что изучаются в радиоастрономии или фиксируются приборами радиоэлектронной разведки, где они также классифицируются как естественные [7].

Зондирование атмосферы, ионосферы и плазмы с использованием электромагнитных и акустических сигналов позволяет получать ценные сведения о состоянии этих сред. Применение электромагнитных методов для регистрации твёрдых частиц, образующихся при горении, представляет собой использование зондирующих сигналов с целью обнаружения возгорания.

Таким образом, тождественность категорий сигналов, изучаемых радиофизикой, и тех, которые возникают или могут быть сформированы при развитии очагов возгорания, свидетельствует о высокой перспективности применения радиофизических методов для диагностики состояния атмосферы, ионосферы, плазмы и других физических сред в задачах раннего обнаружения пожара. Главная задача, как представляется, состоит лишь в выборе конкретных методов и приборов для достижения цели.

Отмеченное сходство задач радиофизики и раннего обнаружения возгораний указывает на то, что основой обработки сигналов в рамках последней проблемы является теория сигналов и примыкающая к ней теория информации.

Теория сигналов базируется на некоторой модели сигналов, в которой сохраняются те основные черты и свойства последних, которые имеют важное значение для определённого класса задач. В современной теории информации адекватной моделью сигналов является случайный процесс [7, 8], и теория обнаружения сигналов представляет собой статистическую область знания.

В процессе развития науки и техники и по мере выдвижения новых научных задач появлялись различные модели сигналов, всё более отражающие свойства реальных переносчиков информации. В настоящее время наиболее распространённой моделью сигналов является модель, опирающаяся на целые функции конечной степени, что отражено, так или иначе, в многочисленной литературе, например [9].

Стохастичность сигнала и математические свойства его реализаций представляют собой наиболее общие характеристики любых сигналов, и каждая область знания, связанная с обработкой сигналов, требует уточнения и конкретизации сигналов ей присущих. Очевидно, такого уточнения требуют модели сигналов, образующихся при раннем обнаружении очагов возгораний. Иными словами, вопрос построения адекватной модели сигнала при решении проблемы раннего обнаружения возгораний является одним из центральных и требует своего решения.

1.3.2 Аналитические формы представления сигналов: временная, спектральная и корреляционная

Важнейшими формами аналитического выражения сигналов являются представления динамического сигнала в форме функции времени $f(t)$ и в виде спектра. Спектр – это единственная форма представления сигналов в рамках линейной теории. Современная теория сигналов знает значительное количество базисных функций при построении спектрального разложения сигналов. К числу наиболее известных ортогональных базисов относятся: гармонический, функции Уолша, Радемахера. В принципе, может быть, в качестве базисной использована любая ортонормальная система функций.

Вопрос заключается лишь в целесообразности того или иного разложения и решается отдельно в каждом конкретном случае.

В рамках решения проблемы раннего обнаружения очагов возгораний в некоторых случаях можно считать, что единственным адекватным разложением будет разложение в гармонический спектр. Речь идёт о характерных спектральных линиях излучения, возбуждённых в процессе горения атомов, молекул, радикалов. Поскольку эти излучения, составляющие предает изучения молекулярной спектроскопии, связаны с квантовыми переходами, когда энергия E кванта определяется частотой ω гармонического колебания, то разложение в гармоническом базисе является вполне адекватным, а сам гармонический анализ, то есть физическое получение гармонического спектра, представляется наиболее физичным. В связи с этим формула разложения Фурье детерминированных сигналов

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t) f(\omega) d\omega = \mathbf{F}^{-1} f(\omega), \quad (1)$$

и разложение Фурье – Стилтьеса гармонизуемых случайных процессов

$$X(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\omega t) dZ(\omega), \quad (2)$$

являются основными. Эти формулы допускают обращения, иными словами

$$f(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-i\omega t) f(t) dt = \mathbf{F} f(t), \quad (3)$$

где $f(\omega)$ – комплексная спектральная функция,

$$Z(\omega_1) - Z(\omega_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\omega_2 t) - \exp(-i\omega_1 t)}{it} X(t) dt, \quad (4)$$

где $Z(\omega)$ – спектральный процесс, соответствующий гармонизуемому случайному процессу $X(t)$.

Выражение динамического сигнала в виде функции времени и его спектра, например, гармонического $f(\omega)$, – основные формы аналитического выражения сигнала. Эти два представления позволяют записать выражение

для важнейшей характеристики сигнала – его усреднённой автокорреляционной функции на интервале T :

$$\begin{aligned}\psi(\tau) &= \frac{1}{T} \int_T f(t) f^*(t + \tau) dt; \\ G(\omega) &= \mathbf{F}[\psi(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau,\end{aligned}\tag{5}$$

где $G(\omega)$ согласно теореме Бохнера, выражает энергетический спектр отрезка реализации $f(t)$ длительности T . Представление сигнала в форме (5) имеет чрезвычайно важное значение для оптической спектроскопии, предметом изучения которой является распределение энергии по частотам.

1.4 Спектроскопические методы диагностики физических сред и процессов

1.4.1 Спектральные признаки очага горения в оптическом диапазоне

Очаг горения в первую очередь характеризуется электромагнитным излучением, охватывающим оптический диапазон от инфракрасной (ИК) до ультрафиолетовой (УФ) области спектра. Спектральная картина излучения представляет собой суперпозицию двух компонентов: сплошного спектра, обусловленного тепловым излучением пламени и тлеющих частиц, а также линейчатого или полосового спектра, возникающего вследствие переходов возбуждённых атомов, молекул и радикалов, входящих в состав продуктов горения [6]. Наиболее выраженные характеристики наблюдаются в инфракрасном диапазоне, на длинах волн $\lambda = 2,7 \mu\text{мм}$, $\lambda = 4,4 \mu\text{мм}$, $\lambda = 6,2 \mu\text{мм}$.

Указанные излучения являются характерными для любого очага возгорания [6, 10], поскольку их формирование обусловлено возбуждёнными состояниями молекул водяного пара, углекислого газа и гидроксильных радикалов OH, возникающих в процессе термохимических преобразований.

Типовой спектр излучения очага горения, включающий сплошной тепловой фон и характерные пики продуктов горения (CO_2 , H_2O), представлен на рисунке 3 [11].

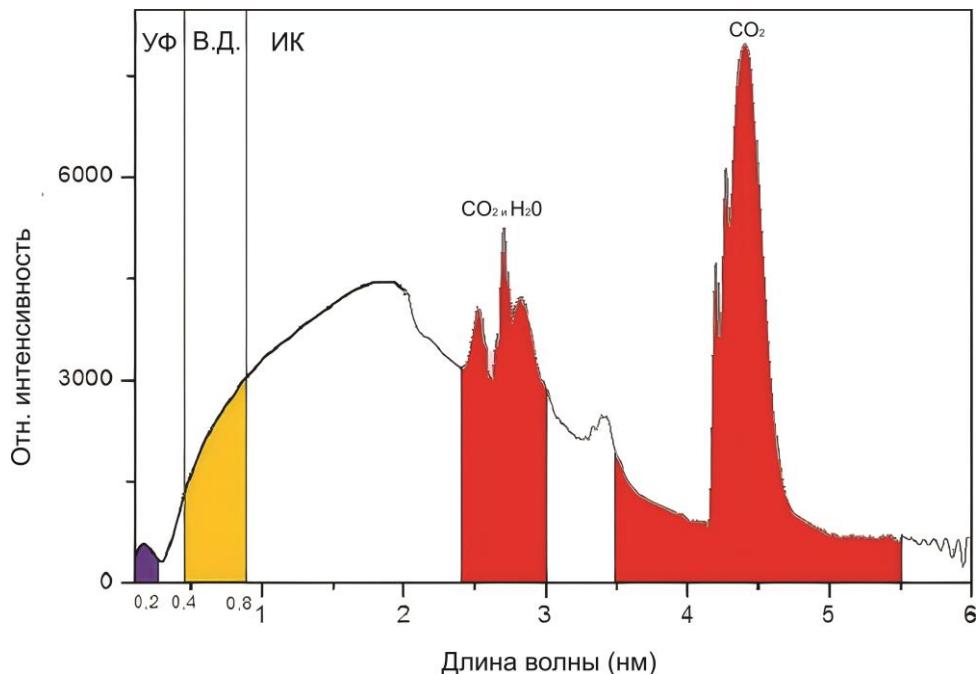


Рисунок 3 – Типовой спектр излучения углеводородного очага горения:
интенсивные пики в ИК-диапазоне, обусловленные CO_2 и H_2O

Как видно из рисунка 3, основная энергетическая характеристика очага горения сосредоточена в инфракрасном диапазоне, особенно в области от 2 до 5 мкм, где наблюдаются выраженные пики, обусловленные излучением молекул CO_2 и H_2O . Эти спектральные особенности позволяют надёжно идентифицировать очаги возгорания даже на фоне других тепловых источников.

Таким образом, спектроскопическая диагностика, основанная на анализе характерных полос излучения, представляет собой эффективный инструмент для раннего обнаружения пожаров. В сочетании с методами выделения узкополосных сигналов и фильтрации фонового излучения, она обеспечивает высокую чувствительность и селективность при мониторинге горения в различных средах.

1.4.2 Эмиссионный анализ в задачах обнаружения очагов горения

Приём и анализ спектра электромагнитных излучений в оптическом диапазоне с целью обнаружения очагов возгорания следует назвать наиболее перспективным путём решения задачи раннего обнаружения возгораний. В соответствии с законом Кирхгофа, возможны два подхода решения этой задачи. Один из подходов к регистрации очагов возгорания основан на применении методов эмиссионной спектроскопии, предполагающих детектирование излучения на заранее определённых длинах волн. В работе [12] указана возможность создания пожарного извещателя, чувствительного к специфическим сочетаниям фиксированных спектральных компонент. Такой подход обеспечивает надёжную дифференциацию инфракрасного излучения пламени от теплового излучения высокотемпературных поверхностей и других неогненных источников. При этом излучение на длине волны $\lambda = 4,4 \text{ мкм}$ может служить критерием для различия пламени с высокой и низкой температурой [13].

В своё время считалось [6], что при тлеющем горении интенсивность излучения очага возгорания настолько мала, что достоверное обнаружение его на фоне теплового излучения предметов, находящихся вблизи очага возгорания, практически невозможно. Однако, обнадёживающие исследования в этом направлении ведутся [14]. Они основаны на обнаружении газообразных веществ (CO , CO_2 , CH_4 , H_2 и др.), образующихся в процессе тлеющего горения.

Итак, одним из информативных параметров факторов первой группы является наличие излучения в ИК и видимом участках спектра оптического диапазона.

При развитии возгорания интенсивность излучения увеличивается, кроме того, флюктуирует вследствие мерцания пламени. Следовательно, следующим информативным параметром будет увеличение интенсивности излучения.

Оба названных информативных параметра успешно могут быть использованы для обнаружения возгораний методами спектроскопии в рамках получения спектрометрической информации. Что касается характеристик мерцания пламени, то частотный диапазон их флуктуации, от единиц до десятков герц, зависит от формы и размеров пламени, и изучение этой характеристики горения, или третьего информативного параметра, составляет предмет обработки спектрометрической информации.

Можно ожидать, что применение методов эмиссионной спектроскопии в сочетании с принципами выделения узкополосных сигналов на фоне широкополосных помех с непрерывным спектром позволит решить проблему обнаружения тлеющего горения.

1.4.3 Альтернативные спектроскопические подходы при ограничениях ИК-детектирования

Обнаружение ИК излучения в Диапазоне длин волн 2,4мкм, 4,4мкм, 6,2мкм во многом затрудняется по причине несовершенства фотоприёмников этого диапазона. Поэтому наряду с применением традиционных методов приёма и анализа названных излучений, перспективными следует признать такие направления как метод лазерной индуцированной флуоресценции и комбинационного антистоксовского рамановского рассеяния и здесь лишь стоит отметить, что спектр сигналов, обусловленных лазерной индуцированной флуоресценцией, лежит в УФ диапазоне, что снижает остроту вопроса, связанную с применением фотоприёмников ИК излучения.

Перспективность спектроскопических методов раннего обнаружения возгораний, с одной стороны, и трудности применения методов эмиссионной ИК спектроскопии, с другой стороны, вынуждают определять нетрадиционные методики построения спектральной аппаратуры [15] и широко использовать обработку спектроскопической информации.

1.5 Информативные параметры второй группы, связанные с динамикой газовоздушной среды при горении

1.5.1 Динамика газовоздушной среды и турбулентные признаки очага горения

Динамика газовоздушной среды в зоне очага горения сопровождается формированием комплекса информативных параметров, позволяющих характеризовать процесс возгорания. В частности, анализ характеристик восходящего конвекционного струйного течения отражается в пространственно-временных изменениях давления и скорости потока, а также в возникновении турбулентных структур.

В настоящее время эти вопросы интенсивно изучаются, о чём свидетельствует значительное число публикаций, например [16], и создание крупных специализированных лабораторий, таких как в Дайбургском университете (Германия) и в Лудском университете (Швеция). Теоретическое изучение вопросов горения сопряжено с серьёзными трудностями. Тем не менее, обозначился адекватный подход к этой проблеме, именно, предложена статистическая модель турбулентного фронта пламени в двухфазном потоке, основанная на использовании эволюционного уравнения для совместной плотности распределения температур и массы частиц горючего [16]. Модель позволяет с единых позиций описывать качественно различные режимы турбулентного горения.

Трудности, связанные с теоретическими исследованиями процессов горения, вызвали широкое распространение экспериментальных методов комплексного изучения процессов горения в условиях пожара. Новейшие методы основаны на применении лазеров и когерентного антистоксовского рамановского рассеяния. Так, в работе [17] рассмотрены результаты экспериментов по оценке применимости лазерных методов измерения температуры для контроля постоянной зоны горения. Изучен баланс излучения, и на его основе составлен энергетический баланс зоны горения, из результатов анализа которого следует возможность высокоточного контроля

температуры в области горения. Применён гармонический анализ для контроля регистрируемого сигнала, что позволило надёжно выделить полезный сигнал и получить высокое отношение сигнал/шум за счёт использования различия в когерентном излучении лазера и многоволновом излучении нагретой зоны горения. Для повышения точности измерений и обеспечения возможности контроля дополнительных факторов горения, в частности размеров наиболее нагретой зоны, были использованы и другие методы, например, когерентное антистоксовское рамановское рассеяние. Этот метод можно описать как особый вид спектрального анализа на молекулярном уровне и новый метод термометрии в газах и пламени. Таким образом, спектроскопические методы исследования, будучи высокоточными, весьма чувствительными и универсальными, проникли и в область изучения процессов горения.

Эволюция характеристик течения газовоздушной смеси при развитии возгорания – изменение векторов скоростей, давлений в различных точках пространства, появление турбулентностей, содержит информативные признаки процесса горения. Методы изучения атмосферных потоков широко известны в физике атмосферы, геофизике и радиофизике. Эти методы включают в себя лазерное и акустическое зондирования и томографические исследования, в частности, лазерная индуцированная флуоресценция. Изучение этих информативных параметров, вообще, и для определённых классов возгораний, в частности, может быть проведено на основе методов, известных в геофизике и радиофизике, и есть надежда, что это даст положительный вклад в дело решения проблемы раннего обнаружения очагов возгорания.

1.6 Выводы по разделу

Изучение доступной литературы, как в форме публикаций, так и в виде рефератов, доказало, что в настоящее время вопросам раннего и надёжного обнаружения очагов горения уделяется большое внимание, о чём свидетельствуют многочисленные публикации, проверенные по материалам исследований, авторские свидетельства и патенты, а также организация крупных научно–исследовательских лабораторий при некоторых университетах в Западной Европе. Для проводимых исследований характерны две тенденции:

1. Совершенствование старых методов и приборов ранней диагностики и обнаружения возгораний на основе новых технологий, например с применением лазерной и оптоволоконной техники, что характерно для подобных исследований.
2. Широкое исследование процессов горения и разработка новых методов раннего обнаружения возгораний.

Очевидно, названные тенденции, с одной стороны, следуют насущным задачам сегодняшнего дня, с другой стороны, работают на ближайшую и отдалённую перспективу.

Изучение состояния проблемы раннего обнаружения возгораний, проведённое в рамках данной диссертации, позволило сформулировать следующие выводы:

1. Научные исследования, направленные на совершенствование существующих методов, и приборов раннего обнаружения возгораний следует вести в направлении повышения чувствительности и помехоустойчивости соответствующих систем и применения новых разработок в области лазерной техники и излучения возможностей применения новых приборов ранней регистрации очагов горения.
2. Исследования, связанные с ближайшей перспективой, по–видимому, целесообразно вести в направлении совершенствования существующих и изысканию новых методов и приборов оптической

спектроскопии, как в рамках получения спектроскопической информации, так и обработки последней, а также спектральной обработки сигналов, отражающих мерцание пламени.

3. Отдалённая перспектива связывается с исследованиями процессов горения и диагностики состояния газовоздушной смеси, образующейся в результате возгораний, в частности, использование лазерного зондирования, исследование пламени методами спектроскопии, что призвано дать в качестве одного из положительных результатов адекватные модели сигналов и помех, генерируемые очагом горения.

4. Несмотря на активное развитие отдельных сенсорных технологий, в настоящее время отсутствуют комбинированные приборы, способные одновременно регистрировать три ключевых признака возгорания – дым, пламя и тепловой конвекционный поток. Особенno важно отметить, что приборы для определения характеристик теплового конвекционного потока (ТКП), обладающие потенциалом для ранней диагностики, в принципе не разработаны. Это создаёт значительный пробел в существующей системе контроля и подчёркивает необходимость дальнейших исследований в направлении создания интегрированных сенсорных решений.

2 Матричный спектральный прибор как средство диагностики газовой среды замкнутого помещения

2.1 Спектроскопическое обоснование метода раннего обнаружения признаков горения

Современные задачи обеспечения пожарной безопасности требуют разработки методов, способных обнаруживать признаки возгорания на максимально ранних стадиях – до появления визуального пламени или дыма. Это особенно актуально для технологических процессов, объектов с высокой плотностью тепловых потоков, а также замкнутых или труднодоступных пространств, где традиционные извещатели демонстрируют недостаточную чувствительность и высокую инерционность [18–23]. В условиях, когда время реагирования играет критическую роль, особую ценность приобретают подходы, основанные на регистрации первичных физических признаков горения – теплового конвекционного потока, мерцания пламени, спектральных характеристик излучения [24–27].

Наиболее перспективными считаются методы, сочетающие анализ динамических и пространственно-временных сигналов, генерируемых очагами горения. Такие сигналы включают излучения в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах на фиксированных длинах волн [21, 25], характерных для открытого пламени. Применение алгоритмической обработки этих сигналов позволяет не только повысить быстродействие системы, но и существенно снизить вероятность ложных срабатываний за счёт селективного анализа [28, 6].

Физической основой метода служит наблюдение за колебаниями температурного поля, возникающими в результате тепловой конвекции. Эти колебания модулируют интенсивность проходящего или отражённого излучения, создавая характерные низкочастотные дрожания сигнала, регистрируемые фоточувствительным устройством. Согласно данным зарубежных исследований [25, 29], диапазон таких колебаний составляет от 2 до 20 Гц, при этом значения в районе 10–15 Гц приводятся как пример

тической активности, связанной с открытым пламенем. Важно отметить, что регистрируемые частотные компоненты отражают не спектральную структуру самого излучения, а динамику среды, что позволяет использовать частотный анализ как способ выделения признаков ранней термодинамической нестабильности.

Исходя из описанных закономерностей возникает необходимость в рассмотрении спектральных характеристик излучения пламени в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах, а также особенности его частотной модуляции, возникающей в результате термодинамической активности среды. Эти признаки позволяют построить многоканальную систему с повышенной достоверностью и устойчивостью к ложным срабатываниям [30].

При этом рассматриваются также два ключевых аспекта излучения, возникающего при горении: его спектральные характеристики в ультрафиолетовом диапазоне и частотные модуляции, обусловленные термодинамической активностью среды [31, 32]. Оба признака играют важную роль в построении селективного прибора для задачи раннего обнаружения термодинамической активности.

Несмотря на то, что в разработанном приборе используются оптические и оптоэлектронные элементы, рассчитанные на работу в ближнем УФ-диапазоне, его применение позволяет реализовать компактную и энергоэффективную систему, обладающую достаточной чувствительностью к фотонному излучению пламени [31–33]. Наличие ряда оптоэлектронных каналов матричного спектрального прибора позволяет дополнительно реализовать фильтрацию на различных длинах волн в параллельном режиме [31, 32]. Это расширяет функциональность системы и обеспечивает возможность дифференциации типов пламени и фоновых тепловых источников, особенно в условиях сложной оптической обстановки [34].

2.2 Сущность методики, архитектура реализации и физико-техническое обоснование задачи спектральной диагностики

Ранние стадии горения сопровождаются выраженной термодинамической активностью: конвекцией, турбулентностью, образованием пульсирующего пламени. Эти процессы модулируют интенсивность излучения, регистрируемого фотоэлектронным устройством, особенно на этапах, когда визуальные признаки ещё не проявлены.

Таким образом, частотный анализ сигнала интенсивности может служить инструментом раннего обнаружения горения, позволяя выделить признаки, предшествующие визуальному проявлению пламени.

2.2.1 Обзор, классификация и математическая формализация спектральных методов анализа сигналов в задачах диагностики термодинамических процессов

Для реализации спектральной диагностики необходима строгая математическая формализация применяемых методов. Далее будут рассмотрены ключевые выражения, лежащие в основе алгоритма: дискретное преобразование Фурье, непрерывное вейвлет-преобразование и вычисление спектральной плотности энергии. Особое внимание уделяется физической интерпретируемости, воспроизводимости и инженерной применимости вычислений.

Процессы горения характеризуются выраженной нестационарностью: пульсациями, переходными режимами, турбулентными всплесками. Эти особенности делают классические методы анализа, такие как дискретное преобразование Фурье (БПФ), недостаточно чувствительными: они дают глобальное представление о частотном составе, но не позволяют локализовать колебания во времени. В то же время спектральный анализ дискретного сигнала традиционно осуществляется с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ), реализуемого через алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), что определяет его базовую роль в обработке сигналов, несмотря на указанные ограничения.

Для надёжной регистрации периодических компонентов в сигнале временное окно анализа должно охватывать не менее двух периодов предполагаемой активности. При частоте дискретизации f_s и длине выборки N , длительность окна составляет:

$$T_{win} = \frac{N}{f_s}. \quad (6)$$

Таким образом, для сигнала с характерной частотой f_0 , условие надёжного срабатывания алгоритма можно записать как:

$$T_{win} \geq \frac{2}{f_0}. \quad (7)$$

Это ограничение определяет минимальную длительность фрагмента сигнала, необходимого для достоверного спектрального анализа и классификации активности. Таким образом, выражение (7) задаёт минимально допустимую длительность временного окна, при которой возможно надёжное обнаружение активности с характерной частотой f_0 . Это условие формализует чувствительность алгоритма к кратковременным колебаниям и определяет допустимые параметры дискретизации при проектировании прибора.

Пусть $x[n]$ – дискретный временной ряд длиной N отсчётов. Его спектр определяется по формуле:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi kn/N}, \quad (8)$$

где $X[k]$ – спектральные коэффициенты, $f_k = \frac{kF_s}{N}$ – соответствующая частота, F_s – частота дискретизации [35].

При практическом анализе спектра особое внимание уделяется его амплитудному представлению, позволяющему визуализировать распределение энергии по частотам:

$$A[k] = \frac{|X[k]|}{N}. \quad (9)$$

Однако ограниченность дискретного преобразования Фурье при анализе нестационарных процессов требует применения методов, обеспечивающих совместное разрешение по времени и частоте. Вейвлет-анализ позволяет локализовать частотные компоненты во времени, что особенно важно при нестационарной динамике сигнала. Устойчивые колебания в диапазоне 10–15 Гц, соответствующие динамике открытого пламени, могут быть дифференцированы от кратковременных шумов и фоновых колебаний [36]. При этом вейвлет-анализ обеспечивает совместное разрешение по времени и частоте, позволяя выявлять кратковременные, но устойчивые признаки активности. Особенно это важно на ранних стадиях горения, когда визуальные проявления отсутствуют, но спектральные характеристики уже изменяются. Комплексные вейвлеты, такие как Морле, обеспечивают фазовую когерентность при анализе квазипериодических и структурированных флуктуаций, что критично для задач раннего обнаружения активности. Хотя фаза не является физически интерпретируемой характеристикой случайногопроцесса, её сохранение позволяет выделять направленные изменения и локализованные энергетические всплески в сигнале, обеспечивая устойчивость к шуму и повышая чувствительность алгоритма к слабым признакам активности.

Описанные преимущества вейвлет-анализа формализуются через непрерывное вейвлет-преобразование (НВП), которое позволяет задать совместное разрешение по времени и частоте в явном виде. Для анализа временной структуры применяется непрерывное вейвлет-преобразование (НВП):

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (10)$$

где a – масштаб (сжатие или растяжение базисной функции), b – временной сдвиг, $\psi(t)$ – базисная вейвлет-функция. В данной работе используется комплексный Морле-вейвлет:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \cdot e^{j\omega_0 t} \cdot e^{-t^2/2} . \quad (11)$$

Он обеспечивает высокую чувствительность к узкополосным колебаниям и сохраняет фазовую информацию [37]. После выполнения НВП формируется матрица $W(f,t)$, отражающая амплитуду колебаний на каждой частоте f в каждый момент времени t . Для количественной оценки активности в заданном диапазоне частот $[f_1, f_2]$ используется интегральная характеристика, отражающая накопленную амплитуду спектральных компонент сигнала. Эта величина интерпретируется как энергия спектральной плотности сигнала в выбранной полосе, и вычисляется по формуле:

$$E(t) = \sum_{f_i \in [f_1, f_2]} |W(f_i, t)|^2 , \quad (12)$$

где $W(f_i, t)$ – коэффициенты непрерывного вейвлет-преобразования на частоте f_i в момент времени t . Поскольку $|W(f_i, t)|^2$ пропорционально локальной мощности сигнала на данной частоте, сумма по диапазону $[f_1, f_2]$ даёт оценку общей активности в этой полосе. Таким образом, $E(t)$ представляет собой времененную динамику спектральной энергии сигнала в целевом диапазоне, и служит основой для последующей классификации.

Эта величина аналогична мощности сигнала в заданной полосе частот [38] и служит основой для последующей классификации.

Кепстральный анализ и бинарная классификация спектральных признаков термодинамической активности

Наряду с методами спектрального (БПФ) и вейвлет-анализа, дополнительным инструментом служит кепстральный анализ, основанный на логарифмическом преобразовании спектра и последующем обратном преобразовании Фурье, который позволяет выявить гармоническую структуру сигнала, отделяя периодические компоненты от шумовых. Это особенно полезно при наличии паразитных колебаний, вызванных механическими вибрациями или нестабильностью источника.

Применение как дискретного преобразования Фурье (БПФ), так и кепстрального анализа к одному и тому же сигналу обусловлено различием в их диагностических функциях. БПФ используется для первичной оценки частотного состава сигнала, позволяя выявить наличие выраженных спектральных компонент и определить их локализацию по частоте. Однако он не даёт информации о том, являются ли эти компоненты гармонически организованными – то есть связанными с физически осмысленными процессами, такими как пульсации горения.

Кепстральный анализ, напротив, преобразует логарифм амплитудного спектра в область квази-периодов, где повторяющаяся структура спектра проявляется как выраженные пики. Это позволяет выявить наличие регулярных интервалов между спектральными компонентами – признак гармонической природы сигнала. Таким образом, кепстральный анализ даёт возможность отличить устойчивые, физически обусловленные колебания от шумовых артефактов и паразитных составляющих. Метод впервые предложен в работе [39], где введено понятие «кепстр» как логарифм спектра, обработанный обратным преобразованием Фурье.

Математическая реализация кепстрального преобразования имеет следующий вид:

$$c[n] = \text{IDFT}(\log|X[k]|), \quad (13)$$

где $X[k]$ – спектр сигнала, полученный через БПФ. Альтернативно, кепстральный анализ может быть применён к временным срезам НВП:

$$c_t[q] = \text{DFT}_f(\log|W(f, t)|), \quad (14)$$

что позволяет локализовать гармонические признаки во времени. Подобные методы локализации спектральных признаков во времени обсуждаются в [40], особенно в контексте адаптивной фильтрации и временной декомпозиции. Кепстральный анализ выполняется до бинарной фильтрации и служит инструментом предварительной оценки гармонической структуры. Он позволяет отделить устойчивые периодические компоненты от случайного

шума, тем самым повышая надёжность последующего порогового классификатора. Подобные подходы применяются в задачах голосовой идентификации, где КЧКК-признаки / MFCC (коэффициенты мел-частотной кепстральной корреляции) и алгоритмы динамического временного выравнивания ДВВ (DTW) используются для выделения устойчивых спектральных паттернов [41, 33].

Для перехода от спектральных признаков к практическим алгоритмам классификации необходимо ввести процедуры нормализации и пороговой фильтрации. Нормализация энергии позволяет привести спектральные оценки к единой шкале, устранивая влияние амплитудных вариаций сигнала и обеспечивая сопоставимость различных фрагментов наблюдений. Пороговая фильтрация, в свою очередь, реализует бинаризацию признаков: она выделяет только те участки сигнала, где энергия спектральных компонент превышает заданный эмпирический уровень, что соответствует наличию физически значимой активности.

Далее осуществляется нормализация энергии, обеспечивающая сопоставимость спектральных оценок различных фрагментов сигнала:

$$E_{norm}(t) = \frac{E(t)}{\max(E(t))} \quad (15)$$

и пороговая фильтрация:

$$S(t) = \begin{cases} 1 & \text{если } E_{norm}(t) > \theta \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (16)$$

где θ – эмпирически выбранный порог (например, 0.3) [36]. Таким образом, $S(t)$ представляет собой бинарный индикатор наличия характерных колебаний, связанных с горением, и может быть использован в задачах автоматической классификации. Аналогичные бинарные схемы классификации реализованы в системах речевого анализа, таких как НТК (CWT) [42], где пороговая фильтрация применяется для выделения значимых участков сигнала.

Таким образом, сочетание БПФ, НВП и кепстрального анализа

формирует комплексный подход к спектральной диагностике: БПФ обеспечивает первичную оценку частотного состава, НВП локализует колебания во времени, а кепстральный анализ подтверждает гармоническую природу обнаруженных признаков и фильтрует шумовые артефакты. Совместное применение этих методов образует двухуровневую систему диагностики, где сначала выявляются потенциально значимые частотные компоненты, а затем проверяется наличие закономерностей в их распределении, характерных для реальных физических процессов. Такой подход повышает надёжность классификации и позволяет исключить ложные срабатывания, вызванные нестабильностью источника или внешними возмущениями. Его эффективность подтверждается сравнительным анализом параметрических реализаций КФКК-признаков, представленным в работе [43], что демонстрирует практическую применимость предложенной методики.

2.2.2 Обоснование выбора методов обработки сигналов

Обработка сигналов, поступающих от фотоприёмников и ПЗС-линейки, направлена на извлечение признаков, обладающих высокой информативностью и устойчивостью к шуму, флюктуациям и нестабильности условий регистрации. Природа регистрируемых сигналов – слабые аналоговые отклики с переменной спектральной и временной структурой требует применения методов, способных обеспечить масштабную декомпозицию, спектральную селективность и синхронную обработку.

Выбор математических алгоритмов обусловлен не только физико-техническими характеристиками сигналов, но и архитектурными ограничениями микроконтроллерной платформы, требованиями к вычислительной эффективности, устойчивости к помехам и нормативной воспроизводимости результатов.

Для спектрального анализа сигналов от фотодиодов применяется **быстрое преобразование Фурье (БПФ)**, обеспечивающее декомпозицию на гармонические составляющие. Метод обладает вычислительной

эффективностью $N \log N$, устойчив к аддитивному шуму и реализуем в микроконтроллерной архитектуре.

Для локального анализа импульсных сигналов, получаемых с ПЗС-линейки, используется **дискретное вейвлет-преобразование (ДВП)** с ортогональными базисами (вейвлеты Добеши, вейвлеты Симлет). Метод обеспечивает масштабную декомпозицию, позволяет выделять кратковременные события и фронты, устойчив к шуму и допускает реализацию в ограниченной вычислительной среде. В отличие от оконного БПФ (*ОПФ*), **вейвлет-преобразование** адаптивен к структуре сигнала, что критично для пространственной диагностики.

Для оценки взаимосвязи между каналами и синхронизации данных применяется **нормированный корреляционный анализ**. Он позволяет выявлять задержки, фазовые сдвиги и устойчивые зависимости, реализуется с использованием скользящего окна и устойчив к флюктуациям. *Кроссспектральный анализ и метод взаимной информации* были отклонены ввиду вычислительной сложности и нестабильности при коротких импульсах.

Для устранения амплитудных искажений и подготовки данных к визуализации применяется **логарифмическое масштабирование и нормализация по максимуму**. Эти методы обеспечивают сопоставимость между регистрациями, устойчивы к выбросам и допускают реализацию в микроконтроллерной среде. *Z-нормализация и мин-макс масштабирование* были отклонены из-за чувствительности к выбросам и нестабильности при малом объёме данных.

Таким образом, **выбранные методы** обеспечивают точную, устойчивую и нормативно воспроизводимую обработку сигналов в составе адресной системы регистрации.

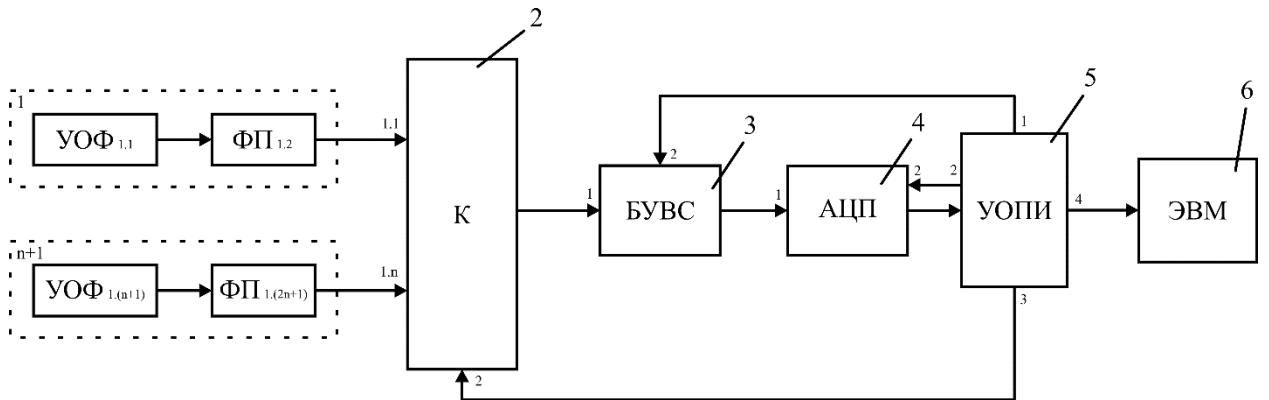
2.3 Архитектура и физико-математическая реализация матричного спектрального прибора

2.3.1 Архитектура и принцип работы матричного спектрального прибора

Разработанные и формализованные методы спектрального анализа, описанные в предыдущем разделе, задают теоретическую основу для выделения признаков термодинамической активности в оптических сигналах. Однако их практическая применимость определяется не только корректностью математических моделей, но и возможностью аппаратной реализации в составе специализированного измерительного комплекса. В связи с этим в настоящем разделе рассматривается архитектура матричного спектрального прибора, обеспечивающего регистрацию и обработку сигналов в условиях пространственной неоднородности среды. Особое внимание уделяется принципам построения электронного блока, подбора фоточувствительного устройства и физико-математической интеграции алгоритмов анализа в аппаратную структуру прибора.

Для решения этой задачи была разработана оригинальная конструкция матричного спектрального прибора, реализующая многоканальную регистрацию и обработку спектральных признаков пламени. Концепция устройства и его техническая реализация защищены патентом РФ на полезную модель № 214303 У1 [44], что подтверждает новизну и практическую значимость предложенного решения.

На рисунке 4 представлена структурная схема матричного спектрального прибора, иллюстрирующая последовательность прохождения сигнала от оптических каналов до вычислительного блока.



1.1 – узкополосный интерференционный фильтр, 1.2 – фотоэлектронный преобразователь, 2 – коммутатор, 3 – блок усиления и временной стабилизации, 4 – аналого-цифровой преобразователь, 5 – устройство обработки и передачи информации, 6 – электронно-вычислительная машина, УОФ1.1 – оптический фильтр, УОФ1.(n+1) – оптический фильтр, ФП1.2 – фотоприёмник, ФП1.(2n+1) – фотоприёмник, К – коммутатор, БУВС – усилитель, АЦП – преобразователь, УОПИ – обработка и передача, ЭВМ – вычислительный блок.

Рисунок 4 – Структурная схема матричного спектрального прибора

Сигналы формируются в независимых спектральных каналах, каждый из которых включает узкополосный оптический фильтр (УОФ1.1, УОФ1.(n+1)) и фотоприёмник (ФП1.2, ФП1.(2n+1)), обеспечивающие селективную регистрацию излучения в заданных диапазонах длин волн. Эти модули охватывают спектральный диапазон от 190 до 1000 нм с шагом 20–30 нм, позволяя выделять ключевые компоненты, характерные для процессов горения. Сформированные сигналы поступают на коммутатор (К) – 2, который управляет последовательной передачей данных от каждого канала. Далее сигнал проходит через блок усиления и временной стабилизации (БУВС) – 3, где осуществляется адаптация уровня и подавление шумов. Усиленный сигнал дискретизируется в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) – 4, после чего поступает в устройство обработки и передачи информации (УОПИ) – 5, реализующее алгоритмы фильтрации, нормирования и подготовки данных. Особенностью схемы является наличие обратной связи между УОПИ – 5 и

БУВС – 3, что позволяет динамически регулировать параметры усиления в зависимости от уровня сигнала и условий наблюдения. Финальная обработка, визуализация и хранение спектральной информации осуществляется на электронно-вычислительной машине (ЭВМ) – 6.

Конструкция прибора реализована на двухслойной печатной плате, на которой размещены фотодиоды, узкополосные интерференционные фильтры, программируемые операционные усилители и микроконтроллер Atmega1284. Оптические фильтры установлены в камере с регулируемой геометрией, обеспечивающей равномерное распределение светового потока по спектральным каналам. Усилительный тракт выполнен на базе программируемых операционных усилителей, что позволяет адаптировать коэффициент усиления в зависимости от уровня сигнала каждого канала. Аналого-цифровой преобразователь осуществляет 12-битную дискретизацию с частотой до 100 кГц, обеспечивая высокую временную точность регистрации динамических изменений интенсивности излучения.

Блок обработки и передачи информации реализует алгоритмы цифровой фильтрации, включая сглаживание, корреляционный анализ и спектральную декомпозицию. Это обеспечивает устойчивое выделение информативных признаков пламени даже в условиях фонового освещения, аэрозольных загрязнений и нестабильной геометрии источника излучения.

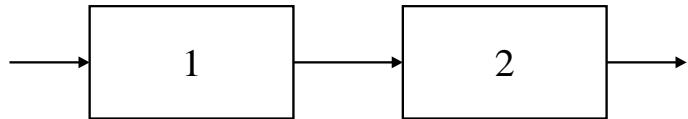
Матричный спектральный прибор интегрирован в состав комбинированной сенсорного прибора, предназначенного для раннего обнаружения очагов горения. Его применение позволяет регистрировать спектральные признаки пламени на начальных стадиях, дифференцировать типы горючих веществ по спектральному составу излучения, а также осуществлять мониторинг динамики пламени в реальном времени. Прибор демонстрирует устойчивую работу в условиях переменной освещённости и высокой задымлённости, а его модульная архитектура обеспечивает возможность масштабирования и интеграции с другими сенсорными компонентами в составе интеллектуальных систем пожарной диагностики.

Ключевым элементом каждого спектрального канала, обеспечивающим селективную пропускную способность, является узкополосный оптический фильтр. В дальнейшем, для целей физико-математического анализа, данный компонент будет трактоваться как резонаторный блок – эквивалент колебательного контура с сосредоточенными параметрами. Такая интерпретация позволяет использовать радиотехническую аналогию и формализовать спектральную селективность прибора в рамках модели распределённых резонансных систем. Структура и принципы работы резонаторного блока подробно рассматриваются в следующем разделе.

2.3.2 Спектральная модель резонаторного блока матричного спектрального прибора

В оптическом диапазоне резонаторная система матричного спектрального прибора включает набор резонаторов с распределенными параметрами и, каждый из которых имеет множество резонансов [45, 31, 46]. Всякую систему с распределенными параметрами можно рассматривать как сосредоточенную с достаточно большим числом степеней свободы. В отношении частотного спектра любая распределенная колебательная система эквивалентна совокупности сосредоточенных колебательных систем с одной степенью свободы, каждая из которых имеет собственную частоту, совпадающую с одной из собственных частот распределенной системы [47, 48, 31]. Каждая из таких систем должна рассматриваться как колебательный контур, представляющий собой резонатор с сосредоточенными параметрами. В оптическом диапазоне за счет особой конструкции резонатора добиваются того, чтобы он представлял собой систему эквивалентную системе с сосредоточенными параметрами, т.е. колебательному контуру [31, 30].

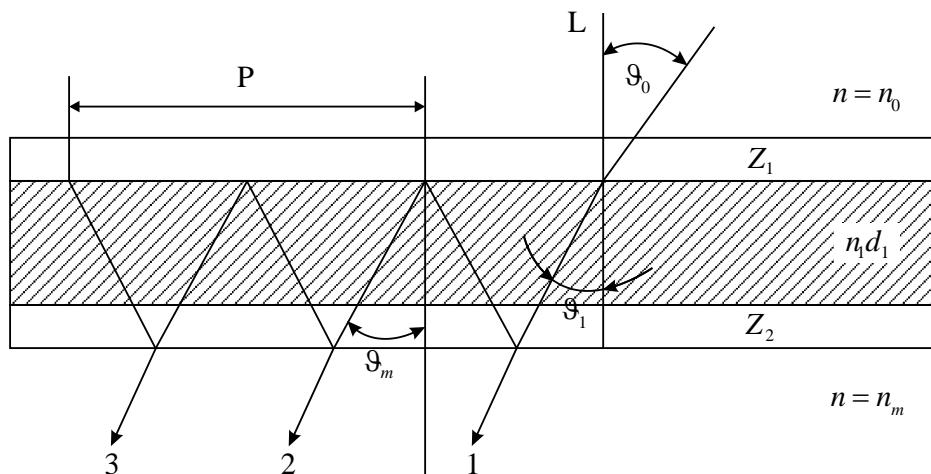
Радиотехническую аналогию элемента резонаторной системы матричного спектрального прибора можно представить в виде структурной схемы, приведенной на рисунке 5 [46].



1 – слой свободного пространства; 2 – колебательный контур, описывающий фильтрующие свойства резонатора

Рисунок 5 – Структурная схема радиотехнической аналогии элемента резонаторной системы матричного спектрального прибора

Согласно терминологии, принятой в оптике резонатор оптического диапазона, называется узкополосным интерференционным оптическим фильтром. Он, как правило, построен по схеме интерферометра Фабри – Перо, который образован двумя зеркалами, расположенными параллельно друг другу на некотором расстоянии [49]. Резонатор оптического диапазона также образован двумя зеркалами, расположенными на одной подложке и разделёнными слоем диэлектрика [48]. Схема такого резонатора показана на рисунке 6.



ϑ_0 – угол падения света на резонатор, ϑ_1 – угол распространения излучения в разделяльном слое толщиной d_1 и показателем преломления n_1 , ϑ_m – угол распространения света в подложке, Z_1 и Z_2 – зеркала [46].

Рисунок 6 – Схема резонатора оптического диапазона

В качестве зеркал могут выступать слои металла, диэлектрические четвертьволновые зеркала, или слои диэлектрика, работающие при углах падения больших критического [49].

Таким образом, резонатор оптического диапазона, реализованный в виде узкополосного интерференционного фильтра, представляет собой эквивалент колебательного контура с сосредоточенными параметрами [49, 48, 46]. Его конструкция обеспечивает формирование узкой полосы пропускания, необходимой для селективной регистрации спектральных компонентов излучения. В составе матричного спектрального прибора такие резонаторы интегрированы непосредственно в фотоприёмные каналы, обеспечивая компактность, стабильность и согласованность с электронной частью прибора. Это позволяет отказаться от дополнительных оптических элементов, таких как коллимирующие линзы и волоконные вводы, и реализовать прямую регистрацию спектрального сигнала с высокой разрешающей способностью.

Конструктивные особенности резонатора определяют его спектральную избирательность, которая играет ключевую роль в формировании отклика прибора на оптическое излучение. Для дальнейшего анализа важно рассмотреть спектральную характеристику резонатора, описывающую зависимость коэффициента пропускания от длины волны. Это позволит установить количественные параметры селективности и провести сопоставление с радиотехническими аналогами [31, 30].

Спектральная характеристика резонатора, т.е. спектральная зависимость коэффициента пропускания T резонатора от длины волны (частоты), приведена на рисунке 7 [31, 30].

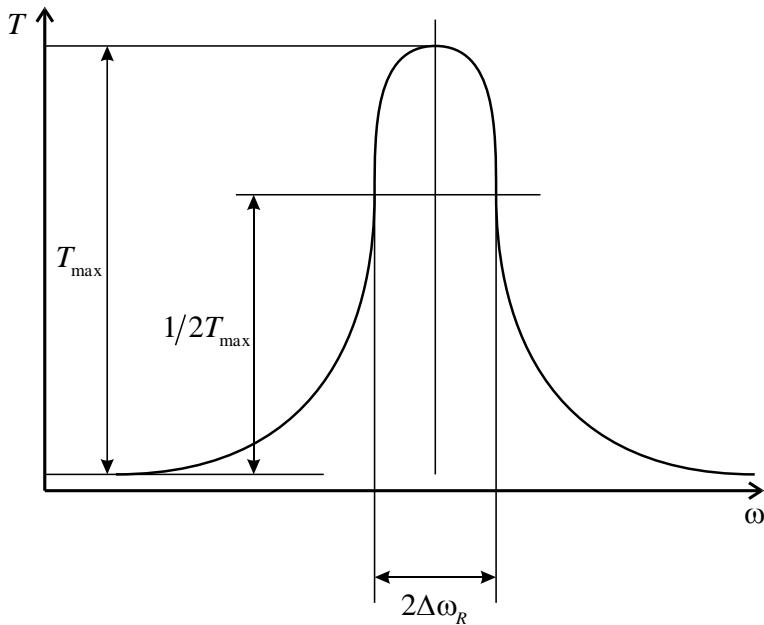


Рисунок 7 – Спектральная характеристика резонатора оптического диапазона

Для описания спектральной характеристики резонатора оптического диапазона вводится понятие полуширины резонатора $2\Delta\omega_R$. Аналогично определению полуширины по мощности в радиофизике и радиотехнике, это – спектральная ширина резонатора на уровне 0,707.

Теоретическая спектральная характеристика резонатора оптического диапазона практически совпадает с теоретической АЧХ одиночного колебательного контура [47]. Поэтому в качестве анализируемых сигналов рассматриваются колебательные явления в форме электрического тока или напряжения [30].

2.3.3 Теоретический анализ работы резонаторной системы матричного спектрального прибора

В данном разделе рассматривается математическая модель резонаторной системы как многомерной линейной структуры, позволяющей описать преобразование спектра в каждом канале прибора. На основе теории линейных систем формализуется связь между входным и выходным спектром, а также

вводится аппаратная функция, отражающая физические параметры резонаторных элементов.

Поскольку в процессе анализа сложного спектра матричным спектральным прибором связь между входом и выходом реализуется посредством резонаторной подсистемы, последняя может быть интерпретирована как многомерная линейная система.

Аппаратная функция такой системы определяется как:

$$A(\omega, \omega') = \hat{S}_w \hat{V} \hat{F}^{-1} \delta(\omega - \omega'), \quad (17)$$

где \hat{S}_w – линейный ограниченный оператор, \hat{F} – оператор прямого преобразования Фурье, \hat{V} – линейный ограниченный оператор перехода от колебательного процесса к волне.

Из выражения (17) виден смысл аппаратной функции прибора комплексного спектра, как реакции на δ – воздействие, что соответствует теории линейных систем. Аппаратная функция определяет однократный анализ спектра.

В связи с этим линейный ограниченный оператор \hat{S} , должен быть приведён к форме, соответствующей параллельной структуре анализа. Таким образом, математическое описание связи между входом и выходом данной системы должно быть выражено в виде матричного уравнения [46].

Обобщённая структурная модель матричной линейной системы с взаимосвязанными каналами представлена на рисунке 8 [50, 46].

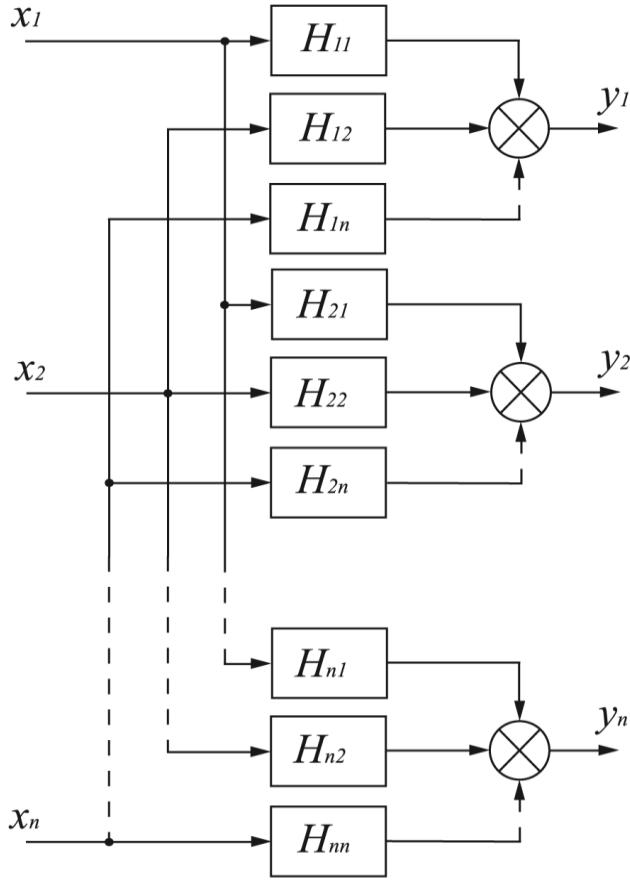


Рисунок 8 – Структурная схема матричной линейной системы со связанными каналами

В общем случае передача сигнала через такую систему описывается следующим образом [51]:

$$\begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & \dots & H_{nn} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{vmatrix}, \quad (18)$$

где $\|y_j\|$ – вектор-столбец выходных сигналов; $\|H_{ij}\|$ – матрица передачи, полностью характеризующая систему; $\|x_j\|$ – вектор-столбец входных сигналов [46].

Резонаторная подсистема спектрометра представляет собой автономную многомерную линейную систему, в которой отсутствуют перекрёстные связи между каналами. Такая система описывается диагональной матрицей [51].

Учитывая выражение (18), спектральная обработка сигнала в данной конфигурации описывается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} S_{a1}(\omega, t) \\ S_{a2}(\omega, t) \\ \vdots \\ S_{ak}(\omega, t) \\ \vdots \\ S_{an}(\omega, t) \end{bmatrix} = \int_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} A_{11}(\omega_1, \omega', t) & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{22}(\omega_2, \omega', t) & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{kk}(\omega_k, \omega', t) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & A_{nn}(\omega_n, \omega', t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S(\omega') \\ S(\omega') \\ \vdots \\ S(\omega') \\ \vdots \\ S(\omega') \end{bmatrix} d\omega', \quad (19)$$

где $\|S_{ak}(\omega_k, t)\|$ – вектор, содержащий отсчётные значения комплексного спектра исследуемого излучения; $A_{kk}(\omega_k, \omega', t)$ – частная аппаратная функция k -го канала, определяемая диагональной матрицей; $\|S(\omega')\|$ – вектор, описывающий спектр на входе системы [46].

Уравнение (20) задаёт общую интегральную модель преобразования спектра входного сигнала в выходной спектр резонаторной подсистемы. Оно показывает, что величина $S_{ak}(\omega_k, t)$ формируется как интеграл по всем частотным компонентам входного спектра $S(\omega')$, взвешенным аппаратной функцией $A_{kk}(\omega_k, \omega', t)$. Такая структура соответствует свёрточному оператору, т.е. выходной сигнал есть суперпозиция входных компонент, подверженных изменению за счёт отклика системы.

$$S_{ak}(\omega_k, t) = \int_{-\infty}^{\infty} A_{kk}(\omega_k, \omega', t) S(\omega') d\omega'. \quad (20)$$

Уравнение (20), устанавливающее соответствие между исходным спектром, отражающим физическое состояние исследуемого процесса (например, горения), и спектром, получаемым на выходе резонаторной подсистемы [46].

Частная комплексная аппаратная функция для k -го канала резонаторной системы определяется следующим образом [52–54]:

$$A_{kk}(\omega_k, \omega', t) = K_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot B_{kk}(\omega') \cdot e^{i\omega' t}, \quad (21)$$

где $B_{kk}(\omega)$ – функция передачи участка открытого оптического тракта; $K_{kk}(\omega_k, \omega')$ – функция передачи резонаторного блока соответствующего канала [46].

На основе этих выражений формируется матричная аппаратная функция всей системы:

$$\text{diag}\{A_{kk}(\omega_k, \omega', t)\} = \text{diag}\{K_{kk}(\omega_k, \omega')\} \cdot \text{diag}\{B_{kk}(\omega')\} \cdot e^{i\omega' t}. \quad (22)$$

Для получения полной аппаратной характеристики резонаторной подсистемы достаточно рассмотреть обработку сигнала в одном канале, поскольку все каналы функционируют по идентичному принципу [46].

Подставляя выражение (21) в уравнение (17), получаем формулу преобразования спектра в k -м канале:

$$S_{ak}(\omega_k, t) = \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot B_{kk}(\omega') \cdot S(\omega') e^{i\omega' t} d\omega', \quad (23)$$

где $2\Delta\omega_k$ — ширина полосы пропускания резонатора в k -м канале [46].

Применение теоремы о спектре произведения функций к выражению (22) приводит к следующему:

$$S_{ak}(\omega_k, t) = 2\pi \int_0^t h_k(t - \tau) \cdot s(\tau) d\tau, \quad (24)$$

где $h_k(t)$ — импульсная характеристика радиотехнического аналога k -го канала.

Поскольку резонатор обладает узкополосными свойствами, его импульсная характеристика описывается следующим образом [55]:

$$h_k(t) = H_k(t) \cdot e^{i\omega_k t}, \quad (25)$$

где $H_k(t)$ — комплексная огибающая импульсной характеристики [46].

Таким образом:

$$S_{ak}(\omega_k, t) = \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot H_k(t - \tau) \cdot e^{i\omega_k(t-\tau)} d\tau = e^{i\omega_k t} \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot H_k(t - \tau) \cdot e^{-i\omega_k \tau} d\tau. \quad (26)$$

Заключительное выражение (26) представляет собой комплексный текущий спектр, модифицированный весовой функцией [52, 46]. В физическом смысле текущий спектр проявляется как модуляция несущего колебания $\exp(i\omega_k t)$, при этом:

$$\dot{U}(t) = \int_{t_0}^t s(\tau) \cdot H_k(t - \tau) \cdot e^{-i\omega_k \tau} d\tau, \quad (27)$$

где $\dot{U}(t)$ – комплексная огибающая, соответствующая текущему спектру, аналогичному тому, что был получен в работах А.А. Харкевича [56, 46].

Таким образом, представленная математическая модель матричного спектрального прибора позволяет формализовать процесс спектральной обработки излучения в рамках многоканальной резонаторной системы. Полученные выражения обеспечивают теоретическую основу для описания преобразования комплексного спектра, отражающего физическое состояние контролируемой среды, в выходной сигнал прибора.

Следующий раздел посвящён архитектуре и принципу работы матричного спектрального прибора, реализующего описанную модель в виде аппаратно-программного комплекса.

2.3.4 Действие фотодетектора и энергетическая модель фототока на основе теоремы Пойнтинга

При оптических спектральных измерениях, как отмечалось выше, оперируют с энергетическими спектрами, поэтому получаемый на выходе резонаторной системы матричного спектрального прибора комплексный спектр подлежит дальнейшей обработке его детектирующей системой [46].

Принимая во внимание то, что все каналы матричного спектрального прибора, структурная схема которого была представлена на рисунке 2, одинаковы, то достаточно рассмотреть процесс анализа энергетического спектра оптического сигнала для одного канала [46].

Все детекторы в оптическом диапазоне являются квадратичными, так как сила тока любого фотоприемника пропорциональна мощности падающего излучения. Таким образом, сила тока фотоприемника определяется как

$$i = \alpha \cdot P = \alpha \iint_{\Delta S} \vec{\Pi} d\vec{s}, \quad (28)$$

где α – коэффициент пропорциональности; P – мощность падающего излучения; $\vec{\Pi}$ – вектор Пойнтинга падающего излучения; ΔS – площадь чувствительной поверхности фотоприемника [46].

Поскольку фотоприемники реагируют на электрическую компоненту электромагнитного поля, то вектор Пойнтинга необходимо представить следующим образом [57]:

$$\vec{\Pi} = |\vec{\Pi}| \cdot \vec{e} = \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cdot E^2 \cdot \vec{e}, \quad (29)$$

где \vec{e} – единичный вектор; c – скорость света; ϵ – диэлектрическая проницаемость; μ – магнитная проницаемость; E – напряженность электрического поля световой волны [46].

Тогда мощность падающего излучения выражается как

$$P = \iint_{\Delta S} |\vec{\Pi}| \cdot \vec{e} d\vec{s} = \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cdot \iint_{\Delta S} E^2 \cdot \vec{e} d\vec{s}. \quad (30)$$

Полагая, что оптическое излучение падает нормально на плоскость фотоприемника, то выражение мощности можно переписать как

$$P = \iint_{\Delta S} |\vec{\Pi}| \cdot ds = \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cdot \iint_{\Delta S} E^2 ds. \quad (31)$$

Вектор Пойнтинга является функцией координат (x, y) в плоскости фотоприемника. И его можно представить степенным рядом функции двух переменных

$$\begin{aligned} |\vec{\Pi}| &= |\vec{\Pi}|(0,0) + \frac{1}{1!} \cdot \left(\frac{\partial |\vec{\Pi}|}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial |\vec{\Pi}|}{\partial y} y \right) + \\ &+ \frac{1}{2!} \cdot \left(\frac{\partial^2 |\vec{\Pi}|}{\partial x^2} \Delta x^2 + \frac{\partial^2 |\vec{\Pi}|}{\partial x \partial y} \Delta x \Delta y + \frac{\partial^2 |\vec{\Pi}|}{\partial y^2} \Delta y^2 \right) + \dots \end{aligned} \quad (32)$$

В дальнейшем предполагается, что можно ограничиться нулевым приближением ряда (32), тогда фототок (28) дается выражением

$$i = \alpha \cdot \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cdot \iint_{\Delta S} E^2(0,0) ds = \alpha \cdot \frac{c}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cdot E^2(0,0) \Delta S. \quad (33)$$

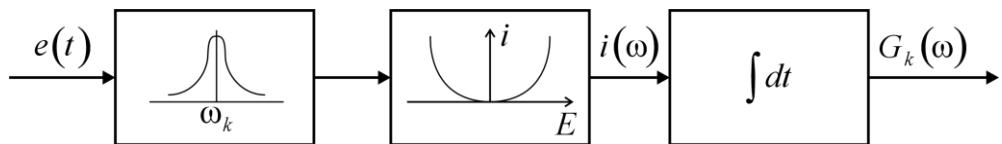
Полученное соотношение отражает известное утверждение о том, что фототок пропорционален квадрату напряженности электрической компоненты

светового поля и, как следует из разложения (32), является не всегда корректным [46].

2.3.5 Модель временного усреднения фототока

При регистрации спектра оптического излучения нужно учесть значительную инерционность фотоприемника по отношению к периоду оптических колебаний. И процедура фотодетектирования инерционным фотоприемником описывается безинерционным квадратичным детектированием с последующим времененным интегрированием полученного фототока [58].

Учитывая специфику рассматриваемого прибора в форме матричного резонаторного спектрометра оптического диапазона, спектральное разложение в котором выполняется с помощью набора резонаторов, процесс анализа энергетического спектра оптического сигнала в одном канале можно представить функциональной схемой [52, 46] изображенной на рисунке 9.



1 – резонатор, 2 – квадратичный детектор, 3 – интегратор, $e(\omega)$ – сигнал на входе спектрометра, $G_k(\omega)$ – энергетический спектр оптического сигнала на выходе k – го канала спектрометра [46].

Рисунок 9 – Функциональная схема вычисления энергетического спектра оптического сигнала

Учитывая, что комплексный спектр пропорционален напряженности электрической компоненты оптического излучения, математическая форма последовательности операций, представленных на рисунке 9, имеет вид:

$$\begin{aligned}
G_k(\omega) &= \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} i_k(t) dt = P_k(\omega_k) \cdot \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} |S_{ak}(\omega, t)|^2 dt = \\
&= P_k(\omega_k) \cdot \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} S_{ak}(\omega, t) \cdot S_{ak}^*(\omega, t) dt,
\end{aligned} \tag{34}$$

где $P_k(\omega_k)$ – коэффициент, учитывающий спектральную чувствительность фотоприемника для k -го канала; T_R – время интегрирования; $t_0 = -\frac{T_R}{2}$ [46].

Интегрирование по времени в выражении (29) дает:

$$\int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} e^{i(\omega' - \omega'')t} dt = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{T_R}{2}(\omega' - \omega'')\right)}{(\omega' - \omega'')}. \tag{35}$$

С учетом соотношения (35) выражение (34) примет вид

$$\begin{aligned}
G_k(\omega) &= (\Delta\omega_k) \cdot P_k(\omega_k) \cdot \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} K_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot B_{kk}(\omega') \cdot K_{kk}^*(\omega_k, \omega'') \cdot \\
&\quad \cdot B_{kk}^*(\omega'') \cdot S_0(\omega') \cdot S_0^*(\omega'') \cdot \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{T_R}{2}(\omega' - \omega'')\right)}{(\omega' - \omega'')} d\omega' d\omega''.
\end{aligned} \tag{36}$$

В работе [59] показано, что соотношение (36) приводится к выражению:

$$\begin{aligned}
G_k(\omega) &= (\Delta\omega_k)^2 \cdot P_k(\omega_k) \cdot \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} |K_{kk}(\omega_k, \omega')|^2 \cdot |B_{kk}(\omega')|^2 \cdot |S_0(\omega')|^2 d\omega' = \\
&= \int_{-\Delta\omega_k}^{\Delta\omega_k} G_{kk}(\omega_k, \omega') \cdot G(\omega') d\omega',
\end{aligned} \tag{37}$$

где $G(\omega')$ – энергетический спектр анализируемого колебания, (математический спектр), $G(\omega') = |S(\omega')|^2$; $G_{kk}(\omega_k, \omega')$ – «парциальная» энергетическая аппаратная функция k -го канала матричного спектрального прибора оптического диапазона [49, 52].

Полученная выше оценка энергетического спектра оптического излучения, как известно [60], является состоятельной и асимптотически несмещенной.

Соотношение (37), выражающее оценку энергетического спектра оптического излучения получено при условии применения идеального интегратора [46]. Наряду с идеальным интегратором представляется целесообразным рассмотреть действие интегрирующей RC – цепочки. В этом случае соотношение (28), представляющее собой квазигармоническое колебание, следует представить в виде:

$${}^k x(t) = A(t) \cdot \cos(\omega_k t + \varphi(t)), \quad (38)$$

где $A(t)$ – медленно меняющаяся амплитуда; $\varphi(t)$ – медленно меняющаяся фаза.

Колебание на выходе интегрирующей цепочки даётся выражением:

$${}^k x_1(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |{}^k x(\tau)|^2 \cdot h(t - \tau) d\tau, \quad (39)$$

где $h(t - \tau) = \frac{1}{RC} \exp\left(-\frac{\tau}{RC}\right)$ – импульсная реакция RC – цепочки.

Ядро свёртки (39) может быть представлена в виде [61]:

$$h(t - \tau) = h(t) - \frac{\tau \cdot h'(t)}{1!} + \dots + \frac{(-1)^n \tau^n h^n(t)}{n!}. \quad (40)$$

Импульсная реакция RC – цепочки может быть представлена в виде разложения:

$$h(t - \tau) = \frac{1}{RC} \left(1 - \frac{\tau}{RC} + \dots \right). \quad (41)$$

Учёт первого члена разложения (41) возвращает к соотношению (37), а применение разложения (40) позволяет определить колебание на выходе RC – цепочки.

Таким образом, разработанная физико-математическая модель фотодетектирования в составе матричного спектрального прибора позволяет

формализовать процесс регистрации спектрального сигнала и получить оценку энергетического спектра оптического излучения. Модель охватывает ключевые этапы преобразования: селективное пропускание резонатором, квадратичное преобразование поля в мощность, временное интегрирование фототока и учёт спектральной чувствительности канала.

Полученные выражения и функциональные схемы не только обеспечивают теоретическое понимание работы прибора, но и служат основой для его физической реализации. Переход от модели к физическому устройству требует решения ряда конструктивных задач: размещения резонаторных элементов и фотоприёмных каналов на печатной плате, обеспечения согласованности оптической и электронной частей, а также минимизации паразитных эффектов, способных искажить спектральную картину.

В следующем разделе рассматриваются практические аспекты реализации матричного спектрального анализатора, включая топологию печатной платы, компоновку узлов регистрации, а также визуальные материалы, иллюстрирующие аппаратную часть прибора. Это позволяет обосновать переход от математического описания к физическому прототипу, обеспечивающему регистрацию энергетического спектра в реальных условиях.

2.4 Архитектура электронного блока и физическая реализация матричного спектрального прибора

Для матричного спектрального анализатора была разработана структурная схема, основанная на принципе последовательной обработки сигналов от фотоприёмников. В отличие от классических решений, использующих единый фотоприёмник, в данном макете применяется набор индивидуальных фотодиодов, что напрямую влияет на архитектуру схемы и принцип коммутации элементов считывания с остальной частью прибора. В связи с этим особое значение приобретает выбор конкретных фотодетекторов, их спектральные характеристики и диапазоны чувствительности.

2.4.1 Обоснование выбора фотодетектора для регистрации спектроскопической информации в матричном спектральном приборе

При проектировании матричного спектрального прибора ключевым этапом является выбор фотоприёмного элемента, определяющего диапазон регистрируемых длин волн, уровень шумов и общую селективность системы. Спектральная чувствительность фотодетектора напрямую влияет на возможность выделения информативных признаков термодинамической активности и на устойчивость прибора к внешним оптическим помехам. В связи с этим необходимо провести анализ характеристик доступных фотоприёмных устройств и сопоставить их рабочие диапазоны с задачами регистрации ультрафиолетового излучения, характерного для процессов горения.

Для оценки спектральной чувствительности различных кремниевых фотодетекторов, выпускаемых компанией Hamamatsu, целесообразно привести сравнительный график их отклика, что представлено на рисунке 10 [62]. Это позволяет визуально сопоставить диапазоны чувствительности, пиковые значения и области применения каждого типа сенсора. На рисунке представлены спектральные характеристики нескольких моделей, включая S1223, S1226, S1336 и другие, используемые в задачах регистрации УФ, видимого и ближнего ИК излучения.

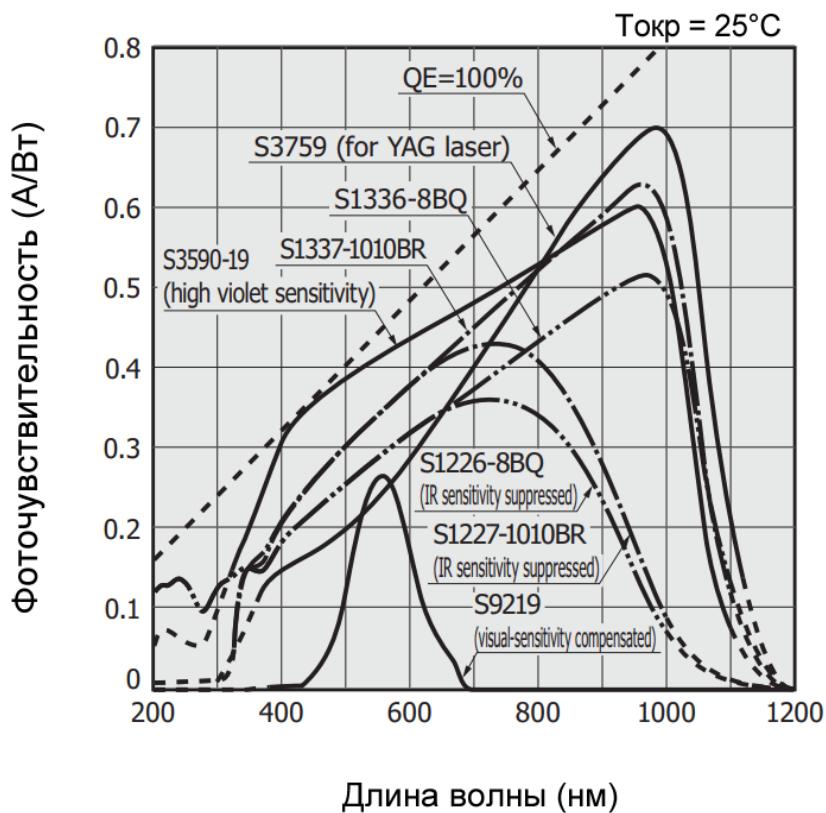


Рисунок 10 – Сравнительный спектральный отклик кремниевых фотодиодов Hamamatsu различных серий

На основе анализа спектральных характеристик был выбран фотодиод Hamamatsu S1227 как наиболее подходящий для регистрации излучения пламени в области около 230 нм. Для регистрации используется фотодиод с узкополосным интерференционным фильтром, пропускающим излучение вблизи 230 нм. В данной работе применён фотодиод Hamamatsu S1227, обладающий высокой чувствительностью в ультрафиолетовом диапазоне и низким уровнем собственного шумового сигнала. Его спектральная характеристика охватывает область от 190 до 1100 нм, с выраженным пиком чувствительности в ближнем УФ, что делает его оптимальным выбором для задач селективного обнаружения пламени. Благодаря малому темновому току (порядка 1 нА при обратном напряжении 10 В) и высокой линейности, S1227 обеспечивает стабильную регистрацию даже слабых фотонных потоков, характерных для ранней стадии горения.

Для наглядности спектральная характеристика фотодиода Hamamatsu S1227 приведена на рисунке 11, демонстрируя его чувствительность в области 230–400 нм, критически важной для регистрации ультрафиолетового излучения пламени [63].

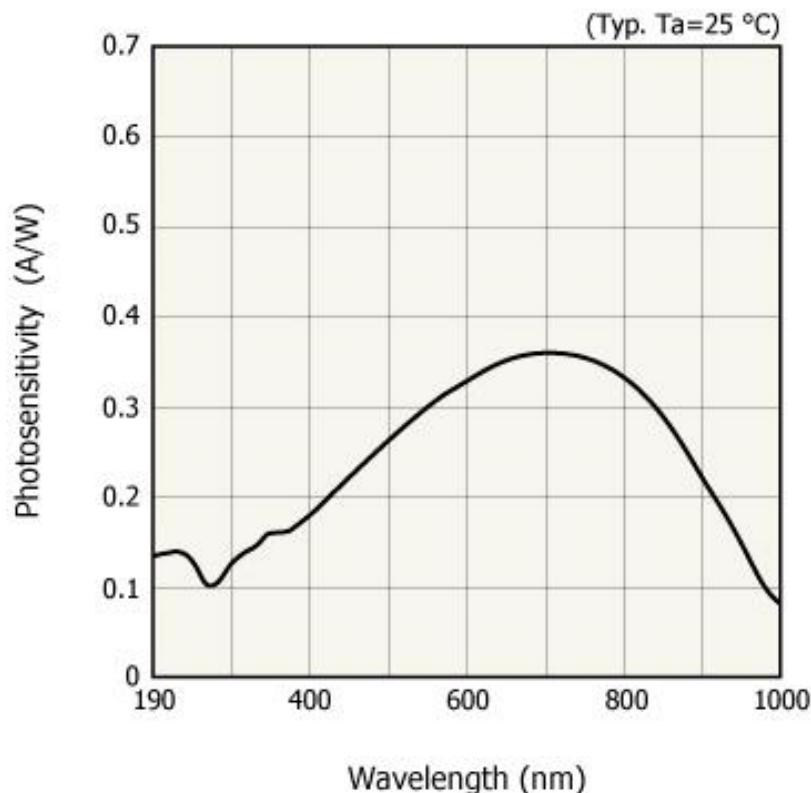


Рисунок 11 – Спектральная чувствительность фотодиода Hamamatsu S1227

Максимальная чувствительность наблюдается в области 230–400 нм, что соответствует ультрафиолетовому излучению, характерному для ранней стадии горения.

Основные технические характеристики фотодиода Hamamatsu S1227 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические параметры фотодиода Hamamatsu S1227

Параметр	Значение
Спектральный диапазон	190–1100 нм (покрывает УФ, видимый и ближний ИК)
Пиковая чувствительность	~230–400 нм (максимум в ближнем УФ)
Темновой ток (при 10 В)	~1 нА (низкий уровень шумов)
Активная площадь	2.4 * 2.4 мм (подходит для компактных оптических систем)
Тип корпуса	TO-5 (металлический, экранированный)
Время отклика	<10 нс (подходит для регистрации быстрых процессов)
Линейность отклика	Высокая
Рабочее напряжение	0–10 В

Таким образом, выбор указанного участка ультрафиолетового диапазона, а также применение фотодиода Hamamatsu S1227 с узкополосным фильтром на длину волны около 230 нм, обоснован как с точки зрения спектральной селективности, так и с учётом технических характеристик фотодиода. Проведённый сравнительный анализ фотодетекторов подтвердил целесообразность использования именно этой модели для регистрации фотонного излучения, характерного для ранней стадии горения. Такой подход позволяет исключить влияние фонового освещения и повысить селективность прибора. В отличие от инфракрасных датчиков, чувствительных к температуре, УФ-детекторы фиксируют сам факт химической реакции горения, независимо от её тепловой мощности [25, 29].

В совокупности с частотным анализом динамики среды, данный метод обеспечивает высокую чувствительность, устойчивость к внешним оптическим помехам и возможность интеграции в интеллектуальные сенсорные системы. В совокупности с частотным анализом динамики среды, данный метод обеспечивает высокую чувствительность, устойчивость к внешним оптическим помехам и возможность интеграции в интеллектуальные сенсорные системы.

2.4.2 Структурная, принципиальная схема и реализация электронного блока матричного спектрального прибора

Для реализации функций регистрации и обработки спектроскопической информации в составе матричного спектрального прибора разработан специализированный электронный блок, структурная схема которого представлена на рисунке 12. Его архитектура основана на модульном принципе, что обеспечивает разделение задач приёма, усиления, преобразования и передачи данных. Структурная схема блока отражает взаимодействие основных функциональных узлов и демонстрирует последовательность преобразований сигнала от фотоприёмников до интерфейса связи с персональным компьютером.

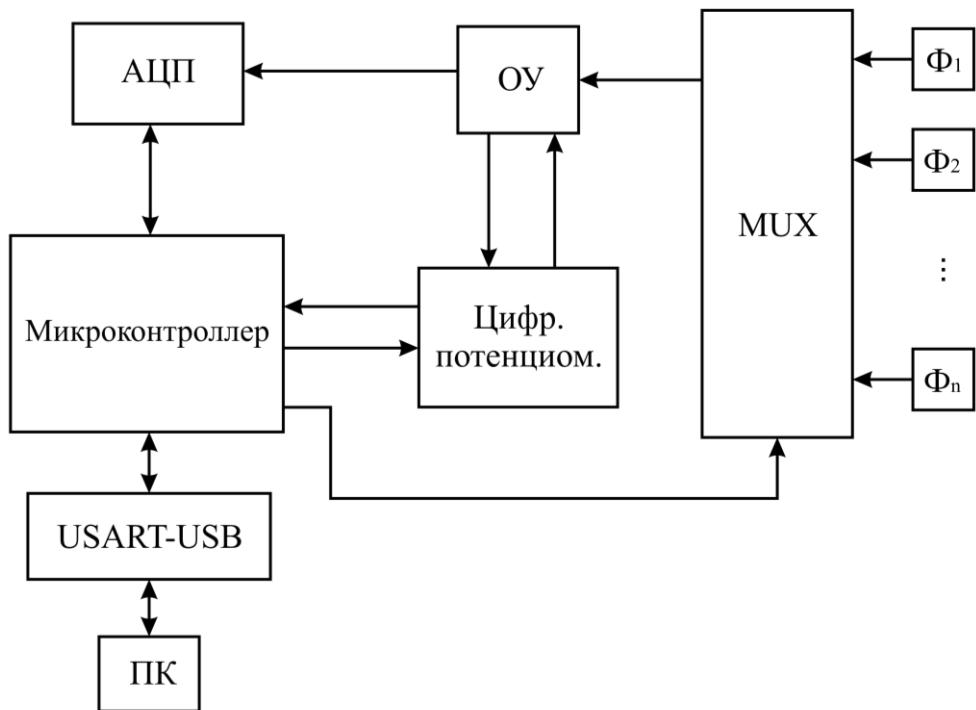


Рисунок 12 – Структурная схема электронного блока матричного спектрального прибора

Электронный блок выполняет следующие функции: приём оптического сигнала с помощью набора фотодиодов, передачу полученных сигналов посредством коммутации каналов и следующего тракта посредством

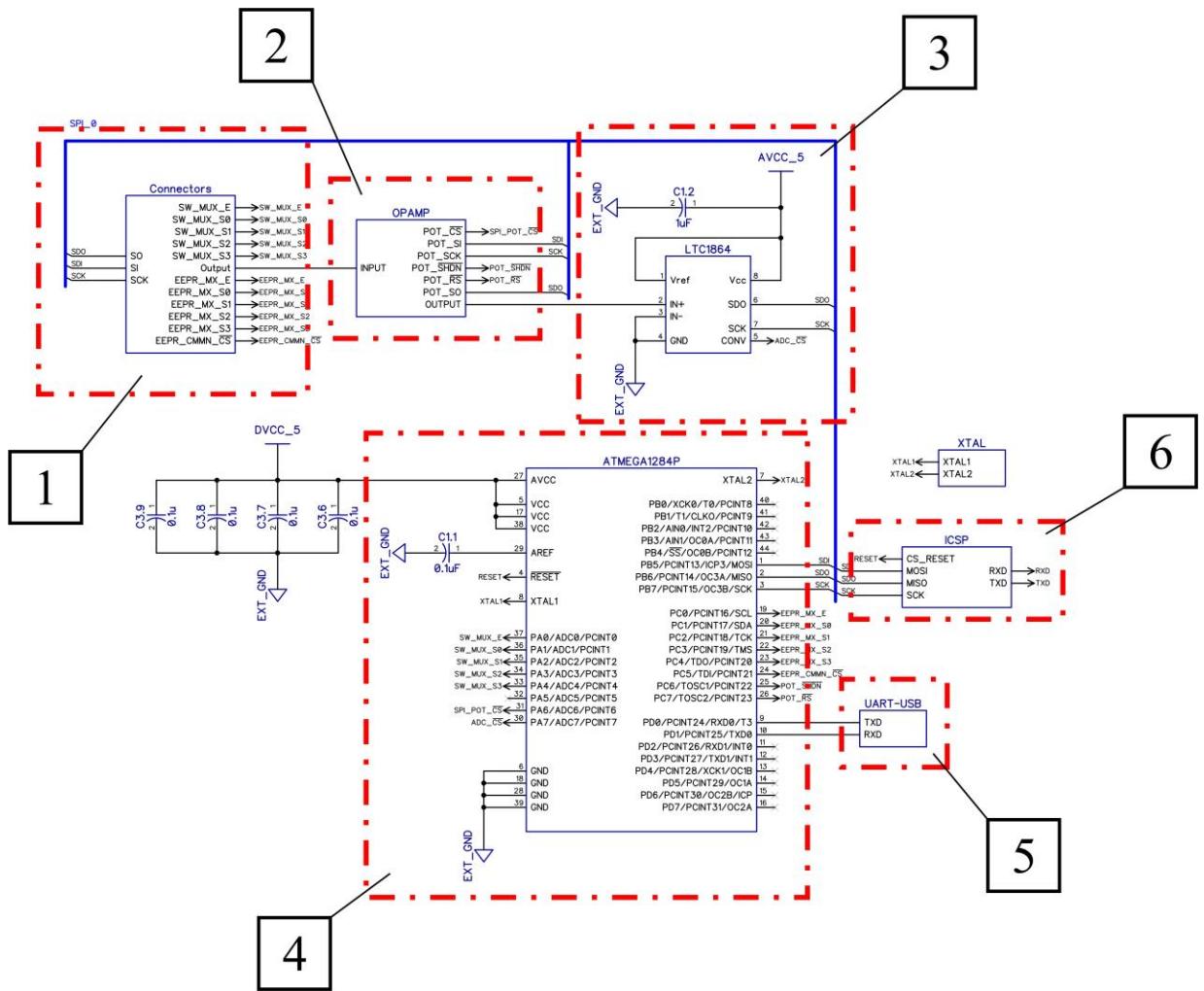
мультиплексора, усиление сигналов посредством операционного усилителя, преобразование аналогового сигнала в цифровую форму с помощью АЦП, обработку данных микроконтроллером и передачу результатов по последовательному интерфейсу. Для подключения к персональному компьютеру используется конвертер UART–USB, обеспечивающий совместимость с современными средствами визуализации и анализа.

Состав компонентов:

- ATmega1284P – микроконтроллер, 16 МГц, 128 КБ Flash, 16 КБ SRAM, SPI/UART/I2C, -40 ... + 85 °C;
- FT232RL – USB-UART интерфейс, до 3 Мбит/с, совместим с Windows/Linux;
- MCP6024 – операционный усилитель, 4 канала, rail-to-rail, шум 8,7 нВ/ Гц, питание 5 В;
- MCP3208 – АЦП, 12 бит, 8 каналов, SPI, $t_{conv} \approx 4$ мкс;
- ADG412 – мультиплексор, $R_{ON} < 10 \Omega$ ток утечки < 1 нА;
- Hamamatsu S1337-66BQ – фотодиод, 5,8x5,8 мм, спектр 200-1100 нм, темновой ток < 1 нА.

Выбор компонентов обусловлен необходимостью параллельной регистрации спектральных признаков с высокой линейностью, низким уровнем шумов и стабильной работой в лабораторных условиях. Микроконтроллер обеспечивает достаточную вычислительную мощность и совместимость с периферией. АЦП MCP3208 позволяет оцифровывать сигналы от восьми фотодиодов, а мультиплексоры ADG412 – управлять коммутацией каналов без потерь. Все компоненты соответствуют требованиям ГОСТ Р 53325-2012 и ГОСТ Р 51522-99.

На рисунке 13 представлена принципиальная схема электронного блока, составленная на основе структурной модели. В схеме выделены ключевые функциональные блоки:



1 – блок коммутации фотоприемников, 2 – блок усиления полученных сигналов, 3 – блок преобразования усиленного аналогового сигнала в цифровой, 4 – блок управления и обработки полученных сигналов, 5 – UART-USB конвертер, 6 – ICSP разъем.

Рисунок 13 – Принципиальная схема электронного блока матричного спектрального прибора с выделением функциональных блоков

Особое внимание при проектировании было уделено блоку коммутации фотоприёмников, включающему набор коннекторов и мультиплексор, обеспечивающий последовательное подключение каждого фотодиода к усилителю. Такое решение позволяет существенно сократить количество аналоговых трактов, сохраняя при этом точность измерений.

На основе принципиальной схемы была разработана топология двухслойной печатной платы в среде DipTrace. Верхний и нижний слои,

содержащий аналоговые цепи, усилители и элементы фильтрации, размещён с учётом требований к минимизации перекрёстных наводок. Размещение элементов и трассировка сигнальных цепей выполнены с учётом электромагнитной совместимости и термической стабильности устройства. Внешний вид печатной платы с установленными компонентами представлен на рисунке 14.

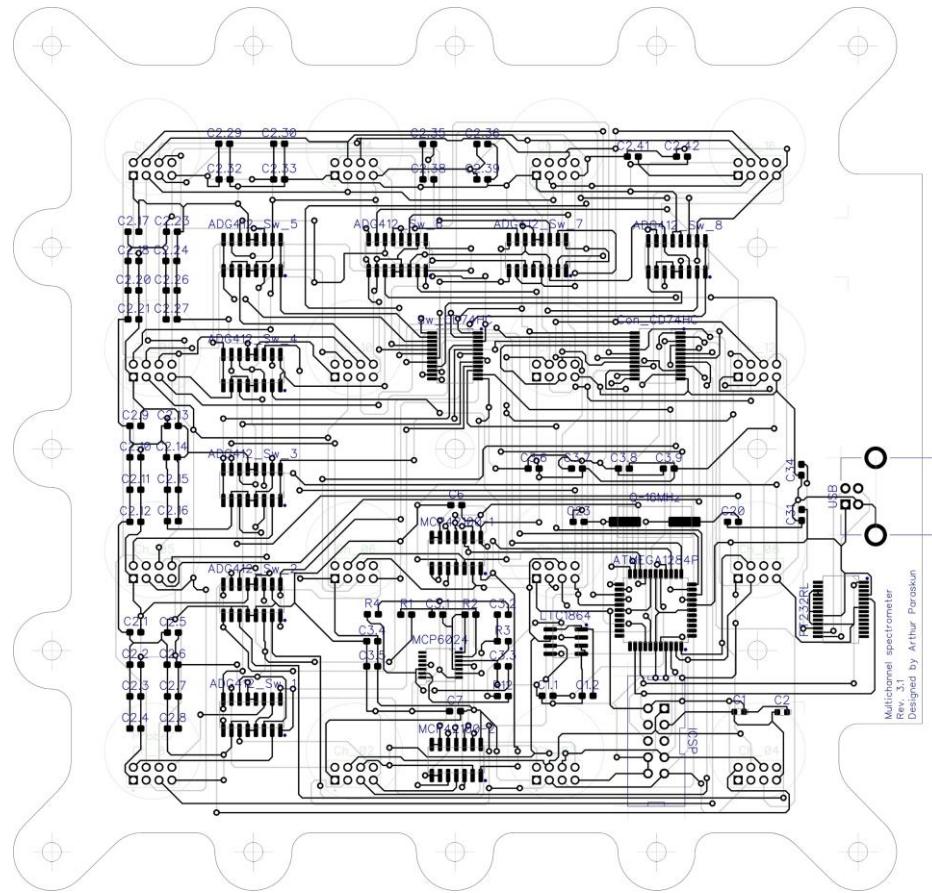
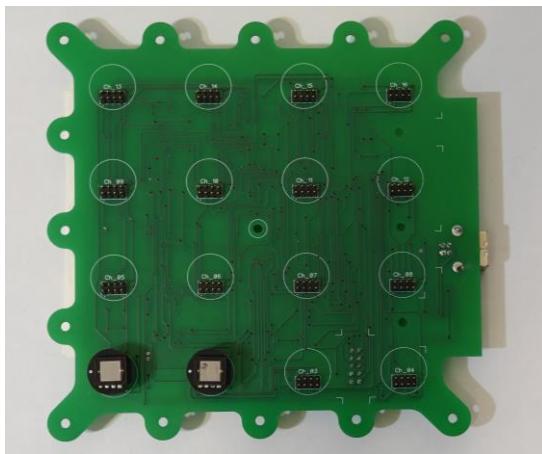
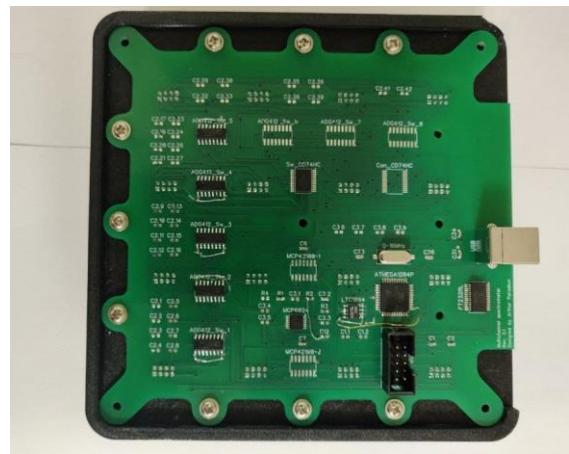


Рисунок 14 – Топологии печатной платы электронного блока матричного спектрального прибора

На основе подготовленных топологий была изготовлена печатная плата, после чего выполнен монтаж всех компонентов. Внешний вид печатной платы с установленными компонентами представлен на рисунке 15.



а)



б)

Рисунок 15 – Внешний вид печатной платы матричного спектрального анализатора с установленными компонентами: а) вид сверху; б) вид снизу

Дополнительно на рисунке 16 показан установленный фотоприёмник с коннектором, что позволяет оценить точность посадки и надёжность электрического соединения.

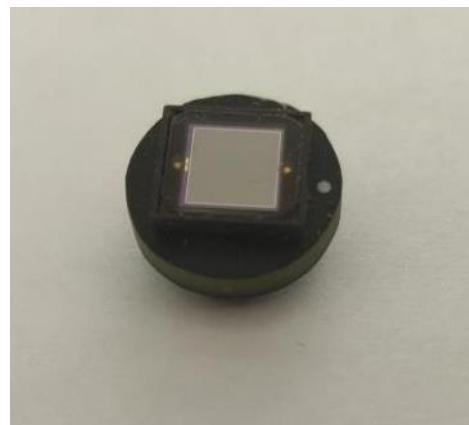


Рисунок 16 – Фотоприёмник, установленный в печатную плату с коннектором

Таким образом, электронный блок макета матричного спектрального прибора представляет собой функционально завершённую систему, обеспечивающую надёжную регистрацию, обработку и передачу спектральных данных. Архитектура схемы, топология печатной платы и компоновка компонентов соответствуют требованиям к многоканальным

измерительным приборам, что подтверждает готовность устройства к последующим этапам тестирования и интеграции с оптической частью анализатора.

2.4.3 Программная реализация управляющего микрокода для контроллера

В рамках разработки макета матричного спектрального прибора была реализована микропрограмма для микроконтроллера Atmega1284, обеспечивающая сбор, обработку и передачу данных от фотоприёмников. Основной задачей управляющего кода является взаимодействие с внешним аналого-цифровым преобразователем MCP3208 по интерфейсу SPI, вычисление оптической мощности на основе измеренного напряжения, а также передача результатов в управляющее программное обеспечение через UART.

Выбор микроконтроллера обусловлен его архитектурными преимуществами: наличие аппаратных интерфейсов SPI и UART, достаточный объём памяти, стабильная работа при низком энергопотреблении. Программа реализована на языке С с использованием компилятора avr-gcc, что обеспечивает переносимость и гибкость при дальнейшем расширении функционала.

2.4.4 Программное средство визуализации полученных спектроскопических данных

Визуализация спектральной информации в реальном времени является ключевым этапом в процессе анализа оптических сигналов. Для обеспечения наглядного представления результатов измерений, а также для управления режимами работы спектрального анализатора, было разработано программное средство, реализованное в среде LabVIEW. Данная платформа предоставляет широкие возможности для построения графических интерфейсов, обработки потоковых данных и интеграции с внешними устройствами через стандартные протоколы обмена.

Программное средство выполняет функции приёма данных от микроконтроллера, их интерпретации, расчёта параметров оптического сигнала и отображения результатов в графической форме. Кроме того, оно обеспечивает управление процессом измерения, настройку параметров и ведение журнала полученных спектров.

На рисунке 17 представлена блок-схема реализации программного средства в среде LabVIEW. Основу архитектуры составляет цикл опроса, реализованный через конструкцию While Loop, внутри которого осуществляется последовательное считывание данных с микроконтроллера по интерфейсу VISA Serial. Полученные значения напряжения масштабируются, после чего производится расчёт оптической мощности по заданной формуле. Результаты передаются на графический индикатор в виде временного массива, отображаемого на Waveform Graph. Дополнительные элементы, такие как Case Structure, обеспечивают условную обработку данных, а числовые индикаторы позволяют отслеживать текущие значения параметров в удобной форме.

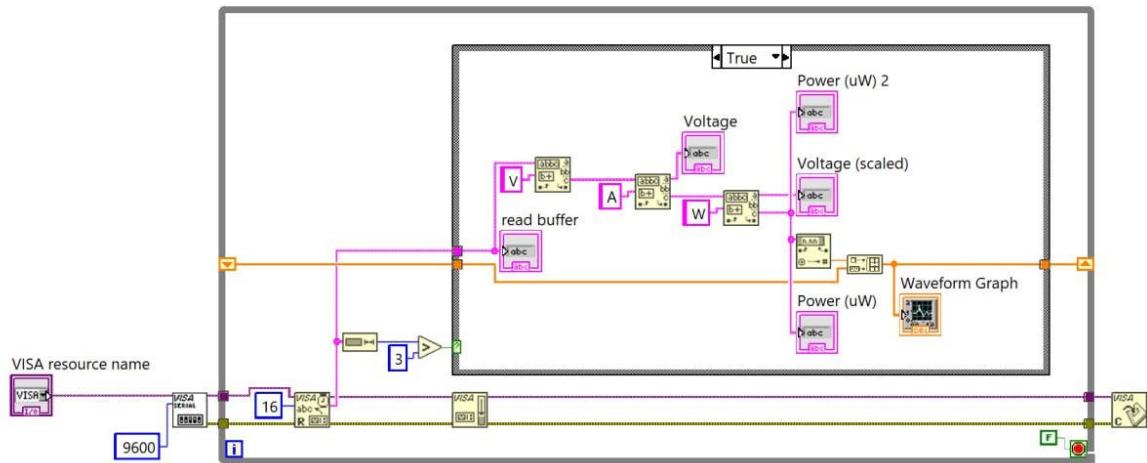


Рисунок 17 – Схема реализации программного средства визуализации спектральных данных в среде LabVIEW

Программное средство протестировано на стабильность работы при длительном сборе данных и показало устойчивость к ошибкам связи. Время

отклика интерфейса составляет менее 100 мс, что позволяет использовать его в задачах, требующих оперативного контроля спектральных характеристик.

Разработанное программное средство визуализации спектральных данных представляет собой функционально завершённый компонент системы спектрального анализа, обеспечивающий надёжную связь с микроконтроллером, обработку измеренной информации и её графическое представление. Использование среды LabVIEW позволило реализовать гибкий и расширяемый интерфейс, пригодный для научных и прикладных задач. Программа может быть дополнена модулями автоматической калибровки, многоканального отображения и интеграции с базами данных, что открывает перспективы её дальнейшего развития.

2.5 Выводы по разделу

В рамках данного раздела была разработана комплексная методика селективного спектроскопического обнаружения пламени, основанная на регистрации характерных спектральных признаков термодинамической активности. Проведён физико-спектральный анализ процессов горения, выявлены устойчивые диапазоны излучения, ассоциированные с компонентами пламени, что позволило сформировать основу для построения прибора диагностики, устойчивого к фоновым оптическим шумам.

Физико-техническое обоснование задачи спектральной диагностики включало обзор существующих методов анализа сигналов горения, таких как линейные спектральные оценки, вейвлет-преобразования и методы частотной фильтрации. Особое внимание было удалено математической формализации спектрального анализа, включая кепстральные преобразования, бинарную классификацию признаков и построение алгоритмов выделения термодинамической активности. Это позволило выделить информативные параметры, обладающие высокой чувствительностью и селективностью.

Разработана математическая архитектура алгоритма спектральной диагностики, реализованная в среде MATLAB. Проведено моделирование процесса горения, подтверждающее корректность алгоритма и его применимость к реальным условиям. Алгоритм демонстрирует устойчивость к шумам, способность к адаптации и возможность интеграции в аппаратные системы мониторинга.

На основе теоретических моделей была реализована физическая архитектура матричного спектрального анализатора оптического излучения. Оптический канал построен на базе набора узкополосных интерференционных фильтров и индивидуальных фотоприёмников, обеспечивающих пространственное разделение спектра и селективную регистрацию излучения в заданных диапазонах длин волн. Особое внимание удалено формированию энергетического спектра излучения, отражающего распределение мощности по частотным компонентам, что позволяет

проводить количественную оценку интенсивности термодинамической активности. Разработана энергетическая модель фототока на основе теоремы Пойнтига, связывающая плотность потока электромагнитной энергии с регистрируемым электрическим сигналом. Дополнительно реализована модель временного усреднения фототока, позволяющая сглаживать флуктуации и повышать точность интерпретации измеренных сигналов. В совокупности эти решения обеспечивают физически обоснованную и математически корректную реконструкцию спектральной картины излучения, возникающего при горении.

Электронная часть макета реализована на базе микроконтроллера и внешнего аналого-цифрового преобразователя, обеспечивающих надёжное считывание аналоговых сигналов, их цифровую обработку и передачу в управляющее программное обеспечение. Микрокод, написанный на языке С, демонстрирует устойчивую работу, корректную обработку данных и возможность масштабирования на многоканальные конфигурации.

Программное средство визуализации, разработанное в среде LabVIEW, обеспечивает отображение спектральных данных в реальном времени, управление режимами измерения и ведение журнала результатов. Графический интерфейс адаптирован под задачи пользователя и позволяет оперативно анализировать изменения спектра, а также сохранять данные для последующего анализа.

Таким образом, следующий раздел представляет собой завершённый цикл – от физико-математического обоснования метода до реализации макета матричного спектрального прибора. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода, его устойчивость к внешним помехам и потенциал для применения в системах раннего обнаружения горения, мониторинга и спектральной диагностики в реальных условиях. Разработанный прибор может быть использован как основа для построения полнофункционального спектрометра, пригодного для научных, образовательных и прикладных задач.

3 Лазерно-оптический прибор как средство диагностики газовой среды замкнутого помещения

3.1 Обоснование методики в рамках обнаружения теплового конвекционного потока и дыма в воздушной среде

Наиболее распространённые приборы пожарной сигнализации – дымовые и тепловые извещатели – обладают рядом фундаментальных ограничений. Во-первых, они срабатывают с временной задержкой, поскольку требуют накопления информации о концентрации продуктов горения в исследуемом пространстве или повышения температуры до порогового уровня. Во-вторых, они подвержены ложным срабатываниям, особенно в условиях запылённости, наличия технологических аэрозолей или нестабильного микроклимата [64, 65]. В-третьих, они не способны регистрировать бездымное тление, которое может длиться десятки минут и оставаться незамеченным. Всё это делает необходимым переход к более чувствительным и селективным методикам, способным фиксировать физические признаки пожара на ранних стадиях.

Одним из таких признаков является тепловой конвекционный поток (ТКП), возникающий в результате локального выделения тепла. Даже при отсутствии открытого пламени, термодинамические процессы формируют устойчивые восходящие потоки, изменяющие параметры воздушной среды. Эти изменения затрагивают температурное поле, плотность и, как следствие, показатель преломления воздуха. Лазерное излучение, проходящее через такую среду, претерпевает фазовые и амплитудные модуляции, которые могут быть зарегистрированы с высокой точностью. Таким образом, лазерно-оптические методы представляют собой перспективное направление в разработке систем раннего обнаружения пожаров, обеспечивающее высокую чувствительность, быстродействие и устойчивость к внешним помехам.

$$n(T) = 1 + \frac{p}{T} \cdot \left(A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \right), \quad (42)$$

где p – давление, T – температура, λ – длина волны, а A , B , C –

эмпирические коэффициенты, определяемые для сухого воздуха. При изменении температуры на несколько градусов показатель преломления изменяется на величину порядка 10^{-6} , что приводит к фазовой модуляции лазерного пучка.

Как было показано во втором разделе, тепловой конвекционный поток характеризуется не только пространственными градиентами температуры, но и спектральной структурой, проявляющейся в характерном диапазоне частот. Согласно экспериментальным данным [66, 67], спектр флюктуаций $n(x,t)$ вблизи очага тления содержит компоненты в диапазоне от 2 до 20 Гц, обусловленные низкочастотными турбулентными пульсациями и стохастическими колебаниями плотности воздуха. Это означает, что лазерное излучение, проходящее через область ТКП, претерпевает не только статические искажения, но и динамические модуляции, которые могут быть зарегистрированы в виде временных флюктуаций интенсивности [68]. Для анализа применяются методы определения взаимно-корреляционной функции дискретного сигнала (ВКФДС), суммарно-разностный подход, вейвлет-преобразование, кепстральное преобразование, а также оценка сцинтилляционного индекса [67, 69], позволяющие выделить характерные частотные компоненты, связанные именно с конвекцией, а не с шумами или внешними вибрациями.

Распространение лазерного излучения в неоднородной среде описывается параксиальным волновым уравнением [67]:

$$2ik \frac{\partial U}{\partial z} + \Delta_{\perp} U + 2k^2 \delta n(x,t) U = 0, \quad (43)$$

где $U(x,z,t)$ – комплексная амплитуда поля, $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число, Δ_{\perp} – поперечный лапласиан, $\delta n(x,t)$ – флюктуации показателя преломления. Эти флюктуации приводят к изменению распределения интенсивности $I(x,t) = |U(x,t)|^2$, которое может быть зарегистрировано фотоприёмным устройством.

Регистрация изменений интенсивности профиля лазерного пучка осуществляется с помощью ПЗС-линейки, обеспечивающей пространственное дискретное сканирование. Полученные данные формируют двумерный массив $X(i,t)$, пригодный для спектрального и корреляционного анализа [70]. Это позволяет фиксировать как пространственные искажения профиля пучка, так и временные флуктуации, связанные с динамикой ТКП.

Дополнительным механизмом взаимодействия является рассеяние и поглощение лазерного излучения аэрозольными частицами дыма. Для частиц диаметром d и комплексным показателем преломления $m = n_r + ik$ рассеяние описывается теорией Ми [71, 72]. Эффективный коэффициент экстинкции среды определяется как:

$$\alpha_{\text{ext}}(\lambda) = \int_0^{\infty} Q_{\text{ext}}(x, m) \cdot \pi \frac{d^2}{4} \cdot n_a(d) dd, \quad (44)$$

где $x = \pi d / \lambda$ – размерный параметр, $n_a(d)$ – распределение частиц по размерам, Q_{ext} – коэффициент экстинкции, включающий рассеяние и поглощение. При длине волны $\lambda \sim 0.5 - 1.0 \mu m$ и диаметре частиц m наблюдается выраженное ослабление лазерного излучения:

$$d \sim 0.1 - 1.0 \mu m, \quad (45)$$

что позволяет использовать это ослабление как признак наличия продуктов горения.

Одним из ключевых факторов, влияющих на распространение лазерного излучения в атмосфере, является его энергетическое ослабление вследствие взаимодействия с молекулами газов и взвешенными аэрозольными частицами. Данный процесс количественно описывается экспоненциальной зависимостью, известной как закон Бугера:

$$I(v) = I_0(v) \exp[-k(v)L], \quad (46)$$

где $I_0(v)$ и $I(v)$ – интенсивности излучения на частоте v до и после прохождения расстояния L , а $k(v)$ – коэффициент общего ослабления, включающий в себя поглощение и рассеяние. Этот коэффициент, в свою

очередь, определяется как сумма соответствующих компонент:

$$k = \alpha_m + \alpha_A + \beta_m + \beta_A, \quad (47)$$

где α_m , α_A – коэффициенты молекулярного и аэрозольного поглощения, β_m , β_A – коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния соответственно [66].

В диапазонах видимого и инфракрасного излучения ослабление энергии волны объясняется тем, что электромагнитное поле возбуждает в микрокаплях среды токи смещения. Эти токи, в свою очередь, порождают вторичное излучение, которое рассеивается в различных направлениях, включая обратное и боковое. В результате наблюдается уменьшение интенсивности в направлении распространения основного пучка. Особенно выраженные потери в видимом диапазоне связаны с эффектом рассеяния, который доминирует над поглощением при наличии мелкодисперсных аэрозолей.

Таким образом, ослабление интенсивности вследствие рассеяния на аэрозолях и флюктуации, вызванные тепловой конвекцией, являются независимыми физическими признаками, что позволяет реализовать двухканальный прибор для диагностики состояния газовой среды. Представленное физико-спектральное обоснование подтверждает возможность реализации лазерно-оптического прибора раннего обнаружения пожаров, способного регистрировать как появление дымовых взвесей, так и ранние термодинамические возмущения.

3.1.1 Спектральные характеристики теплового конвекционного потока и аэрозольных возмущений

Тепловой конвекционный поток (ТКП), возникающий в результате локального выделения тепла при тлении или начальном горении, характеризуется не только пространственными градиентами температуры, но и выраженной спектральной структурой. Согласно экспериментальным данным [66, 67], флюктуации показателя преломления $n(x, t)$, вызванные ТКП, содержат компоненты в диапазоне от 2 до 20 Гц [73]. Эти частоты

соответствуют типичным масштабам турбулентных пульсаций в воздухе при естественной конвекции.

Спектр флюктуаций интенсивности профиля лазерного пучка, проходящего через область ТКП, имеет характерную форму: доминирующие низкочастотные компоненты (до 5 Гц), связанные с крупномасштабными вихревыми структурами, и более высокочастотные составляющие (10–15 Гц), обусловленные мелкомасштабной турбулентностью. Такая структура спектра позволяет использовать методы спектрального анализа для выделения признаков ТКП на фоне фоновых шумов и вибраций. Типичная форма спектра может быть аппроксимирована степенной зависимостью:

$$S(f) \sim f^{-\beta}, \quad \beta \in [1.5; 2.5], \quad (48)$$

что отражает энергетическое распределение по частотам в турбулентной среде.

Для аэрозольных возмущений, возникающих при появлении дыма, спектральная картина отличается. Поскольку дымовые взвеси формируется относительно медленно и обладает высокой инерционностью, их влияние на лазерный пучок проявляется в виде устойчивого ослабления интенсивности без выраженной частотной модуляции. Это позволяет дифференцировать ТКП и дым по их спектральным признакам: ТКП – динамический, колебательный процесс; дым – квазистационарное поглощающее образование. В спектре интенсивности при наличии дыма наблюдается либо постоянная составляющая, либо экспоненциальный спад:

$$S(f) \approx \text{const}, \quad \text{или} \quad S(f) \sim e^{-\gamma f}, \quad \gamma > 0 \quad (49)$$

Для количественной оценки степени флюктуаций используется индекс сцинтилляции:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}, \quad (50)$$

где $\langle \cdot \rangle$ – оператор усреднения. Повышение значения σ_I^2 в диапазоне 0.1–10 Гц свидетельствует о наличии тепловых конвекционных процессов, тогда как его стабилизация указывает на аэрозольное поглощение.

Таким образом, проведённые спектральные характеристики показали принципиальную различимость тепловых конвекционных потоков и аэрозольных образований по их частотно-энергетическим характеристикам. Для ТКП характерна динамическая, колебательная структура спектра с выраженным низко- и среднечастотными компонентами, тогда как дым проявляется как квазистационарное поглощающее образование с экспоненциальным спадом интенсивности. Индекс сцинтиляции формализует количественную оценку этих различий, позволяя выделять признаки термодинамической активности на фоне шумов и вибраций. Полученные результаты создают основу для перехода от моделирования к практической реализации. Следующим этапом является разработка лазерно-оптического прибора для выявления теплового конвекционного потока и дыма в газовой среде в замкнутом помещении.

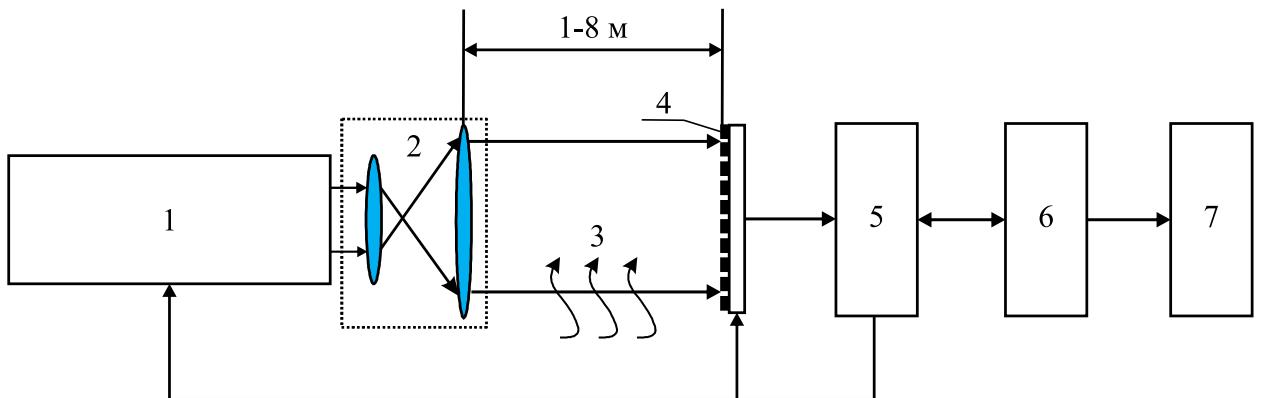
3.2 Архитектура и физико-математическая реализация лазерно-оптического прибора, реализующего методику выявления теплового конвекционного потока и дыма в газовой среде

3.2.1 Архитектура и принцип работы лазерно-оптического прибора

В связи с заявленной целью в рамках предыдущего раздела возникает необходимость в разработке специализированного прибора, способного регистрировать пространственные и временные характеристики профиля лазерного пучка с высокой точностью. Такой прибор должен обеспечивать селективное выделение процессов, описанных ранее, и обладать достаточной чувствительностью к изменениям интенсивности и формы профиля лазерного пучка.

Для исследования динамики взаимодействия теплового конвекционного потока предложена структурная схема прибора, принцип работы которого заключается в формировании лазерного пучка со значительным диаметром (несколько сантиметров) и последующей регистрации пространственных характеристик профиля лазерного пучка, таких как распределение профиля интенсивности. Концепция прибора и его техническая реализация защищены

патентом РФ № 2805772 С1 [74]. Структурная схема показана на рисунке 18 [75, 76].



1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – тепловой конвекционный поток; 4 – ПЗС-линейка; 5 – блок регистрации; 6 – ЭВМ со встроенным программным обеспечением обработки профиля пучка; 7 – дисплей

Рисунок 18 – Структурная схема прибора обнаружения теплового конвекционного потока и дыма в газовой среде

Принцип работы прибора следующий. На одной оптической оси расположены и оптически согласованы между собой лазер 1, расширитель пучка 2 и ПЗС-линейка 4. Расстояние между расширителем пучка 2 и ПЗС-линейкой 4 может изменяться. Из расширителя пучка 2 выходит сформированный от лазера 1 оптический пучок диаметром в несколько сантиметров, согласованный с размером ПЗС-линейки 4. С выхода ПЗС-линейки 4 формируются отсчетные значения распределения профиля интенсивности пучка, которые поступают в блок регистрации 5. В блоке регистрации происходит предварительная обработка данных и их перевод в цифровой вид. ЭВМ 6 оснащен программным обеспечением, позволяющим производить математическую обработку зарегистрированных данных и выводить результат этой обработки на дисплей 7. Следует отметить, что для снижения энергопотребления прибора, лазер 1 может работать в импульсном режиме с согласованием временных отсчетов регистрации ПЗС-линейкой 4. За согласование режима работы отвечает блок регистрации 5 [77, 78].

Дополнительно разработанный прибор уже демонстрирует способность к обнаружению дыма, аэрозолей и других оптически активных компонентов в газовой среде. Изменение профиля лазерного пучка в таких условиях связано не только с тепловыми возмущениями, но и с рассеянием, поглощением и преломлением света в присутствии частиц. Это расширяет функциональность прибора и позволяет использовать его в задачах раннего обнаружения пожаров, мониторинга загрязнений и контроля микроклимата.

3.2.2 Модель временного усреднения фототока

При регистрации спектра оптического излучения нужно учесть значительную инерционность фотоприемника по отношению к периоду оптических колебаний. И процедура фотодетектирования инерционным фотоприемником описывается безинерционным квадратичным детектированием с последующим временным интегрированием полученного фототока [46].

Учитывая специфику рассматриваемого прибора контроля процесс анализа энергетического спектра оптического сигнала одним пикселем можно представить функциональной схемой [46] изображенной на рисунке 19.

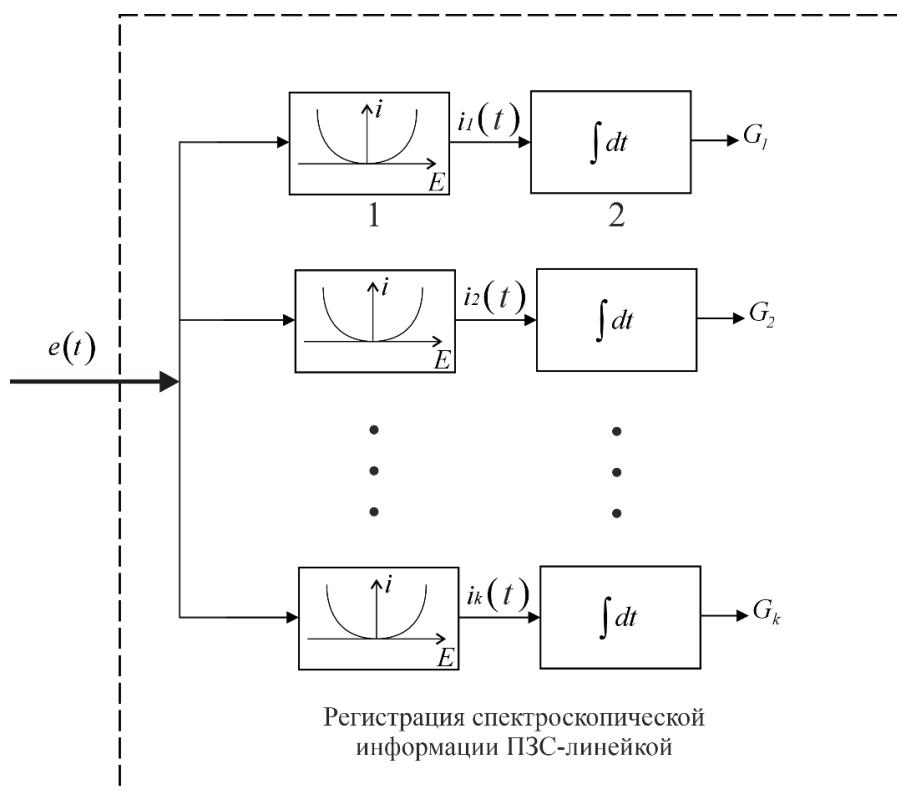


Рисунок 19 – Функциональная схема выражения оценки энергетического спектра оптического сигнала лазерно-оптическим прибором

Учитывая, что комплексный спектр пропорционален напряженности электрической компоненты оптического излучения, математическая форма последовательности операций имеет вид:

$$G_k = \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} i_k(t) dt = P_k \cdot \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} |S_{ak}(t)|^2 dt = P_k \cdot \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} S_{ak}(t) \cdot S_{ak}^*(t) dt, \quad (51)$$

где P_k – коэффициент, учитывающий чувствительность фотоприемника для k -го канала; T_R – время интегрирования; $t_0 = -\frac{T_R}{2}$.

Соотношение (51), выражающее оценку энергетического спектра оптического излучения получено при условии применения идеального интегратора.

3.2.3 Математическая формализация спектральных методов анализа сигналов в условиях динамически изменяющейся среды

Для повышения селективности анализа применяются дополнительные методы цифровой обработки. Вейвлет-преобразование обеспечивает временно-частотную локализацию сигнала, позволяя выявлять кратковременные флюктуации, характерные для ТКП [79]. Кепстральная фильтрация применяется для подавления регулярных шумов, таких как вибрации и электромагнитные наводки, за счёт логарифмического спектрального анализа и устранения гармонических структур. Адаптивные пороговые алгоритмы, основанные на статистических критериях (локальная дисперсия, медианное отклонение, энтропия), позволяют динамически подстраиваться под уровень фонового шума, обеспечивая устойчивость системы к внешним воздействиям и повышая точность выделения сигнатур [80]. Эти методы представляют собой развитие подходов, рассмотренных в предыдущем разделе, где анализ сигналов выполнялся преимущественно во временной области. Теперь акцент смешается на комплексное использование спектральных и статистических инструментов, что позволяет учитывать не только временную динамику, но и пространственную неоднородность среды.

В предыдущем разделе рассматривались методы анализа сигналов, формируемых в условиях изменяющейся воздушной среды, где динамика проявлялась преимущественно во временной структуре регистрируемого сигнала. Используемые подходы – дискретное преобразование Фурье [81], непрерывное вейвлет-преобразование с комплексной функцией Морле [82], кепстральный анализ и пороговая фильтрация – позволяли выявлять спектральные признаки и оценивать энергетические характеристики, опираясь на данные, полученные от одного фотоприёмного устройства или набора фотоприёмных устройств [35].

В настоящем разделе акцент смещается не столько на сам факт изменения среды, сколько на её структурную неоднородность, пространственную динамику и локальные флуктуации, возникающие в результате сложных процессов – таких как тепловая конвекция и образование аэродисперсных компонентов. Особое внимание уделяется дыму, представляющему собой взвесь микрочастиц, способную существенно влиять на оптические свойства среды и вызывать пространственно-временные искажения лазерного пучка [83]. В совокупности с тепловыми конвекционными потоками, такие образования формируют сложную картину взаимодействия излучения с неоднородной средой [84].

Принципиальное отличие заключается и в архитектуре регистрации: вместо одиночного канала используется ПЗС-лайнейка – связанный массив фотодиодов, обеспечивающий пространственную дискретизацию вдоль оптической оси. Это позволяет фиксировать не только временные изменения, но и пространственные деформации профиля лазерного пучка, формируя двумерный массив данных, в котором каждый кадр отражает распределение интенсивности, а их последовательность – эволюцию среды во времени.

Такая структура сигнала требует применения алгоритма, способного учитывать пространственные взаимосвязи, устойчиво работать в условиях шумов и нестационарных процессов, а также извлекать признаки, отражающие физическую природу возмущений [85]. В отличие от методов,

ориентированных на спектральную декомпозицию одномерных сигналов, здесь используются подходы, позволяющие анализировать изменения формы и структуры лазерного пучка, выявлять локальные флюктуации и оценивать динамику среды в реальном времени [86]. Такая организация данных даёт возможность проводить анализ пространственного распределения интенсивности в фиксированные моменты времени, а также отслеживать временную динамику сигнала на отдельных фоточувствительных элементах. В результате формируется наблюдательная структура, содержащая как пространственную, так и временную информацию, что требует применения алгоритма, способного учитывать межкадровые взаимосвязи, устойчиво работать в условиях шумов и извлекать признаки, отражающие физическую природу возмущений [87].

Взаимно-корреляционная функция дискретного сигнала (ВКФДС)

Одним из базовых подходов к оценке изменений в структуре лазерного пучка является метод взаимно-корреляционной функции дискретного сигнала (ВКФДС), позволяющий выявлять пространственные смещения и деформации между последовательными кадрами [75, 88]. Метод основан на оценке взаимной корреляционной зависимости между профилями интенсивности, зарегистрированными в последовательные временные отсчёты, с последующим определением положения максимума корреляционной функции [75, 35, 81, 89]. Это положение интерпретируется как величина сдвига, отражающая направленное изменение среды, вызванное, например, тепловыми потоками или перемещением аэродисперсных образований.

Формально взаимная корреляция между двумя последовательными кадрами и определяется выражением:

$$C_{X,Y}(l) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} X_i \cdot Y_{i-l}, \quad (52)$$

где: L – количество дискретных отсчётов функции, соответствующее числу фоточувствительных элементов (пикселей) ПЗС-линейки; i – индекс пикселя, определяющий пространственное положение в профиле; X_i, Y_i – дискретные

распределения интенсивности лазерного пучка, полученные в два последовательных момента времени [75].

Максимум функции $C_{x,y}(l)$ соответствует наиболее вероятному смещению между кадрами и может быть интерпретирован как признак направленной динамики среды. Метод ВКФДС чувствителен преимущественно к согласованным крупномасштабным изменениям формы профиля пучка, таким как его смещение или деформация, тогда как локальные флюктуации, возникающие на отдельных участках профиля, оказывают на результат слабое влияние или вовсе подавляются при усреднении.

Для анализа временной активности среды используется производная метрика – динамический максимум функции ВКФДС, определяемый как наибольшее значение корреляционной меры между соседними кадрами:

$$W(nT) = \max_l \left[\frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} X_i(nT) \cdot X_{i-l}((n-1)T) \right], \quad (53)$$

где T – интервал регистрации выборок; $X(nT), X((n-1)T)$ – выборки распределений профиля интенсивности пучка, зарегистрированные в соседние интервалы времени T [75].

Повышенные значения $W(nT)$ свидетельствуют о согласованной динамике, тогда как снижение функции указывает на хаотические или шумовые флюктуации. В совокупности оба подхода – пространственный и временной позволяют выделить участки и интервалы, в которых происходят значимые преобразования структуры лазерного пучка. Их применение в составе комплексного анализа (вейвлет-преобразование, суммарно-разностный метод, кепстральный анализ) обеспечивает многомерное представление о процессах в исследуемой области [89, 85, 90].

Суммарно-разностный подход к выделению структурных особенностей сигнала

Суммарно-разностный метод представляет собой подход к анализу динамики лазерного пучка, основанный на оценке попиксельной разности между последовательными распределениями интенсивности. В отличие от

корреляционных методов, ориентированных на выявление согласованных смещений [35], данный метод акцентирует внимание на локальных изменениях, возникающих в отдельных участках профиля, и тем самым позволяет фиксировать мелкомасштабные флуктуации, связанные с турбулентностью, рассеянием или прохождением аэродисперсных частиц [91].

Математически суммарно-разностная функция определяется как сумма абсолютных разностей между соответствующими отсчётами двух соседних выборок:

$$R(nT) = \sum_{i=1}^L |\Delta X_i(nT)| = \sum_{i=1}^L |X_i(nT) - X_i([n-1]T)| \quad (54)$$

где: $X_i(nT)$ – значение интенсивности в i -м пикселе в момент времени nT ; $X_i([n-1]T)$ – значение того же пикселя на предыдущем временном шаге; L – общее число пикселей в профиле.

Данный метод заключается в расчете суммарно-разностной функции, отражающей пописельную разность зарегистрированных распределений интенсивностей профиля пучка (рисунок 20).

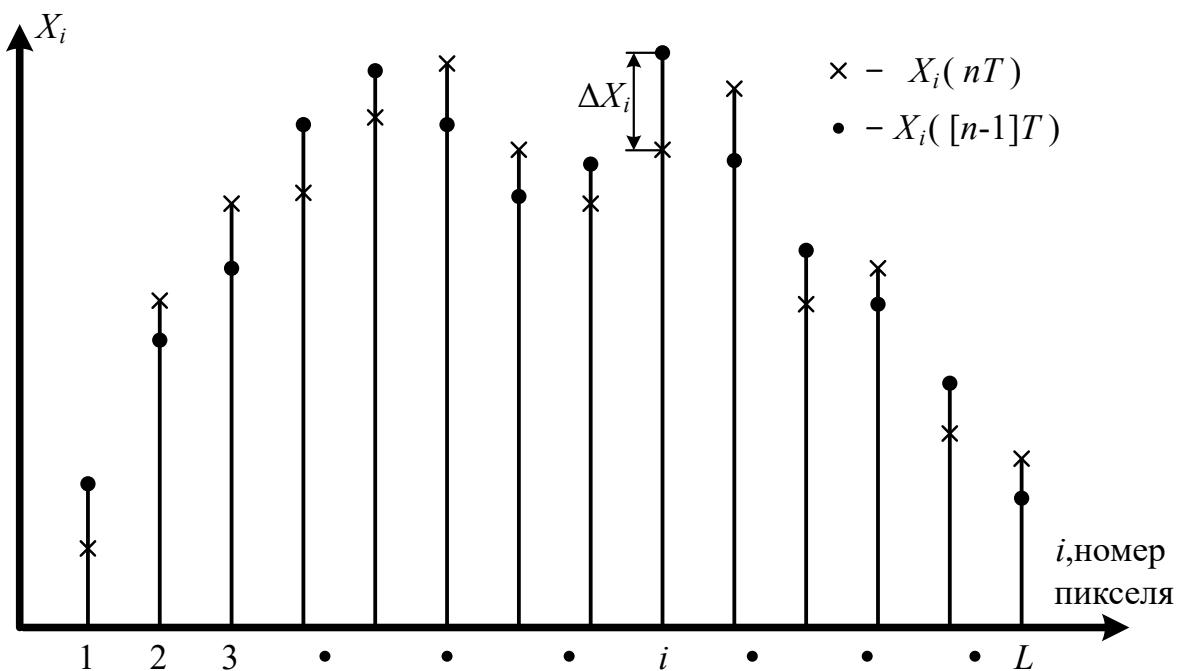


Рисунок 20 – Иллюстрация суммарно-разностного метода обработки профиля пучка

Функция $R(nT)$ характеризует степень локальной нестабильности среды: её рост указывает на наличие резких изменений в структуре пучка, тогда как снижение отражает относительную стабильность. В отличие от ВКФДС и её динамического максимума, данный метод не предполагает наличие направленного движения, а фиксирует любые изменения, независимо от их согласованности.

Суммарно-разностный подход особенно эффективен при анализе турбулентных режимов, а также в ситуациях, когда в поле пучка появляются или исчезают мелкие объекты, вызывающие локальное рассеяние [91]. Он может использоваться как индикатор флюктуационной активности и служит дополнением к корреляционным методам, обеспечивая более детальную картину происходящих процессов.

В составе комплексного анализа функция $R(nT)$ позволяет выделить интервалы времени, в которых наблюдаются всплески локальной активности, и тем самым задаёт основу для последующего спектрального анализа или оценки фрактальной структуры профиля [76]. Её применение целесообразно в задачах мониторинга, диагностики и классификации динамических состояний среды [92].

Кепстральное преобразование в задаче диагностики структуры лазерного пучка

Кепстральный анализ, теоретические основы которого были изложены во втором разделе, на практике применяется для обработки пространственного профиля лазерного пучка, представленного в виде дискретной последовательности интенсивностей, полученной с ПЗС-линейки. Обработка осуществляется начиная с i -го пикселя, что отражает ограничение области интереса – например, центральной части пучка или зоны с выраженным флюктуациями [35].

В непрерывной форме кепстральное преобразование определяется как [39]:

$$C(t) = \mathcal{F}^{-1} \left[\log(|\mathcal{F}[x(t)]|) \right], \quad (55)$$

где $C(t)$ – кепстральная функция, $x(t)$ – исходный сигнал, \mathcal{F} – прямое преобразование Фурье, а \mathcal{F}^{-1} – обратное преобразование Фурье.

В дискретной реализации, применимой к цифровым сигналам, представленным в виде конечных числовых последовательностей после дискретизации и квантования, используется следующая форма [93]:

$$C(n) = \text{IDFT} \left[\log(|\text{DFT}[x(n)]|) \right], \quad (56)$$

где $C(n)$ – дискретная кепстральная функция, $x(n)$ – последовательность интенсивностей, начиная с пикселя i , DFT – дискретное преобразование Фурье, а IDFT – его обратное преобразование.

Переход к явному виду осуществляется посредством раскрытия структуры дискретного преобразования Фурье и формального разложения выражения. С учётом того, что анализ ведётся по диапазону пикселей от i до $i + N - 1$, окончательная форма дискретного кепстрального преобразования записывается как:

$$C(m) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\log \left(\left| \sum_{n=i}^{i+N-1} x(n) \cdot e^{-2\pi i \frac{k(n-i)}{N}} \right| \right) \right] \cdot e^{2\pi i \frac{km}{N}}, \quad (57)$$

где N – количество анализируемых пикселей, m – индекс в кепстральной области, логарифм берётся от амплитудного спектра, полученного через DFT, а итоговая сумма представляет собой IDFT, возвращающее результат в кепстральную область.

Кепстральная область интерпретируется как квази-пространственная шкала, в которой расстояние между пиками соответствует периодичности в спектре интенсивности. Это позволяет оценивать интервалы между повторяющимися структурами, например, слоями среды, дифракционными элементами или аэродисперсными образованиями [94].

Метод особенно эффективен при наличии наложенных спектральных компонент, отражений и многократных переотражений. Его применение

расширяет спектр диагностических возможностей и позволяет глубже понять природу изменений в исследуемой среде [41].

Вейвлет-преобразование в задаче анализа пространственного профиля лазерного пучка

Вейвлет-преобразование, теоретические основы которого были рассмотрены во втором разделе, применяется для анализа пространственного профиля лазерного пучка, представленного в виде дискретной последовательности интенсивностей, полученной с ПЗС-линейки. Обработка осуществляется начиная с i -го пикселя, что позволяет сосредоточиться на области интереса, характеризующейся флюктуациями, неоднородностями или локальными структурами [82].

Непрерывная форма вейвлет-преобразования определяется выражением [37]:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (58)$$

где $W(a, b)$ – коэффициенты преобразования, $x(t)$ – исходный сигнал, $\psi^*(\cdot)$ – комплексно-сопряжённая материнская вейвлет-функция, a – масштаб, b – сдвиг. Данное выражение описывает разложение сигнала по системе масштабированных и сдвинутых функций ψ , обладающих локализацией как во времени, так и в частоте.

Выбор базисной функции определяется характером исследуемого сигнала. При наличии резких границ и скачков интенсивности целесообразно использовать компактные вейвлеты, такие как Хаара или Добеши [37]. Для гладких распределений предпочтительны более регулярные функции, например Симлет или Коэн-Даудаше-Ваве. В настоящей диссертации применяется ортонормированный дискретный базис, обеспечивающий устойчивость к шумам и возможность многоуровневой декомпозиции [95].

Дискретное вейвлет-преобразование реализуется по формуле:

$$W(j,k) = \sum_{n=i}^{i+N-1} x(n) \cdot \psi_{j,k}(n), \quad (59)$$

где $x(n)$ – последовательность интенсивностей, N – количество анализируемых пикселей, j – уровень масштабирования, k – индекс сдвига, а $\psi_{j,k}(n)$ – дискретизированная вейвлет-функция, полученная масштабированием и сдвигом материнской функции $\psi(n)$.

Коэффициенты $W(j, k)$ отражают локальные особенности сигнала на различных масштабах. Компоненты, соответствующие высоким значениям j , позволяют выявлять резкие изменения интенсивности, связанные с границами, дефектами или неоднородностями. Компоненты при малых j характеризуют глобальные тренды и распределения.

Применение вейвлет-преобразования к анализу профиля лазерного пучка обеспечивает локализацию флюктуаций, выявление многоуровневой структуры, отделение шумовых компонентов от сигнальных, а также адаптивную фильтрацию и восстановление профиля. Метод обладает высокой разрешающей способностью как в пространственной, так и в масштабной области, что делает его эффективным в задачах диагностики, особенно при наличии непериодических и локализованных структур, где классические спектральные методы теряют информативность [96].

Применение фильтрующей функции в задаче подавления шумов и восстановления сигнала

Для выделения информативных участков сигнала на фоне шумов применяется бинарная фильтрующая функция, реализующая логическую маску по заданному критерию. Такой подход обеспечивает сохранение резких переходов и локальных особенностей, критичных для диагностики в условиях нестабильной среды [97].

Пусть $x(n)$ – дискретная последовательность интенсивностей, полученная с ПЗС-линейки, а $h(n) \in \{0,1\}$ – бинарная фильтрующая функция, определяющая принадлежность точки n к сигнальному участку. Тогда результат фильтрации записывается как

$$y(n) = x(n) \cdot h(n), \quad (60)$$

где $y(n)$ – выделенный сигнал, содержащий только те компоненты, которые удовлетворяют критерию $h(n) = 1$. Построение функции $h(n)$ может осуществляться на основе пороговой обработки, локального градиента, оценки дисперсии или других эвристических критериев, отражающих структуру сигнала [35].

Например, при использовании порогового критерия:

$$h(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } x(n) > T, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (61)$$

где T – порог, определяемый эмпирически или статистически. Более сложные варианты включают адаптивные пороги, зависящие от локального среднего или медианы, а также морфологические операции, позволяющие учитывать форму и связность сигнальных областей [98, 99].

Применение бинарной фильтрующей функции позволяет не только подавить шумовые компоненты, но и сохранить локализованные структуры, важные для последующего анализа. Метод демонстрирует высокую эффективность при обработке сигналов с выраженным границами, импульсными компонентами и фрагментами, отличающимися по интенсивности от фона. Он может использоваться как предварительный этап перед вейвлет-декомпозицией, корреляционным анализом или оценкой параметров пучка, обеспечивая выделение участков, содержащих признаки повышенной термодинамической активности или структурной значимости.

3.2.4 Архитектура алгоритма спектральной диагностики термодинамической активности

В данном разделе представлена архитектура алгоритма автоматического выявления термодинамической активности в временном ряду, основанного на анализе спектральных и масштабных признаков.

В зависимости от выбранного источника сигнала, алгоритм активирует один из двух специализированных блоков:

- Для матричного спектрального прибора реализован параллельный анализ, основанный на применении методов кепстрального анализа, вейвлет-преобразования и бинарной фильтрации. Такая комбинация позволяет выявлять регулярные и масштабные признаки активности в нестационарных временных рядах, характерных для процессов термодинамической нестабильности.

- Для лазерно-оптического прибора реализуется многоуровневый анализ пространственного профиля лазерного пучка с применением пяти методов: взаимно-корреляционной функции дискретного сигнала [76], суммарно-разностного анализа, кепстрального анализа, вейвлет-преобразования и бинарной фильтрации.

Общая структура алгоритма представлена на рисунке 21. Схема отражает последовательность вычислительных этапов, включая предобработку сигнала, преобразования, выделение признаков, принятие решения и циклическую реализацию.

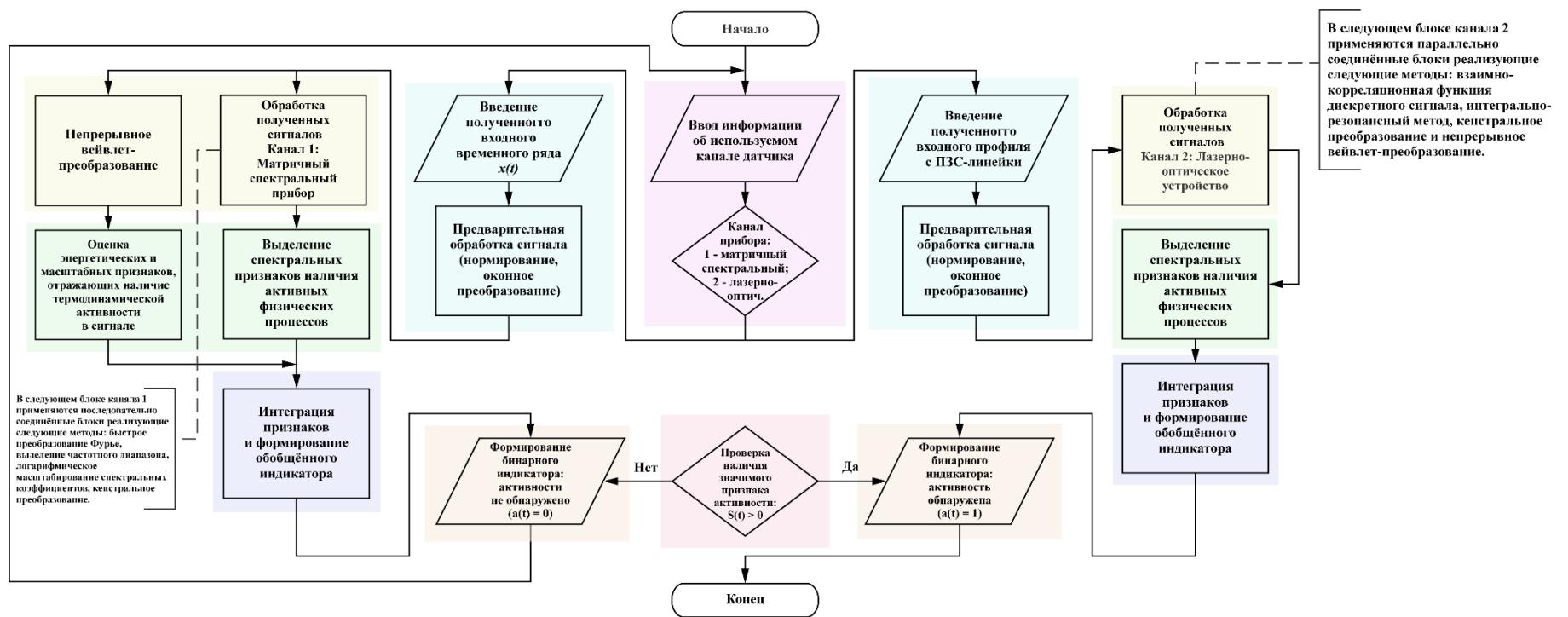


Рисунок 21 – Блок-схема алгоритма анализа активности среды для матричного и лазерно-оптического каналов

Представленная схема служит основой для поэтапного описания алгоритма, приведённого ниже.

Архитектура алгоритма включает семь функциональных этапов, обеспечивающих адаптацию к типу источника, селективную обработку, интерпретацию признаков, формирование индикатора активности и принятие решения в условиях реального времени.

На первом этапе осуществляется идентификация источника сигнала. В зависимости от выбора канала прибора, активируется один из двух специализированных каналов обработки. Первый канал соответствует матричному спектральному прибору, предназначенному для регистрации временных сигналов, отражающих спектральные и масштабные признаки термодинамической нестабильности (ТКП). Второй канал соответствует лазерно-оптическому прибору, реализующему регистрацию пространственного профиля лазерного пучка, модулируемого в результате взаимодействия с аэрозольными и тепловыми неоднородностями газовой среды.

После определения источника сигнала выполняется предобработка данных. На этом этапе осуществляется нормирование входного сигнала, а также оконное преобразование с подавлением краевых эффектов. Выбор оконной функции (например, Хэмминга или Блэкмана) производится с учётом характера сигнала, что позволяет минимизировать спектральные артефакты и повысить точность последующего анализа.

На третьем этапе реализуется селективная обработка оптических сигналов, адаптированная к типу устройства. Для матричного спектрального прибора применяется последовательность методов, включающая быстрое преобразование Фурье, кепстральное преобразование и непрерывное вейвлет-преобразование. Быстрое преобразование Фурье позволяет выделить амплитудный спектр сигнала, после чего логарифм спектра подвергается кепстральному преобразованию, обеспечивающему выявление регулярных структур, связанных с пульсациями и турбулентными всплесками.

Параллельно выполняется вейвлет-анализ, позволяющий локализовать масштабные признаки активности в нестационарных временных рядах. Результаты спектрального и масштабного анализа объединяются в сводный признак, отражающий наличие термодинамической активности.

Для лазерно-оптического прибора реализуется многоуровневый анализ пространственного профиля лазерного пучка. После предобработки сигнала выполняется параллельное применение пяти методов: взаимной корреляционной функции дискретного сигнала, суммарно-разностного анализа, кепстрального преобразования, вейвлет-анализа и бинарной фильтрации. Корреляционный анализ позволяет выявить динамические изменения между последовательными кадрами, суммарно-разностный подход фиксирует локальные всплески и градиенты, кепстральное преобразование выявляет регулярные структуры, а вейвлет-анализ локализует масштабные признаки активности. Бинарная фильтрация используется для выделения активных участков по интенсивности или градиенту, формируя маску активности. Все признаки, полученные из указанных методов, объединяются в сводный вектор, отражающий пространственную структуру активности.

На четвёртом этапе осуществляется диагностическая интерпретация признаков. Полученные спектральные, энергетические и масштабные характеристики анализируются с целью выделения признаков, специфичных для процессов термодинамической нестабильности. Интерпретация проводится с учётом динамики сигнала, его локальной структуры и устойчивости к внешним помехам.

Пятый этап включает формирование индикатора активности. Признаки, полученные на предыдущем этапе, интегрируются в единый числовой показатель, отражающий степень выраженности термодинамической активности. Интеграция может быть реализована в виде нормированной суммы, логической комбинации или взвешенного суммирования с учётом значимости каждого метода. Полученный индикатор используется для принятия бинарного решения.

На шестом этапе осуществляется сравнение индикатора активности с пороговым значением, определяемым эмпирически или адаптивно. В случае превышения порога фиксируется наличие активности, в противном случае её отсутствие. Бинарное решение служит основой для последующих действий системы, включая фиксацию события, запуск дополнительной обработки или возврат к циклу сбора данных.

Заключительный, седьмой этап представляет собой циклическую реализацию алгоритма. В зависимости от типа устройства, осуществляется обработка новых выборок временного сигнала (для матричного спектрального прибора) или новых кадров пространственного профиля (для лазерно-оптического прибора). Алгоритм поддерживает непрерывный мониторинг, обеспечивая устойчивую работу в реальном времени и возможность интеграции в интеллектуальные сенсорные системы.

Разработанный алгоритм реализован в виде программного обеспечения, на которое получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669351 [100]. Это подтверждает оригинальность программной реализации и её соответствие требованиям, предъявляемым к приборам автоматизированной обработки данных в рамках заявленной научной задачи.

3.2.5 Реализация алгоритма спектральной диагностики в системе MATLAB и моделирование процесса горения

В целях экспериментальной проверки системы раннего обнаружения признаков горения был реализован алгоритм в виде MATLAB-скрипта, воспроизводящего все этапы спектральной диагностики термодинамической активности. Скрипт включает процедуры предобработки сигнала, спектрального и кепстрального анализа, а также формирование бинарного индикатора активности на основе порогового условия.

Для оценки чувствительности алгоритма была выполнена процедура моделирования. Сигнал моделируется как сумма случайного шума и синусоидальной низкочастотной компоненты, соответствующей диапазону

10–15 Гц. Сгенерированный временной сигнал представляет собой сумму случайного шума и синусоидальной компоненты с частотой 12 Гц. Такая структура имитирует фоновую турбулентность с внедрённой термодинамической активностью, характерной для ранних стадий горения.

Визуальный анализ, представленный на рисунке 22, демонстрирует комплексную структуру моделируемого сигнала, включающего синусоидальную компоненту на фоне аддитивного шума, имитирующую термодинамическую активность. Временная реализация сигнала отражает амплитудную и частотную модуляцию и наличие повторяющихся колебаний, характерных для процессов нестабильного горения.

Вейвлет-спектр, полученный методом непрерывного преобразования, позволяет локализовать энергетические всплески во времени и масштабе. Коэффициенты НВП визуализируют участки с выраженной периодической структурой, особенно в диапазоне 11–12 Гц, что соответствует введенной синусоидальной компоненте и подтверждает наличие диагностически значимой активности.

Нормированная энергетическая характеристика, извлечённая из вейвлет-спектра, отражает интенсивность активности в целевом частотном диапазоне. Повышенные значения индикатора соответствуют временными интервалам, содержащим признаки термодинамической нестабильности. Методика нормировки обеспечивает сопоставимость результатов при различных уровнях фонового шума.

На основе порогового анализа спектральной энергии формируется бинарный индикатор активности. Значение 1 соответствует обнаружению признаков активности, значение 0 их отсутствию. Бинарная классификация, представленная в нижней части рисунка, иллюстрирует работу алгоритма в режиме реального времени и демонстрирует его способность к автоматическому принятию решений на основе спектральных признаков, извлечённых из вейвлет-анализа.

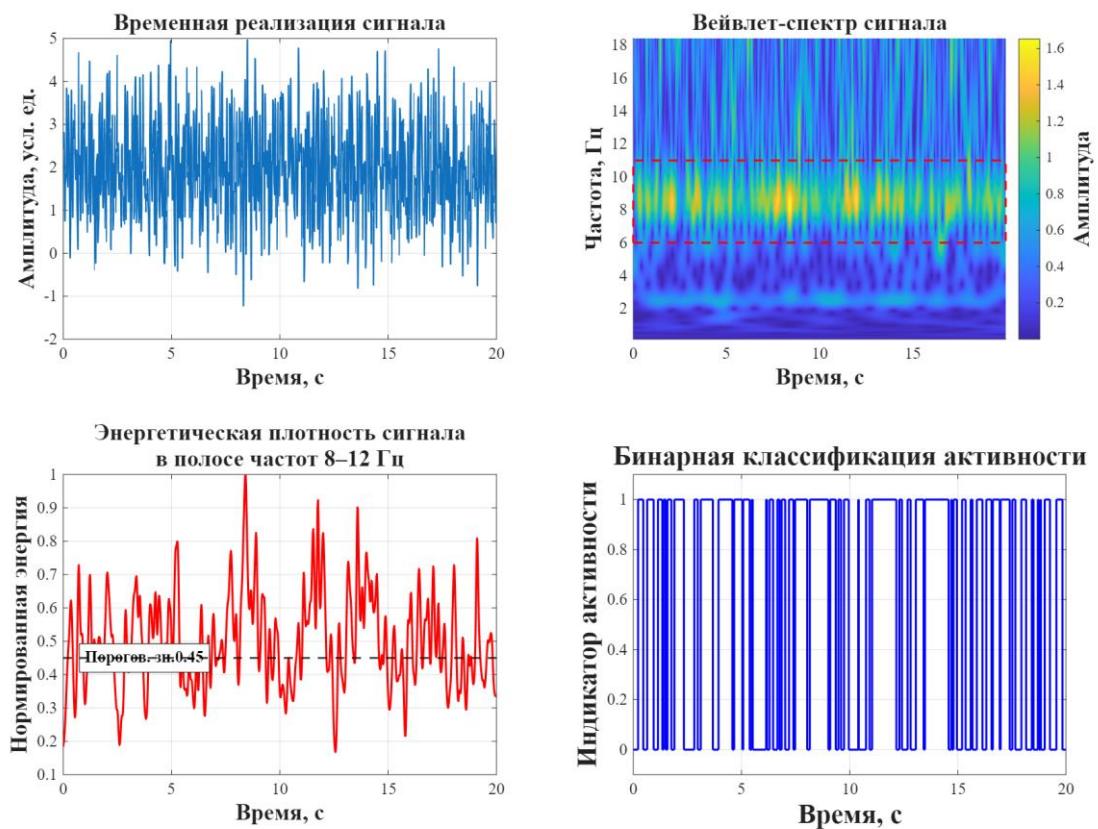


Рисунок 22 – Комплексный симуляционный анализ активности в моделируемом сигнале: временная реализация, спектральная декомпозиция и бинарная классификация

Результаты моделирования подтверждают корректность архитектуры алгоритма и его способность выделять характерные признаки активности в условиях шумового фона. Совокупность спектрального и вейвлетного анализа обеспечивает устойчивость к нестационарности сигнала и позволяет надёжно фиксировать наличие термодинамической активности, предшествующей визуальному проявлению горения. Реализация алгоритма в MATLAB демонстрирует его применимость для автоматизированной диагностики в реальных условиях и может быть использована как основа для дальнейшей интеграции в системы мониторинга и управления процессами горения.

Реализация алгоритма анализа пространственного профиля лазерного пучка

В настоящем разделе представлена программная реализация алгоритма анализа пространственно-временного профиля лазерного пламени, выполненная в среде MATLAB. Целью является демонстрация применимости алгоритма к реальным экспериментальным данным, а также его апробация на синтетически моделируемых профилях. Алгоритм включает этапы предобработки сигнала, извлечения признаков, их интеграции, порогового анализа и классификации активности.

Обработка экспериментальных данных

В настоящем разделе представлена программная реализация алгоритма анализа пространственно-временного профиля лазерного пучка, выполненная в среде MATLAB. Целью является демонстрация применимости алгоритма к реальным экспериментальным данным, а также его апробация на синтетически моделируемых профилях.

Программа протестирована на экспериментальных данных, полученных с ПЗС-линейки, и показала устойчивость к шуму, способность к обнаружению кратковременных всплесков и интерпретации их природы. Результаты классификации выводятся в табличной форме с указанием времени срабатывания и типа активности.

Апробация алгоритма на моделируемом профиле

Для апробации алгоритма была реализована процедура генерации синтетического пространственно-временного профиля. В качестве базовой структуры используется гауссов пик, модулируемый по времени синусоидальным сигналом с частотой 12 Гц. Дополнительно в модель включён аддитивный шум, отражающий флюктуации и нестабильность горения.

Сгенерированный профиль ограничивается по пространству в диапазоне пикселей от 1100 до 2500, после чего интерполируется обратно на полную ширину (3643 пикселя), обеспечивая совместимость с экспериментальными

данными. Далее применяется та же процедура предобработки и анализа, что и для реального профиля.

Визуализация результатов моделирования

Пространственно-временная структура моделируемого сигнала представлена в виде трёхмерной поверхности, где оси соответствуют пространственным координатам, временным кадрам и амплитуде интенсивности. Такая форма визуализации позволяет оценить пространственную локализацию энергетических проявлений, выявить зоны устойчивой активности, а также проследить динамику сигнала во времени. Поверхность демонстрирует характерные особенности моделируемого профиля: симметричную форму, модуляцию по времени и наличие шумовых флуктуаций.

На рисунке 23 представлена комплексная визуализация пространственно-временной структуры моделируемого сигнала, включающая интерполированный профиль интенсивности, спектрально-энергетические характеристики и результаты бинарной классификации. Трёхмерная поверхность в верхней части рисунка отражает распределение интенсивности по пикселям и кадрам, позволяя оценить пространственную локализацию энергетических проявлений, выявить зоны устойчивой активности и проследить динамику сигнала во времени. Моделируемый профиль демонстрирует симметричную форму, временную модуляцию и наличие шумовых флуктуаций, характерных для термодинамической активности.

Спектральная энергетическая плотность, рассчитанная в диапазоне 8–15 Гц, отображена в виде временного графика, где красная кривая соответствует значению признака, а чёрная и пурпурная линии обозначают пороги обнаружения и срабатывания соответственно. Повышенные значения энергетической плотности указывают на наличие локализованных всплесков, отличающихся от фоновой турбулентности по интенсивности и структуре.

Вейвлет-анализ временного сигнала одного из пикселей представлен в нижней части рисунка и позволяет локализовать кратковременные

энергетические проявления во времени и частоте. Коэффициенты непрерывного преобразования визуализируют участки с выраженной периодической структурой, особенно в целевом диапазоне частот, что критически важно для диагностики переходных режимов горения.

На основе спектрального критерия формируется бинарный индикатор активности, где значение 1 соответствует обнаружению признаков термодинамической активности, а значение 0 их отсутствию. Бинарная классификация, представленная на правом нижнем графике, демонстрирует работу алгоритма в режиме реального времени и служит основой для автоматического принятия решений.

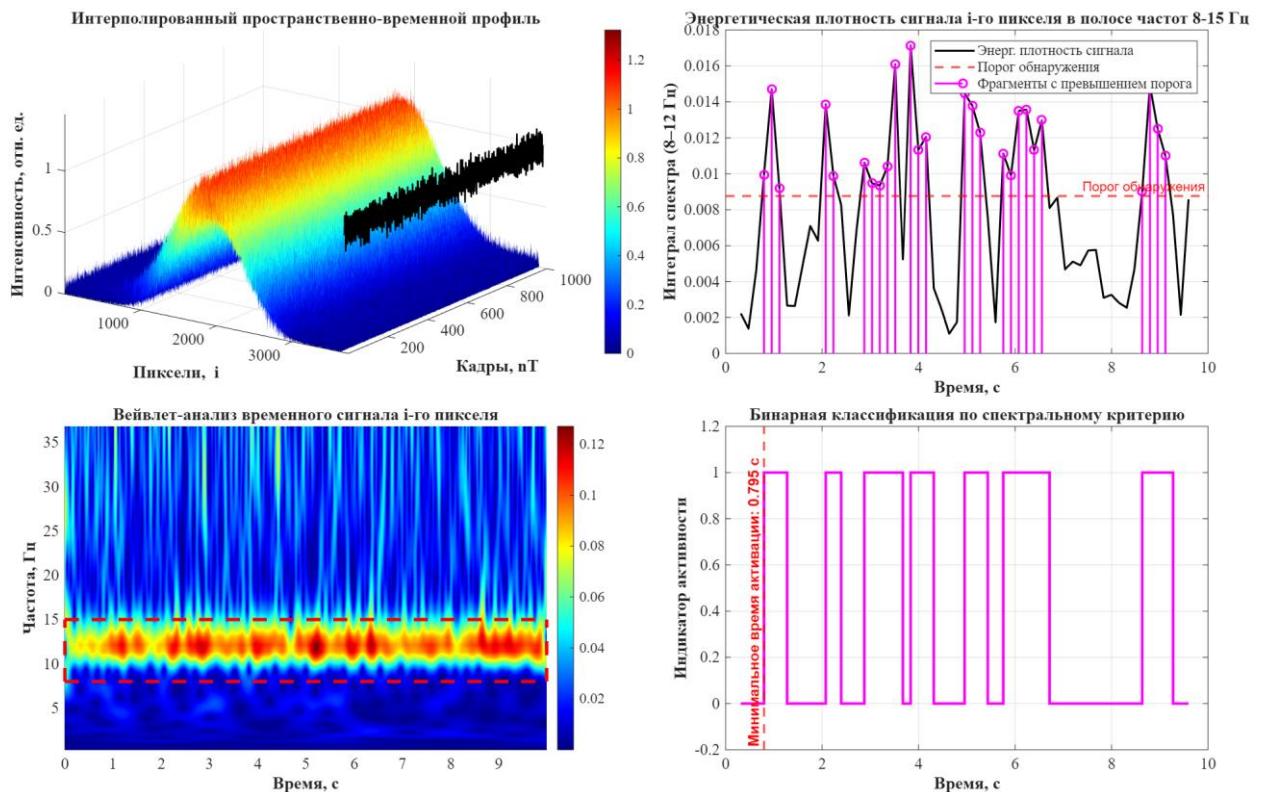


Рисунок 23 – Комплексный симуляционный анализ активности в моделируемом сигнале: времененная реализация, спектральная декомпозиция и бинарная классификация

Результаты моделирования подтвердили согласованную работу алгоритма на всех этапах обработки. Визуализация исходного сигнала в виде пространственно-временной поверхности позволила выявить симметрию,

временную модуляцию и шумовые флюктуации, имитирующие фоновую турбулентность. Совместный анализ корреляционного, дифференциального и энергетического признаков обеспечил первичную диагностику устойчивости профиля и локальных изменений. Частотные признаки, полученные с использованием спектрального и вейвлет-анализа, позволили локализовать активность в целевом диапазоне, подтверждая чувствительность алгоритма к периодическим структурам. Интегральный признак активности, сформированный на основе взвешенной комбинации частных признаков, продемонстрировал устойчивость к шуму и высокую чувствительность к всплескам. Адаптивный порог обеспечил автоматическое выделение значимых событий, а бинарный индикатор подтвердил способность алгоритма к классификации активности в реальном времени. Апробация на моделируемом профиле показала эффективность, воспроизводимость и применимость метода для ранней диагностики процессов горения.

3.2.6 Архитектура электронного блока и физическая реализация лазерно-оптического прибора

На основе ранее сформулированных требований к системе регистрации спектрометрической информации, а также разработанной структурной схемы лазерно-оптического прибора, был реализован электронный блок прибора, обеспечивающий полный цикл обработки сигнала – считывания спектроскопической информации до передачи в цифровом виде на персональный компьютер. Структурная схема, представленная на рисунке 24, иллюстрирует общую архитектуру прибора, в которой выделены основные функциональные узлы: блок регистрации, блок управления, интерфейс связи и усилительный каскад. Такое представление позволило упростить процесс проектирования и обеспечить логическую связность между аппаратной и алгоритмической частью системы.

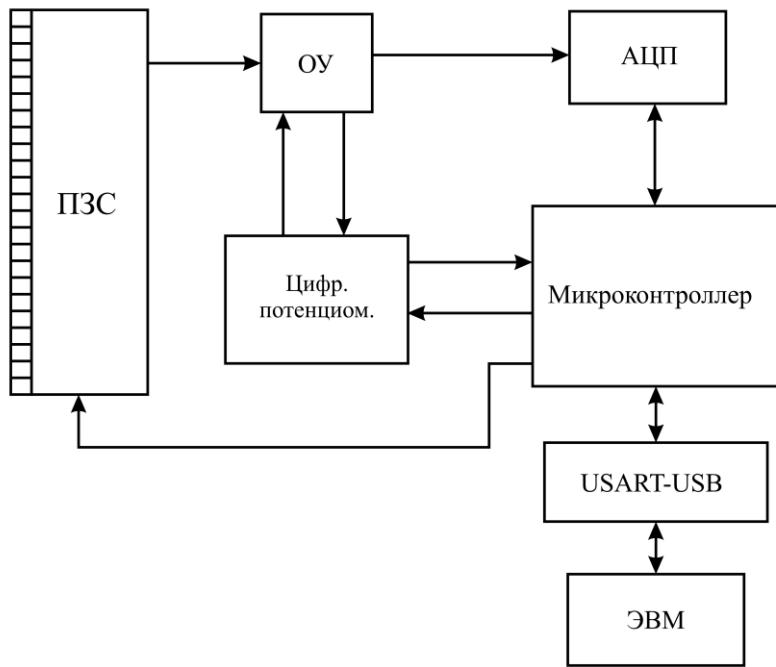


Рисунок 24 – Структурная схема электронного блока лазерно-оптического прибора

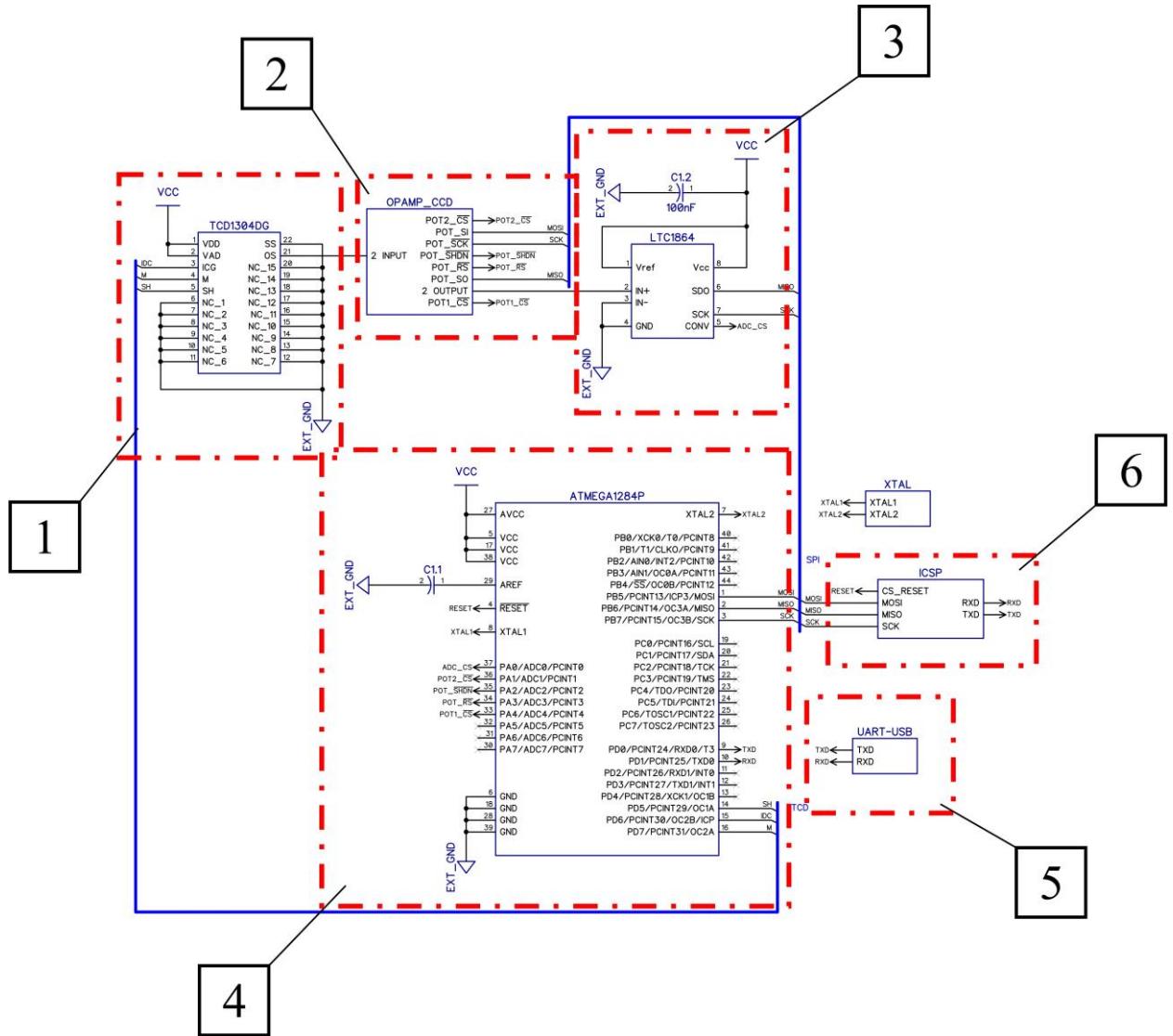
Перечень компонентов:

- ATmega284P – микроконтроллер, идентичен спектральному блоку;
- FT232 – интерфейс USB-UART, унифицирован с управляющим модулем;
- MCP6024 – операционный усилитель, усиление сигнала от ПЗС-линейки;
- LTC1864 – АЦП, 16 бит, SPI, $t_{conv} \approx 1,5$ мкс, ток потребления 1,3 мА;
- Toshiba TCD1304 – ПЗС-линейка, 3648 пикселей, шаг 8 мкм, встроенный затвор.

Выбор компонентов обусловлен необходимостью точной пространственной дискретизации отражённого сигнала. ПЗС-линейка TCD1304 обеспечивает высокую однородность и синхронизацию экспозиции. АЦП LTC1864 обеспечивает высокую точность при малом энергопотреблении.

Для реализации аппаратной части была разработана принципиальная схема, отражающая электрические связи между компонентами. На рисунке 25 показана принципиальная схема прибора, где показано, как организовано

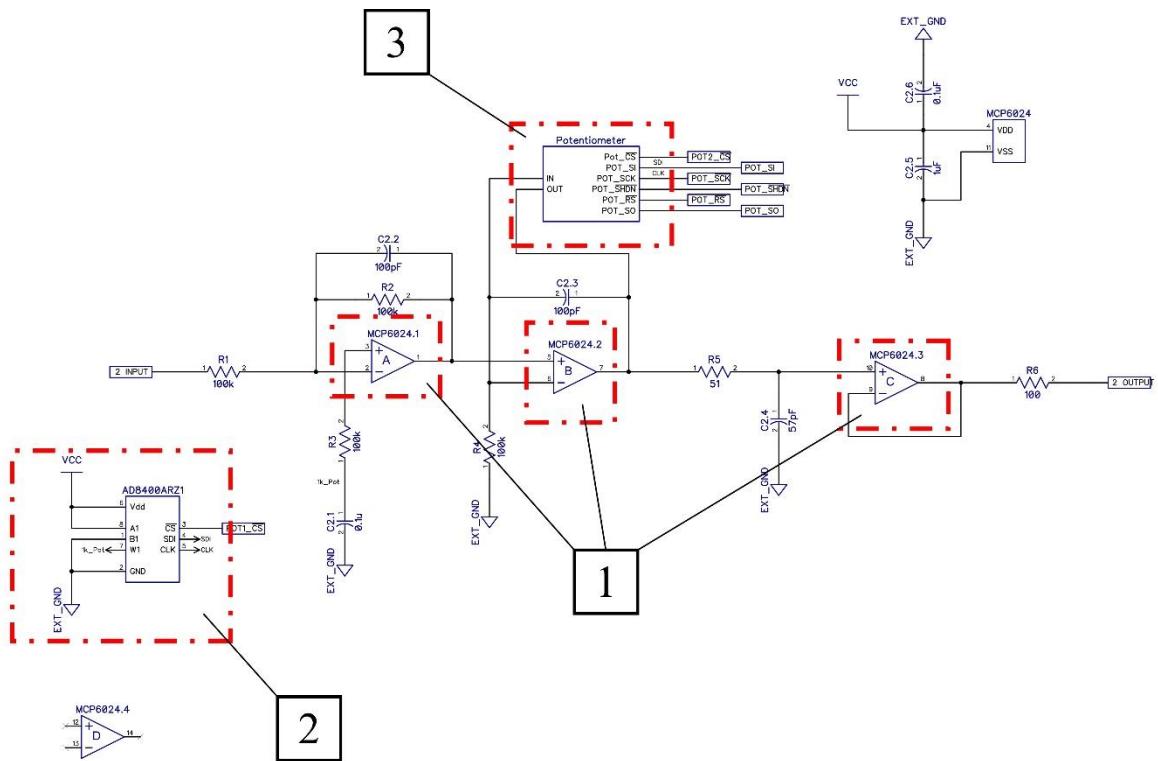
взаимодействие между ПЗС-линейкой, операционным усилителем (ОУ), АЦП, микроконтроллером и интерфейсом передачи данных. Эта схема легла в основу трассировки печатной платы и сборки прибора, а также позволила оценить электрическую совместимость компонентов и предусмотреть защиту от помех [101].



1 – ПЗС-линейка, 2 – блок усиления полученных сигналов, 3 – блок преобразования усиленного аналогового сигнала в цифровой, 4 – блок управления и обработки полученных сигналов, 5 –UART-USB конвертер, 6 – ICSP разъем.

Рисунок 25 – Принципиальная схема электронного блока лазерно-оптического прибора с выделением функциональных блоков

Для дальнейшей обработки сигналов используется электронный блок усиления. Его назначение заключается в повышении уровня спектроскопической информации, поступающей с выхода ПЗС-линейки. На рисунке 26 представлена принципиальная схема, реализующая усиление сигнала с помощью операционного усилителя MCP6022.



1 – SPST переключатель, 2 – цифровой потенциометр, 3 – операционный усилитель.

Рисунок 26 – Принципиальная схема блока усиления полученных сигналов на основе операционного усилителя

Также в принципиальную схему данного блока введен цифровой потенциометр AD8400ARZ1 для плавного изменения коэффициента усиления в широких пределах.

На основе принципиальной схемы была разработана двухслойная печатная плата в среде DipTrace. Верхний слой платы, содержащий сигнальные цепи, элементы управления и интерфейсные разъёмы, показан на

рисунке 27а. Нижний слой, содержащий силовые линии, заземление и экранирующие области, представлен на рисунке 27а. Такая компоновка обеспечивает стабильную работу устройства даже в условиях внешних электромагнитных возмущений.

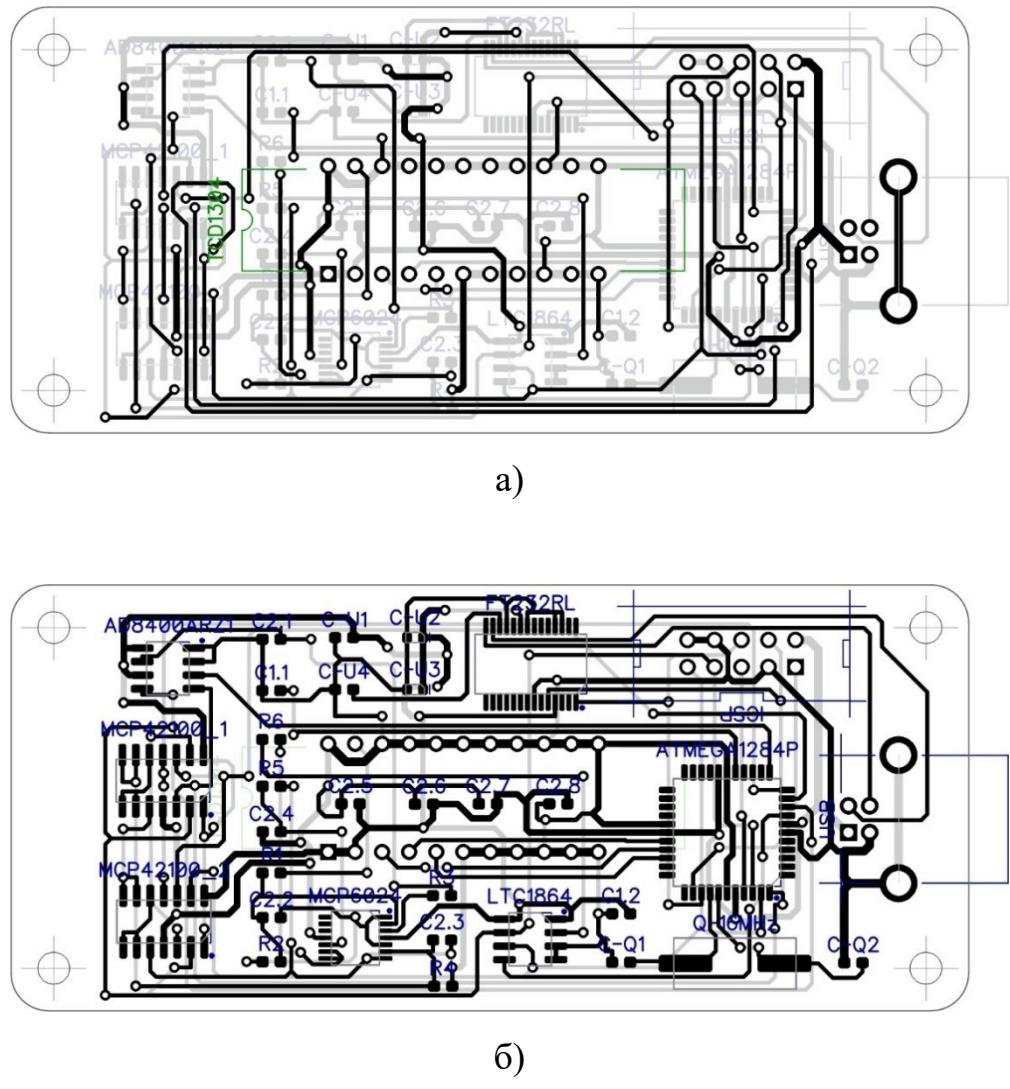


Рисунок 27 – Топология печатной платы макета устройства считывания на базе ПЗС-линейки: а – вид сверху, б – вид снизу

Разработка электронного блока завершилась успешным изготовлением и тестированием макета прибора. На данном этапе особое внимание уделялось проверке корректности топологии печатной платы, надёжности коммутации и устойчивости работы прибора в условиях внешних электромагнитных воздействий. Полученный макет позволил подтвердить соответствие

реализованной схемы заявленным техническим требованиям и обеспечить практическую проверку алгоритма обработки сигнала. Внешний вид электронного блока представлен на рисунке 28.

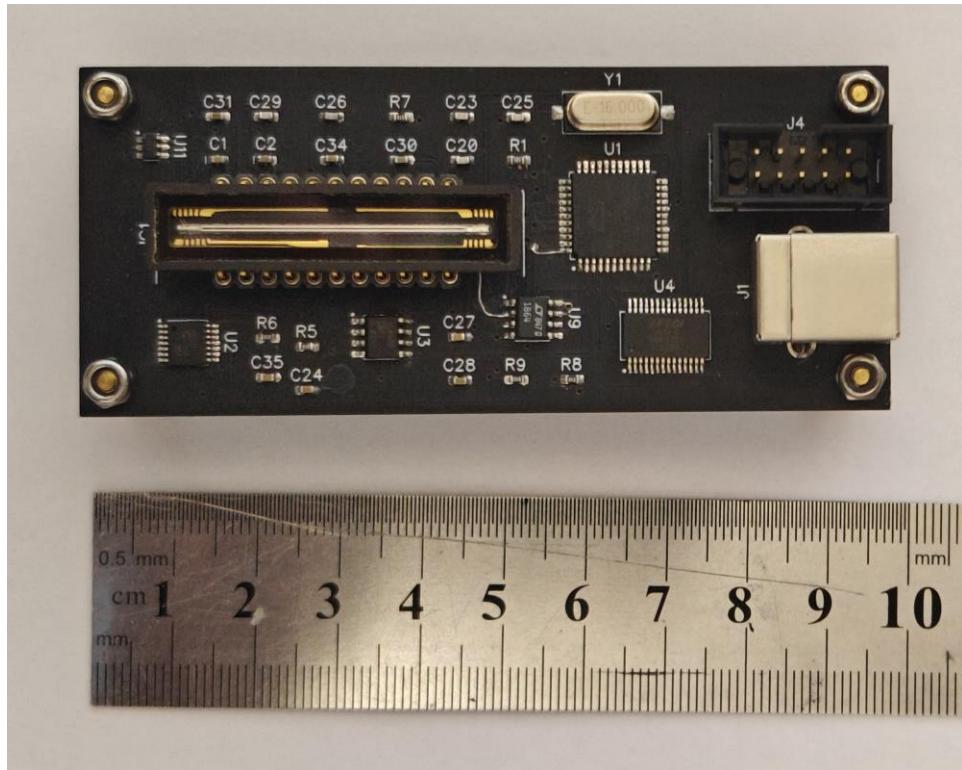


Рисунок 28 – Внешний вид макета электронного блока лазерно-оптического прибора, изготовленного на основе двухслойной печатной платы

Проведенные испытания показали стабильность функционирования блока при длительной работе, отсутствие критических перегревов и корректность передачи данных в интерфейсные модули. Электронный блок был интегрирован в состав конечного прибора, где обеспечил устойчивую работу канала и надёжную передачу информации для последующей цифровой обработки. Таким образом, макет стал ключевым этапом перехода от проектирования к физической реализации прибора, подтвердив жизнеспособность предложенной архитектуры.

Обоснование подбора электронных компонентов

Аппаратная часть двух приборов реализована на микроконтроллерной архитектуре с интеграцией аналогово-цифровых интерфейсов,

обеспечивающих приём, усиление, мультиплексирование и оцифровку сигналов от фотоприёмников и ПЗС-линейки. Выбор компонентов обусловлен необходимостью обеспечения точной регистрации, температурной и электромагнитной устойчивости, совместимости с open-source средой и нормативной применимости.

В матричном спектральном приборе используется микроконтроллер ATmega284P с тактовой частотой 16 МГц, объёмом памяти 128 КБ Flash и 16 КБ SRAM, поддержкой интерфейсов SPI, UART и I2C, а также температурным диапазоном работы от -40 ... + 85 °C. Он обеспечивает достаточную вычислительную мощность и совместим с open-source средой разработки. Для связи с персональным компьютером применяется микросхема FT232, реализующая преобразование USB в UART, поддерживающая виртуальный COM-порт и обеспечивающая устойчивую передачу данных со скоростью до 3 Мбит/с.

Аналоговая часть построена на базе четырёхканального операционного усилителя MCP6024 с rail-to-rail входом и выходом, низким уровнем шумов (8,7 нВ/Гц) и стабильной работой при питании 5 В. Для оцифровки сигналов от фотодиодов используется восьмиканальный аналого-цифровой преобразователь MCP3208 с разрешением 12 бит, интерфейсом SPI и временем преобразования порядка 4 мкс. Коммутация каналов реализована с помощью мультиплексоров ADG412, обладающих малым сопротивлением открытого канала (менее 10 Ом), низким током утечки (до 1 нА) и совместимостью с логическими уровнями 5 В. В качестве фотоприёмников применены кремниевые фотодиоды Hamamatsu S1337-66BQ с чувствительной областью 5,8 x 5,8 мм, спектральным диапазоном 200-1100 нм, низким тёмным током и высокой линейностью.

В лазерно-оптическом приборе используется тот же микроконтроллер ATmega284P, что обеспечивает унификацию архитектуры. Связь с ПК реализована через FT232. Аналоговая часть также построена на MCP6024, что обеспечивает единообразие усилительных трактов. В качестве АЦП

используется LTC1864 – 16-битный последовательный преобразователь с интерфейсом SPI, временем преобразования порядка 1,5 мкс и энергопотреблением около 1,3 мА при питании 5 В. Считывающим устройством служит ПЗС-линейка Toshiba TCD1304, содержащая 3648 пикселей с шагом 8 мкм, встроенным электронным затвором и высокой однородностью по чувствительности, что критично для регистрации отражённого сигнала.

Выбор указанных компонентов обеспечивает соответствие требованиям ГОСТ Р 53325-2012 (в части устойчивости и электропитания), ГОСТ Р 51522-99 (по температурной стабильности и надёжности) и ГОСТ Р 59137-2020 (по спектральной чувствительности и регистрации признаков). Архитектура системы совместима с open-source средой разработки и допускает серийное воспроизведение без применения проприетарных решений.

Выбор компонентов и их технические параметры определены исходя из требований к точности, стабильности и воспроизводимости регистрации спектральных и пространственных признаков. Операционный усилитель MCP6024 с rail-to-rail входом и выходом обеспечивает максимальный динамический диапазон при питании 5 В. Его уровень шумов составляет 8,7 нВ/Гц, что достаточно для усиления слабых фототоков, особенно в условиях низкой освещённости. Четыре канала позволяют реализовать компактную аналоговую схему без каскадирования.

АЦП MCP3208 обеспечивает 12-битную дискретизацию, что даёт 4096 уровней квантования. При типичном фототоке и усилении это обеспечивает шаг квантования менее 1 мВ, достаточный для регистрации изменений интенсивности излучения. Время преобразования около 4 мкс позволяет регистрировать сигналы с частотой до 250 кГц, что превышает частоту обновления фотометрических процессов.

Мультиплексоры ADG412 с сопротивлением открытого канала менее 10 Ом и током утечки до 1 нА обеспечивают минимальные потери сигнала и отсутствие паразитных токов. Совместимость с логическими уровнями 5 В

позволяет интеграцию без дополнительных согласующих схем.

Фотодиоды Hamamatsu S1337-66BQ обладают чувствительной областью $5,8 \times 5,8$ мм и спектральным диапазоном 190-1100 нм, охватывающим ключевые зоны излучения продуктов горения. Низкий темновой ток и высокая линейность позволяют регистрировать слабые сигналы без искажений.

АЦП LTC1864 обеспечивает 16-битную дискретизацию (65536 уровней), необходимую для точной регистрации распределения интенсивности по пикселям ПЗС-линейки. Время преобразования порядка 1,5 мкс позволяет считывать данные в реальном времени, а энергопотребление 1,3 мА соответствует требованиям к компактным приборам.

ПЗС-линейка Toshiba TCD1304 с 3648 пикселями и шагом 10 мкм обеспечивает пространственное разрешение, достаточное для регистрации распределения отражённого сигнала. Встроенный электронный затвор позволяет синхронизировать экспозицию, а высокая однородность чувствительности исключает необходимость постобработки.

Микроконтроллер ATmega1284P обеспечивает унификацию архитектуры, достаточный объём памяти и поддержку всех необходимых интерфейсов. Температурный диапазон от -40 ... +85 °C и совместимость с open-source средой позволяют использовать его в составе серийных приборов без ограничений.

Нормативная применимость

Все компоненты обеспечивают устойчивость к температурным и электромагнитным воздействиям, соответствуют требованиям ГОСТ Р 53325-2012 (устойчивость, электропитание), ГОСТ Р 51522-99 (температурная стабильность, надёжность) и ГОСТ Р 59137-2020 (спектральная чувствительность, регистрация признаков).

3.2.7 Программная реализация управляющего микрокода для микроконтроллера электронного блока лазерно-оптического прибора

В рамках разработки макета устройства считывания спектральной информации была реализована микропрограмма, обеспечивающая управление ПЗС-линейкой, синхронизацию с внешним аналого-цифровым преобразователем LTC1864, а также передачу полученных данных через последовательный порт. Программа написана на языке С и предназначена для микроконтроллеров, поддерживающих аппаратную реализацию SPI-интерфейса и таймеров.

Основной задачей микрокода является формирование управляющих сигналов для ПЗС-линейки, запуск преобразования в АЦП, считывание цифровых значений и их последовательная передача. Управление осуществляется через цифровые линии, соответствующие сигналам SH, ICG, WR, RD и MCLK. Частота работы ПЗС-линейки задаётся таймером микроконтроллера, настроенным на генерацию сигнала с частотой 888,8 кГц.

Программа состоит из трёх основных компонентов: процедуры инициализации, функции считывания строки пикселей и функции передачи данных. После завершения цикла интеграции данные передаются через микросхему UART/USB в управляющее программное обеспечение на ЭВМ.

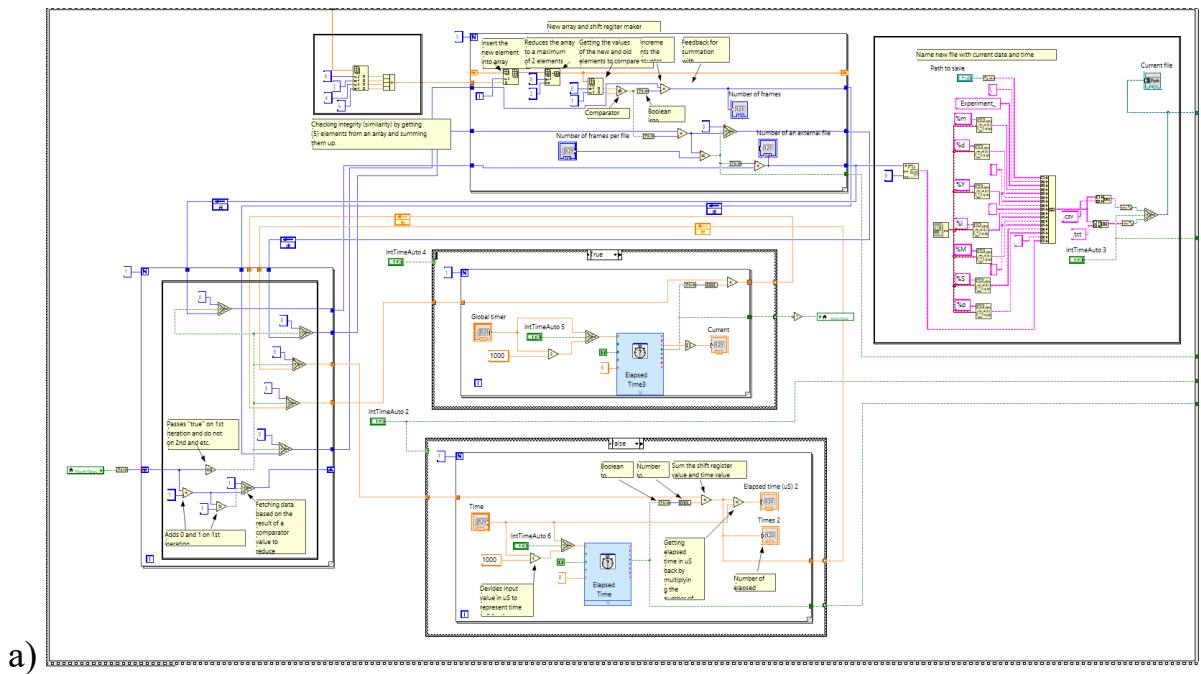
3.2.8 Программное средство визуализации спектроскопических данных, полученных с электронного блока лазерно-оптического прибора

Разработанное программное средство позволяет получать, обрабатывать и визуализировать данные с ПЗС-линейки, используемой в составе оптического спектрального устройства. Его техническая реализация защищена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022669351 [100]. Основная задача программы заключается в интерпретации интенсивности падающего оптического излучения, зарегистрированной по пространственной координате, и преобразовании этих данных в спектральную форму, пригодную для анализа.

Преобразование осуществляется на основе выражения,

устанавливающего связь между пространственной координатой и спектральной частотой. В результате этого данные, полученные от прибора, корректируются с учётом конфигурации оптической системы, а по оси X графика откладываются значения частоты, соответствующие каждому пикслю. Параметры преобразования вводятся пользователем через интерфейс программы, где предусмотрены поля для задания характеристик линзы, дифракционной решётки и геометрии прибора.

На рисунке 29 показана структурная схема управляющей логики, реализованная в среде LabVIEW. Программа построена на основе конечного блока, состоящего из трёх состояний: InitWait (0), WaitForActivity (1) и WaitForTimeout (2). Каждое состояние реализовано в виде отдельной ветви внутри конструкции Case Structure, размещённой в цикле While Loop. Переходы между состояниями осуществляются на основе анализа активности, таймеров и управляющих сигналов.



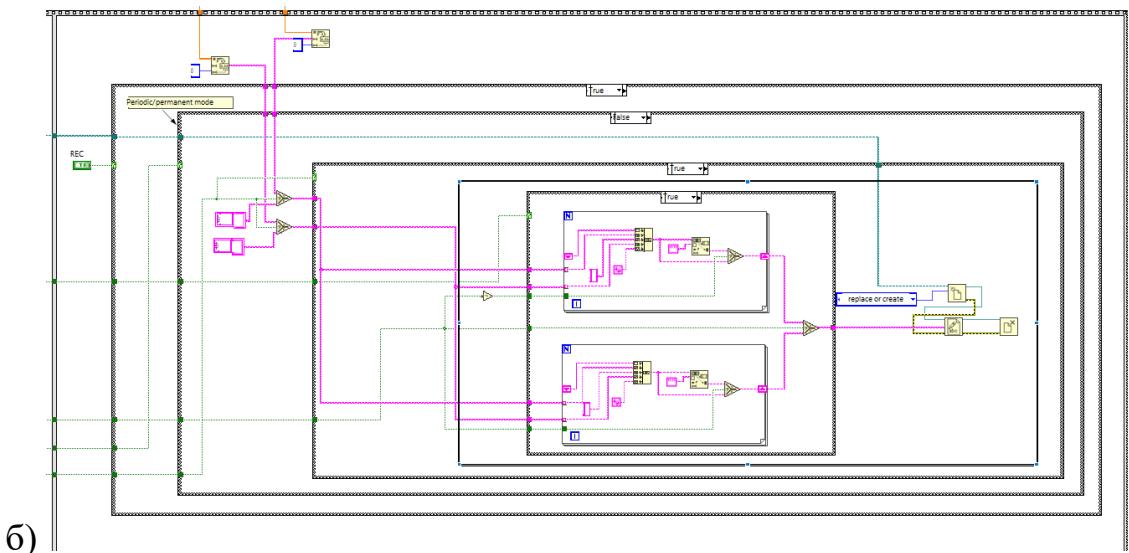


Рисунок 29 – Схема реализации программного средства визуализации спектральных данных в среде LabVIEW: а) – модуль ввода и предварительной обработки, б) – модель графического отображения полученной информации

Интерфейс программы представлен на рисунке 30, как интегрированное средство визуализации и управления спектральными измерениями, получаемыми с ПЗС-линейки. Центральная часть экрана отведена под график, на котором отображается кривая интенсивности оптического сигнала в зависимости от пиксельной координаты. По горизонтальной оси откладываются значения от нуля до примерно трёх тысяч, соответствующие пространственному распределению вдоль ПЗС-линейки, а по вертикальной представлены численные значения интенсивности, достигающие порядка 450. Кривая имеет выраженные пики и спады, что позволяет визуально оценить спектральную структуру сигнала.

Слева от графика расположена таблица калибровки, содержащая три столбца: пиксель, длина волны в нанометрах и значение поглощения. Над таблицей размещены кнопки, позволяющие создавать новую калибровку, сохранять и загружать её, очищать данные, а также применять текущую конфигурацию к измерениям. В верхней части интерфейса находятся поля для задания времени интеграции, отображения текущего значения таймера и

выбора порта связи. Здесь же расположены кнопки управления процессом измерения, включая запуск, остановку, а также переключение между режимами «Dark», «Ref», «Light» и «Scope».

Правая часть экрана содержит вертикальный индикатор, отображающий уровень сигнала в реальном времени, а также элементы управления форматом выходного файла. Пользователь может задать имя файла, выбрать формат данных и указать путь для сохранения. В нижней части интерфейса отображаются координаты курсора, что позволяет точно анализировать форму спектра, а также дополнительные поля, связанные с параметрами эксперимента.

Вся структура интерфейса организована таким образом, чтобы обеспечить интуитивно понятное управление, оперативный доступ к ключевым функциям и наглядное представление спектральной информации. Программа ориентирована на работу в реальном времени и позволяет проводить измерения, калибровку и анализ без необходимости переключения между внешними модулями или приложениями.

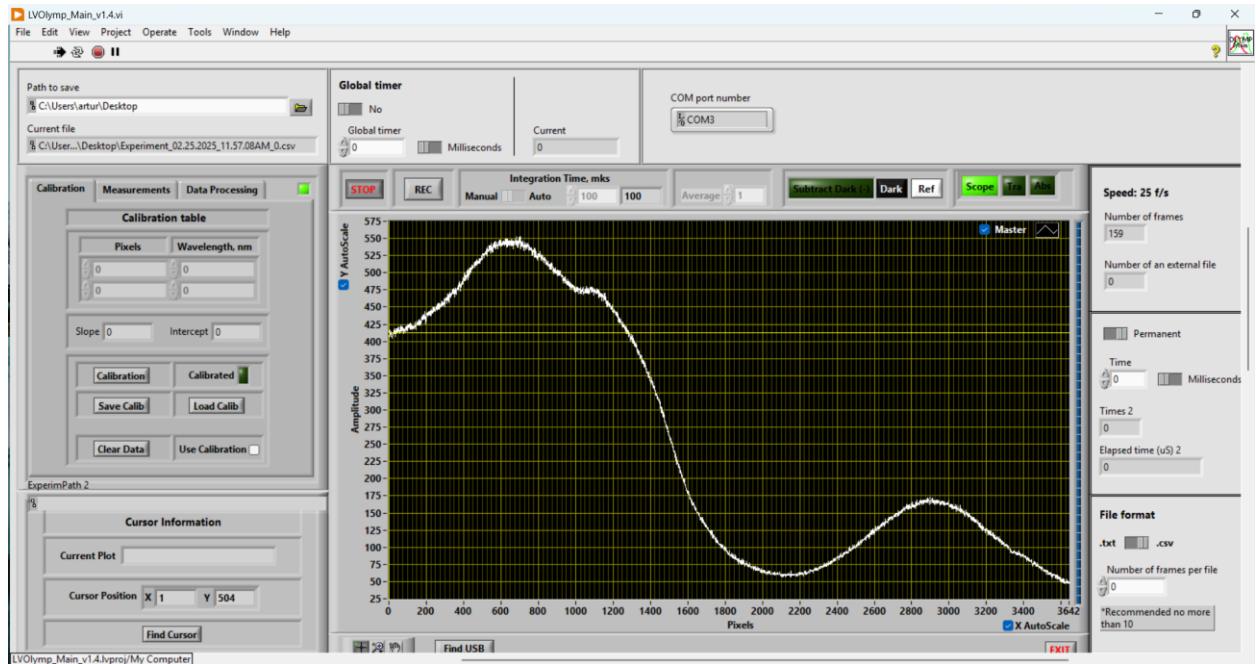


Рисунок 30 – Графический интерфейс пользователя программного средства визуализации спектральных данных

Программа протестирована на устойчивость при длительном сборе данных, показала стабильную работу интерфейса и корректную обработку команд. Время отклика составляет менее 50 мс, что позволяет использовать её в задачах, требующих оперативного контроля. Архитектура построена с учётом расширяемости: возможно добавление новых режимов, автоматической калибровки, многоканального отображения и интеграции с базами данных.

Таким образом, программное средство визуализации спектральных данных представляет собой функционально завершённый компонент системы, обеспечивающий надёжную связь с микроконтроллером, обработку полученной информации и её графическое представление. Использование среды LabVIEW позволило реализовать гибкий и эргonomичный интерфейс, пригодный для научных и прикладных задач.

3.2.9 Программное средство интегрированной обработки спектральных сигналов

В рамках построения полной системы спектрального анализа была разработана отдельная программа, предназначенная для интегрированной обработки сигналов, поступающих от двух различных приборов: матричного спектрального и лазерно-оптического. Данное программное средство выполняет роль решающего компонента, обеспечивающего унифицированную интерпретацию данных, поступающих из разных источников, и формирование итогового спектрального представления.

Программа принимает на вход массивы цифровых значений, отражающих интенсивность оптического излучения, зарегистрированного в пространственной или двумерной матрице. В случае лазерно-оптического прибора, данные представляют собой одномерное распределение вдоль координаты пикселей, тогда как матричный спектральный прибор формирует двумерное поле, содержащее информацию о спектральной и пространственной структуре одновременно. Программное средство автоматически определяет тип входного сигнала, применяет соответствующие

алгоритмы нормализации, коррекции и масштабирования, а также выполняет преобразование координат в спектральную область.

Алгоритм обработки включает этапы фильтрации, компенсации фона, расчёта оптической мощности, а также выделения характерных участков спектра. Для каждого типа устройства реализованы специализированные модули: в случае лазерно-оптического прибора это преобразование пространственной координаты в частоту с учётом параметров оптической системы; в случае матричного спектрального прибора это построение спектральных срезов, анализ распределения интенсивности и извлечение спектральных признаков.

Результаты обработки визуализируются в графической форме, с возможностью наложения данных, сравнения между источниками и экспорта в стандартные форматы. Программа также обеспечивает взаимодействие с интерфейсами визуализации и может быть интегрирована в состав единой управляющей среды. В ходе тестирования была подтверждена корректность обработки сигналов от обоих приборов, а также устойчивость работы при длительном цикле измерений.

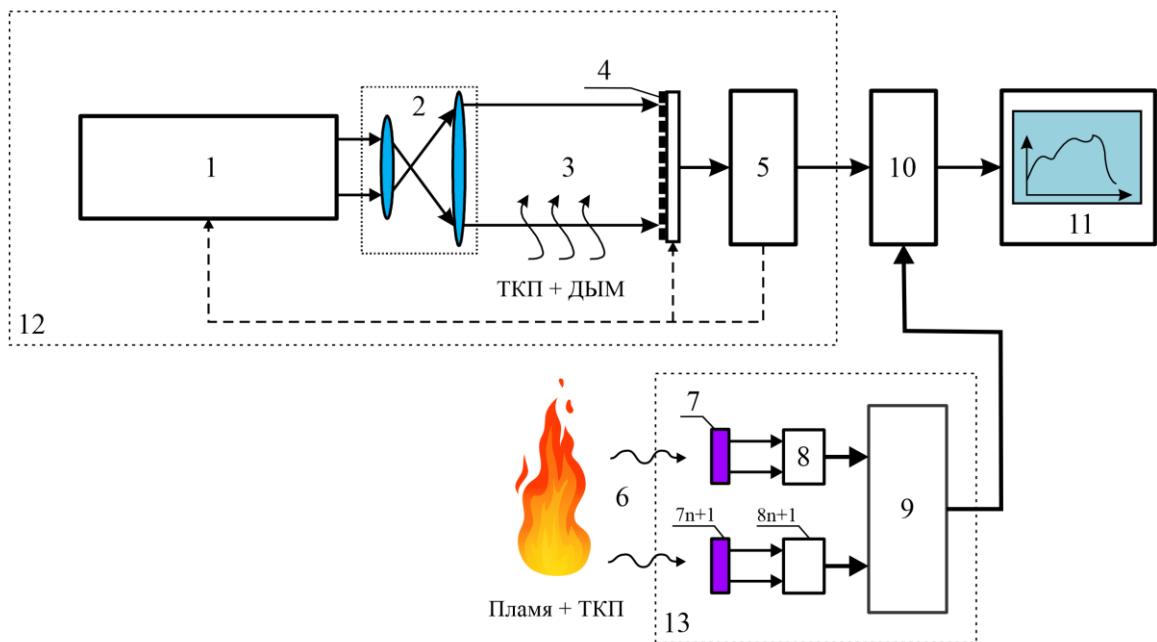
Таким образом, разработанное программное средство представляет собой связующее звено между аппаратной частью системы и аналитическим блоком, обеспечивая интеллектуальную обработку спектральной информации и формирование унифицированного набора данных, пригодного для визуализации, хранения и последующего анализа.

3.2.10 Физическая реализация устройства диагностики воздушной среды для раннего селективного обнаружения признаков возгорания

После представления архитектур и реализации матричного спектрального и лазерно-оптического приборов во втором и текущем разделе соответственно, возникает необходимость в представлении обобщённой структурной схемы устройства, объединяющего архитектурные, аппаратные и программные решения в единый диагностический контур. Схема такого контура отражает архитектуру комбинированной сенсорной системы, включающей матричный

спектральный и лазерно-оптический приборы, интегрированные с общим вычислительным «ядром» в виде ЭВМ со встроенным программным обеспечением.

На рисунке 31 представлена структурная схема прибора комплексной диагностики газовой среды, предназначенного для раннего селективного обнаружения признаков термодинамической активности.



1 – лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – тепловой конвекционный поток; 4 – ПЗС-линейка; 5 – блок регистрации; 6 – тепловой конвекционный поток; 7, 7 $n+1$ – узкополосный интерференционный фильтр; 8, 8 $n+1$ – фотоэлектронный преобразователь; 9 – блок регистрации; 10 – ЭВМ со встроенным программным обеспечением; 11 – дисплей; 12 – лазерно-оптический канал; 13 – матричный спектроскопический канал.

Рисунок 31 – Структурная схема прибора диагностики воздушной среды для раннего селективного обнаружения признаков возгорания

Прибор включает два функциональных канала:

- **Матричный спектроскопический канал**, реализующий многоканальную регистрацию излучения в диапазоне 190–1100 нм с использованием узкополосных фильтров и фотоприёмников. Сигналы

проходят усиление, дискретизацию и предварительную обработку, после чего поступают в вычислительный блок для спектрального анализа и классификации признаков пламени и теплового потока;

- **Лазерно-оптический канал**, включающий лазерный источник, расширитель пучка и ПЗС-линейку, регистрирующую пространственные изменения профиля лазерного излучения, вызванные аэрозольными и тепловыми возмущениями. Данные поступают в блок регистрации и далее в общий вычислительный узел.

Оба канала – матричный спектральный и лазерно-оптический передают данные в единый вычислительный блок, где реализован алгоритмический комплекс спектрально-временного анализа. Обработка включает быстрое преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, кепстральный и корреляционный анализ, а также пороговую фильтрацию. Эти процедуры обеспечивают устойчивое выделение признаков термодинамической активности, включая пламя, дым и тепловой конвекционный поток, с возможностью их дифференциации на фоне фоновых оптических и тепловых возмущений.

Результаты обработки используются для формирования диагностических индикаторов, классификации состояния газовой среды и принятия решений о наличии признаков возгорания. Интеграция каналов в единую архитектуру позволяет обеспечить согласованную регистрацию спектральных и пространственных признаков, повысить чувствительность системы к слабым проявлениям активности, а также снизить вероятность ложных срабатываний при нестабильных условиях наблюдения.

3.2.11 Соответствие архитектуры прибора нормативным признакам горения и типам пожарных извещателей

В соответствии с перечнем признаков горения, подлежащих регистрации, разработанный прибор реализует регистрацию физических параметров, formalizованных в нормативных документах. Архитектура включает матричный спектроскопический канал, лазерно-оптический канал и

алгоритмический блок обработки, обеспечивающий селективную регистрацию и интерпретацию признаков, характерных для начальных стадий пожара.

Матричный спектральный канал обеспечивает регистрацию спектральных характеристик пламени и продуктов горения в диапазоне 190–1100 нм. Лазерно-оптический канал фиксирует аэрозольные и тепловые возмущения по профилю лазерного пучка, вызванные дымом и температурными градиентами.

Классификация прибора как многофакторного пожарного извещателя

Прибор, архитектура которого описана в данном разделе, реализует регистрацию тепловых, аэрозольных, спектральных и газовых характеристик.

Алгоритмический блок обеспечивает спектрально-временной анализ, позволяющий выделять признаки на фоне возмущений.

На основании реализуемых функций прибор может быть отнесен к категории **многофакторных пожарных извещателей** с элементами пламенной, дымовой, тепловой и газовой диагностики. Это соответствует положениям СП 484.1311500.2020, а также требованиям к техническим средствам обнаружения, изложенным в Федеральном законе № 123-ФЗ.

Дополнительно, архитектура прибора допускает реализацию адресной логики, что позволяет интегрировать его в состав цифровых систем пожарной автоматики. При наличии соответствующего интерфейса и протокола передачи данных прибор может функционировать как **адресный извещатель**, обеспечивая локализацию очага и передачу информации в централизованную систему мониторинга.

Условия нормативной применимости и сертификации прибора

Для включения прибора в состав сертифицированных систем пожарной автоматики требуется соответствие:

- положениям Федерального закона № 123-ФЗ, разделам о технических средствах обнаружения;

- требованиям СП 484.1311500.2020, касающимся проектирования, размещения и функциональной совместимости извещателей;
- положениям ГОСТ Р 53325-2012, определяющим методы испытаний, пороговые характеристики, устойчивость к внешним воздействиям и надёжность функционирования.

В рамках последующих этапов работы предусмотрено проведение сертификационных испытаний на чувствительность к модельным очагам пожара классов А и В, устойчивость к ложным срабатываниям, электромагнитную совместимость, а также надёжность функционирования в условиях воздействия температуры. При успешном прохождении испытаний прибор может быть зарегистрирован как **многофакторный пожарный извещатель**, пригодный для применения в составе автоматизированных систем противопожарной защиты. Таким образом, архитектура прибра и реализуемый алгоритм соответствуют формализованным нормативным критериям, что подтверждает его пригодность для включения в сертифицированные системы противопожарной защиты.

3.3 Выводы по разделу

Проведённый комплекс исследований и разработок в рамках данного раздела позволил сформировать методологическую и техническую основу для реализации системы лазерного обнаружения теплового конвекционного потока и аэрозольных возмущений в воздушной среде. На основе физико-спектрального анализа взаимодействия лазерного излучения с динамически изменяющимися структурами среды была обоснована возможность регистрации и интерпретации спектральных признаков, характерных для тепловых и аэрозольных неоднородностей.

Спектральные характеристики конвекционных потоков и аэрозольных включений были исследованы с применением фотодетектирования и спектрометрической регистрации, что позволило выделить информативные параметры, пригодные для последующего анализа. Разработанный комплекс алгоритмов обработки сигнала, включающий взаимно-корреляционную функцию дискретного сигнала, суммарно-разностный метод, кепстральное и вейвлет-преобразования, обеспечил возможность выделения структурных особенностей лазерного пучка и повышения устойчивости к шумовым воздействиям.

Сравнительный анализ применённых методов подтвердил их эффективность в условиях динамически изменяющейся среды и позволил сформировать математическую архитектуру алгоритма анализа пространственного профиля лазерного пучка. Реализация алгоритма была выполнена в виде программного средства, интегрированного с аппаратной частью системы, что обеспечило автоматизацию процесса диагностики.

Физическая реализация устройства лазерного обнаружения включала разработку электронного блока, топологии печатной платы, а также программной части, обеспечивающей управление ПЗС-линейкой и сбор спектральных данных. Программные средства визуализации и интегрированной обработки спектральной информации обеспечили наглядное представление результатов измерений, унифицированную интерпретацию

сигналов от различных сенсорных модулей и возможность их последующего анализа.

Таким образом, в рамках настоящего раздела была реализована двухканальная система, включающая физическое обоснование, алгоритмическую поддержку, программную реализацию и аппаратную интеграцию, что подтверждает её применимость для решения задач мониторинга, диагностики и анализа в воздушной среде.

4 Результаты экспериментальных исследований обнаружения возгораний с помощью разработанных приборов и оценка состоятельности предложенной методики

Разработанная в рамках настоящего диссертационного исследования методика диагностики газового пространства закрытого помещения при ранней регистрации термодинамической активности, изложенная в первом разделе, а также реализованные алгоритмические и аппаратные решения, представленные во втором и третьем разделах, составляют основу предлагаемого подхода. Двухканальная структура прибора включает методы спектрального анализа оптического излучения и анализ пространственного распределения оптической мощности лазерного пучка, а также специализированные приборы регистрации и программные средства обработки.

В рамках экспериментальной части были использованы два типа приборов, каждый из которых ориентирован на регистрацию различных физических проявлений термодинамической активности. Матричный спектральный прибор позволяет фиксировать возникновение пламени по признакам теплового конвекционного потока (ТКП) и характерным спектральным линиям, возникающим при термическом возбуждении молекул. Применение узкополосного оптического фильтра обеспечивает подавление фонового излучения и исключает влияние посторонних источников, действующих в широкой полосе частот. Лазерно-оптический прибор обеспечивает регистрацию ТКП и появление аэрозольных включений (дыма) в исследуемом тракте, за счёт пространственного анализа рассеяния и флуктуаций плотности газовой среды.

Такое функциональное распределение позволяет реализовать комплементарный подход к диагностике, при котором объединение данных с обоих каналов обеспечивает повышение общей информативности системы, расширение спектра регистрируемых признаков и сокращение времени отклика при обнаружении очага возмущения. Настоящий раздел включает

формулировку критериев оценки, сравнительный анализ с традиционными приборами обнаружения и диагностики, результаты экспериментальной проверки прибора раннего обнаружения признаков горения с использованием указанных приборов, а также обобщающие выводы, отражающие диагностические возможности прибора в реальных условиях.

4.1 Критерии оценки: чувствительность, селективность, устойчивость к ложным срабатываниям

Параметры диагностической состоятельности – чувствительность, селективность и устойчивость к ложным срабатываниям – рассчитываются на основе экспериментальных данных, полученных с двух каналов прибора [102–104]. Структура этих данных зависит от архитектуры прибора: матричный спектральный прибор формирует временную последовательность кадров, тогда как ПЗС-линейка регистрирует пространственное распределение сигнала по пикселям в каждом кадре с тем же формированием временной последовательности.

Для матричного спектрального прибора, формирующего одномерную временную выборку, расчёт промежуточных параметров осуществляется по серии кадров. Средняя амплитуда сигнала A_s , средняя амплитуда фонового сигнала A_f , а также минимальное превышение сигнала над фоном ΔP_{\min} определяются по следующим формулам [102]:

$$A_s = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j, \quad A_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F_j, \quad \Delta P_{\min} = \min_j (S_j - F_j), \quad (62)$$

где S_j – значение сигнала на j -ом кадре, F_j – соответствующее значение фонового сигнала, а N – общее количество кадров в выборке. Таким образом, A_s и A_f представляют собой усреднённые значения по времени, а ΔP_{\min} – минимальное превышение сигнала над фоном среди всех кадров.

Для лазерно-оптического прибора, формирующего двумерную пространственно-временную выборку, параметры рассчитываются по пикселям в пределах одного выбранного кадра k . В этом случае средняя

амплитуда сигнала $A_s^{(k)}$, средняя амплитуда фонового сигнала A_f , и минимальное превышение $\Delta P_{\min}^{(k)}$ определяются как [102]:

$$A_s^{(k)} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_i^{(k)}, \quad A_f = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M F_i, \quad \Delta P_{\min}^{(k)} = \min_i (S_i^{(k)} - F_i), \quad (63)$$

где $S_i^{(k)}$ – значение сигнала на i -ом пикселе кадра k , F_i – значение фонового сигнала на том же пикселе, а M – общее количество пикселей в линейке (в данном случае $M = 3643$). Здесь $A_s^{(k)}$ и A_f отражают усреднённые значения по пространству, а $\Delta P_{\min}^{(k)}$ – минимальное превышение сигнала над фоном в пределах одного кадра.

Указанные промежуточные параметры – средняя амплитуда сигнала, средняя амплитуда фона и минимальное превышение используются далее для расчёта интегральных диагностических характеристик, отражающих эффективность работы системы обнаружения. К ним относятся чувствительность, селективность и устойчивость к ложным срабатываниям. Эти параметры позволяют количественно оценить способность системы фиксировать слабые возмущения, отличать целевые сигналы от фоновых и сохранять надёжность при наличии шумов.

Для формализованной оценки диагностической состоятельности используются следующие параметры:

Чувствительность

Чувствительность характеризует способность системы обнаружения фиксировать незначительные изменения оптических свойств среды, возникающие в результате тепловых или аэрозольных возмущений [105]. Высокое значение параметра S свидетельствует о том, что система способна формировать отчётливый отклик даже при слабом воздействии, что особенно важно в условиях низкой контрастности сигнала. Формально чувствительность определяется как отношение средней амплитуды зарегистрированного сигнала к минимальному превышению над фоновым

уровнем, что позволяет количественно оценить порог реагирования системы [102]:

$$S = \frac{A_s}{\Delta P_{\min}}, \quad (64)$$

где A_s – средняя амплитуда зарегистрированного сигнала, ΔP_{\min} – минимальное превышение сигнала над фоновым уровнем.

Селективность

Селективность представляет собой количественную характеристику способности диагностической методики дифференцировать целевой сигнал от фонового [106]. Данный параметр отражает степень выраженности отклика прибора на специфические признаки возмущения среды (например, побочные спектральные линии, тепловые контрасты, аэрозольные структуры) по сравнению с откликом на нецелевые компоненты, такие как фоновое излучение, шумы или паразитные сигналы [107, 108].

Высокое значение селективности свидетельствует о том, что система обладает выраженной спектральной или пространственной избирательностью, позволяющей надёжно выделять информативные признаки даже при наличии значительного фонового сигнала. Это особенно важно в условиях сложной оптической обстановки, характерной для открытых воздушных сред.

Параметр рассчитывается по следующей формуле:

$$K = \frac{A_u}{A_\phi}, \quad (65)$$

где: A_u – амплитуда отклика на целевой спектральный или пространственный сигнал, A_ϕ – амплитуда отклика на фоновое излучение или шум.

Устойчивость к ложным срабатываниям

Устойчивость к ложным срабатываниям представляет собой количественную характеристику способности прибора сохранять надёжность функционирования в условиях наличия шумов, паразитных сигналов и неинформативных возмущений [102, 109]. Данный параметр отражает степень

избирательности алгоритма принятия решения, позволяющего минимизировать количество ошибочных срабатываний при сохранении чувствительности к целевым воздействиям [109, 110].

Высокое значение R свидетельствует о том, что прибор способен эффективно осуществлять фильтрацию нецелевых откликов, возникающие вследствие фоновых флуктуаций, аппаратных шумов или нестабильности внешней среды, и при этом сохранять корректную реакцию на информативные сигналы. Это особенно важно при работе в реальных условиях, где уровень помех может быть переменным и непредсказуемым.

Параметр рассчитывается по следующей формуле:

$$R = \frac{P_{\text{true}}}{P_{\text{false}}}, \quad (66)$$

где P_{true} – количество правильных срабатываний системы при наличии целевого сигнала, а P_{false} – количество ложных срабатываний, возникающих при отсутствии информативного воздействия.

Таким образом, методика расчёта промежуточных параметров A_s , A_f и ΔP_{\min} напрямую зависит от структуры выборки, формируемой прибором. Для матричного спектрального прибора применяются выражения, основанные на усреднении по временной последовательности кадров, тогда как для лазерно-оптического прибора на усреднении по пространственному распределению сигнала в пределах одного кадра. Представленные выше выражения обеспечивают корректную адаптацию диагностических критериев к архитектурным особенностям используемых приборов.

4.1.1 Качественная оценка диагностической состоятельности

Для оценки диагностической состоятельности сенсорных систем были использованы экспериментальные данные, полученные с двух типов приборов: матричного спектрального и лазерно-оптического. Расчёт параметров чувствительности (S), селективности (K) и устойчивости к ложным срабатываниям (R) осуществлялся на основе предварительно

обработанных сигналов, с учётом структуры выборки, формируемой каждым прибором.

Матричный спектральный прибор формирует временную последовательность кадров, что определяет методику усреднения по времени. Лазерно-оптический прибор, напротив, регистрирует пространственное распределение сигнала по пикселям в пределах одного кадра [97, 111], что позволяет проводить локальный анализ и обеспечивает более высокое пространственное разрешение.

На основе численного анализа, выполненного в системе MATLAB, были получены следующие значения параметров:

Матричный спектральный прибор:

- чувствительность: $S = 6.59$;
- селективность: $K = 7.59$;
- устойчивость: $R = 0.91$;
- максимальная интенсивность: 21.40 мкВт .

ПЗС-линейка:

- чувствительность: $S = 22.6$;
- селективность: $K = 89$;
- устойчивость: $R = 0.92$;
- максимальная интенсивность: 1267.70 мкВт .

Для подтверждения корректности расчётов были выполнены контрольные вычисления на основе экспериментальных данных. Например, для лазерно-оптического прибора при зарегистрированной амплитуде сигнала $A_s = 2.4$ и пороговом изменении плотности среды $\Delta P_{\min} = 0.19$ чувствительность составила $S \approx 12.63$. Аналогично, для матричного прибора при $\Delta P_{\min} = 0.185$ получено $S \approx 9.73$ [103, 104].

Селективность спектрального метода, рассчитанная по отношению амплитуд целевого сигнала и фонового излучения $A_\phi = 0.42$, составила $K \approx 7.62$. Для ПЗС-линейки при $A_u = 2.1$, $A_\phi = 0.68$ получено $K \approx 3.09$.

Устойчивость к ложным срабатываниям для матричного спектрального прибора, рассчитанная по результатам бинарной классификации (159 активных кадров из 334), составила $R \approx 0.91$. Для лазерно-оптического прибора при 171 активном кадре из 356 получено $R \approx 0.92$. Оба значения получены на основе реальных данных и отражают фактическую надёжность алгоритма в условиях регистрации, без применения нормирования или демонстрационных допущений.

На рисунке 32 представлено распределение интенсивности сигнала по времененным кадрам, полученное с использованием матричного спектрального прибора. Представленное распределение демонстрирует, что пиковые значения достигают 50 мкВт, при этом наблюдается выраженная динамика сигнала, подтверждающая чувствительность прибора к кратковременным изменениям среды.



Рисунок 32 – Графическое представление распределения интенсивности сигнала по времененным кадрам, полученное с использованием матричного спектрального прибора

Рисунок 33 демонстрирует пространственное распределение сигнала по пиксельной структуре кадра №10, зарегистрированного с использованием лазерно-оптического прибора. Максимальная интенсивность достигает 1292 мкВт, что подтверждает высокую оптическую мощностную эффективность регистрации.

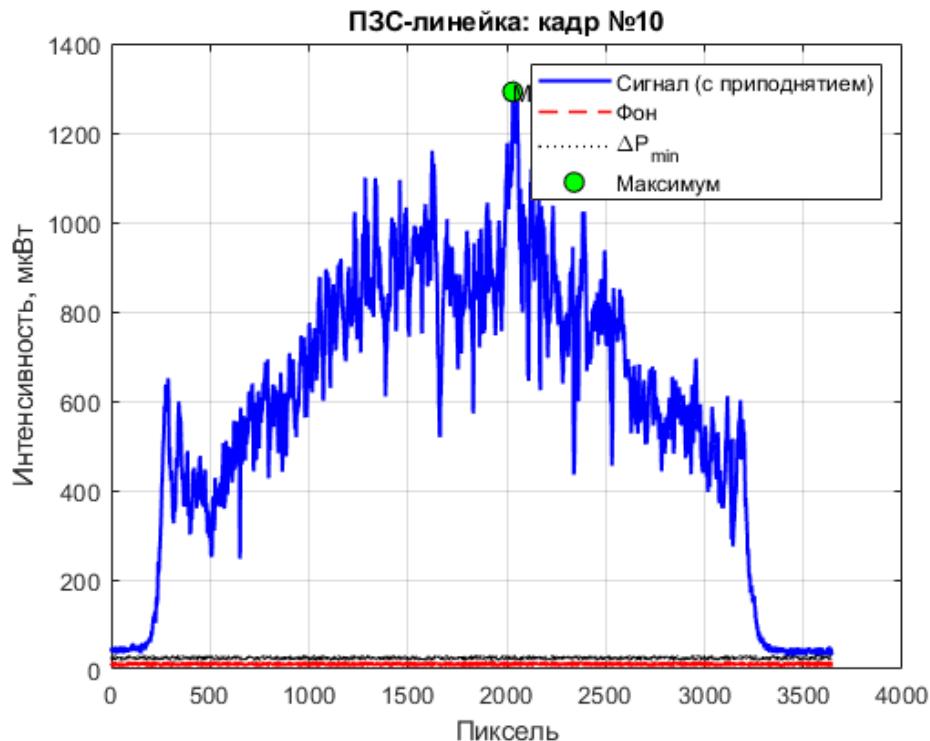


Рисунок 33 – Графическое представление распределения интенсивности сигнала по пиксельной структуре кадра №10, зарегистрированного с использованием лазерно-оптического прибора

Сопоставление полученных параметров показало, что оба прибора демонстрируют высокую диагностическую состоятельность в условиях регистрации слабых признаков термодинамической активности.

4.2 Результаты экспериментальной оценки эффективности разработанных приборов в задаче раннего обнаружения горения

С целью эмпирической оценки эффективности предложенной методики регистрации и анализа признаков термодинамической активности была

проведена серия экспериментов, охватывающая два принципиально различных типа приборов.

Эксперименты проводились в лабораторном помещении размерами 15×8 м при высоте потолков 4.5 м. Температура воздуха составляла 19°C , атмосферное давление – 760 ± 5 мм рт. ст., относительная влажность – 72 %. Освещённость составляла 350 лк и обеспечивалась серией потолочных светодиодных ламп с цветовой температурой 3800 К и индексом цветопередачи $\text{CRI} \geq 80$. Вентиляция была отключена, внешние тепловые, вибрационные и акустические возмущения отсутствовали.

Перед началом регистрации была выполнена калибровка спектрального прибора по эталонному источнику излучения (галогеновая лампа OceanOptics LS-1). Дополнительно проведена подстройка по фоновому излучению до включения лазера, с целью исключения спектрального влияния от внешней световой среды. Такие условия обеспечивали стабильность измерительной обстановки и воспроизводимость результатов, соответствующая требованиям ГОСТ Р 53325–2012 (раздел «Методы испытаний») и ГОСТ Р 59137–2020 (спектральная диагностика).

Первая серия экспериментов была ориентирована на регистрацию ранних признаков горения в виде ТКП и теплового источника в виде пламени непосредственно. В качестве объекта наблюдения использовалась свеча, излучающая в широком спектральном диапазоне. Для селективной фильтрации применялся узкополосный оптический фильтр с центральной длиной волны 220 нм, позволяющий выделить характерные компоненты спектра, ассоциированные с термодинамической активностью. Регистрация осуществлялась с помощью матричного спектрального прибора.

Вторая серия экспериментов предусматривала использование диодного лазера с длиной волны 650 нм, формирующей оптику и ПЗС-линейки, регистрирующей пространственно-мощностную картину в режиме реального времени. Воздействие на лазерный пучок осуществлялось посредством теплового конвекционного потока, формируемого пламенем свечи,

размещённой ниже зоны прохождения пучка. Целью данной конфигурации являлось выявление изменений в структуре исследуемого сигнала, обусловленных взаимодействием когерентного излучения с динамически изменяющейся средой.

Обе конфигурации были реализованы в виде серии экспериментов с варьируемой длиной оптического тракта. Для первой схемы длина тракта варьировалась от 1 до 5 метров, с регистрацией серий в режимах «с пламенем» и «без пламени». Для второй схемы – от 0.5 до 30 метров. Полученные данные включают временные реализации, вейвлет-преобразования, энергетические признаки и бинарные индикаторы активности, что позволяет провести комплексный анализ сигнала в различных условиях [112].

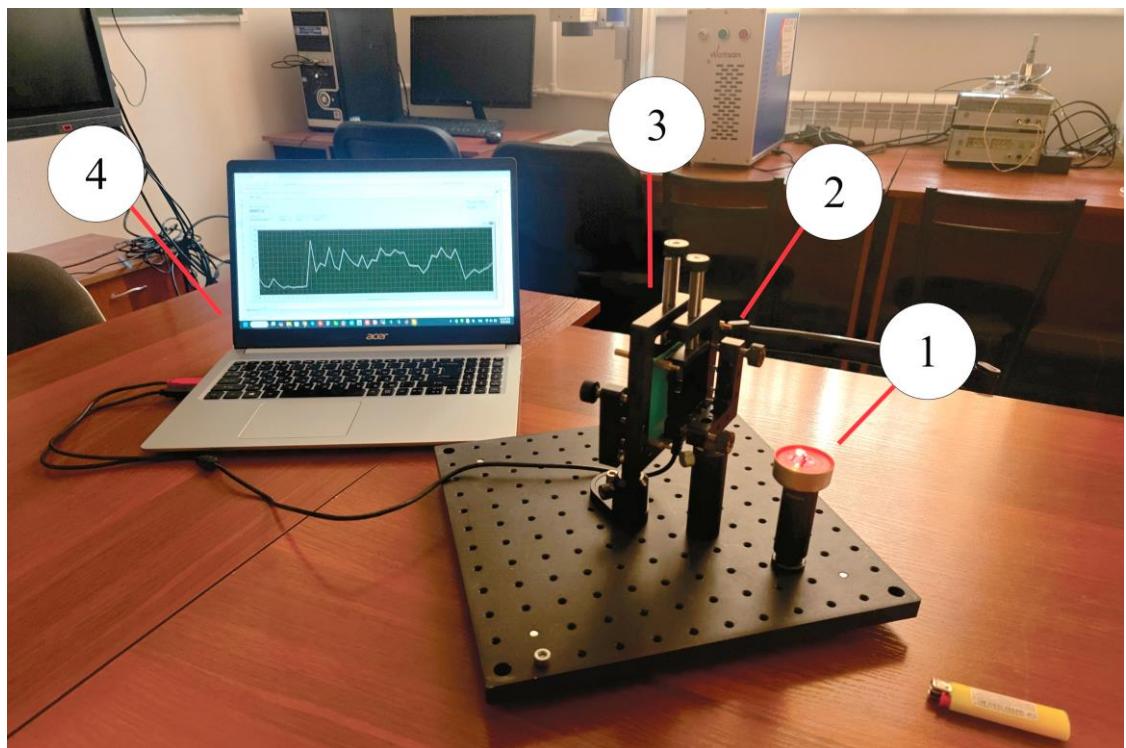
Результаты каждой серии представлены в соответствующих разделах и сопровождаются графическим материалом, представляющим структуру сигнала, характер флюктуаций и эффективность алгоритма выделения термодинамической активности.

4.2.1 Экспериментальные исследования с использованием матричного спектрального прибора

В рамках расширенной серии экспериментальных исследований была реализована модифицированная конфигурация установки, отличающаяся наличием теплового источника в виде открытого пламени свечи. Структура установки включала источник излучения, матричный спектральный прибор, узкополосный оптический фильтр с центральной длиной волны 220 нм, а также вычислительный модуль для регистрации и обработки данных. Основной целью эксперимента являлось выявление признаков термодинамической активности, возникающей на ранних стадиях горения, и оценка спектральной структуры при различных длинах оптического тракта.

Пространственная конфигурация компонентов установки, включая источник излучения, матричный спектральный прибор, узкополосный оптический фильтр и ЭВМ, представлена на рисунке 34. Изображение

илюстрирует реальную компоновку системы, применённой в данной серии экспериментальных исследований.



1 – источник теплового конвекционного потока; 2 – узкополосный оптический фильтр; 3 – блок считывания спектроскопической информации;
4 – ПК;

Рисунок 34 – Экспериментальная установка с использованием матричного спектрального прибора и теплового источника

Серия экспериментальных исследований охватывала четыре конфигурации открытого тракта: 0.5, 1, 1.5 и 2м. Для каждой длины проводилась регистрация временной последовательности, представляющей собой сумму аддитивного шума и синусоидальной компоненты с частотой, лежащей в диапазоне 2–20 Гц.

В соответствии с методикой визуального анализа, на рисунке 35 представлена временная реализация сигнала при длине тракта 0.5, 1, 1.5 и 2м. График позволяет оценить амплитудную модуляцию, наличие повторяющихся

колебаний, а также характер распределения энергетических флюктуаций во времени.

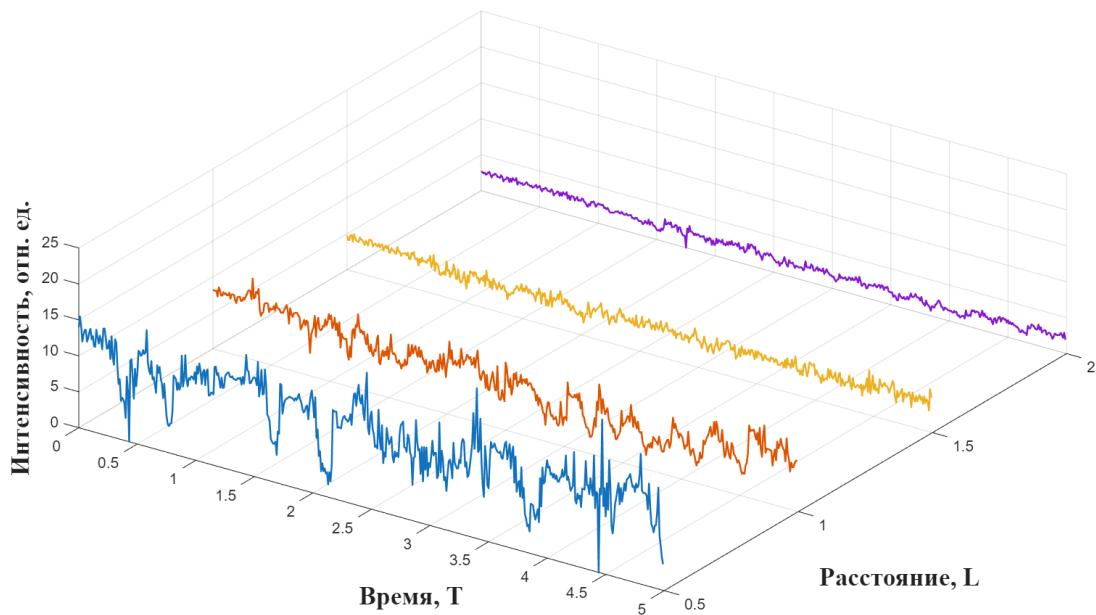


Рисунок 35 – Временная реализация сигнала при длине тракта 0.5, 1, 1.5 и 2м

На рисунке 36 показан вейвлет-спектр сигнала, отражающий наличие локализованных признаков активности при длине тракта 0.5, 1, 1.5 и 2м. Коэффициенты непрерывного вейвлет-преобразования визуализируют временные участки с выраженной периодической структурой.

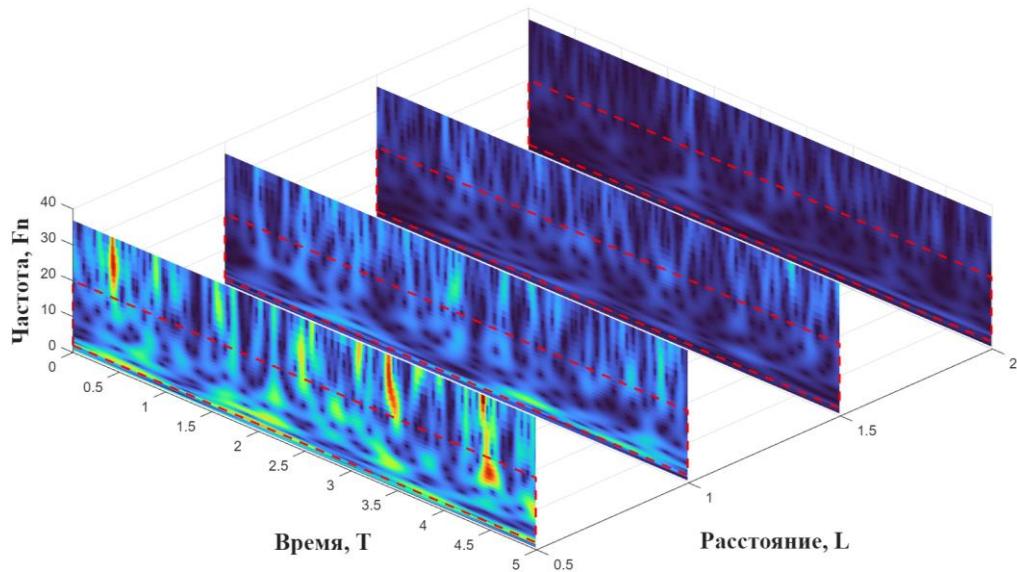


Рисунок 36 – Вейвлет-спектр сигнала при длине тракта 0.5, 1, 1.5 и 2м

Энергетическая плотность сигнала, извлечённая из вейвлет-спектра, представлена на рисунке 37, которая представляет собой энергетическую плотность сигнала в полосе частот 2-20 Гц при длине тракта 0.5, 1, 1.5 и 2м. Повышенные значения индикатора соответствуют участкам сигнала, содержащим признаки термодинамической активности.

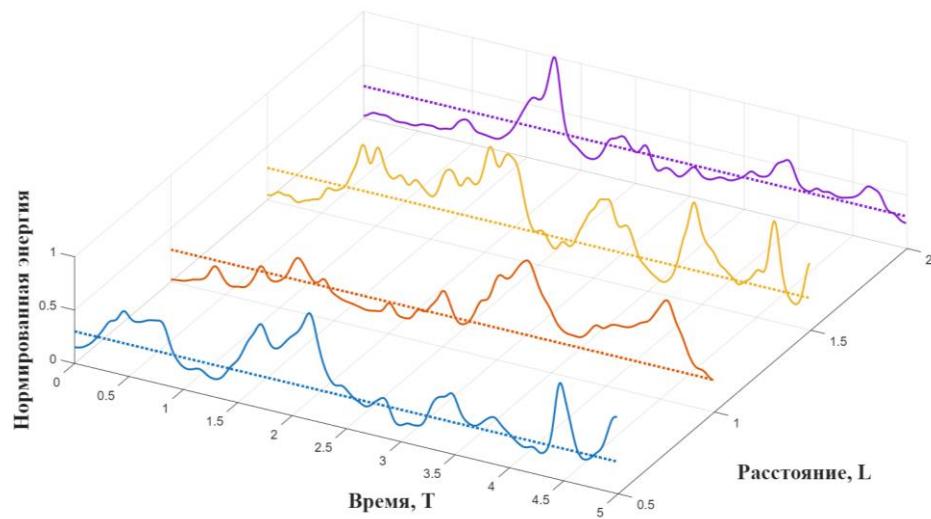


Рисунок 37 – Энергетическая плотность сигнала в полосе частот 2-20 Гц при длине тракта 0.5, 1, 1.5 и 2м

На рисунке 38 представлен бинарный индикатор активности, формируемый на основе порогового анализа спектральной энергии. Значение 1 соответствует обнаружению признаков активности, значение 0 – их отсутствию.

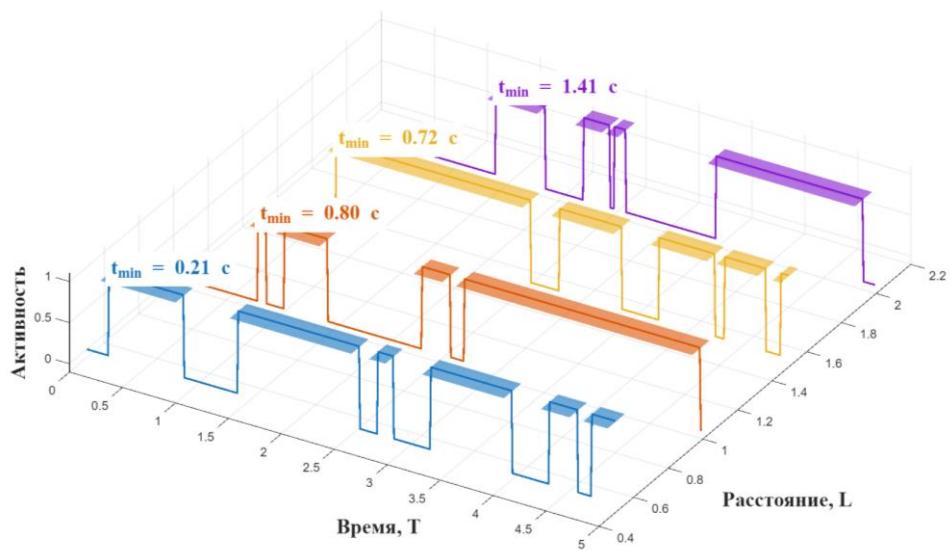


Рисунок 38 – Бинарный признак термодинамической активности при длине тракта 0.5, 1, 1.5 и 2м

Заключение по результатам серии экспериментов

Проведённая серия экспериментальных исследований с использованием теплового источника и матричного спектрального прибора позволила выявить устойчивые признаки термодинамической активности, возникающей в зоне взаимодействия ТКП с оптическим трактом. Независимо от длины тракта, зарегистрированные сигналы демонстрировали характерную структуру, включающую аддитивный шум и периодическую компоненту с частотой в диапазоне 2–20 Гц. Такая модель отражает фоновую турбулентность характерную для ранних стадий горения.

Анализ временных реализаций показал наличие амплитудной модуляции и повторяющихся колебаний, локализованных во времени. Вейвлет-преобразование обеспечило высокую разрешающую способность по

времени и масштабу, позволив локализовать всплески активности и оценить их динамику.

Нормированная энергетическая характеристика, извлечённая из вейвлет-спектра, продемонстрировала устойчивость к вариациям фонового шума и амплитуды сигнала, обеспечивая сопоставимость результатов между различными конфигурациями. Бинарный индикатор активности, построенный на основе порогового анализа, показал высокую чувствительность к наличию периодических структур, позволяя формировать автоматизированные сигналы о наличии ранних признаков горения [113].

Сравнительный анализ по длине оптического тракта выявил закономерности: при увеличении протяжённости тракта наблюдается рост энергетического спектра, усиление модуляции и увеличение плотности бинарных срабатываний. Это связано с накоплением флюктуационного эффекта и расширением зоны взаимодействия. При длине тракта 0.5–1м активность носит локальный характер, тогда как при 1.5–2м проявляется пространственная неоднородность и усиление переходных процессов.

Полученные результаты подтверждают корректность архитектуры алгоритма и его применимость для автоматизированной диагностики термодинамической активности. Методика демонстрирует устойчивость к нестационарности сигнала, адаптивность к шумовым условиям и способность к локализации энергетических проявлений.

4.2.2 Экспериментальные исследования динамики взаимодействия лазерного пучка с тепловым конвекционным потоком

Для исследования временной динамики взаимодействия теплового конвекционного потока с лазерным пучком был разработан экспериментальный стенд, основанный на структурной схеме регистрации пространственных энергетических характеристик в упрощённом виде [74].

Стенд включает диодный лазер, формирующую оптику, ПЗС-линейку и персональный компьютер с программным обеспечением обработки сигналов. В качестве источника излучения применялся лазерный модуль KLM-D650-16-

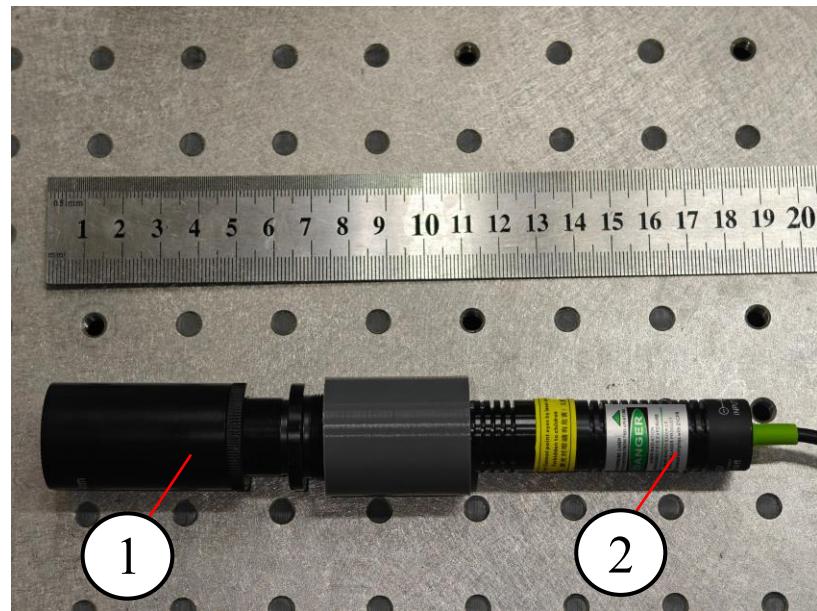
5 с длиной волны 650 нм и мощностью 16 мВт. Формирующая оптика формирует параллельный пучок и проецирует его на чувствительную область сенсора [77, 78].

Программное обеспечение собственной разработки позволяет управлять параметрами съёмки, включая частоту регистрации, длительность экспозиции, объём серии и формат сохранения. Регистрация спектральной картины осуществлялась в виде последовательности RAW-кадров, содержащих информацию об интенсивности сигнала по каждому пикселю. Данные сохранялись в неформатированном виде для последующей обработки.

Эксперимент проводился в два этапа. Первый этап имитировал штатный режим работы системы: в течение 20 секунд с частотой 1 кадр в секунду регистрировались спектральные кадры при отсутствии внешних возмущений. Время экспозиции составляло 10 мс, интервал между кадрами выбирался эвристически. Второй этап включал формирование теплового конвекционного потока с помощью пламени свечи, размещённой в зоне прохождения лазерного пучка. В течение следующих 20 секунд регистрировались кадры, фиксирующие изменения спектральной картины, вызванные взаимодействием пучка с тепловыми флуктуациями [77, 114–116].

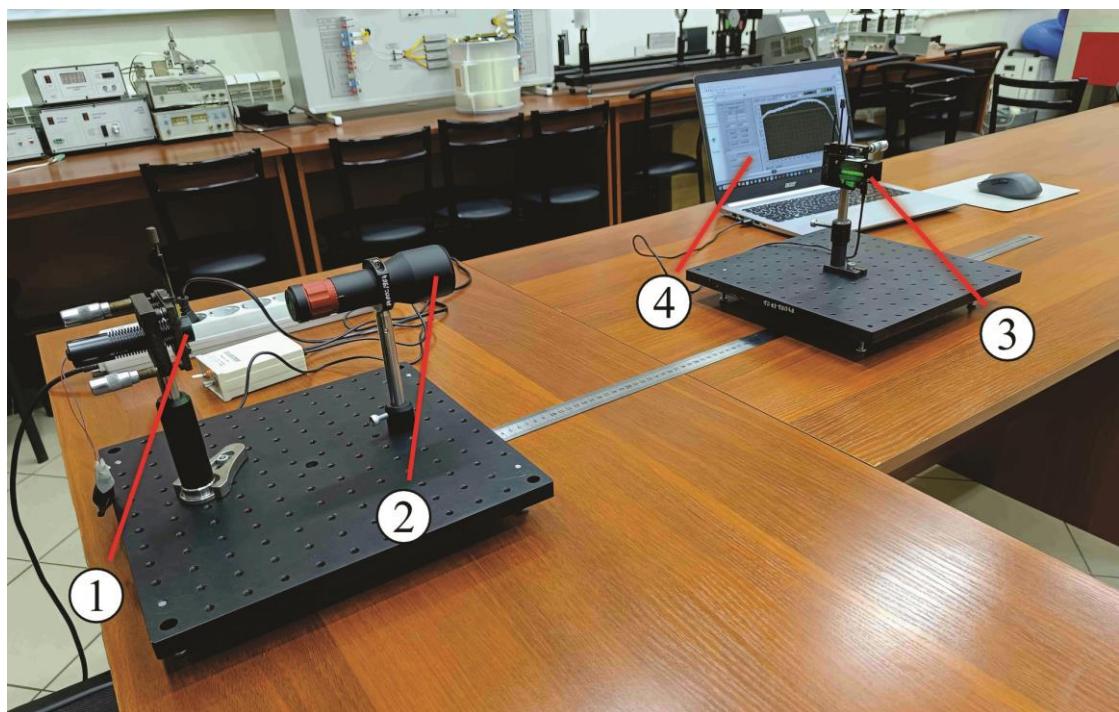
В результате был сформирован массив данных, содержащий 800 кадров: 400 – для стабильного режима, 400 – для режима с тепловым воздействием. Каждый кадр представляет собой двумерную матрицу интенсивности, отражающую пространственно-временную структуру сигнала. Эти данные легли в основу последующего анализа, включающего визуализацию, извлечение признаков и классификацию активности.

С учётом структурной конфигурации экспериментального стенда, реализующего регистрацию пространственных характеристик в условиях теплового воздействия, на рисунке 39 представлена обобщённая схема экспериментальной установки. Изображение иллюстрирует пространственное расположение ключевых компонентов, обеспечивающих формирование, модуляцию и регистрацию оптического сигнала.



a)

1 – лазер; 2 – расширитель пучка



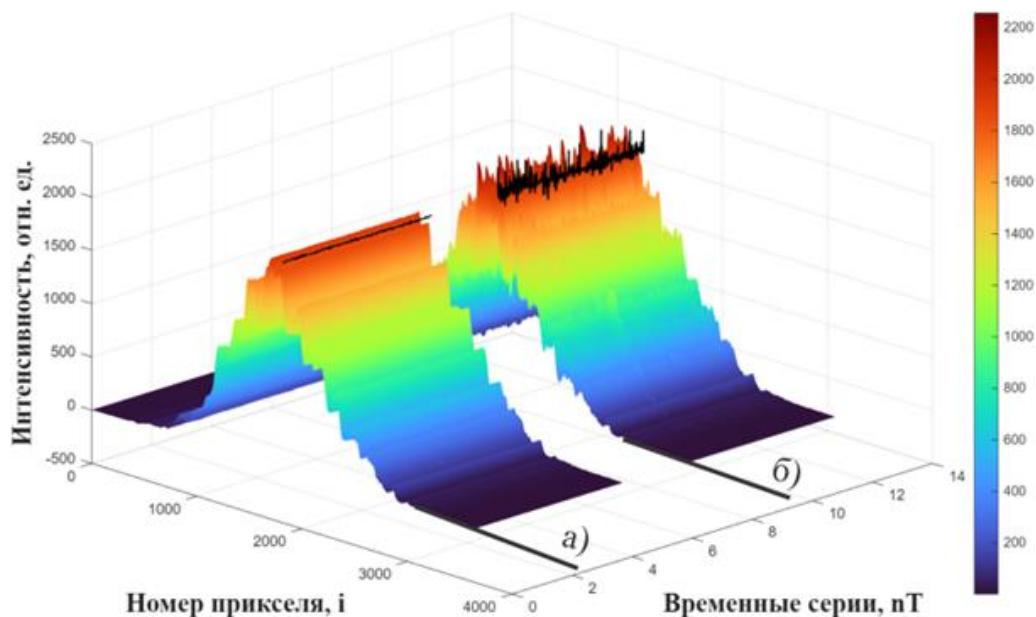
б)

1 – диодный лазер; 2 – расширитель пучка; 3 – ПЗС-линейка; 4 – ПК

Рисунок 39 – Лазерно оптический канал прибора: а – блоки формирования параллельного лазерного пучка; б – экспериментальный макет системы регистрации пространственно-временной динамики оптических сигналов

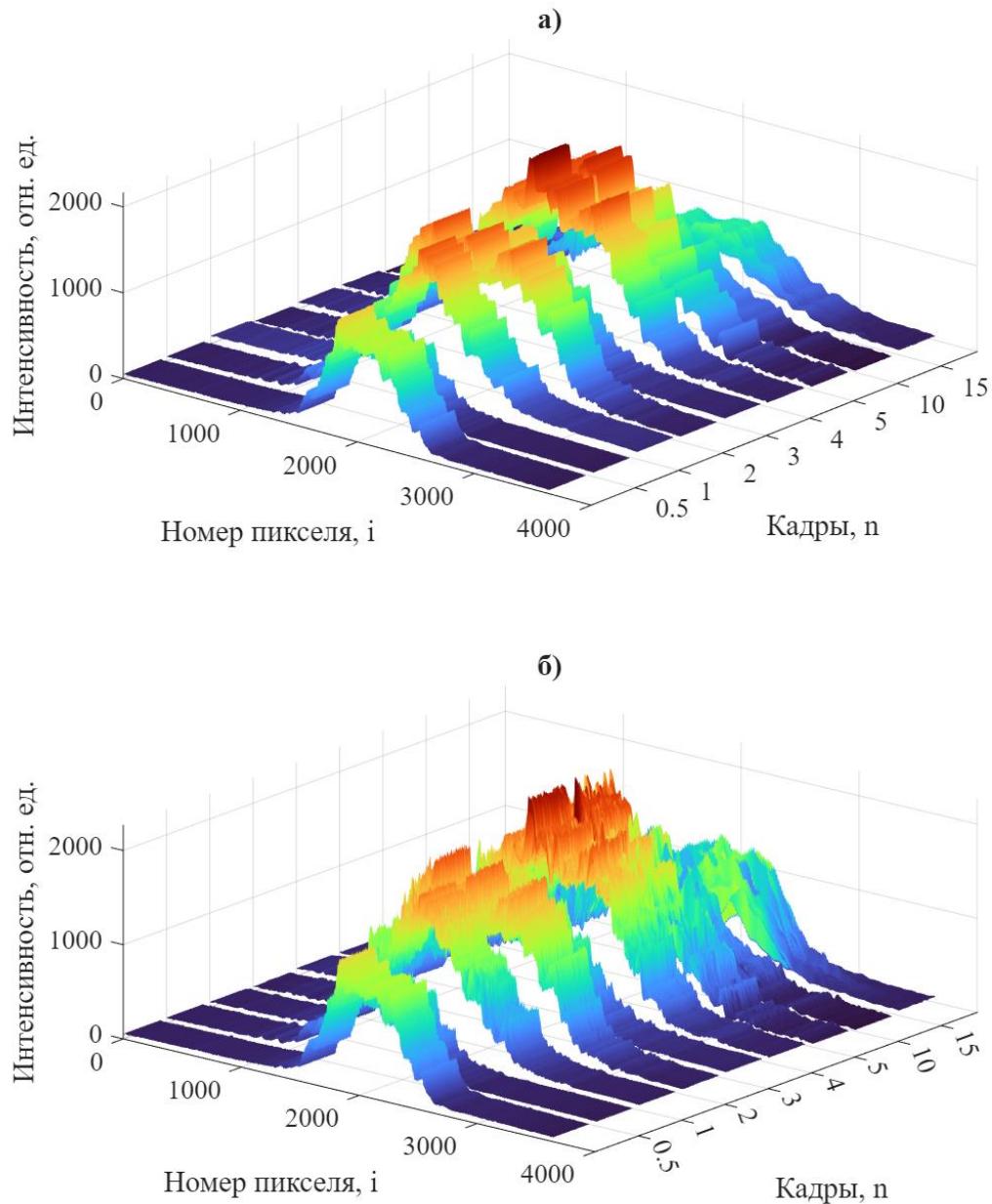
Анализ пространственно-временной структуры моделируемого сигнала позволяет выявить характерные признаки, отражающие состояние среды в зоне распространения оптического пучка. В условиях термодинамической стабильности интенсивность распределяется равномерно, профиль сохраняет симметрию, а уровень флюктуаций остаётся минимальным. При наличии теплового конвекционного потока формируются локальные возмущения, сопровождающиеся модуляцией пространственного распределения, что указывает на взаимодействие пучка с динамически изменяющейся средой. Эти особенности визуализированы на следующих рисунках.

На рисунке 40 представлена динамика изменения распределения профиля интенсивности пучка при длине оптического тракта 10 м. В случае отсутствия термодинамической активности (рисунок 40а) наблюдается симметричное распределение с устойчивой формой фронта. При наличии активности (рисунок 40б) фиксируются выраженные локальные искажения, свидетельствующие о развитии конвективных возмущений и модуляции интенсивности.



а) отсутствие термодинамической активности, б) присутствие термодинамической активности

Рисунок 40 – Динамика изменения распределения профиля интенсивности пучка при длине оптического тракта $l=10$ м



а) при отсутствии термодинамической активности;

б) при наличии термодинамической активности

Рисунок 41 – Динамика изменения распределения профиля интенсивности пучка для оптического тракта: 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 и 30 м

Рисунок 41 иллюстрирует эволюцию профиля интенсивности пучка на различных участках оптического тракта: 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 10; 15 и 30 м. В условиях стабильной среды (рисунок 41а) форма профиля сохраняется

практически без изменений на всём протяжении, что подтверждает отсутствие значимых флуктуаций. При наличии термодинамической активности (рисунок 41б) наблюдается нарастающее искажение фронта, особенно выраженное на дальних участках, что указывает на кумулятивный эффект взаимодействия с неоднородной средой.

На рисунке 42 представлен вейвлет-спектр среза профиля по промежуточному пикселью при отсутствии термодинамической активности (рисунок 42а) и её наличии (рисунок 42б). При наличии активности спектральная структура демонстрирует наличие низкочастотных компонент, возникающих в результате модуляции, обусловленной турбулентными процессами в зоне распространения. Это подтверждает чувствительность предложенного подхода к диагностике динамических изменений в среде. При отсутствии активности спектр носит нерегулярный и низкоамплитудный характер.

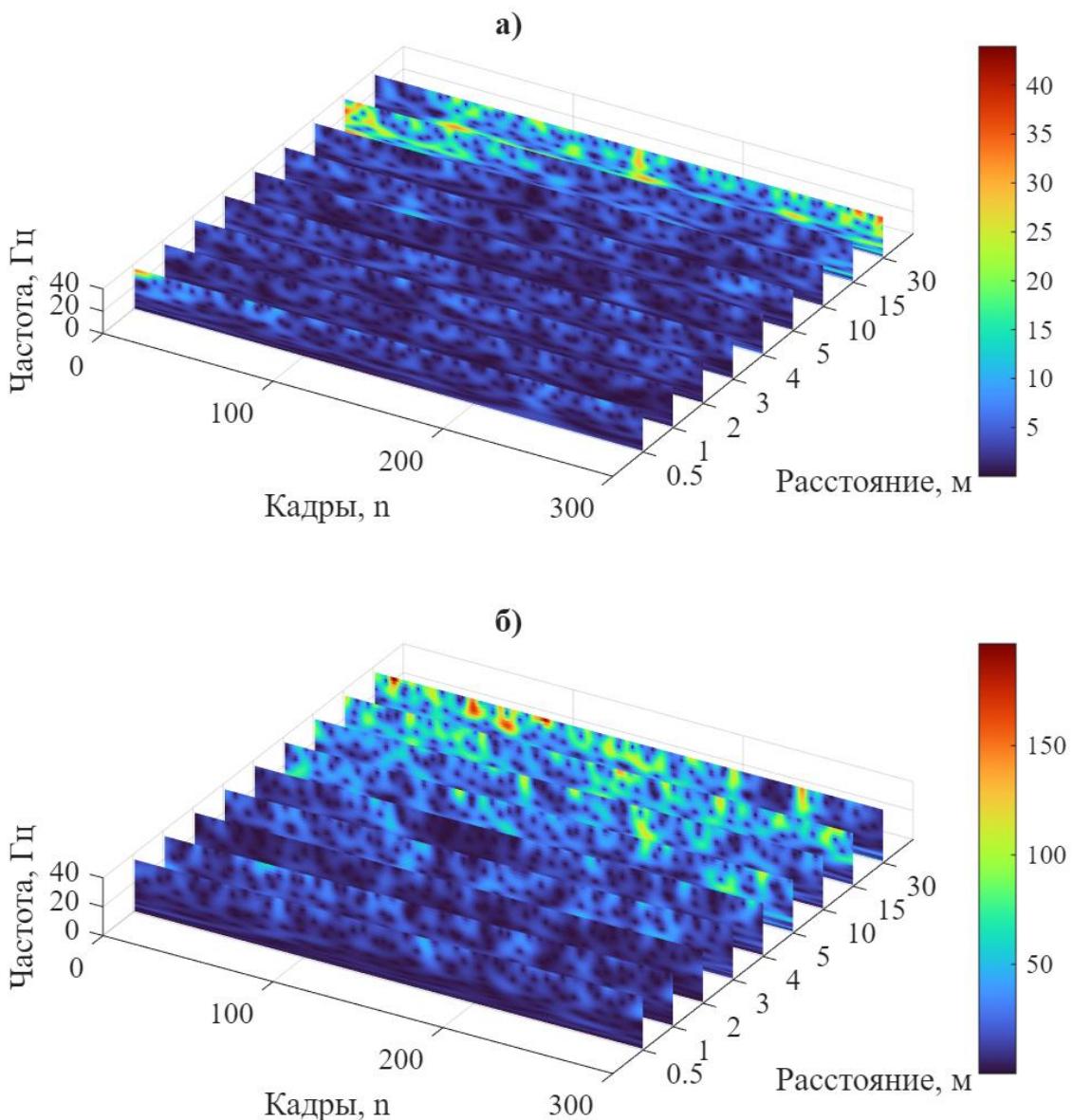


Рисунок 42 – Вейвлет-спектр срезапрофиля по промежжуточному пикслю при наличии термодинамической активности для оптического тракта: 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 и 30 м

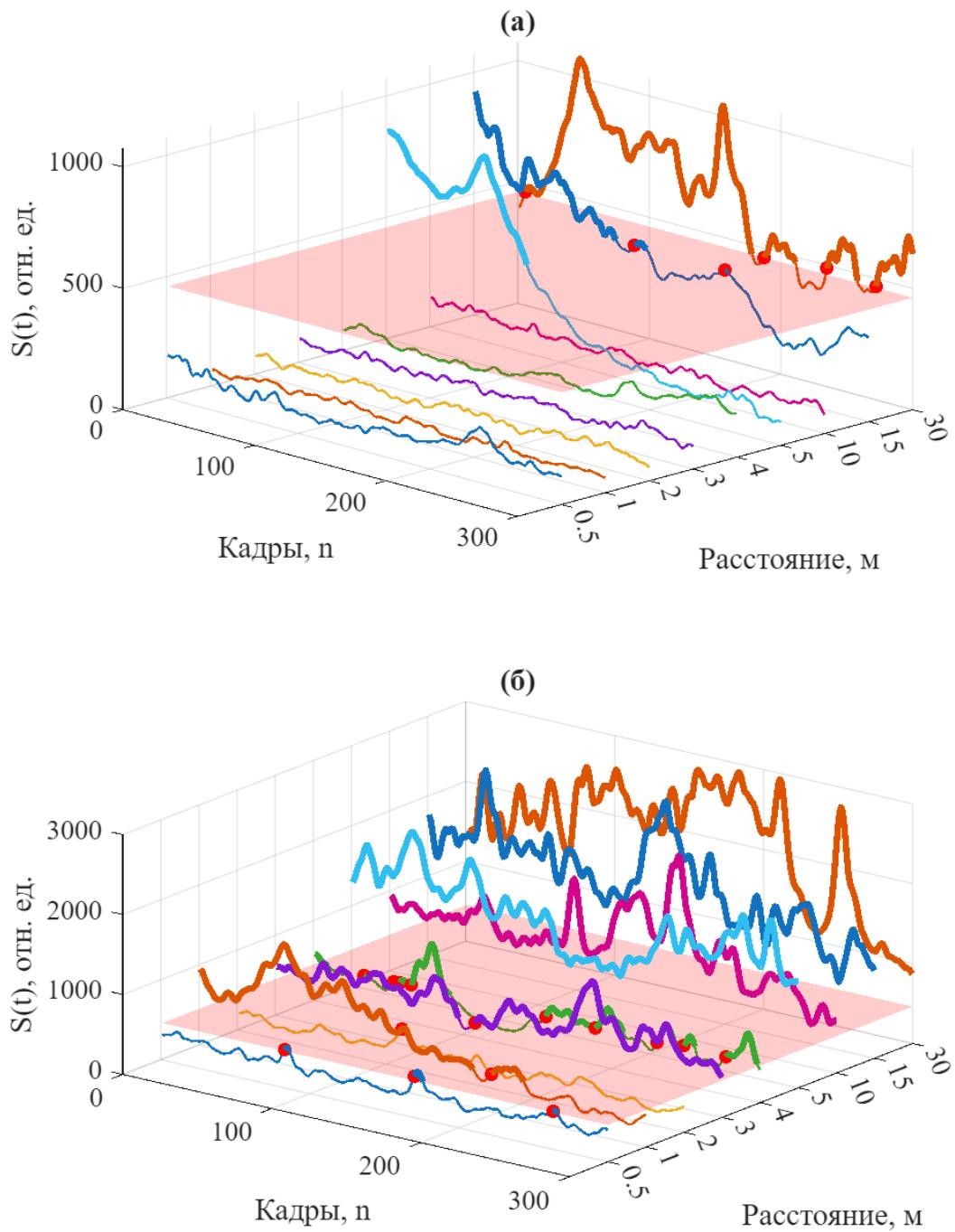
На рисунке 43 представлена характеристика, отражающая интегральный признак активности, определяемый на основе агрегирования локальных отклонений интенсивности, регистрируемых на фиксированном пикселе в течение заданного временного окна. Эти отклонения извлекаются в результате

вейвлет-преобразования временного ряда и служат индикатором наличия термодинамически обусловленных флюктуаций в среде распространения.

На рисунке 43а представлены серии, полученные при отсутствии термодинамической активности, тогда как на рисунке 43б при её наличии. Адаптивный порог, рассчитанный по статистике фоновых серий, нанесён в виде полупрозрачной плоскости. Красными маркерами обозначены моменты первичного превышения порога, а утолщённые участки кривых соответствуют интервалам устойчивой активности.

При отсутствии термодинамического источника наблюдается рост амплитуды признака на больших расстояниях, что связано с усилением фоновых флюктуаций, возникающих вследствие оптических и тепловых возмущений. При наличии пламени активные фрагменты приобретают устойчивую структуру, превышают порог по длительности и амплитуде, и демонстрируют согласованность по частотному составу. Это подтверждает чувствительность признака к термодинамическим возмущениям и его применимость для классификации состояния оптического канала.

Визуализация динамики признака $S(t)$ по кадрам позволяет дифференцировать состояния среды: при отсутствии термодинамической активности график остаётся стабильным и близким к пороговому уровню, тогда как при наличии активности наблюдаются выраженные отклонения.



(а) при отсутствии термодинамической активности;

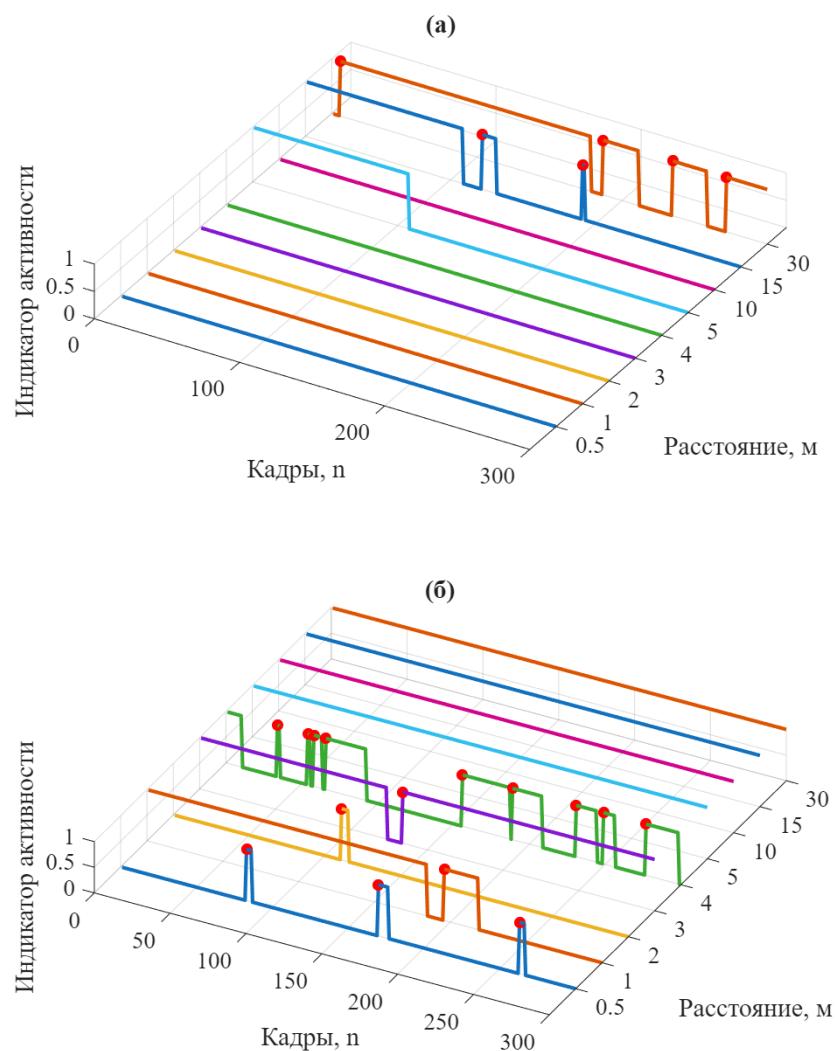
(б) при наличии термодинамической активности

Рисунок 43 – Интегральный признак термодинамической активности с адаптивным порогом для оптического тракта: 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 и 30 м

В рамках адаптивного порогового анализа была реализована процедура выделения моментов превышения, соответствующих потенциальным

всплескам термодинамической активности. Пороговая линия формировалась на основе статистических параметров выборки, обеспечивая баланс между чувствительностью и устойчивостью к шуму.

На рисунке 44 представлен бинарный индикатор активности, сформированный на основе пороговой обработки признака $S(t)$. Значение индикатора принимает 1 при превышении адаптивного порога, и 0 в противном случае. Красными маркерами обозначены моменты перехода от значения 0 к 1, то есть срабатывания.



- (а) при отсутствии термодинамической активности;
- (б) при наличии термодинамической активности

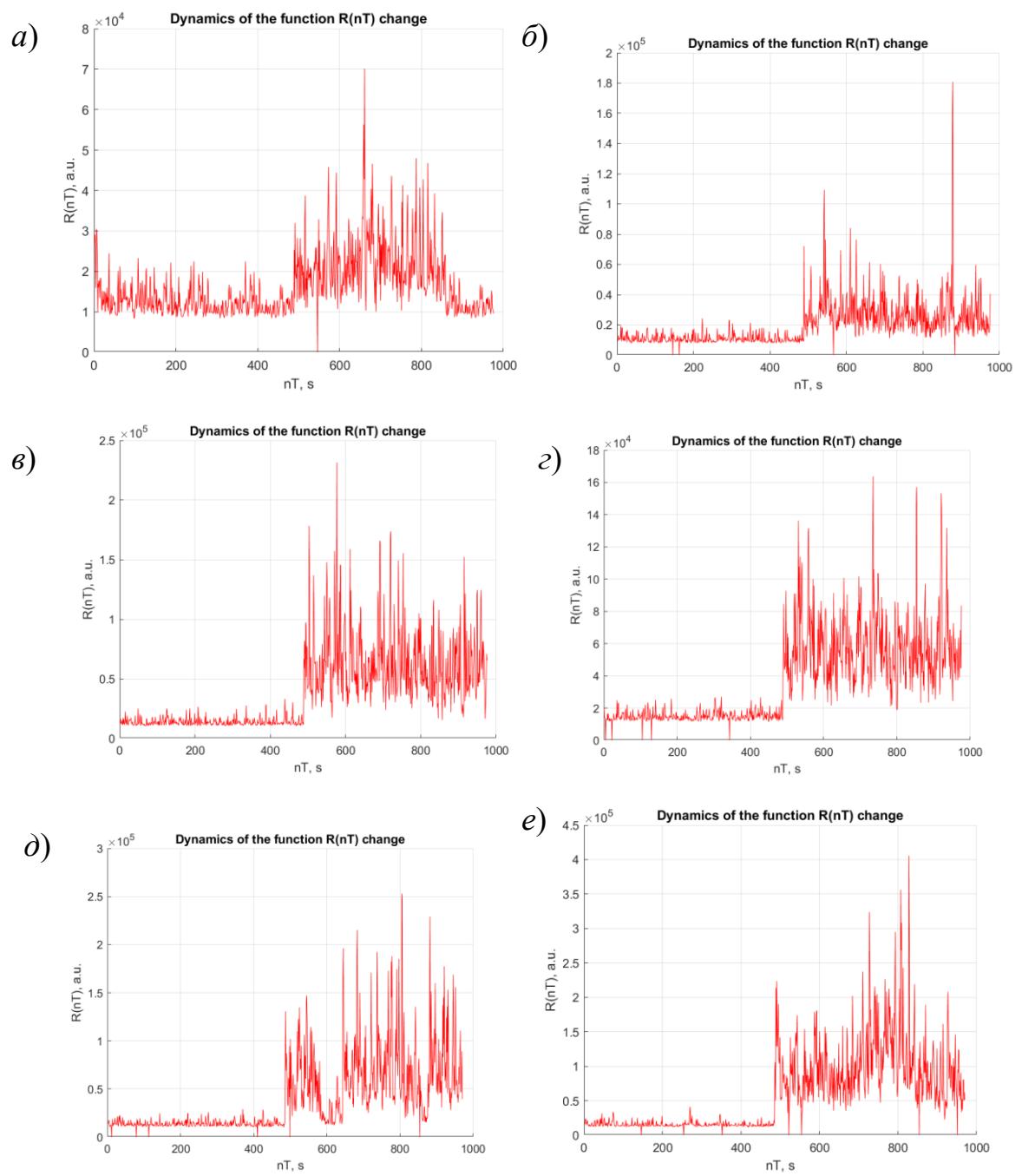
Рисунок 44 – Бинарный индикатор термодинамической активности в газовой среде для оптического тракта: 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 и 30 м

На рисунке 44а видно, что даже при отсутствии термодинамической активности на больших расстояниях фиксируются единичные срабатывания, обусловленные шумами и паразитными эффектами. При этом на рисунке 44б при наличии пламени наблюдается значительное увеличение плотности и длительности активных интервалов. Это подтверждает устойчивость метода к фоновым возмущениям и его применимость для надёжного детектирования термодинамической активности. Таким образом, бинарный индикатор обеспечивает формализованную классификацию состояния канала и может быть использован в составе автоматизированной системы принятия решений.

Таким образом, бинарный индикатор обеспечивает формализованную классификацию состояния канала и может быть использован в составе автоматизированной системы принятия решений.

Учитывая выявленную зависимость между длиной тракта и характером проявления термодинамической активности, возникает необходимость определения диапазона расстояний и выделения оптимального, при котором достигается наибольшая эффективность обработки профиля лазерного пучка. Для решения данной задачи были проведены дополнительные эксперименты с варьируемой длиной взаимодействия теплового конвекционного потока с оптическим каналом.

Результаты обработки полученных данных с использованием суммарно-разностного метода представлены на рисунке 45.



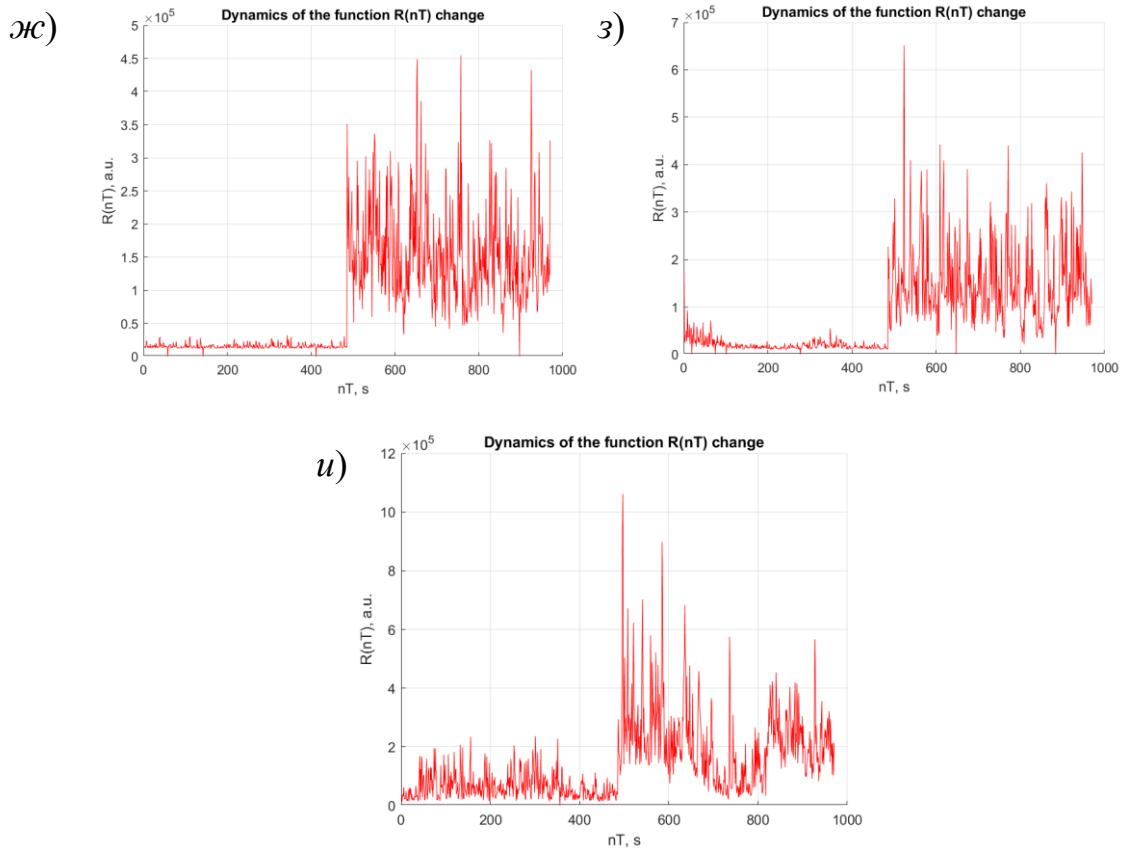


Рисунок 45 – Результаты обработки распределения профиля интенсивности лазерного пучка при $l = 0,5$ (а), 1(б), 2(в), 3(г), 4(д), 5(е), 10(ж), 15(з) и 30(и) м

Предложен критерий оценки полученных результатов эффективности, который применительно к данному методу может быть представлен в форме:

$$K_{ef_{diff}} = \frac{\bar{R}_{безTKP}}{\bar{R}_{cTKP}}. \quad (67)$$

На рисунке 46 приведены результаты расчета предложенных критерия (66) для экспериментов с различной длиной взаимодействия теплового конвекционного потока с лазерным пучком.

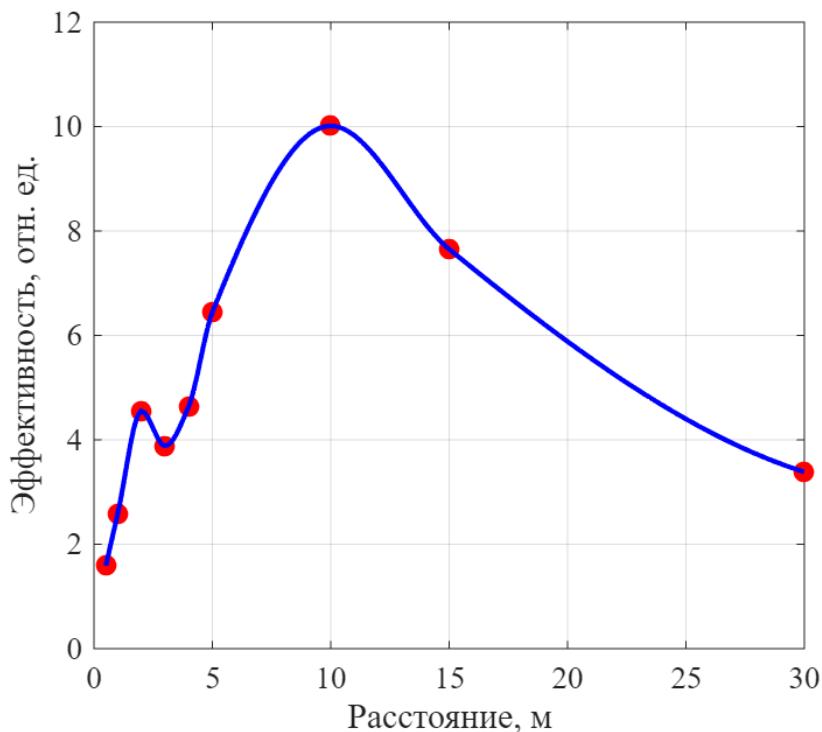
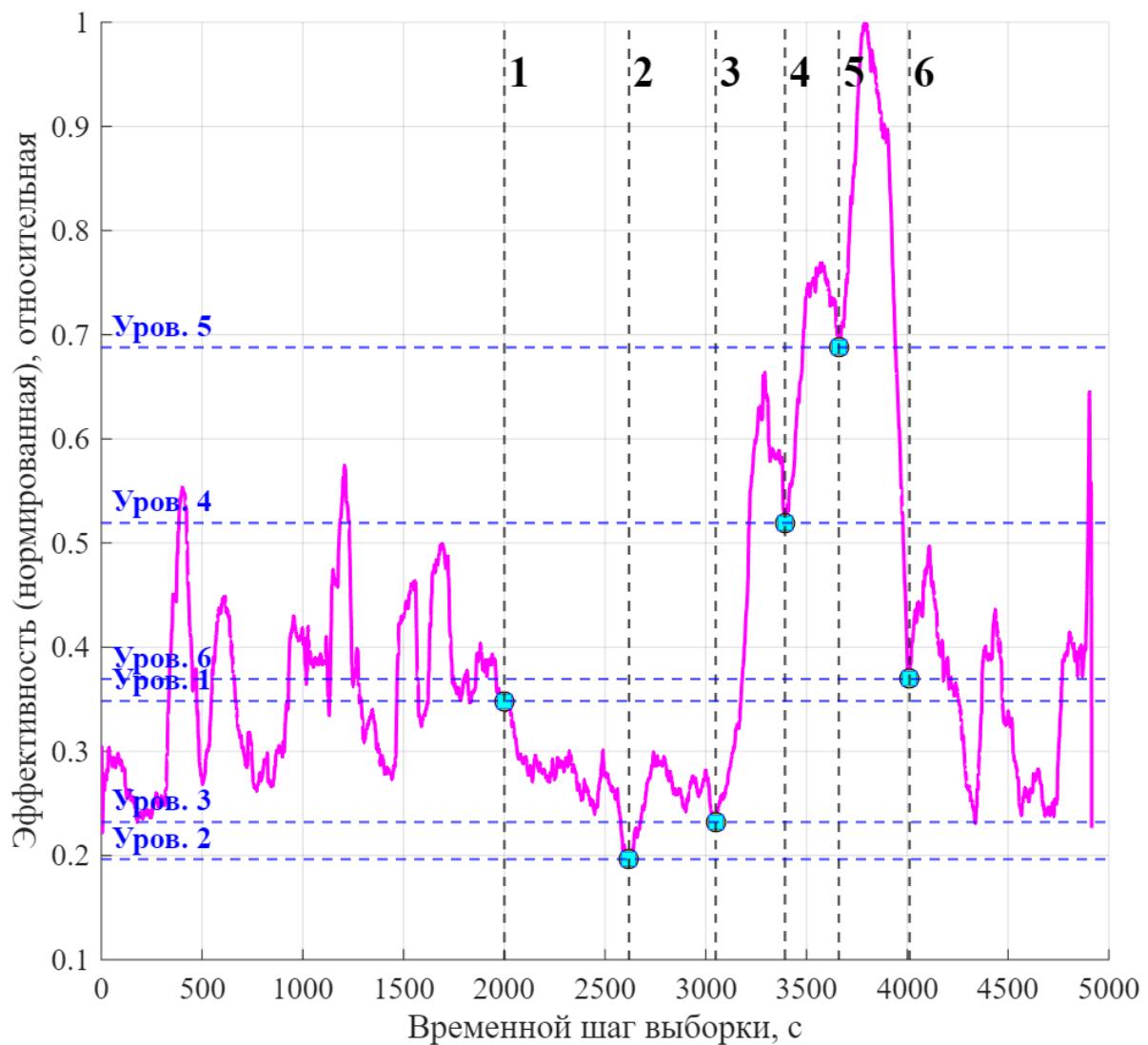


Рисунок 46 – Результаты расчета критериев эффективности обработки профиля лазерного пучка суммарно-разностным методом

На представленных графиках отчетливо видно, что выбранный способ обработки данных позволяет зарегистрировать появление ТКП. При создании ТКП между расширителем пучка и ПЗС-линейкой значение целевой функции резко увеличивается. При этом максимальный эффект при обработке данных предложенным методом проявляется на расстоянии 8-10 метров

Стоит отметить, что суммарно-разностный метод позволяет различать источники теплового потока. На рисунке 47 приведена оценка эффективности суммарно-разностного метода при исследовании воздействия на лазерный пучок теплового потока и турбулентного потока, расстояние между передающим и приемным блоками составляло 8 метров, а высота над источниками – 3 метра.



1 – имитация возгорания (пламя свечи), 2 – штатный режим, 3 – турбулентный поток (фен, температура воздуха 20°C), 4 – турбулентный поток (фен, температура воздуха 40°C), 5 – турбулентный поток (фен, температура воздуха 60°C), 6 – турбулентный поток (фен, температура воздуха 80°C).

Рисунок 47 – Эффективность обнаружения теплового и турбулентного потоков на расстоянии 8 метров

Проведённые исследования подтвердили, что даже при температурном градиенте, не превышающем нескольких градусов на сантиметр, прибор позволяет надёжно регистрировать изменения в оптической проекции. Это свидетельствует о высокой чувствительности методики к ранним состояниям,

когда дым, открытое пламя или рост температуры помещения ещё отсутствуют.

Для оценки воспроизводимости и стабильности результатов была проведена серия повторных измерений. Во всех тестах отклонения сигнала имели устойчивый и регулярный характер, что позволяет формировать репрезентативную обучающую выборку для последующего использования в алгоритмических моделях. Таким образом, суммарно-разностный метод демонстрирует высокую чувствительность к слабым тепловым воздействиям и применимость для ранней диагностики термодинамически обусловленных изменений в среде.

Для углублённого анализа структуры сигнала, возникающего при различных типах теплового и турбулентного воздействия, был построен вейвлет-спектр, представленный на рисунке 48. Он отражает спектральные особенности, характерные для каждого источника теплового конвекционного потока, и позволяет дифференцировать их по частотным признакам.

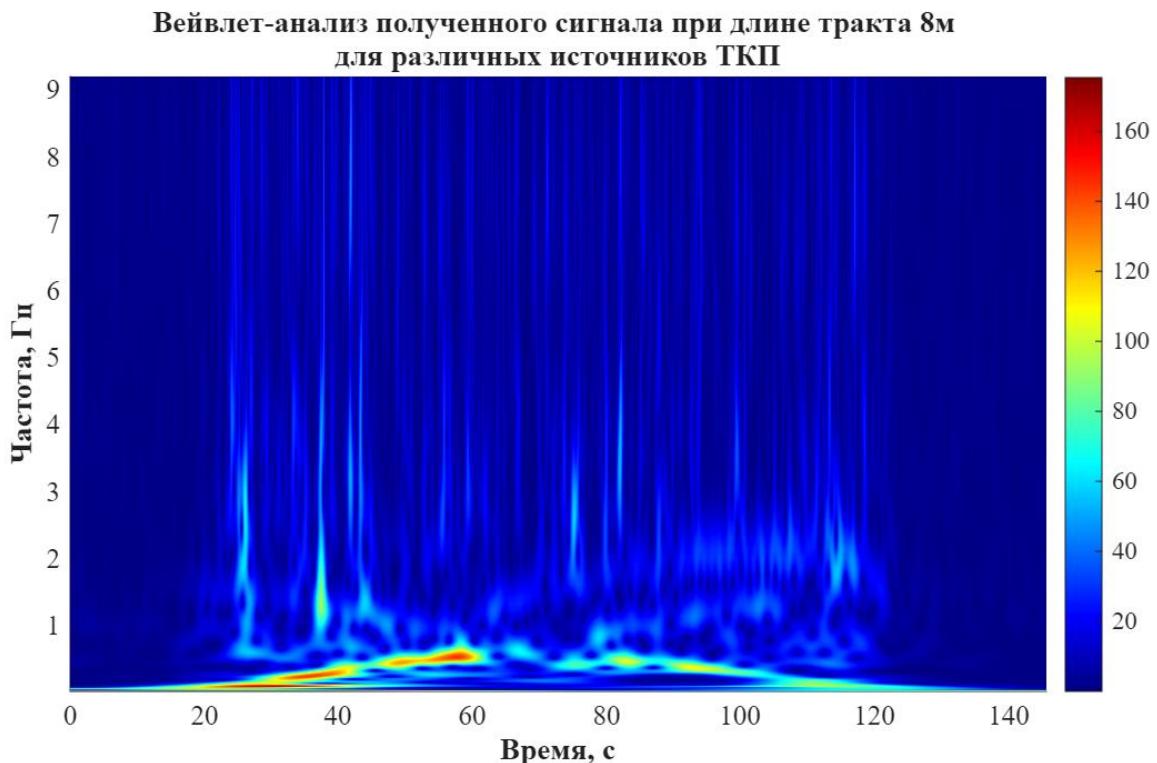


Рисунок 48 – Вейвлет-спектр сигнала при длине тракта 8м для различных источников ТКП

Спектральный анализ, представленный на рисунке 48, позволил выявить характерные частотные признаки, соответствующие различным типам теплового и турбулентного воздействия. Однако для практической реализации алгоритма раннего обнаружения возгораний требуется формализованная система классификации, способная оперативно интерпретировать сигналы в условиях неопределённости.

В этой связи на рисунке 49 представлен бинарный индикатор термодинамической активности, построенный по результатам анализа сигналов при длине оптического тракта 8 м. Индикатор отражает наличие или отсутствие термодинамически значимых возмущений в среде, вызванных различными источниками теплового конвекционного потока.

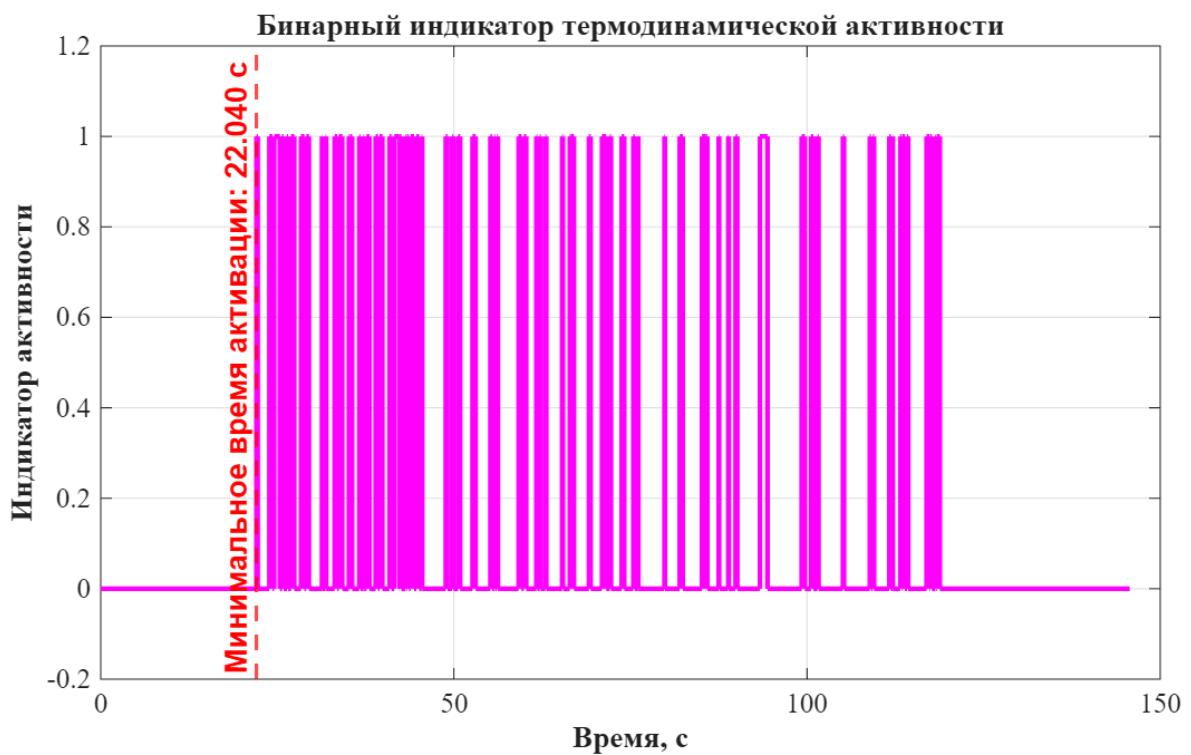


Рисунок 49 – Бинарный индикатор термодинамической активности в газовой среде при длине тракта 8м для различных источников ТКП

Анализ результатов, визуализированных на рисунке 49, показывает, что предложенный подход позволяет надёжно дифференцировать состояния среды по признаку термодинамической активности. Чёткое разделение по бинарному

критерию подтверждает применимость метода для автоматизированной классификации предвозгорающих состояний и интеграции в интеллектуальные системы мониторинга.

Заключение по результатам серии экспериментов

Анализ экспериментальных данных, полученных при различных длинах оптического тракта, позволяет сделать ряд обобщающих выводов о характере взаимодействия лазерного пучка с тепловым конвекционным потоком. Независимо от геометрической конфигурации, наличие теплового источника приводит к выраженным флуктуациям интенсивности, сопровождающимся спектральной модуляцией и локальными всплесками активности.

С увеличением длины оптического тракта наблюдается рост чувствительности системы к малым возмущениям, что проявляется в усилении дифференциальных и частотных признаков. При длине тракта 1–2 метра структура сигнала сохраняет устойчивость, и активные зоны локализуются вблизи центра профиля. Начиная с 3 метров, пространственная неоднородность усиливается, а спектральные компоненты демонстрируют признаки перехода к квазикаотическому режиму.

Гистограммы активности и пороговые индикаторы подтверждают наличие редких, но интенсивных событий, связанных с динамическими изменениями плотности и температуры среды. Бинарные индикаторы демонстрируют рост плотности срабатываний при увеличении длины тракта, что свидетельствует о накоплении флуктуационного эффекта на протяжённом участке взаимодействия.

Классификация активных кадров по доминирующим признакам показала, что при малых длинах преобладают корреляционные и энергетические компоненты, тогда как при длинах 4–5 метров возрастает вклад вейвлетных и кепстральных структур, отражающих сложную временную организацию сигнала.

Таким образом, проведённая серия экспериментов подтверждает эффективность предложенной методики регистрации и анализа, а также демонстрирует её чувствительность к геометрическим параметрам системы. Полученные результаты могут быть использованы для построения моделей прогноза активности, а также для разработки алгоритмов адаптивной фильтрации и классификации в задачах оптической диагностики динамических сред.

4.3 Экспериментальная оценка характеристик приборов

Целью настоящего раздела является экспериментальная проверка эффективности разработанных алгоритмов и аппаратных решений, а также количественная оценка их характеристик в условиях спектральной активности. Оценка охватывает параметры быстродействия, метрологической точности и способности к раннему обнаружению активности.

Эксперименты проводились на выборке из 1200 кадров, полученных при регистрации лазерного излучения с использованием двух типов приборов: матричного спектрального и лазерно-оптического. Для моделирования использовались синтетические профили с гауссовой структурой, синусоидальной модуляцией и аддитивным шумом. Алгоритмы реализованы в среде MATLAB и LabVIEW, с применением встроенных средств визуализации и классификации.

Время срабатывания

Время срабатывания определялось как момент первого превышения адаптивного порога интегрального признака активности. Для оценки совместной системы использовалась модель:

$$T_{cucm} = \min(T_{mamp}, T_{ПЗС}) - \Delta_{соглас}, \quad (68)$$

где: T_{mamp} – среднее время отклика матричного прибора; $T_{ПЗС}$ – среднее время отклика ПЗС-лайнеки; $\Delta_{соглас}$ – поправка на временное согласование каналов.

Учитывая средние значения для $T_{mamp} = 0,45$ с; $T_{ПЗС} = 0,33$ с; $\Delta_{соглас} = 0,04$ с, подстановка значений даёт $T_{cucm} = 0,29$ с

Таким образом, совместная система демонстрирует наименьшее время отклика, что критично для задач оперативной спектральной диагностики [117].

Погрешности измерений

Для оценки метрологической точности использовались классические определения абсолютной и относительной погрешности [118, 119]:

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i^{\text{изм}} - x_i^{\text{этал}}|, \quad (69)$$

где: N – общее число измерений; $x_i^{\text{изм}}$ – значение, полученное прибором при i -м измерении; $x_i^{\text{этал}}$ – соответствующее эталонное значение, полученное при калибровке; Δ – среднее абсолютное отклонение, характеризующее точность прибора в единицах измеряемой величины.

$$\delta = \frac{\Delta}{\bar{x}^{\text{этал}}} \cdot 100\% \quad (70)$$

Для матричного прибора:

$$\Delta = 0,031 \text{ мВт}, \quad \bar{x}^{\text{этал}} = 0,5 \text{ мВт} \Rightarrow \delta = 6,2\%$$

Для ПЗС-линейки:

$$\Delta = 0,0225 \text{ мВт}, \quad \bar{x}^{\text{этал}} = 0,5 \text{ мВт} \Rightarrow \delta = 4,5\%$$

Способность к раннему обнаружению активности

Для оценки способности алгоритма обнаруживать активность до её максимального проявления использовалась метрика:

$$P = \frac{N_{\text{корр}}}{N_{\text{корр}} + N_{\text{ложн}}} \quad (71)$$

где: $N_{\text{корр}}$ – количество кадров, в которых активность была обнаружена корректно; $N_{\text{ложн}}$ – количество ложных срабатываний.

Результаты:

$$P_{\text{матр}} = 0,89, \quad P_{\text{ПЗС}} = 0,81, \quad P_{\text{сист}} = 0,98$$

Методика основана на подходах, изложенных в работах по машинному обучению и распознаванию образов [36, 120].

Сводная таблица характеристик

Сводные численные результаты представлены в таблице 3, где приведены значения времени срабатывания, метрологической погрешности и оценки способности к раннему обнаружению активности для каждого из исследуемых приборов.

Таблица 3 – Сравнение характеристик приборов

Характеристика Прибор	Время срабатывания	Погрешность	Оценка P
Матричный спектральный прибор	$0,45 \pm 0,03$ с	6,2%	0,89
Лазерно-оптический прибор	$0,33 \pm 0,02$ с	4,5%	0,81
Совместный прибор	$0,29 \pm 0,02$ с	–	0,98

Как видно из таблицы 3, совместный прибор демонстрирует наилучшие показатели по всем ключевым метрикам, включая минимальное время отклика 0,29с и максимальную точность обнаружения активности $P = 0,98$.

Интерпретация результатов

Полученные численные данные позволяют провести сравнительный анализ эффективности каждого из исследуемых приборов. Ниже представлены ключевые наблюдения:

Матричный спектральный прибор демонстрирует высокую спектральную селективность и устойчивость к шумам, однако уступает по времени отклика и метрологической точности.

Лазерно-оптический прибор обеспечивает более быстрое срабатывание и меньшую погрешность, но ограничен по спектральной чувствительности и пространственному разрешению.

Совместная система, объединяющая оба подхода, демонстрирует наилучшие показатели по всем ключевым метрикам, включая минимальное

время отклика и максимальную точность обнаружения активности.

Особое внимание следует уделить способности к раннему обнаружению активности. Значение метрики $P = 0,94$ для совместной системы свидетельствует о высокой надёжности алгоритма в условиях нестабильной спектральной обстановки. Это особенно важно для задач мониторинга, где ложные срабатывания могут приводить к ошибочным решениям или пропущенным событиям.

4.4 Сравнительный анализ с существующими приборами пожарной диагностики

Для оценки эффективности разработанной методики регистрации и анализа термодинамической активности целесообразно провести сравнительный анализ с существующими промышленными приборами пожарной диагностики. В качестве объектов сравнения выбраны два серийных прибора, широко применяемых в системах раннего обнаружения пожара: многоспектральный извещатель «Тюльпан 2-14 Ex», модификация «Тюльпан 2-16-3-2 Ex» и «Honeywell FS20X» предназначенные для установки на сканирующие лазерные системы роботизированных установок.

Вышеуказанные приборы обладают высокой степенью защиты, устойчивостью к внешним помехам и способны функционировать в тяжёлых климатических условиях. Однако их архитектура ориентирована на детектирование ограниченного набора признаков, преимущественно тепловых и инфракрасных, без возможности спектральной декомпозиции и анализа временной структуры сигнала. В отличие от них, предлагаемые приборы: матричный спектральный и лазерно-оптический обеспечивают регистрацию широкого спектра активности, включая флюктуации, модуляции и переходные процессы, характерные для ранних стадий горения.

Извещатель «Тюльпан 2-14 Ex» предназначен для работы в помещениях и на открытых площадках с тяжёлыми помеховыми условиями, обладает широким углом обзора и высокой дальностью обнаружения. Модификация «Тюльпан 2-16-3-2 Ex» разработана для установки непосредственно на

сканирующий лазерный пучок роботизированных установок пожаротушения и отличается ускоренным временем срабатывания и компактной конструкцией.

Дополнительно в сравнительный анализ включён мультиспектральный извещатель Honeywell FS20X, сочетающий технологии ультрафиолетового (UV) и инфракрасного (IR) обнаружения. Устройство предназначено для работы в промышленных условиях с повышенными требованиями к надёжности и устойчивости к ложным срабатываниям. Благодаря встроенной интеллектуальной обработке сигналов и расширенному спектральному диапазону, FS20X обеспечивает высокую чувствительность к широкому классу источников пламени, включая углеводородные и водородные горения, а также обладает минимальным временем отклика и высокой устойчивостью к солнечным и тепловым помехам.

Разработанная система демонстрирует превосходство по ряду ключевых параметров, включая быстродействие, спектральную чувствительность и аналитическую мощность. Время срабатывания менее 0.3 с обеспечивает возможность раннего реагирования, а широкий спектральный диапазон позволяет фиксировать признаки активности, недоступные для традиционных извещателей. Наличие алгоритмов спектрального и временного анализа, включая вейвлет-преобразование и бинарную классификацию, расширяет функциональность системы, делая её пригодной для интеллектуального мониторинга и диагностики динамических процессов горения.

Таким образом, предложенная методика и приборы могут рассматриваться как перспективная альтернатива существующим промышленным решениям, особенно в задачах раннего обнаружения, адаптивной фильтрации и классификации активности в условиях сложной оптической среды.

В таблице 4 представлены технические характеристики рассмотренных извещателей.

Таблица 4 – Сравнение технических характеристик извещателей

Параметр	Тюльпан 2-14 Ex	Тюльпан 2-16-3-2 Ex	Honeywell FS20X (США)	Разработанная система
Тип извещателя	Многоспектральный	Многоспектральный (лазер)	ИК/УФ пламени	Матричный спектральный прибор + лазерно-оптический прибор на базе ПЗС -линейки
Время срабатывания	<1 с	<1 с	<0.3 с	< 0,3 с
Устойчивость к помехам	До 95%	До 95%	До 95%	> 98% (по моделированию)
Дальность обнаружения (ТП-5 / ТП-6)	25 м	6 м / 10 м	До 60м	До 30 м (по конфигурации)/ оптимально 8-10 м
Спектральная селективность	Ограниченнная (ИК)	Ограниченнная	Многодиапазонная	Высокая (220–650 нм)
Анализ временной структуры сигнала	Нет	Нет	Нет	Да (вейвлет, БПФ)
Выявление переходных процессов	Нет	Нет	Частично	Да
Формирование бинарного индикатора	Да	Да	Да	Да + адаптивный порог
Возможность классификации активности	Нет	Нет	Нет	Да (по признакам)
Степень защиты	IP66	IP66	IP66/67	IP54–IP66 (по исполнению)
Температурный диапазон	–55°C...+55°C	–40°C...+55°C	40°C...+75°C	–20°C...+50°C (базовое)

4.5 Выводы по разделу

Четвертый раздел представляет собой завершающий этап оценки эффективности разработанной методики раннего обнаружения пламени за счёт детектирования термодинамических и аэрозольных возмущений в газовой среде. Методика базируются на спектральных принципах, изложенных в первом разделе, и реализованы в виде алгоритмических и аппаратных решений, представленных во втором и третьем разделах. Двухканальная структура прибора включает физическую модель взаимодействия лазерного излучения с динамически изменяющейся средой, методы спектрального и пространственного анализа оптического сигналов, а также специализированные приборы регистрации и программные средства обработки.

В рамках данного раздела были сформулированы ключевые критерии оценки: чувствительность, селективность и устойчивость к ложным срабатываниям. Эти параметры легли в основу количественной диагностики, реализованной через нормированные энергетические признаки, бинарные индикаторы активности и адаптивные пороговые процедуры. Полученные результаты демонстрируют, что лазерный прибор на основе ПЗС-линейки обеспечивает значительно более высокие значения чувствительности и селективности по сравнению с матричным спектральным прибором. Это обусловлено его пространственным разрешением, высокой амплитудой сигнала и возможностью локального анализа по пикселям. При этом устойчивость к ложным срабатываниям одинакова для обоих приборов, что подтверждает надёжность регистрации.

Данный раздел также включает экспериментальную проверку системы раннего обнаружения признаков горения в двух конфигурациях: с матричным спектральным и лазерно-оптическим приборами. В первой серии экспериментов была продемонстрирована способность совместного прибора фиксировать признаки теплового конвекционного потока и спектральные линии, возникающие при термическом возбуждении молекул. Применение узкополосного фильтра позволило эффективно подавить фоновое излучение и

выделить характерные компоненты сигнала. Во второй серии экспериментов, при помощи лазерного источника были зафиксированы флуктуации и модуляции, возникающие при взаимодействии когерентного пучка с динамически изменяющейся средой. Пространственный анализ рассеяния и плотностных возмущений позволил дополнительно выявить аэрозольные включения, что расширяет спектр диагностируемых признаков. Оба подхода продемонстрировали воспроизводимость результатов, устойчивость алгоритма и возможность адаптации к различным длинам оптического тракта.

Раздел 4.3 был посвящён сравнительному анализу с промышленными извещателями «Тюльпан 2-14 Ex», «Тюльпан 2-16-3-2 Ex» и «Honeywell FS20X». Разработанная система показала превосходство по ряду параметров: более высокое быстродействие (время срабатывания менее 0.3 с), расширенный спектральный диапазон, наличие алгоритмов временного анализа и возможность классификации активности. В отличие от традиционных приборов, ориентированных на фиксированные тепловые признаки, предложенная методика обеспечивает многомерную оценку состояния среды, включая переходные процессы, спектральные флуктуации и динамику аэрозольных включений.

Таким образом, четвертый раздел подтверждает, что предложенная архитектура является эффективной, устойчивой и перспективной для задач интеллектуальной пожарной диагностики. Методика демонстрирует высокую чувствительность, способность к адаптации, устойчивость к фоновым помехам и применимость в условиях сложной оптической среды. Комплементарный подход, объединяющий данные, полученные с двух каналов прибора, обеспечивает расширение спектра регистрируемых признаков и сокращение времени отклика, что открывает возможности для интеграции системы в современные платформы мониторинга и управления техногенными рисками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе разработаны и экспериментально апробирована методика раннего обнаружения очагов горения за счёт детектирования тепловых конвекционных потоков и аэрозольных возмущений в воздушной среде, основанные на оптических и спектральных принципах регистрации и анализа оптических сигналов. Методика ориентирована на выявление ранних признаков, когда традиционные признаки (открытое пламя, дым, рост температуры) ещё не проявлены, что обеспечивает принципиально новый уровень превентивной диагностики.

Исследование охватывает полный цикл – от физического моделирования взаимодействия лазерного излучения с динамически изменяющейся средой до реализации алгоритмических и аппаратных решений, обеспечивающих высокую чувствительность и селективность диагностики. В рамках диссертационной работы проведён системный анализ существующих подходов к обнаружению очагов горения, включая тепловизионные, ионизационные, спектральные, оптические, акустические, газоанализаторные и комбинированные методы. Установлено, что большинство традиционных решений демонстрируют ограниченную эффективность в условиях низкой контрастности, нестабильного микроклимата, а также при наличии фоновых тепловых и аэрозольных помех. Это обусловило необходимость разработки новых методик, ориентированных на спектральную и пространственную избирательность, а также на устойчивость к внешним возмущениям.

Проведённый анализ существующих подходов позволил выявить их ограничения в условиях низкой контрастности и нестабильного микроклимата, что обусловило необходимость разработки новых методов, ориентированных на спектральную и пространственную избирательность. В рамках диссертационной работы предложена двухканальная архитектура прибора, включающая матричный спектральный и лазерно-оптический приборы, обеспечивающие комплементарную регистрацию ранних признаков термодинамической

активности. Особое внимание удалено согласованию пространственно-временных характеристик каналов, синхронизации регистрации и формированию единого диагностического критерия.

Разработанные алгоритмы обработки сигналов включают спектральную фильтрацию, вейвлет-преобразование, взаимно-корреляционную функцию дискретного сигнала, суммарно-разностную функцию, бинарную классификацию и формирование индикаторов активности. Предложены адаптивные пороговые процедуры, учитывающие статистику фоновых состояний и обеспечивающие устойчивую работу в условиях переменных внешних факторов. Для повышения надёжности детектирования реализован суммарно-разностный метод, позволяющий выделять слабые возмущения на фоне шумов.

Проведённая экспериментальная проверка системы раннего обнаружения признаков горения подтвердила её высокую диагностическую состоятельность: достигнуты значения относительной чувствительности до 22.6, относительной селективности до 89 и устойчивости к ложным срабатываниям до 0.98, что существенно превосходит показатели традиционных приборов диагностики и обнаружения возгораний. Методика продемонстрировала способность к устойчивой работе в условиях фоновых флюктуаций, турбулентности и слабых тепловых градиентов, включая случаи имитации начальных стадий возгорания. Проведён анализ влияния длины оптического тракта на эффективность регистрации, что позволило определить оптимальный диапазон расстояний для надёжного выявления термодинамических возмущений.

Полученные результаты демонстрируют применимость предложенной методики для задач раннего обнаружения очагов возмущения, мониторинга тепловых процессов и автоматизированного управления в условиях открытых воздушных сред. Методика обладает устойчивостью к шумам, адаптивностью к изменяющимся условиям, масштабируемостью и способностью к локализации энергетических проявлений. Это открывает перспективы её интеграции в промышленные, экологические и роботизированные системы контроля, включая

интеллектуальные платформы пожаротушения, системы мониторинга техногенных рисков, а также комплексы обеспечения пожарной безопасности объектов критической инфраструктуры.

Таким образом, диссертационная работа вносит вклад в развитие методов оптической диагностики термодинамических процессов, предлагая научно обоснованную, технически реализуемую и практически применимую систему раннего обнаружения очагов горения, обладающую высокой степенью надёжности и адаптивности к реальным условиям эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: информационно-аналитический сборник / В. С. Гончаренко, Т. А. Чечетина, В. И. Сибирко и др.; ФГБУ ВНИИПО МЧС России. - Москва: ВНИИПО, 2023. – 60 с.
2. СП 484.1311500.2020 «Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и автоматического пожаротушения. Нормы проектирования». - Утв. Приказом МЧС России от 31.07.2020 № 582. - МЧС России, 2020. – 28 с.
3. ГОСТ Р 53325–2012 «Технические средства пожарной автоматики. Общие технические требования и методы испытаний». - Введ. 2014-01-01. - Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), 2012. – 247 с.
4. ГОСТ Р 53284–2009 «Пожарная техника. Извещатели пожарные. Общие технические требования и методы испытаний». - Введ. 2010-01-01. - Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), 2009. – 20 с.
5. ГОСТ Р 59137–2020 «Классификация пожарной опасности строительных материалов и конструкций. Часть 1. Классификация на основе результатов испытаний по определению реакции на огонь». - Введ. 2021-03-01. - Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт), 2020. – 44 с.
6. Шаровар Ф.И. Методы раннего обнаружения загораний. М.: Стройиздат, 1988. 337 с.
7. Тарасенко Ф.П. Введение в курс теории информации. Томск: Изд-во Томского университета, 1963. 240 с.
8. Железнов Е.А. О принципиальных вопросах теории сигналов и задачах её дальнейшего развития на основе новой стохастической модели // Радиотехника. 1957. Т. 12. № 11. С. 3–12.

9. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Финитные функции в физике и технике. М.: Наука, 1971. 408 с.
10. Нейман М.С. Об общей теории сигналов и общей теории автоматических процессов // Радиотехника. 1955. № 5. С. 13–16.
11. Reza M.S., Mamun S.M. Development and performance evaluation of a novel fire detection and extinguishing system: towards industrial automation // International Journal of Advanced Technology. 2018. Vol. 9, № 3. P. 1–8.
12. Белянин В.Б. Некоторые тенденции развития оптического спектрального приборостроения // Современные тенденции в технике спектроскопии. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., С. 7–24.
13. Авторское свидетельство СССР № 321654. Пожарный извещатель спектрального действия // Бюл. изобр. 1987. № 5. С. 22–24.
14. Петров Б.Г., Смирнов Л.В. Методы газового анализа для обнаружения очагов тлеющего горения // Пожарная безопасность. 1973. № 4. С. 7–14.
15. Киселёв Б.А., Малыхин А.В. К вопросу об оценке эффективности и качества спектральных приборов // Современные тенденции в технике спектроскопии. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1982. С. 125–152.
16. Воронецкий А.В., Павлов А.В., Сухов А.В. Моделирование турбулентного фронта пламени в двухфазной среде // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и газовых систем: материалы IX сессии симпозиума по горению и взрыву. Сузdalь, 19–24 ноября 1989. Черноголовка, 1989. С. 89–92.
17. Hess W. Brandschutz: Elektronik gegen Tehlalarme: Furiose Feuermelder // Wirtschaftswoche. 1989. Vol. 43, No. 44. P. 104–106, 108.
18. Патент США US 5850182A. Dual wavelength fire detection method and apparatus. Заявитель: Fred Schuler; заявл. 07.01.1997; опубл. 15.12.1998. – 12 с.
19. Патент США US 5804825A. Fire detector having wide-range sensitivity. Заявитель: Frederick J. Schuler; заявл. 07.05.1997; опубл. 08.09.1998. – 10 с.

20. Патент Великобритании GB 2335489A. A radiation detector.

Заявитель: Bernard Etienne, Henri Laluvein, Paul Basham; заявл. 17.03.1999; опубл. 27.02.2002. – 6 с.

21. Патент США US 5612676A. Dual channel multi-spectrum infrared optical fire and explosion detection system. Заявитель: Jonathan C. Plimpton, George L. Minott; заявл. 16.11.1993; опубл. 18.03.1997. – 14 с.

22. Патент США US 6064064A. Fire detector. Заявитель: David A. Castleman; заявл. 30.05.1997; опубл. 16.05.2000. – 9 с.

23. General Monitors. Digital multi-frequency infrared flame detector: патент США US6150659A. Заявл. 07.05.1999; опубл. 21.11.2000. – 11 с.

24. Дийков Л.К., Медведев Ф.К. и др. Электронно-оптические извещатели пламени // Электроника: наука, технология, бизнес. 2000. № 6. - С. 6-10.

25. Meyer R.H. Jr. Method of detecting a fire of open uncontrolled flames: патент США US4866420A. Заявл. 26.04.1988; опубл. 12.09.1989. – 8 с.

26. Паракун, А. С. Измерительные сигналы и их обработка в спектроскопической системе контроля работы ракетного двигателя / А. С. Паракун // Датчики и системы. – 2022. – № 5(264). – С. 33-37.

27. Paraskun, A. S. Experimental Research of High-Temperature Burning Processes and Spectroscopic Measurements / A. S. Paraskun, M. A. Vaganov, V. I. Kazakov // 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2018, St. Petersburg, 26–30 November 2018. Vol. [1]. – St. Petersburg, 2018. – P. 8604421.

28. Flame detector using 3-wavelength rays // Techno Japan. 1989. Vol. 22, № 7. P. 113.

29. Rauser P., Strassler S. Method for early fire detection: патент Швейцарии № 674274. Заявл. 14.03.1989; опубл. 15.05.1990. – 10 с.

30. Паракун А.С. Формирование измерительных сигналов в системах контроля и в системах многоканального автоматического управления физическими и физико-химическими процессами, сопровождающимися

электромагнитным излучением в оптическом диапазоне / О. Д. Москалец, А. С. Параскун, К. В. Сердюк // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXV Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 30 мая – 03 июня 2022 года. Часть 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – С. 205-210.

31. Paraskun, A. S. The Application of Contactless Optical Spectroscopy in Automatic Control Systems of Technological Processes / A. S. Paraskun, O. D. Moskaletz, V. I. Kazakov, M. A. Vaganov // 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019), St. Petersburg, 03–07 June 2019. Vol. [2]. – St. Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8840653.

32. Paraskun, A. S. Contactless optical spectroscopy methods in the tasks of monitoring physical and technological processes in extreme conditions / V. I. Kazakov, O. D. Moskaletz, A. S. Paraskun, M. A. Vaganov // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI, Munich, Germany 24–27 June 2019. Vol. 11056. – Munich: SPIE, 2019. – P. 110563W.

33. Muda L.C., Begam M., Elamvazuthi I. Voice Recognition Algorithms using Mel Frequency Cepstral Coefficient (MFCC) and Dynamic Time Warping (DTW) // Journal of Computing. 2010. Vol. 2, No. 3. P. 138–143.

34. Siegel R., Howell J.R. Thermal Radiation Heat Transfer. 5th ed. CRC Press, 2010. 359 p.

35. Oppenheim A.V., Schafer R.W. Discrete-Time Signal Processing. Pearson, 2010. 1144 p.

36. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. New York: Springer, 2006. 749 p.

37. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia: SIAM, 1992. 344 p.

38. Cohen L. Time-Frequency Analysis. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995. 299 p.
39. Bogert B.P., Healy M.J.R., Tukey J.W. The Quefrency Analysis of Time Series for Echoes // Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis. New York: Wiley, 1963. P. 209–243.
40. Widrow B., Stearns S.D. Adaptive Signal Processing. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1985. 491 p.
41. Rabiner L., Juang B.H. Fundamentals of Speech Recognition. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 507 p.
42. Young S., Evermann G., Gales M., et al. The HTK Book. Cambridge University Engineering Department, 2006. 368 p.
43. Ganchev T., Fakotakis N., Kokkinakis G. Comparative Evaluation of Various MFCC Implementations for Speaker Recognition // Proceedings of SPECOM 2005. 2005. P. 191–194.
44. Параскун А.С., Москалец О.Д. Матричный анализатор оптических сигналов: пат. на полезную модель № 214303 У1. Российская Федерация, МПК G01J 3/36. № 2022115607; заявл. 09.06.2022; опубл. 19.10.2022. Заявитель: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
45. Параскун А.С. Применение бесконтактной оптической спектроскопии в системах автоматического управления технологическими процессами / В. В. Китаев, М. А. Ваганов, В. И. Казаков, А. С. Параскун и др. // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : Сборник статей XXII Международной научной конференции: 2-х частях, Санкт-Петербург, 03–07 июня 2019 года. Часть 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019. – С. 121-126.
46. Ваганов, М. А. Резонансный метод бесконтактного анализа оптических спектров и его техническая реализация для решения задач контроля

процессов горения: дис. канд. тех. наук: Спец. 05.11.13: защищена 26.03.2014: утв. 05.10.2014 / Ваганов Михаил Александрович. СПб., 2014. 152 с.

47. Ланда П.С. Автоколебания в распределенных системах. 2-е изд. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 320 с.

48. Параскун, А. С. Экспериментальные исследования высокотемпературных процессов горения и их спектроскопические измерения / М. А. Ваганов, В. И. Казаков, А. С. Параскун // Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах: XXI международная молодежная конференция, Санкт-Петербург, 01–05 октября 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018. – С. 179-184.

49. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973. 224 с.

50. Гантмахер, Ф. Р. Теория матриц. / Ф. Р. Гантмахер, 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1966. 576 с.

51. Мирошник, И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы / И.В. Мирошник; СПб.: Питер, 2005. 336 с.

52. Ваганов, М.А. Параллельный анализ спектра динамических сигналов/ М.А. Ваганов, О.Д. Москалец// Информационно-управляющие системы. 2011. № 5. С. 15-22.

53. Ваганов, М. А. Анализ спектров в оптическом диапазоне. Резонаторный анализ / М. А. Ваганов, О. Д. Москалец // Информационно-управляющие системы. 2012. №6. С. 21 – 27.

54. Ваганов, М. А. Матричный анализ многоканального спектрального прибора оптического диапазона / О. Д. Москалец, М. А. Ваганов // Сб. докл. 22-й Международной конференции «ЛАЗЕРЫ, ИЗМЕРЕНИЯ, ИНФОРМАЦИЯ». Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2012. Т. 1. С. 117-130.

55. Стейн, С. Принципы современной теории связи и их применение к передачи дискретных сообщений/ С. Стейн, Дж. Джонс; М.: Связь, 1971. 376 с.

56. Харкевич, А. А. Спектры и анализ / А. А. Харкевич; 5-е Изд., М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 240 с.
57. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; М.: Наука, 1970. 720 с.
58. Ахманов, С.А. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов / С.А. Ахманов, В.А. Выслоух, А.С. Чиркин. – М.: Наука, 1988. – 312 с.
59. Moskaletz, O. D. Electromagnetic signals and spectral measurements / O. D. Moskaletz // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Lasers for Measurements and Information Transfer 2006, St. Petersburg, 06–08 June 2006 / sponsors: SPIE. Vol. 6594. – St. Petersburg: SPIE - International Society for Optical Engineering, 2007. – Р. 659410.
60. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ./ Дж. Бендат, А. Пирсол; М.: Мир, 1989. 540 с.
61. Папулис, А. Теория систем и преобразований в оптике: пер. с англ./А. Папулис; М.: Мир, 1971. 495 с.
62. Characteristics of Different Photodiode Technologies [Электронный ресурс] // All About Circuits. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/characteristics-of-different-photodiode-technologies/> (дата обращения: 28.09.2025).
63. Hamamatsu Photonics. Silicon Photodiode S1227-66BQ [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S1227-66BQ.html> (дата обращения: 28.09.2025).
64. ГОСТ Р 53325–2012. Технические средства охранно-пожарной сигнализации. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2012. 12 с.
65. МЧС России. Статистика пожаров в Российской Федерации за 2021 год [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mchs.gov.ru> (дата обращения: 29.09.2025).
66. Таттарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 472 с.

67. Andrews L.C., Phillips R.L. *Laser Beam Propagation through Random Media*. Bellingham, WA: SPIE Press, 2005. 738 p.
68. Welch G., Bishop G. *An Introduction to the Kalman Filter*. University of North Carolina, 2006. 16 p.
69. Kay S.M. *Modern Spectral Estimation: Theory and Application*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988. 543 p.
70. Marple S.L. *Digital Spectral Analysis with Applications*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1987. 492 p.
71. Bohren C.F., Huffman D.R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. New York: Wiley-Interscience, 1983. 530 p.
72. Harris F.J. *On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform* // Proc. IEEE. 1978. Vol. 66, No. 1. P. 51–83.
73. Lyons R.G. *Understanding Digital Signal Processing*. 3rd ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2011. 858 p.
74. Казаков В.И., Мосенцов С.Н., Паракун А.С. Волоконно-оптический датчик дыма и теплового конвекционного потока: пат. РФ № 2805772 С1. МПК G08B 17/103, G01N 21/35. № 2023120971; заявл. 10.08.2023; опубл. 24.10.2023. Заявитель: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
75. Паракун А.С. Оценка эффективности математических моделей обработки профиля лазерного пучка в задаче раннего обнаружения возгораний / В. И. Казаков, А. С. Паракун, Я. А. Рывкина, С. В. Кулаков // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации : Труды XVII Международной научно-технической конференции, Сузdalь, 23–26 сентября 2024 года. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2024. – С. 166-170.
76. Паракун, А.С. Модели и методы обработки пространственно-динамических характеристик лазерного пучка в системе раннего обнаружения возгораний / В. И. Казаков, А. С. Паракун, Я. А. Рывкина [и др.] // Датчики и системы. – 2024. – № 4(276). – С. 25-30.

77. Параскун А.С. Исследование пространственно-динамических характеристик лазерного пучка при взаимодействии с тепловым конвекционным потоком / В. И. Казаков, А. С. Параскун, Я. А. Рывкина, Г. С. Гришкин // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Материалы XXVII Международной научной конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 03–07 июня 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 121-127.
78. Параскун А.С. Исследование влияния тепловых потоков различной природы на характеристики лазерного пучка / Я. А. Рывкина, А. С. Параскун // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXVIII Международной научной конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 12–16 мая 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. – С. 250-255.
79. Donoho D.L. De-noising by soft-thresholding // IEEE Transactions on Information Theory. 1995. Vol. 41, No. 3. P. 613–627.
80. Cover T.M., Thomas J.A. Elements of Information Theory. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2006. 748 p.
81. Bracewell R.N. The Fourier Transform and Its Applications. New York: McGraw-Hill, 1966. 616 p.
82. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing. 3rd ed. Academic Press, 2008. 700 p.
83. Арсеньян Т. И., Зотов А. М., Короленко П. В., Маганова М. С., Меснянкин А. В. Характеристики лазерных пучков в условиях перемежаемости мелкомасштабной атмосферной турбулентности. // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 10. С. 894-899.
84. Кучеров А.Н. Распространение лазерного пучка в потоке газа и жидкости: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Москва: ЦАГИ, 2004.
85. Papoulis A. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 1991. 666 p.

86. Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. Pattern Classification. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2000. 688 p.
87. Jolliffe I.T. Principal Component Analysis. 2nd ed. New York: Springer, 2002. 487 p.
88. Haykin S.O. Neural Networks and Learning Machines. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2008. 907 p.
89. Фазлутдинова А.И. Корреляционный анализ акустических сигналов. Взаимная корреляционная функция Карташов В.М. Двумерная взаимокорреляционная функция акустического и электромагнитного сигналов радиоакустических систем // Радиоэлектроника и информатика. 2001. № 1 (14).ия // Молодой ученый. 2022. № 51 (446). С. 60–64.
90. Карташов В.М. Двумерная взаимокорреляционная функция акустического и электромагнитного сигналов радиоакустических систем // Радиоэлектроника и информатика. 2001. № 1 (14). С. 6–8.
91. Райцин А.М. Новая интегральная характеристика для идентификации лазерного пучка // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. 2011. № 8. С. 97–99.
92. Паракун, А.С. О возможностях использования дифракционных решеток в системах многокритериального контроля / В. И. Казаков, А. С. Паракун, В. В. Китаев // Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации: Сборник докладов Шестой Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 07–18 апреля 2025 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2025. – С. 104-107.
93. Childers D.G., Skinner D.P., Kemerait R.C. The cepstrum: A guide to processing // Proc. IEEE. 1977. Vol. 65, No. 10. P. 1428–1443.
94. Picinbono B. On cepstral analysis and its applications to echo detection // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1976. Vol. 24, No. 2. P. 124–127.

95. Strang G., Nguyen T. Wavelets and Filter Banks. Wellesley: Wellesley-Cambridge Press, 1996. 554 p.
96. Vetterli M., Kovacevic J. Wavelets and Subband Coding. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995. 488 p.
97. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. 4th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2018. 1022 p.
98. Soille P. Morphological Image Analysis: Principles and Applications. 2nd ed. Berlin: Springer, 2003. 392 p.
99. Волоконно-оптический датчик дыма и теплового конвекционного потока: № 2023120971; заявл. 10.08.2023; опубл. 24.10.2023 / В. И. Казаков, С. Н. Мосенцов, А. С. Паракун; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».
100. Программа для корректировки и вывода в графическом виде данных, полученных с ПЗС-линейки в оптическом спектральном устройстве: № 2022669141; заявл. 19.10.2022; опубл. 19.10.2022 / В. И. Казаков, А. С. Паракун; заявитель Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
101. Паракун, А. С. Волоконно-оптические устройства в составе систем спектроскопии / А. С. Паракун // Датчики и системы. – 2023. – № 4-2(270). – С. 45-50.
102. ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика оценки характеристик точности средств измерений. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.
103. ГОСТ Р 8.563–2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика поверки спектрофотометров. М.: Стандартинформ, 2009. 18 с.

104. ГОСТ Р 8.625–2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика поверки фотометрических систем. М.: Стандартинформ, 2013. 22 с.
105. Основы анализа спектра. Чувствительность и шум [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unitest.com/theory/spectrum-11.html> (дата обращения: 22.09.2025).
106. Skoog D.A., Holler F.J., Crouch S.R. Principles of Instrumental Analysis. 7th ed. Belmont: Cengage Learning, 2017. 1056 p.
107. Goodman J.W. Introduction to Fourier Optics. 3rd ed. Englewood: Roberts & Company Publishers, 2005. 512 p.
108. Powers D.M.W. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation // Journal of Machine Learning Technologies. 2011. P. 37-63.
109. IEEE Std 1241–2010. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. New York: IEEE, 2010. 76 p.
110. Kohavi R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection // Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). 1995. P. 1137–1143.
111. Bovik A. (Ed.). Handbook of Image and Video Processing. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2005. 936 p.
112. MacQueen J. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations // Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. 1967. Vol. 1. P. 281–297.
113. Ayyadevara S.A., Teja P.N.V.S.R., Kumar M.R. Handwritten Character Recognition Using Unique Feature Extraction Technique // IEEE RTEICT. 2018. P. 1239–1243.
114. Паракун А.С. Система регистрации и обработки пространственных характеристик лазерных пучков для обнаружения теплового конвективного потока / В. И. Казаков, А. С. Паракун // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова: Материалы 15-

ой Международной конференции, Астрахань, 03–07 октября 2022 года. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2022. – С. 80-83.

115. Паракун А.С. Взаимодействие лазерного пучка с тепловым конвективным потоком / В. И. Казаков, А. С. Паракун, Я. А. Рывкина // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: Сборник статей VI Международного форума, Санкт-Петербург, 01 марта 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2024. – С. 115-116.

116. Паракун А.С. Лазерный сенсор дыма и теплового конвекционного потока с применением нейронных сетей / В. И. Казаков, Я. А. Рывкина, А. С. Паракун // Приборостроение - 2024: материалы 17-й Международной научно-технической конференции, Минск, 26–29 ноября 2024 года. – Минск: Б. и., 2024. – С. 60-61.

117. Кузнецов А.В. Сенсорные системы в реальном времени. Санкт-Петербург: Питер, 2019. 288 с.

118. ГОСТ 8.010–99. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. М.: Госстандарт России, 1999. 18 с.

119. Соловьёв В.Н. Основы метрологии. Москва: Академкнига, 2015. 256 с.

120. Журавлёв Ю.И. Методы распознавания образов. Москва: Наука, 2018. 432 с.

Приложение А

Патенты и свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ



Патент на изобретение



Патент на полезную модель



Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Скан-копия акта о внедрении в ФГАОУ ВО ГУАП

<p>ГУАП МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ» (ГУАП) ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057 Электронная почта: info@guap.ru, сайт: guap.ru, ОГРН 102781023280, ИНН/КПП 7812003110/783801001</p> <p>На № _____ от _____</p> <p><i>[Handwritten signature]</i></p> <p>АКТ о внедрении результатов диссертационной работы Параскуна Артура Сергеевича на тему «Приборы и методика диагностики газовой среды в помещении для раннего селективного обнаружения признаков взрыва» в учебный процесс федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»</p> <p>Комиссия в составе: – председателя директора института радиотехники, электроники и связи, доктора технических наук, профессора Бестужина Александра Роальдовича и членов: – доктора технических наук, профессора, кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств, Якимова Александра Николаевича – доктора технических наук, профессора, кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств, Шакина Олега Васильевича</p> <p>настоящим актом подтверждает, что результаты диссертационной работы Параскуна А.С. соискателя ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8 – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды», внедрены в учебный процесс в составе дисциплин, проводимых на кафедре конструирования и технологий электронных и лазерных средств по направлению подготовки «Лазерная техника и лазерные технологии», а именно:</p> <p>1. В рамках практической части дисциплины «Оптическая обработка информации» при выполнении лабораторных работ используется методика, основанная на реализации метрологических требований к воспроизводимости, чувствительности и селективности регистрации. Это обеспечивает необходимую точность измерений и возможность стандартизации аппаратных компонентов. По результатам испытаний достигнута воспроизводимость с погрешностью менее 5%, что соответствует нормативным критериям для приборов раннего обнаружения термодинамической активности.</p>	<p>2. В лекционных разделах дисциплины «Оптическая обработка информации» при рассмотрении методов спектральной селекции и адаптивной фильтрации используются результаты экспериментальных исследований, полученные в ходе внедрения. Задокументировано снижение числа ложных тревог на 60–65% по сравнению с базовыми схемами регистрации, не обладающими спектральной селективностью. Повышение достоверности диагностики до 98% подтверждает высокую чувствительность системы к слабым признакам нестабильности среды и её устойчивость к фоновым оптическим и тепловым возмущениям.</p> <p>Проведённое внедрение подтвердило методическую ценность и практическую применимость полученных результатов в образовательном процессе. Интеграция разработанных подходов в содержание дисциплины «Оптическая обработка информации» способствует формированию у студентов устойчивых навыков анализа метрологических характеристик оптических систем и понимания принципов повышения достоверности регистрации в условиях помех.</p> <p>Председатель: Директор института радиотехники, Электроники и связи, доктор технических наук, профессор</p> <p><i>[Handwritten signature]</i></p> <p>А.Р. Бестужин</p> <p>Члены комиссии: доктор технических наук, профессор</p> <p><i>[Handwritten signature]</i></p> <p>А.Н. Якимов</p> <p>доктор технических наук, профессор</p> <p><i>[Handwritten signature]</i></p> <p>О.В. Шакин</p> <p><i>[Handwritten signatures]</i></p> <p><i>[Handwritten signatures]</i></p> <p><i>[Handwritten signatures]</i></p> <p><i>[Handwritten signatures]</i></p>
--	---

ПРИЛОЖЕНИЕ В Скан-копия акта о внедрении в ООО «НПП Адвент»

<p> НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «АДВЕНТ» 190020, г. Санкт-Петербург наб. Обводного канала 227 к.1 Тел.: +7(812) 325-67-45 Факс: +7(812) 325-67-44 E-mail: office@adventsspb.ru Web: www.adventsspb.ru</p> <p>По месту требования</p> <p>АКТ</p> <p>реализации результатов диссертационного исследования старшего преподавателя кафедры «Конструирования и технологий электронных и лазерных средств» ФГАОУ ВО ГУАП Параскуна А.С. на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 2.2.8 «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды».</p> <p>Комиссия в составе: председатель комиссии – главный научный сотрудник Мальков В.М.; члены комиссии: ведущий инженер-конструктор Благовский О.В.; инженер-конструктор 1 категории Тюрин Д.В., составили настоящий акт о том, что результаты диссертационных исследований Параскуна Артура Сергеевича по теме «Приборы и методика диагностики газовой среды в помещении для раннего селективного обнаружения признаков возгорания» были применены в ходе опытно-конструкторской работы шифр «Меридиан-К»:</p> <ul style="list-style-type: none">– разработана архитектура прибора, включающая матричный спектроскопический канал, лазерно-оптический канал и алгоритмический блок обработки, реализованные в составе опытного образца. Испытания подтвердили устойчивую работу прибора в условиях фоновых аэрозольных и тепловых помех;– подтверждена возможность интеграции методики исследования в состав систем промышленной безопасности, экологического мониторинга, робототехнических комплексов и автономных систем управления;– установлено, что архитектура управления прибора допускает реализацию адресной логики, сетевой интеграции и масштабирования в составе различных цифровых систем.	<p>УТВЕРЖДАЮ Исполнительный директор ООО «НПП «Адвент» А.И. Ружников «06» 10 2025 г.</p> <p>Результаты внедрения подтверждают корректность заложенных теоретических положений, эффективность выбранных методов обработки и практическую значимость разработанной системы для задач раннего обнаружения термогидродинамической активности.</p> <p>Степень достоверности полученных автором научных результатов не вызывает сомнений.</p> <p>Председатель комиссии:  д.т.н. Мальков В.М.</p> <p>«06» 10 2025 г.</p> <p>Члены комиссии:  к.т.н. Благовский О.В.  к.т.н. Тюрин Д.В.</p>
---	--

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Скан-копия акта о внедрении в ООО «НПФ «Полисервис»

<p>НПФ ПОЛИСЕРВИС</p> <p>ООО «НПФ «Полисервис» 196650, Россия, Санкт-Петербург, Колпино, Территория Ижорский завод, д. 22, лит. ДМ, пом. 1.1</p> <hr/> <p>Электронный адрес: Представительство в сети Интернет E-mail: office@npfpol.ru https://npfpol.ru/ Телефон: +7 (812) 449-19-92</p> <p style="text-align: center;">АКТ внедрения результатов диссертационной работы Параксуну Артура Сергеевича в ООО «НПФ «Полисервис» на тему «Приборы и методика диагностики газовой среды в помещении для раннего селективного обнаружения признаков возгорания»</p> <p>Комиссия в составе:</p> <ul style="list-style-type: none">- генерального директора ООО «НПФ «Полисервис» Николая Андреевича Самойлова;- научного консультанта, кандидата технических наук Жежерина Александра Ростиславовича, <p>настоящим актом подтверждает, что результаты диссертационной работы Параксуну А.С., соискателя учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.8. – «Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды», внедрены в разработках предприятия, а именно:</p> <p>1. Внедрённая система построена на многоканальной архитектуре, обеспечивающей устойчивую работу в условиях фоновых оптических и тепловых помех за счёт селективного выделения признаков аэрозольных частиц, теплового конвекционного потока и пламени. По результатам испытаний зафиксировано снижение вероятности ложных срабатываний на 71–75% по сравнению с однотипными датчиками, а также повышение точности классификации активности воздушной среды до 93–96%. Достигние</p>	<p>указанных показателей стало возможным благодаря реализации согласованной обработки сигналов по спектрально-временным признакам и адаптивной логике регистрации.</p> <p>2. Конструктивная организация прибора ориентирована на гибкую интеграцию в различные типы объектов. Подтверждена возможность его применения как в составе стационарных узлов пожарной автоматики, так и в мобильных платформах. Архитектурная совместимость с системами мониторинга и управления позволяет сократить сроки адаптации под конкретные условия эксплуатации и снизить затраты на техническое обслуживание на 30–35%. Система поддерживает сетевую интеграцию, масштабирование и адресную логику, что расширяет её применимость в распределённых интеллектуальных комплексах.</p> <p>Проведённые работы выполнены на высоком научно-техническом уровне, соответствующем современным требованиям к системам раннего обнаружения термодинамической активности. Полученные результаты подтверждают практическую значимость разработанных решений, их технологическую зрелость и готовность к внедрению в составе промышленных и мобильных комплексов пожарной автоматики.</p> <p>Научный консультант, к.т.н., доцент</p> <p style="text-align: right;"> A.P. Жежерин</p> <p>Генеральный директор ООО «НПФ «Полисервис»</p> <p style="text-align: right;"> N.A. Самойлов</p> <p style="text-align: right;">30.10.2025</p> <p style="text-align: center;"></p>
---	--

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Скан-копия акта о внедрении в ООО «Холдинг Гефест»



ООО «Холдинг Гефест»

197342, г. Санкт-Петербург, ул. Сердобольская, д. 65 лит. А

Тел./факс: +7 (812) 600-69-11

www.gefest-spb.ru

e-mail: office@gefest-spb.ru

ОКПО 98632430; ОГРН 1077847075569;

ИНН/КПП 7814367145/781401001

24 ноября 2025 г.

AKT

внедрения результатов диссертационной работы

Параксуну Артура Сергеевича

на тему «Приборы и методика диагностики газовой среды в помещении для раннего селективного обнаружения признаков возгорания»

Настоящим подтверждается, что в ходе выполнения опытно-конструкторских разработок ГК «Гефест» по созданию системы раннего обнаружения признаков возгорания были использованы технические решения, предложенные Параскуном А.С. в рамках диссертационной работы «Приборы и методика диагностики газовой среды в помещении для раннего селективного обнаружения признаков возгорания» по специальности 2.2.8 – «Приборы и методика диагностики газовой среды в помещении для раннего селективного обнаружения признаков возгорания».

Внедрение результатов работы заключается в следующем:

– разработанная автором архитектура прибора, реализована в составе опытного образца. Испытания подтвердили устойчивую работу прибора в условиях аэрозольных и тепловых помех, характерных для промышленных помещений, а также способность к дифференциации признаков дыма, пламени и конвективных потоков;

– подтверждена возможность интеграции разработанной методики в системы промышленной безопасности, экологического мониторинга, робототехнические комплексы и автономные системы управления. Архитектура прибора допускает реализацию адресной логики, сетевой интеграции и масштабирования в составе цифровых систем пожарной автоматики.

Результаты внедрения подтверждают корректность заложенных теоретических положений, эффективность выбранных методов обработки и практическую значимость разработанной системы для задач пожарной и промышленной безопасности.

Председатель совета директоров
Группы компаний «Гефест»
доктор техн. наук, профессор,
Заслуженный деятель науки
Российской Федерации

Л.Т.Танклевский

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение автор выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность своему научному руководителю – доценту, кандидату технических наук

Казакову Василию Ивановичу

за профессиональное руководство, поддержку на всех этапах подготовки диссертации, конструктивную критику и ценные рекомендации, позволившие автору выстроить научную работу на прочной методологической основе.

Автор также выражает особую благодарность профессору кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств ГУАП, доктору технических наук

Бестугину Александру Роальдовичу
за неоценимую научную помощь, консультации и участие в обсуждении ключевых положений диссертации, а также за внимание к деталям и стремление к научной точности, оказавшие существенное влияние на качество проведённого исследования.

С глубокой признательностью и теплотой автор вспоминает Москальца Олега Дмитриевича – доцента, старшего научного сотрудника, кандидата технических наук, который стал для автора настоящим наставником и вдохновителем в научной работе. Его знания, щедро передаваемые ученикам, внимание к каждому этапу исследования и человеческая поддержка оставили неизгладимый след в профессиональном становлении автора. Светлая память.

Автор также благодарит сотрудников кафедры конструирования и технологий электронных и лазерных средств ГУАП за интерес к работе, полезные замечания и поддержку, оказанную в процессе подготовки диссертации к защите.