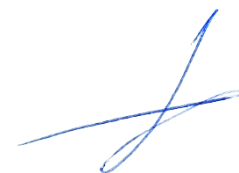


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирская пожарно-спасательная академия»
Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации
последствий стихийных бедствий»

На правах рукописи



Горбунов Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ
ТЕРМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА МЕСТЕ ПОЖАРА**

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
Елфимова Марина Владимировна

Красноярск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА МЕСТЕ ПОЖАРА.....	12
1.1 Теоретические основы формирования повреждений материалов на пожаре...	12
1.2 Анализ существующих методов и средств контроля степени термических повреждений материалов на месте пожара	18
1.2.1 Анализ методов и средств контроля степени термических повреждений на пожаре для бетонных конструкций	19
1.2.2 Анализ методов и средств контроля степени термических повреждений изделий и конструкций из стали.....	22
1.2.3 Анализ методов и средств контроля степени термических повреждений на пожаре для изделий и конструкций из древесины	24
1.2.4 Анализ методов и средств контроля степени термических повреждений материалов на пожаре по отложениям копоти.....	27
1.2.5 Анализ методов и средств контроля степени термических повреждений на пожаре применяемых для полимеров	28
1.3. Анализ зарубежного опыта в области оценки степени термических повреждений на месте пожара	29
1.4 Выводы по главе.....	36
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА МЕСТЕ ПОЖАРА ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	38
2.1 Выбор объектов исследования.....	38
2.2 Теоретические основы цветových систем и природы света.....	42
2.3 Разработка прибора контроля степени термических повреждений материалов путем цветоизмерения	52
2.4 Разработка метода контроля степени термических повреждений материалов на месте пожара путем измерения цветových характеристик.....	65
2.5 Выводы по главе.....	70
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЙ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ...	71
3.1 Результаты исследования изменений цветových характеристик бетона при термическом воздействии.....	71
3.2 Результаты исследования изменений цветových характеристик стали при термическом воздействии.....	84
3.3 Результаты исследования изменений цветových характеристик древесины при термическом воздействии.....	95

3.4 Результаты исследования изменений цветовых характеристик полимеров при термическом воздействии.....	106
3.5 Результаты исследования изменений цветовых характеристик копоти.....	116
3.6 Выводы по главе.....	122
ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ	123
4.1 Практическое применение предложенного метода и прибора на пожарах	123
4.1.1 Исследование конструкций из бетона.....	124
4.1.2 Исследование конструкций из металла	136
4.2 Практические рекомендации по применению метода и прибора контроля степени термических повреждений материалов на месте пожара путем измерения цветовых характеристик	142
4.3 Выводы по главе.....	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Методика определения степени термических повреждений веществ, материалов и изделий методом и прибором, основанном на измерении цветовых характеристик	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты внедрения основных результатов диссертационной работы.....	185

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Согласно определению [1], пожар является неконтролируемым горением. Данное явление представляет опасность в части экологических и экономических последствий, вреда жизни и здоровью людей, а также в целом интересам общества и государства.

Причины пожаров разнообразны. Наиболее распространёнными причинами пожаров являются: неосторожное обращение с огнем; аварийные пожароопасные режимы работы электросети и оборудования; нарушение требований правил пожарной безопасности к устройству отопительных систем; поджог; действия сил природы (грозы, солнечной энергии); неправильное хранение веществ, склонных к самовозгоранию [2].

Существуют преступления, связанные с пожарами. При расследовании таких преступлений основной задачей является правильно установить место первоначального горения, а также исходя из этого, причину его возникновения. Данные действия требуют специальных знаний и технических средств в связи с тем, что место пожар является сложным объектом исследования [3].

Качественное расследование пожаров позволяет снизить количество пожаров путем правильного выбора курса профилактических мероприятий, а также в результате неизбежности наказания за совершенное правонарушение, связанное с пожарной безопасностью.

Физические процессы масса и теплопереноса на месте пожара оставляют определенные следы на сохранившихся конструкциях и предметах. Данная информация позволяет проводить анализ и эффективно устанавливать место первоначального горения и путей его распространения [4].

В Российской Федерации существует отдельный род экспертиз (пожарно-технические), а также орган дознания по преступлениям связанными с пожарами в виде федерального государственного пожарного надзора МЧС России. В развитых странах мира существуют специалисты в области расследования и

экспертизы пожаров. В Японии исследованием пожаров и установлением их причин занимается специализированная сеть региональных центров входящие в пожарные департаменты. В Соединенных Штатах Америки существуют организации, которые обеспечивают расследование пожаров и проведение экспертиз, в том числе в составе страховых компаний. Существуют также общественные организации, к примеру, Международная ассоциация исследователей пожаров и поджогов [4].

Актуальность проблемы качественного расследования пожаров с каждым годом становится все очевидней. Установление первоначального места и истинной причины возникновения горения является важным аспектом правового государства, в части привлечения виновных лиц к ответственности и возмещения убытков в результате пожара. Наличие частной собственности и системы страхования оказывает существенное влияние на важность и актуальность данной темы. Наличие судебной системы обязывает специалистов и правоохранительные органы представлять доказательства своих предположений и суждений, основанных на объективности и полноте исследований с использованием современных достижений науки и техники [5].

Проведя обзор и анализируя существующие на данный момент методики исследования материалов на пожаре для установления очага и путей распространения, выявлено, что методики индивидуальны для каждого материала, и специалисту необходимо вывозить собой целый автомобиль (мобильную лабораторию) с арсеналом приборов различных видов. Зачастую специалисты не в полной мере используют на месте пожара весь технический арсенал, а основываются на органолептических методах и личном жизненном опыте, что приводит к ошибкам и недостоверности доказательств.

Таким образом, необходимо разработать универсальный метод контроля степени термических повреждений материалов на месте пожара и установления очага пожара, с помощью одного прибора. Данный метод позволит специалисту чаще применять технические средства и повысит качество расследования пожаров.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению

развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899) по п. 1. Безопасность и противодействие терроризму, а также п. 4 (разработка универсального оборудования обеспечивающего повышение эффективности выполнения подразделениями МЧС России задач по предназначению) приоритетных направлений научно-технической деятельности МЧС России (приказ МЧС России от 29.01.2021 № 37).

Степень разработанности темы.

Методики исследования материалов на месте пожара базируются на фундаментальных законах физики, химии и других специализированных областях науки. «Исследование пожаров» или «Экспертиза пожаров» (Fire Investigation) является самостоятельным разделом прикладной науки. В основе его лежат научные разработки Б.В. Мегорского, Г.И. Смелкова, Кирка, Де Хаана, Шонтага, Хагемайера, И.Д. Чешко и др.

Сформированы специальные методики, которые позволяют, путем исследования материальной обстановки на месте пожара, устанавливать место его возникновения (очаг пожара), пути развития горения, устанавливать причину пожара. Данные методики позволяют установить место первоначального горения на крупных по площади и сложных по развитию пожарах. Большой вклад в разработку методик внесли Н. Защук, Н. Макагонов, М. Зайцев, Г. Павлов, а также сотрудники и работники Санкт-Петербургского филиала Федерального государственного учреждения «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» (ВНИИПО) МЧС России. На сегодняшний день Исследовательского центра экспертизы пожаров Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (ИЦЭП) – головного судебно-экспертного подразделения Федеральной противопожарной службы МЧС России.

Колориметрия используется в различных областях науки (химии, медицине, для контроля качества воды, в промышленности).

Основным методом оценки степени термических повреждений является визуальный метод. Однако, данный метод субъективен. Восприятие человеком

цвета зависит от многих факторов, что оказывает влияние на достоверность полученных результатов.

По результатам анализа вышеперечисленных методик установлено, что на данный момент существуют методы и приборная база, которые позволяют объективно оценить степень термических повреждений материалов на пожаре. Однако, данные методы индивидуальны для каждого типа вещества или материала, а также часть методов может быть использована только в лабораторных условиях.

Цель диссертационной работы: повысить пожарную и экологическую безопасность в результате качественного расследования пожаров путем повышения объективности контроля степени термических повреждений веществ и материалов.

Для достижения поставленной цели в работе решались **основные задачи:**

1. Разработать метод контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара, основанный на измерении цветовых характеристик.
2. Разработать прибор контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара, имеющий лучшие характеристики по сравнению с аналогами.
3. Экспериментально установить зависимости цветовых характеристик от температуры и времени термического воздействия на объектах исследования и критерий оценки степени их повреждений, разработанным методом и прибором.
4. Разработать рекомендации по практическому применению предложенного метода и прибора контроля для повышения объективности в принятии решения по установлению очага пожара.

Объектами исследования являются наиболее распространенные материалы и вещества на месте пожара (бетон, сталь, древесина, полимеры в виде поливинилхлорида (далее ПВХ), отложения копоти).

Предметом исследования является изменение цветовых характеристик при термическом воздействии на материалы и вещества.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан новый метод контроля степени повреждений веществ и

материалов на месте пожара, основанный на изменении цветовых характеристик в результате термического воздействия, отличающийся от известных своей универсальностью.

2. Разработан новый прибор контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара с лучшими характеристиками по сравнению с существующими аналогами.

3. Впервые экспериментально установлены закономерности изменения цветовых характеристик веществ и материалов от температуры и времени термического воздействия.

4. Предложен новый критерий оценки степени термических повреждений веществ и материалов.

Теоретическая значимость работы:

– установлены закономерности влияния температуры и времени термического воздействия на изменение цветовых характеристик веществ и материалов;

– разработан метод контроля степени повреждений веществ и материалов на месте пожара, основанный на изменении цветовых характеристик в результате термического воздействия;

– разработан прибор контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара с лучшими характеристиками по сравнению с существующими аналогами;

– предложен критерий оценки степени термических повреждений веществ и материалов.

Практическая значимость работы:

Разработаны рекомендации по практическому применению предложенного метода и прибора контроля для повышения объективности в принятии решения по установлению очага пожара.

Основные результаты работы могут быть использованы в практической деятельности при расследовании пожаров специалистами испытательных пожарных лабораторий, а также дознавателями и следователями МЧС, МВД и СК

России.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовались эмпирические методы исследования (наблюдение и эксперименты). В результате применения эмпирических методов исследования была определена цель, сформулированы задачи исследования и выдвинута гипотеза. При проведении эксперимента применялись методы колориметрии для измерения цвета в системе RGB. Проведена обработка с помощью методов математической статистики полученных в ходе эксперимента результатов изменений цветовых характеристик различных материалов, подверженных температурному воздействию. Проведены процедуры перевода полученных данных в закономерности.

Основные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся результаты теоретических и экспериментальных исследований:

1. Метод контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара, основанный на измерении цветовых характеристик.
2. Прибор контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара, имеющий лучшие характеристики по сравнению с аналогами.
3. Результаты исследований изменений цветовых характеристик материалов от температуры и времени термического воздействия и критерий оценки степени их повреждений.
4. Рекомендации по практическому применению предложенного метода и прибора контроля для повышения объективности в принятии решения по установлению очага пожара.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается теоретическими данными и экспериментальными исследованиями, выполненными с использованием прошедших калибровку и поверку средств контроля, работающими на основе других физических принципов (магнитный вихретоковый метод, метод замера остаточных температур на поверхности теплоемких конструкций, ультразвуковая дефектоскопия).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

– III Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» г. Железногорск, 2021;

– IV Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций» г. Железногорск, 2022;

– XXIV Международной студенческой научной конференции «Молодежь, наука и цивилизация», г. Красноярск, 2022;

– VII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы естествознания», г. Иваново, 2022;

– Всероссийской конференции с международным участием «Применение экспертно-криминалистических методов в процессуальной деятельности органов дознания при работе с объектами-носителями информации», г. Екатеринбург, 2022;

– Международной научно-практической конференции «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций», г. Красноярск, 2022.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, включая 4 работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, 6 статей в сборниках трудов Международных и Всероссийских научно-практических конференций.

Личный вклад. Автором лично разработан метод неразрушающего контроля термических повреждений веществ, материалов и изделий на месте пожара, основанный на измерении цветовых характеристик и прибор контроля термических повреждений на месте пожара. Экспериментально установлены зависимости цветовых характеристик от температуры и времени термического воздействия на объектах исследования и критерий оценки степени их повреждений. Разработаны рекомендации по практическому применению

предложенного метода и прибора контроля для повышения объективности в принятии решения по установлению очага пожара.

Реализация результатов работы. Результаты исследования использованы в учебном процессе кафедр «Инженерно-технических экспертиз и криминалистики», «Судебная экспертиза» ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» и ФГБОУ ВО «Уральский институт ГПС МЧС России», внедрены в деятельность ФГБУ «СЭУ ФПС № 93 «ИПЛ» МЧС России.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Полный объем диссертации составляет 187 страниц, 27 таблиц, 77 рисунков, 12 формул. Список литературы включает 103 наименования.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА МЕСТЕ ПОЖАРА

1.1 Теоретические основы формирования повреждений материалов на пожаре

В результате горения возникают повреждения материалов, расположенных в определенной области. В месте первоначального горения (очаге пожара) повреждения материалов более значительные из-за более длительного воздействия температуры в данной области. Особенно явно выраженные следы очага пожара формируются в результате неразвившегося пожара. Недостаточный воздухообмен, малая мощность источника зажигания, свойства материала оказывают прямое влияние на режим горения [3, 4, 6].

Основные очаговые признаки при развитых пожарах формирует физический процесс в виде конвекции.

Существует три вида передачи тепла на пожаре: конвективный теплообмен (конвекция), лучистый теплообмен, теплопроводность внутри твердых тел и при непосредственном их контакте (кондукция) [4, 7].

В результате пламенного горения над местом его первоначального возникновения формируются конвективные потоки. Конвекция оказывает прямое воздействие на развитие процесса горения из-за подсоса воздуха в данную зону. Горячие конвективные потоки приводят к термическим повреждениям в виде разрушений, воспламенений, уничтожений материалов за счет их прогрева. По данной причине от очага пожара образуются локальные термические повреждения материалов и конструкций, которые являются признаками первоначального места возникновения горения. В спокойной атмосфере конвективный поток направлен вверх и образует форму конуса с вершиной направленной к месту очага пожара [4, 7].

Следует отметить, что очаговый конус может меняться в зависимости от определенных условий (высота помещений, направление и сила воздушных

потоков), а может и вовсе нивелироваться при развитии пожара на всю площадь помещения [4, 8].

Воздухообмен на месте пожара влияет на распространение и динамику горения. При расследовании пожара необходимо реконструировать направление воздушных потоков для успешного поиска очага пожара. Однако в ходе развития пожара направление воздушных потоков и воздухообмен в целом может меняться в результате повреждения целостности конструкций, расположения горючих материалов, разрушение остекления окон, а также в результате действий пожарных подразделений [4, 9].

Теплообмен с помощью излучения формирует признаки распространения пожара, а также направление тепловых потоков. Под действием лучистой энергии от очага пожара происходит направленный односторонний нагрев материалов, который приводит к повреждениям и частичным уничтожениям. Металлические конструкции деформируются преимущественно в сторону источника тепла. Данный визуальный признак часто используют пожарные специалисты при поиске очага пожара [4, 6].

Тепловое излучение может стать причиной возникновения вторичных очагов горения [4, 6].

В возникновении и развитии горения при наличии материалов с достаточно высокой теплопроводностью участвует кондукция. Данный вид теплообмена может играть существенную роль при расследовании пожаров. К примеру, загорание материалов, находящихся за металлической переборкой при проведении сварочных работ, особенно на речных и морских судах. Однако, формирование очаговых признаков в результате кондукции незначительное [4, 6].

В литературе для пожарно-технических специалистов [3, 9] указаны признаки направленности распространения горения. Основным признаком путей распространения пожара является постепенно уменьшающиеся от очага термические повреждения материалов. На крупных по площади пожарах пути распространения играют важную роль при установлении первоначального места возникновения горения. Пожарно-технические специалисты на крупных пожарах

стараятся посмотреть на объект пожара сверху, целиком, для установления зоны с наибольшими термическими повреждениями. В данной зоне в дальнейшем устанавливается очаг пожара.

Направленность распространения горения определяют с помощью инструментальных методов контроля степени термических повреждений материалов [4, 6].

Вторичными очагами горения принято называть зоны, в которых в отличие от очага пожара интенсивное горение происходит из-за сосредоточения горючих материалов или имеются условия увеличивающие интенсивность горения (хороший воздухообмен) или тушение подразделениями пожарной охраны производилось в последнюю очередь, а формирование наибольшей степени термических повреждений происходит в ходе развития пожара. В результате растекания и плавления горючих веществ (термопластичные полимеры) также могут образовываться вторичные очаги горения [3, 4].

В очаге пожара степень термических повреждений материалов больше, чем в других зонах, вследствие более длительного горения, при равных условиях в виде сосредоточения пожарной нагрузки и воздухообмена в помещении. Также в результате более длительного промежутка времени горение развивается интенсивнее в данной зоне. Таким образом, температурное воздействие на вещества материалы и изделия в зоне очага пожара выше по сравнению с другими участками пожара [4].

Критерии в виде продолжительности горения (t), степени термического поражения (S) и температуры (T) в источнике [4, 6] рассматриваются как количественные показатели, с помощью которых возможно определить пути распространения горения и очаг пожара.

Критерием для определения очага пожара методом визуального осмотра является анализ степени термических повреждений материалов и конструкций. Признаки термических повреждений индивидуальны для каждого типа материала, и соответственно критерии их оценки также отличаются. Наиболее распространёнными критериями при визуальной оценке являются: деформация,

разрушения, частичное уничтожение, изменения цвета.

Стоит учитывать наличие копоти на поверхности материалов. Степень закопчения на несгораемых материалах может нести важную информацию при установлении очага пожара. В источнике [9] отмечается, что копоть, которая осела на поверхности конструкций, может выгорать в зонах более высоких температур, а на других участках может сохраняться. Таким образом, зоны с отсутствием копоти могут трактоваться как очаговый признак. Следует отметить, что этот признак, с дальнейшим развитием пожара сохраняется в связи с тем, что дальнейшее осаждение копоти не происходит благодаря излучающему тепловому потоку от нагретой поверхности конструкции, особенно теплоемкой (бетонная или кирпичная стена, перекрытие) [4, 9].

По глубине обугливания, текстуре (плотность, пористость) и строению угля на древесных материалах и конструкциях возможно оценить степень термических повреждений [3].

Методы оценки степени термических повреждений с помощью технических средств позволяют более точно оценить и сравнить между собой однотипные материалы после пожара, что позволяет исключить субъективную сторону исследования, характерную при визуальном осмотре. Следует отметить, что инструментальные методы, в большинстве своем, чувствительней к внутренним изменениям в материалах, которые могут не определяться визуально [4, 6].

Для возможности оценки и контроля степени термических повреждений материалов, предметов и конструкций с помощью инструментальных методов необходимо [4]:

а) выбрать физическую характеристику, которая изменяется под действием температуры. Данная зависимость условной характеристики от температуры должна быть в диапазоне изменения, характерном для режима горения;

б) использовать инструментальный метод и средство его реализации, позволяющие определить количественно данную характеристику материала и дифференцировать степень повреждений в результате воздействия выбранного опасного фактора пожара различной интенсивности и длительности. Как

отмечалось выше, для оценки степени термических повреждений материалов используют температуру и время.

По сравнению с определением температуры воздействия на материал, задача определения длительности горения в тех или иных зонах значительно более сложна [4, 6].

При воздействии температуры на материал происходит химическая реакция (или совокупность реакций). Скорость химической реакции зависит от температуры. Результат данной химической реакции, в виде степени термических повреждений материала, зависит от температуры и времени воздействия. Таким образом, степень термических повреждений материала является функцией температуры (T) и времени воздействия (τ) (формула 1.1) [4, 6]:

$$S = f(T, \tau) \quad (1.1)$$

Влияние температуры в данной функциональной зависимости более существенно, в связи с прямой зависимостью от скорости и начала химической реакции. Таким образом, длительность процесса определить сложнее.

В работах [10-12] было предложено решение задачи определения T и τ , по-отдельности, основываясь на результатах инструментального исследования обугленных остатков древесины. При исследовании окарины и неорганических строительных материалов существуют похожие предложения по решению данной задачи [4, 6].

На данный момент времени существуют методы инструментальных исследований материалов и веществ, которые можно найти практически на любом пожаре. Однако технические средства и физические основы применяемых методов индивидуальны для каждого типа материала.

Пожарно-технические специалисты, пользуясь комплексом инструментальных исследований на месте пожара, количественно определяют степень термических повреждений материалов и их распределение в пространстве, что позволяет качественно определить очаг пожара и пути его распространения.

Температурные границы, при которых возможны исследования отдельных

материалов, указаны на рисунке 1.1 [4, 6].

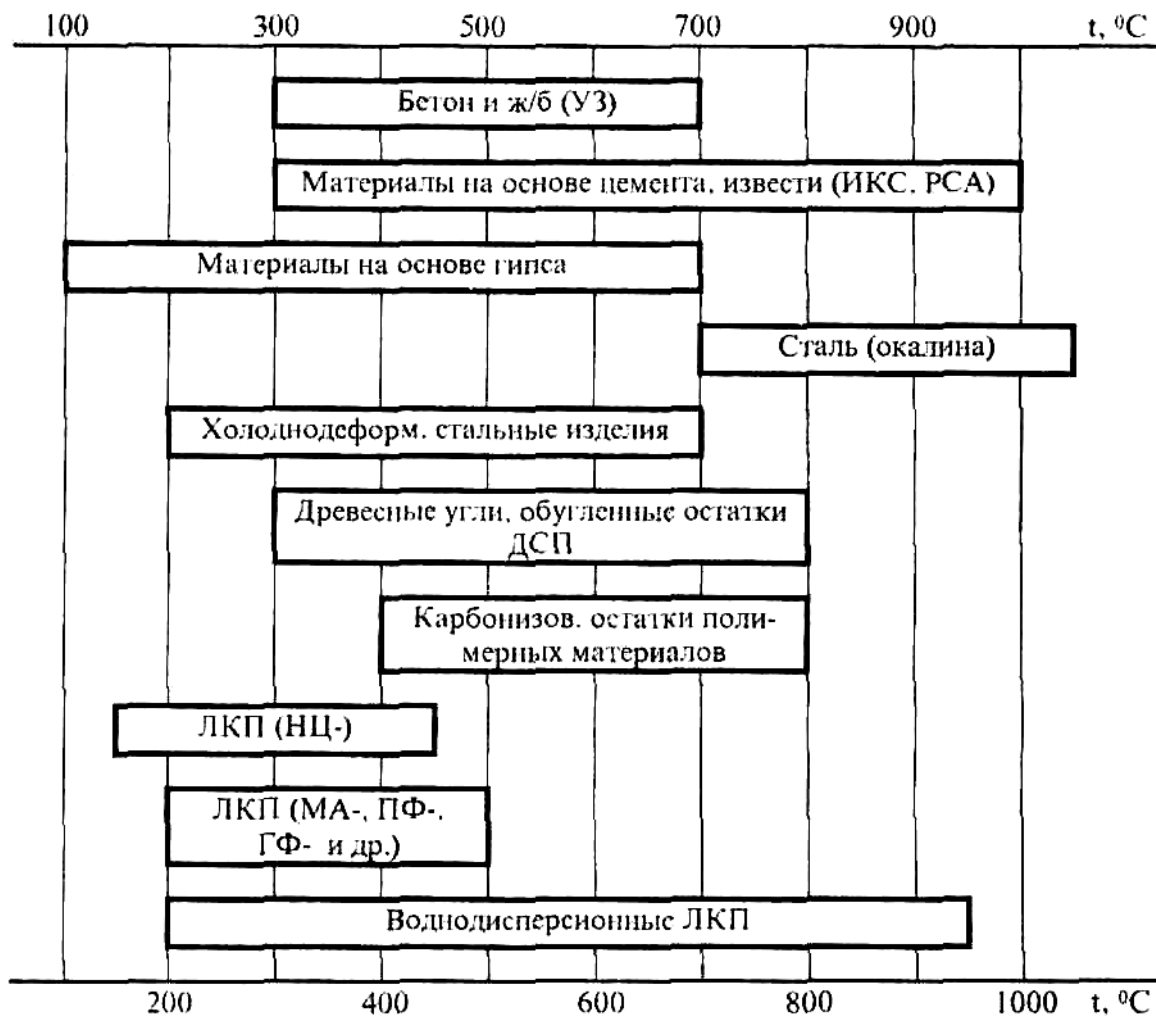


Рисунок 1.1 – Температурные границы информативности существующих методик при исследовании материалов после пожара [4, 6]

Таким образом, при оценке термических повреждений необходимо учитывать температуру и длительность горения. Однако температурные пределы при которых возможно оценить повреждения конструкций и предметов на месте пожара зависят от физических и химических свойств материалов.

1.2 Анализ существующих методов и средств контроля степени термических повреждений материалов на месте пожара

На сегодняшний день для исследования после пожара веществ и материалов различной природы используются инструментальные методы – спектральные, хроматографические, металлографические; методы измерения различных физических свойств материалов.

Необходимо отметить, что только часть методов имеет возможность проведения исследований на месте пожара. Таким образом, далее будут рассмотрены только методы исследования, применяемые непосредственно на месте пожара. На рисунке 1.2 отображены методы контроля степени термических повреждений на месте пожара для основных объектов исследования (бетон, сталь, древесина, копоть, полимеры).



Рисунок 1.2 – Методы контроля степени термических повреждений на месте пожара

Из таблицы 1.1 видно, что инструментальные исследования, применяемые на месте пожара, имеют ограниченное применения только для конкретных материалов. На данный момент отсутствуют универсальные инструментальные

методы оценки термических повреждений на месте пожара. Для качественного расследования пожара необходим комплекс приборов для исследования каждого типа материала, что в свою очередь, накладывает необходимость производить затраты на приобретение, содержание и доставку на место пожара данного оборудования. Красным цветом выделены основные и наиболее применяемые методы. Единственным универсальным методом является визуальный, который основывается на внешних изменениях материала. Визуальный метод имеет ряд недостатков, связанных со световыми иллюзиями и различными условиями наблюдения (угол падения света, освещенность, индивидуальная чувствительность зрения).

1.2.1 Анализ методов и средств контроля степени термических повреждений на пожаре для бетонных конструкций

При воздействии температуры на материалы из цемента химические процессы сопровождаются различными физическими процессами: разрыхлением, появлением трещин, изменением физико-механических свойств. При наличии заполнителей (щебень) в бетоне, и соответственно различий в коэффициентах линейного расширения цементного камня и щебня, возникают дополнительные напряжения и трещинообразование [4, 13].

В результате данных процессов происходят максимальные термические повреждения материалов из цемента в виде отслоения штукатурки, слоя бетона, разрушения и деформации конструкций. Существует ряд методик [4, 14, 15, 16], которые используют эксперты-строители и пожарно-технические специалисты при исследовании бетонных конструкций после пожара.

Метод оценки термических повреждений бетонных конструкций, который заключается в фиксации тона звука при простукивании, долгое время являлся одним из основных. При простукивании конструкции из бетона любым твердым предметом возможно определить на слух тон звука. Термически неподверженный бетон более плотный и имеет более высокий тон звука. При увеличении степени

термических повреждений бетон становится более рыхлый, и звук становится глухим. При ударе молоток может сминать бетон на поверхности конструкции, что говорит о воздействии температуры более 600 °С. Также часть конструкции, прогретая свыше 500 °С, при ударе может отколоться [4, 14].

В источнике [15] предлагается проводить оценку прочности бетонных конструкций после воздействия высоких температур с помощью технических средств в виде эталонного молотка Кашкарова (ГОСТ 22690.2-77) или аналогов (приборов типа ХПС и КМ с шариковым наконечником, молотка Фидзеля). Призмная прочность бетона уменьшается при увеличении температуры воздействия. Таким образом, для конструкций из бетона зонам с наименьшими значениями призмной прочности, соответствуют зоны с максимальными термическими повреждениями [4].

При температуре 300-400 °С, по данным [14], в конструкциях на основе бетона начинают образовываться трещины. При дальнейшем температурном воздействии поперечный размер трещин начинает увеличиваться. Ширина раскрытия трещин может достигать 0,5-1 мм при более высоких температурах (600-800 °С) [14]. В источнике [15] предлагается использование ручной лупы (4х и более кратном увеличении) для исследования макроструктуры бетона, подвергнутого воздействию температуры [4].

Существует метод, основанный на продолжительности протекания активной химической реакции действия соляной кислоты. Одинаковое количество соляной кислоты помещают на свежий скол бетона и производят замер продолжительности вспенивания в результате выделения углекислого газа при химической реакции секундомером. По приведенным данным в источнике [15], длительность реакции уменьшается при воздействии на термически поврежденном бетоне от температуры воздействия 200 °С и выше, вплоть до полного отсутствия реакции при 800 °С. Данная зависимость связана с химическими процессами, происходящими в бетоне, при термическом воздействии, а именно, в уменьшении остаточного содержания карбонатов [4].

Метод, предложенный в работе [14], позволяет оценить степень термических

повреждений по максимальной толщине прогрева конструкции из тяжелого бетона до заданных температур.

Изменения в бетоне при воздействии температуры происходят в результате процесса дегидратации, а также химического изменения компонентов. Данные изменения в составе влияют на физические свойства (твердости, упругости, разрыхление массы, появление трещин), которые приводят к изменению и акустических свойств. В Московском высшем техническом училище с 1947 года И.В. Зацуком проводились работы по использованию ультразвукового метода исследования качества бетонов. Дальнейшие исследования были продолжены во ВНИИ железобетона [17]. К настоящему времени в России и мире широко используется ультразвуковая дефектоскопия. Данный метод используется как экспресс-метод оценки физико-механических свойств бетона (плотности, модуля упругости) [18]. Использование ультразвуковой дефектоскопии для решения задачи выявления наибольших термических повреждений бетонных конструкций на месте пожара в экспертных целях было предложено в работах [19, 20]. Дальнейшее совершенствование метода продолжались в работах [21, 22]. На данный момент времени метод основан на определении скорости распространения поверхностных ультразвуковых волн в наружном (поверхностном) слое бетонных и железобетонных конструкций [4, 6]. При наибольших термических повреждениях в бетонных конструкциях, скорость прохождения ультразвукового импульса наименьшая по сравнению с менее поврежденными. Данный метод позволяет выявить зоны с наибольшими термическими повреждениями даже при низких температурах, когда визуальные признаки отсутствуют (при 300-400 °С). По результатам исследования бетонной конструкции, при определенных условиях, возможна оценка максимальной температуры нагрева [4, 21, 22].

В качестве недостатка метода можно выделить ограниченный круг объектов исследования. Исследуемые объекты должны представлять собой акустически однородные конструкции, так как в основе метода лежит сравнение скорости прохождения ультразвуковой волны на различных участках, и неоднородность оказывает существенное влияние на результат. На пожаре необходимо исследовать

только конструкции из бетона заводского изготовления (плиты перекрытий, стеновые панели) [4, 6].

А.В. Даниловым с соавторами в работах [23, 24] предложена методика исследования штукатурки, бетона и других, содержащих цементнопесочный раствор материалах, основанная на измерении магнитной восприимчивости. В песке может содержаться комплексное железосодержащее соединение (биотит $K(Mg, Fe)_3 [AlSi_3O_{10}] [OH, F]_2$). При термическом воздействии, в определенных температурах (600-700 °С), в результате химических реакций, выделяется вода, и образуется магнитная фаза оксидов железа. Изменение и появление магнитных свойств при распаде биотита может быть измерено с помощью соответствующих приборов. Для данных целей применяют геофизические приборы для измерения магнитной восприимчивости материалов (каппаметры). Таким образом, данный метод позволяет исследовать цементнопесочные материалы и выявлять зоны нагрева выше 600-700 °С. К недостаткам данного метода можно отнести ограниченный круг объектов исследования, в связи с различным строением песка (отсутствие железосодержащих соединений), а также невозможность проведения измерений железобетонных и армированных конструкций [4, 24].

Основным методом для оценки степени повреждений на пожаре для бетонных и железобетонных материалов применяемым специалистами является ультразвуковой метод с помощью ультразвукового дефектоскопа типа УД-2Н или аналогов [25].

1.2.2 Анализ методов и средств контроля степени термических повреждений изделий и конструкций из стали

Термическое воздействие на стальные и металлические конструкции может приводить, при определенных температурах, к внутренним изменениям в структуре, а также на их свойства. Большинство изменений после термического воздействия сохраняются, что позволяет в дальнейшем проводить исследования этих конструкций [4].

Наиболее часто встречающийся признак термического воздействия на конструкции из стали на месте пожара является их деформация. Причиной является низкая огнестойкость стальных конструкций. При термическом воздействии на конструкции из стали выше 300-350 °С происходит повышение ее пластичности, которая сопровождается деформацией, ползучестью, снижением прочности. При дальнейшем увеличении температуры до 500-600 °С прочность конструкции снижается вдвое, а при больших температурах в несколько раз. Таким образом, даже при относительно невысоких температурах (300 °С) металлоконструкции заметно деформируются, при более высоких температурах достаточно 15-20 минут нагрева для обрушения элементов здания [4, 26].

В источниках [3, 9, 27] указано, что деформации происходят преимущественно в сторону более интенсивного теплового воздействия. Для решения данной задачи необходимо выделить основное направление деформации металлоконструкций на участках здания или помещения и рассчитать для него относительную величину деформации, т.е. отношение величины прогиба к величине участка конструкции, на котором этот прогиб наблюдается [4].

При условиях высокотемпературного окисления в среде воздуха на поверхности углеродистой стали формируется плотный слой окислов (окалины). Данный процесс начинается при температуре около 700 °С причем в достаточно короткий промежуток времени. Рост толщины слоя окалины происходит по параболическому закону [28, 29] и зависит от температуры и времени. Таким образом, при увеличении температуры и времени воздействия, увеличивается и толщина слоя окалины [4, 6].

Существует метод [6, 30] для измерения толщины окислов на поверхности углеродистых сталей с помощью магнитного поля вихревых токов. Окалина имеет свои физико-химические свойства отличные от углеродистой стали, в том числе она уменьшает действие электромагнитного поля и вихревых токов соответственно. Таким образом, для вихретокового метода величина ЭДС (U , мкВ) обратно пропорциональна температурному и временному воздействию на поверхность стали. Чем меньше величина ЭДС, тем большие термические

повреждения имеет конструкция из углеродистой стали [4, 6].

В работе [31] предложен метод оценки степени термических повреждений металлических конструкций и изделий на месте пожара путем измерения твердости по Бринеллю или Виккерсу. Недостатками данного метода является невозможность применения для исследования горячекатаных сталей, в связи с тем, что данные объекты были термически обработаны, и температурное воздействие пожара не оказывает существенное влияние на изменение твердости. Данное утверждение подтверждается работой [32], в которой установлено, что изменение микротвердости находится в пределах ошибки измерения для исследованных горячекатаных стальных листов при термическом воздействии [4].

Магнитный метод, основанный на измерении коэрцитивной силы [33], является неразрушающим методом для оценки степени термических повреждений холоднодеформированных стальных изделий в пожарно-технических исследованиях. В данном методе измеряется ток размагничивания предварительно намагниченного изделия или относительная степень рекристаллизации. Коэрцитивная сила (величина напряженности магнитного поля) является структурочувствительной характеристикой материала. Данный показатель широко используется на производстве и технике для неразрушающего контроля свойств металла, его структуры, глубины и твердости поверхностноупрочненных слоев [4, 34].

Основными инструментальными методами оценки степени термических повреждений стальных изделий на месте пожара является магнитный вихретоковый для горячекатаных сталей и метод, основанный на измерении коэрцитивной силы для холоднодеформированных стальных изделий [25].

1.2.3 Анализ методов и средств контроля степени термических повреждений на пожаре для изделий и конструкций из древесины

Основными признаками термических повреждений деревянных конструкций и изделий на пожаре является глубина переугливания и их частичное уничтожение.

В работах [35-37] скорость обугливания принималась равной 0,6-1,0 мм/мин на основании огневых испытаний деревянных конструкций на огнестойкость по стандартному температурному режиму пожара. Однако использование таких данных на пожаре некорректно, в связи с тем, что скорость обугливания зависит от величины теплового потока, воздействующего на древесину и различных свойств древесины (сорт, влажность, смолистость). Так, например, по данным в работе [38], при снижении температуры воздействия, скорость обугливания древесины сосны может снижаться в разы [4].

Наиболее простым и часто используемым методом исследования термических повреждений деревянных конструкций и изделий на месте пожара можно считать метод пенетрации. При протыкании обугленного слоя древесины острым металлическим предметом фиксируется глубина, на которую легко без дополнительных усилий входит данный предмет (гвоздь, игла). Неповрежденная древесина по плотности значительно отличается от угля, тем самым обугленный слой возможно легко проткнуть и провести замер глубины и выявить зоны с наибольшими термическими повреждениями [4].

Анализируя результаты исследований сжигания сосновых балок в работах [39, 40], деревянных досок и балок в работах [41, 42], было установлено, что линейная зависимость глубины обугливания древесины от времени стремится к постоянной величине [4].

Свойства древесных углей, их структура и зависимость от температуры пиролиза достаточно хорошо изучены в работах [43-46]. Но стоит учитывать, что данные исследования были применимы для угля, получаемому без доступа воздуха путем термической деструкцией древесины, а также углю, полученному при условиях без доступа воздуха дополнительным прокаливанием. Для данных объектов исследования установлены зависимости свойств угля (содержание водорода, углерода, летучих веществ, электропроводность, теплопроводность, пористость, плотность, функциональный состав) от температуры воздействия [4].

У обугленных остатков также наблюдаются взаимосвязи с условием теплового воздействия на древесину, из которой они были получены. Основными

факторами, оказывающими влияние на свойства древесных углей при термическом воздействии в условиях пожара, являются температура и время воздействия на древесину. Воздухообмен и прочие условия в меньшей степени оказывают влияние на свойства угля (электропроводность, содержание летучих веществ, элементный состав), по этой причине ими пренебрегают [4].

В работах [47, 48] предлагается метод определения удельного сопротивления углей после пожара, в связи с высокой чувствительностью электросопротивления угля к условиям его образования в части термического воздействия на древесину. При интенсивном горении происходит последовательное отщепление и удаление термолабильных компонентов. В результате карбонизации и ароматизации угольного вещества, вплоть до появления графитизированных структур, происходит снижение удельного электросопротивления угля в связи с увеличением содержания углерода и снижением содержания в угле гетероатомов. К примеру, при тлении древесины образуется уголь, и его электросопротивление достигает $10^8 - 10^{10}$ Ом, а у обугленных остатков при интенсивном пламенном горении электросопротивление образовавшегося угля может составлять всего единицы Ом [4]. Данные изменения можно объяснить тем, что электропроводность вещества резко возрастает в результате интенсивного режима горения. При увеличении продолжительности горения, моно- и полиядерные ароматические углеродные кольца и отдельные графитизированные структуры начинают слагаться в мощную систему полисопряжения. Данная система обеспечивает повышенную подвижность электронов и возможность делокализации электронного облака [4, 6]. Однако у данного метода имеются недостатки в части чувствительности к пробоподготовке, что иногда делает невозможным работу непосредственно на месте пожара.

Основными инструментальными методами контроля степени термических повреждений изделий и конструкций из древесины на месте пожара является метод пенетрации (измерение глубины обугливания) и метод определения удельного сопротивления для обугленных остатков [25].

1.2.4 Анализ методов и средств контроля степени термических повреждений материалов на пожаре по отложениям копоти

В работах [49, 50, 51] предложен метод оценки степени термических повреждений конструкций, основанный на исследовании отложений копоти. Разработана данная методика оценки и технические средства ее реализации в ИЦЭП ФГУ ВНИИПО [4, 50].

На любом пожаре имеются отложения копоти на конструкциях и предметах, причем и в зоне задымления, так и в зоне горения. С помощью разработанного метода исследования копоти для установления очага пожара, в исследованиях [49-51], стало возможно дифференцировать зоны нагрева различной интенсивности для сплошного поля заочпчения на поверхности конструкции [4].

Электросопротивление слоев копоти существенно зависит от условий образования, от температуры в зоне горения, а также температуры и длительности вторичного нагрева в ходе развития пожара. Влияние температурного воздействия на электросопротивление копоти позволяет оценить интенсивность воздействия на конструкции и изделия, на которых эта копоть находится. В результате удается отделить зоны задымления, где копоть осела на относительно холодных поверхностях, а также выявить зоны горения и зоны максимального воздействия конвективных потоков от очага пожара и основных очагов горения на конструкциях и предметах [4].

Таким образом, исследование копоти в связи с наличием продуктов горения на каждом пожаре несет определенную информацию о путях распространения горения и очаге пожара. Единственным и основным методом контроля степени термических повреждений материалов путем исследования копоти является метод измерения электросопротивления слоев копоти [4, 6].

1.2.5 Анализ методов и средств контроля степени термических повреждений на пожаре применяемых для полимеров

При исследовании состава обугленных остатков пенополиуретана на воздухе и в азоте после термического воздействия в работе [52] было установлено, что в зависимости от температуры воздействия, изменяется количество твердых остатков и содержание в них, экстрагируемых бензолом веществ. В работе [53] описали зависимость степени карбонизации продуктов термоокислительной деструкции полистирола, поливинилхлорида, полиамида от температуры воздействия и состава среды. В частности в работе определяли количество экстрагируемых бензолом веществ и отношение Н/С при термической деструкции.

На начальных стадиях термической деструкции полимера происходит отщепление наиболее термолабильных групп и соответственно снижение содержания в нем азота, кислорода, серы, фосфора, галогенов. К примеру, при повышении температуры воздействия, а также длительности нагрева в остатках хлорированных полимеров происходит снижение содержания хлора. Пенополиуретаны теряют азот при термической деструкции за счет отщепления азотсодержащих соединений (цианидов, метандиизоцианата, изоцианурата, изоцианатов). Таким образом, после воздействия температур выше 500 °С коксовый остаток пенополиуретана практически не содержит азота [4, 52, 53].

Различные физико-химические процессы, в том числе ароматизация, конденсация (уплотнение структуры) угольного остатка полимерного материала, при повышении температуры воздействия, способствует уменьшению атомного соотношения «водород/углерод», а также уменьшению низкомолекулярных экстрактивных веществ находящихся в полимере. Таким образом, по мере карбонизации полимера (для реактопластов, полимеров склонных к образованию угольного остатка) должны меняться его физические свойства, в том числе электросопротивление [4, 54, 55].

Подобный метод оценки степени термических повреждений существует для древесины, заключающийся в изменении удельного электросопротивления

обугленных остатков в зависимости от температуры и длительности воздействия. С увеличением температуры и воздействия на полимерные материалы электросопротивление обугленных остатков последовательно снижается. Это обстоятельство дает возможность использовать экспрессный метод определения электросопротивления для оценки степени термических повреждений, как для древесины, так и для полимеров. Необходимо отметить, что для проведения исследования полимер должен образовывать при сгорании карбонизованный остаток (термореактивные полимеры), а также возможно исследование термопластичных полимеров, которые при термодеструкции могут образовывать обугленную массу [4, 56].

Таким образом, основным инструментальным методом контроля степени термических повреждений полимеров на месте пожара является метод определения удельного сопротивления для обугленных остатков. Одним из основных прибором является прибор «Пресс» с пресс-формой. Прибор «Пресс» предназначен для создания необходимого давления на пресс-форму, в которой находится исследуемая проба углей, с целью измерения их электрического сопротивления в момент сжатия [4, 6].

1.3. Анализ зарубежного опыта в области оценки степени термических повреждений на месте пожара

За рубежом методическим и нормативным обеспечением расследования пожаров занимается Национальная ассоциация противопожарной защиты (англ. National Fire Protection Association, NFPA) — американская торгово-промышленная ассоциация при участии других стран по обеспечению пожарной, электрической безопасности и безопасности строительства [57].

Основным документом, в котором изложены методики расследования пожара за рубежом, является NFPA 921 «Руководство по расследованию пожаров и взрывов». Данное руководство было разработано техническим комитетом по расследованию пожаров, чтобы регламентировать процесс расследования пожара и

повысить качество проведения исследований [57].

В документе [57] указано, что анализ глубины обугливания древесины наиболее надежен при оценке путей распространения пожара, а не для установления конкретного времени горения или интенсивности воздействия тепла от соседних горящих материалов. Измеряя относительную глубину древесины и степень ее обугливания, дознаватель может определить, какие части изделия или конструкции дольше всего подвергались температурному воздействию. Относительная глубина обугливания в разных точках конструкции позволяет получить достоверную информацию о термическом воздействии, а также в свою очередь обнаружить зоны, где повреждения были наиболее сильными в зависимости от интенсивности горения, вентиляции или размещения горючих материалов. Затем дознаватель может определить направление распространения горения, при этом глубина обугливания уменьшается по мере удаления от источника тепла.

Использование диаграммы с отмеченными значениями глубин обугливания позволяет выявить зоны с наибольшими термическими повреждениями (рисунок 1.3). Линии разграничения степени повреждений, которые могут казаться неочевидными при визуальном осмотре, могут быть обнаружены и применены для анализа, путем измерения и нанесения на диаграмму сетки значений глубин обугливания. Проводя линии, соединяющие точки с одинаковой глубиной обугливания на диаграмме, можно определить максимальные и минимальные зоны термических повреждений на конструкции или изделии [57].

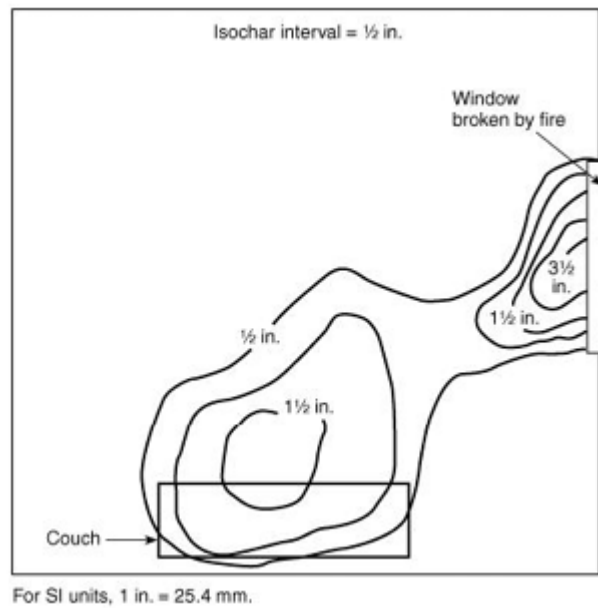


Рисунок 1.3 – Диаграмма глубины обугливания [57]

Однако стоит учитывать несколько факторов [57]:

1. Измерение глубины обугливания древесины может использоваться для определения более чем одного источника возгорания или тепла.

2. Сравнение и анализ результатов измерений глубины обугливания должны проводиться только для конструкций и изделий одного типа и материала. Было бы неверно сравнивать глубину обугливания деревянной балки с глубиной обугливания соседней деревянной стеновой панели.

3. Воздухообмен и вентиляция влияют на скорость горения. Древесина может иметь более глубокое обугливание, если она находится рядом с источником притока воздуха или каналом, через который могут выходить нагретые горючие газы.

4. Каждое сопоставимое измерение глубины обугливания должно производиться одним и тем же инструментом и одним и тем же методом измерения.

Лучше всего подходят тонкие, затупленные щупы, такие как штангенциркули определенных типов, глубиномеры протектора шин или специально модифицированные металлические линейки [57].

Для любого набора сопоставимых измерений следует использовать один и

тот же измерительный инструмент [57].

Для получения точных результатов также необходимо примерно одинаковое давление для каждого измерения при установке измерительного прибора [57].

При определении глубины обугливания необходимо учитывать всю обгоревшую конструкцию из древесины, часть которой могла быть полностью уничтожена огнем, и добавить недостающую глубину древесины к общему измерению глубины [57].

Глубина обугливания часто используется для оценки продолжительности пожара. Скорость обугливания древесины широко варьируется в зависимости от таких переменных, как: скорость и продолжительность нагрева; воздухообмен; отношение площади поверхности горючего вещества к массе; направление, ориентация и размер волокон древесины; порода древесины (сосна, дуб, пихта и т.д.); содержание влаги; характер покрытия поверхности. Таким образом, невозможно определить конкретное время горения только на основании глубины обугливания [57].

Горючие материалы, содержащие углерод, могут образовывать сажу в пламени. Нефтепродукты и большинство пластиков быстрее всего образуют сажу. Когда пламя касается стен и потолков, обычно откладывается сажа на их поверхности.

Отложения сажи позволяют определить очаговые зоны горения и зоны задымления. Следы сажи показывают лишь то, что горение происходило поблизости, но не указывают на конкретную точку. Дым и сажа могут скапливаться на более прохладных поверхностях здания или его содержимого, часто на верхних частях стен в помещениях, прилегающих к месту горения. Дым, особенно в условиях тления горючего материала, имеет тенденцию конденсироваться на стенах, окнах и других более прохладных поверхностях. Поскольку отложения продуктов горения, как правило, занимают практически весь свободный объем, они не помогают определить точное место очага пожара визуально [57].

Дымовые конденсаты имеют оттенки коричневого, а сажа — черного цвета.

Дымовые конденсаты могут быть влажными и липкими, тонкими или густыми, сухими и смолистыми. Эти отложения, после высыхания, нелегко стираются. Там, где было открытое пламя, отложения, скорее всего, будут смесью сажи и дыма. Когда отложения дыма впоследствии нагревают в огне, коричневые отложения могут измениться по цвету, текстуре и составу и могут стать темнее или выгореть.

Некоторые пожары могут привести к образованию только сухих отложений сажи, которые легко стираются с окон или других поверхностей. Полы и верхние поверхности помещений часто покрываются сажей, которая оседает на них во время и после тушения пожаров. При длительном воздействии огня на окнах и других поверхностях могут сгореть как отложения карбонизированного дыма, так и отложения сажи [57].

Чистый прожиг — это явление, которое появляется на негорючих поверхностях, когда сажа и дымовой конденсат, которые обычно остаются на поверхности, сгорают. Это создает чистую область, примыкающую к областям, затемненным продуктами сгорания. Чистый прожиг чаще всего возникает при непосредственном контакте с пламенем или при сильном излучаемом тепле. Хотя они могут свидетельствовать об интенсивном нагреве в данной области. Линии разграничения между чистым горением и закопченными участками могут быть использованы для определения направления распространения огня, а также для оценки степени термических повреждений материала [57].

Термин «прокаливание» используется пожарными специалистами за границей для описания многочисленных изменений, которые происходят с поверхностями гипсокартона во время пожара. Прокаливание гипсокартонных плит включает удаление из гипса свободной и химически связанной воды, а также другие химические и физические изменения в самом гипсовом компоненте. Прокаливание включает химическое превращение гипса в другой минеральный ангидрит. Обожженная гипсовая стеновая плита становится менее плотной от теплового воздействия, чем исходная, предварительно обожженная, неповрежденная стеновая плита. Чем глубже прокаливание стеновой плиты, тем больше термические повреждения данной конструкции (температура и

продолжительность воздействия) [57].

Гипсокартонная панель под воздействием температуры меняет свои свойства. Сначала поверхность бумаги обуглится и может также сгореть. Гипс на стороне, подверженной воздействию огня, меняет цвет в результате пиролиза органического вяжущего. При дальнейшем нагреве изменение цвета может распространиться на всю длину, а поверхность бумаги на обратной стороне обуглится. Когда вся толщина стеновой плиты станет беловатой, ни на одной из сторон не останется бумаги, а гипс будет химически обезвожен и преобразован в более рассыпчатое, менее плотное твердое вещество. Такая стеновая панель может оставаться на вертикальной стене, но на горизонтальных поверхностях держаться не будет, особенно если она впитала значительное количество воды при тушении пожара. Огнестойкие гипсовые стеновые панели содержат минеральные волокна или частицы вермикулита, внедренные в гипс для сохранения прочности стеновых панелей во время воздействия огня. Волокна добавляют прочности стеновым плитам даже после того, как они были тщательно прокалены [57].

Соотношение между прокаленными и непрокаленными участками на гипсокартоне также может отображать видимые линии разграничения температурного воздействия на поверхности. Измерения глубины прокаливания можно нанести на диаграмму, чтобы отобразить зоны термических повреждений, невидимые на поверхности [57].

Прокаливание гипсокартона является индикатором термических повреждений конструкций. Области наибольших термических повреждений могут быть выявлены, как по внешнему виду, так и по глубине прокаливания. Относительные различия в цвете и глубине прокаливания от точки к точке на поверхности конструкции могут быть использованы в качестве индикатора для определения областей больших или меньших термических повреждений при различных условиях пожара, таких как воздухообмен и расположение горючих материалов [57].

Диаграмма глубины прокаливания гипса может быть построена таким же образом, как и диаграмма глубины обугливания для древесины.

Относительная глубина прокаливания может указывать на различия в общем нагреве гипсовой плиты, подверженной воздействию огня, при этом большая глубина прокаливания указывает на больший нагрев. Более глубокие показания прокаливания указывают на более длительный или более интенсивный нагрев (тепловой поток), достигнутые этими участками стеновой панели во время пожара.

Некоторые факторы влияют на достоверность анализа глубины прокаливания гипса. Следует учитывать возможность нахождения нескольких очагов горения на месте пожара. Сравнение измерений глубины прокаливания должно производиться только для одного и того же материала и типа конструкции. Необходимо учитывать, что гипсокартонные листы бывают разной толщины, используют разные строительные материалы и со временем меняются. Дознаватель должен тщательно рассмотреть участки стен или потолков, в которых могли быть вставлены новые участки в результате ремонта. При оценке глубины прокаливания следует учитывать отделку гипсокартона (например, краска, обои, штукатурка). Измерения следует проводить последовательно, чтобы исключить случайные ошибки при измерениях. Гипсокартонная плита может быть повреждена механически при разборе, капитальном ремонте и тушении струями воды. Смачивание обожженной стеновой плиты может размягчить гипс до такой степени, что достоверные измерения практически будут невозможны [57].

При измерении и анализе глубины прокаливания можно использовать визуальное наблюдение поперечных сечений или зондовое исследование.

Визуальный метод требует осторожного удаления небольших участков рыхлого гипса для наблюдения и измерения толщины прокаленного слоя [57].

Метод зонда требует, чтобы исследование глубины прокаливания проводилось путем введения зонда с малым поперечным сечением, такого как показан на рисунке 1.4.

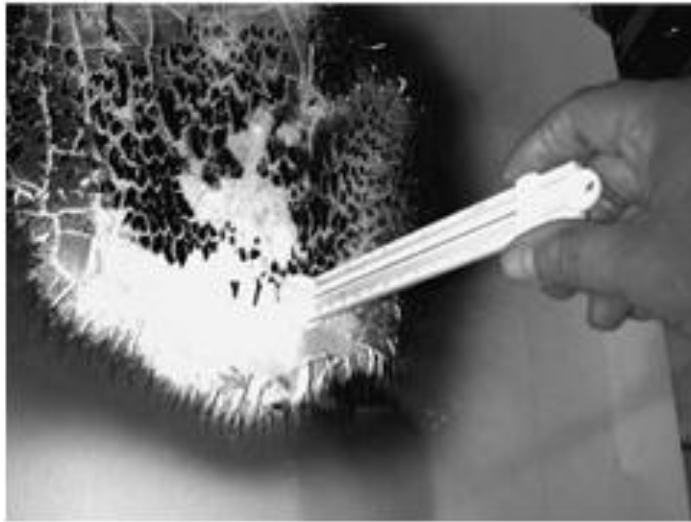


Рисунок 1.4 – Исследования гипса с помощью зонда [57]

При использовании зондового метода дознаватель должен разделить объект исследования на точки измерения с одинаковыми интервалами горизонтальной и вертикальной сетки вдоль поверхности, обычно с шагом 0,3 м (1 фут) или меньше. Следует соблюдать осторожность, чтобы использовать примерно одинаковое давление для каждого измерения. Такие исследования можно проводить как на стенах, так и на потолочном перекрытии [57].

Исходя из выше изложенного, можно сделать вывод, что методы исследования термических повреждений материалов на месте пожара за рубежом частично схожи, однако имеется определенная специфика, связанная с материалами, применяемыми в строительстве (легкие конструкции из гипсокартона и древесины).

1.4 Выводы по главе

1. Термические повреждения материалов зависят от температуры и длительности горения, а информативность в исследовании отдельных материалов и их обгоревших остатков имеют температурные области с определенными границами;

2. Проведен анализ существующих методов и средств контроля степени

термических повреждений. В большинстве случаев основные исследования проводятся в лабораторных условиях, а только часть методов рассчитана на применение непосредственно на месте пожара;

3. Каждый метод и прибор предназначен для контроля степени термических повреждений только для определенной группы материалов.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА МЕСТЕ ПОЖАРА ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1 Выбор объектов исследования

При воздействии температуры пожара на материалы и конструкции, в их составе и структуре происходят физико-химические изменения, что приводит к формированию следов повреждений, специфичных для каждого вида материала. Повреждения могут наблюдаться визуально или выявляться с помощью специальных инструментальных методов и технических средств, в зависимости от степени термических повреждений материала (температуры и времени воздействия). Под термином степени термических повреждений понимается величина разрушений или изменений материала, которую в дальнейшем можно анализировать и сравнивать для установления очага пожара и путей его распространения. Для данных целей необходимо величину выражать качественной оценкой (сильные разрушения с отслоением защитного слоя или незначительные разрушения бетона с образованием мелких трещин, полное или частичное уничтожение) или количественной оценкой с помощью физического параметра, зависящего от последствий воздействия температуры. Измерение глубины обугливания древесины, удельное электросопротивление обугленных остатков древесины и полимеров являются примерами количественной оценки степени термических повреждений материала [4, 58].

Температура и длительность нагрева являются основными физическими параметрами, которые определяют степень термического повреждения любого материала [4, 58].

Для выявления места возникновения (очага) пожара и путей распространения горения необходимо найти, зафиксировать и проанализировать следы горения и теплового воздействия на материалы и конструкции [3].

По результатам анализа и систематизации существующих методов, а также

приборной базы, было принято решение о разработке принципиально нового и универсального метода для контроля степени термических повреждений большинства типов материалов непосредственно на месте пожара, путем применения разработанного цветоизмерительного прибора.

Первым этапом работы было проанализировано поведение веществ и материалов в условиях пожара.

При нагреве поведение бетона определяется изменением его составляющих — заполнителя и цементного камня. К признакам, по которым можно судить о температуре, действовавшей на бетон, можно отнести изменение цвета и степень закопчения продуктами горения [4, 59].

Цвет бетона изменяется в результате термического воздействия в зависимости от вида заполнителя и вяжущего. Так, например, тяжелый бетон при температуре до 300 °С принимает розовый оттенок, дальнейший нагрев до 400–600 °С образует красноватый оттенок, а при высоких температурах пожара 900–1000 °С бетон приобретает бледно-серый цвет [4, 59].

Во время процесса горения образуются вещества в различном агрегатном состоянии (газообразные, жидкие или твердые вещества) и соединения. Продукты горения образуются в результате сложного физико-химического процесса окисления, который называется горением. Под понятием сажа (копоть) понимаются остатки углерода, не вступившего в реакцию [4, 58].

При высоких температурах более 600 °С, в характерных зонах интенсивного горения, копоть полностью выгорает видимыми участками, в виде светлых пятен. В зонах с более низкими температурами пожара (100–400 °С) происходит значительное оседание копоти на поверхности материалов и конструкций [58]. Разная интенсивность закопчения продуктами горения формирует различную толщину слоя копоти, тем самым формируются оттенки черного [4, 60].

При термическом воздействии на конструкции из углеродистой стали, на поверхности образуются окислы железа. Так, при нагревании до температуры 200–300 °С на поверхности стали формируется пленка окислов толщиной в несколько микрон. Существует прямая зависимость толщины оксидной пленки от

воздействующей на сталь температуры. Слой оксидной пленки формирует цветные оттенки, и данный признак называют «цветами побежалости». Цвета побежалости возникают в результате физического процесса интерференции падающего света, благодаря оксидным пленкам на поверхности стали. При увеличении толщины плёнки, происходит последовательное гашение лучей определенной длины волны. К примеру, из падающего дневного белого света вычитается часть спектра длиной волны $\lambda \sim 400$ нм (фиолетово-синий цвет), и в результате поверхность приобретает дополнительный цвет — жёлтый. По мере роста толщины плёнки на поверхности стали происходит вычитание спектров с большей длиной волны. В результате из непрерывного дневного белого спектра вычитается зелёный цвет, и мы наблюдаем красный. Установлено, что для углеродистой стали обыкновенного качества характерны следующие оттенки цветов при воздействии температуры: соломенный при температуре воздействия 220 °С, коричневый (240 °С), пурпурный (260 °С), синий (300 °С), светло-серый (330—350 °С). Для нержавеющей сталей изменение цвета при нагреве на воздухе наблюдается: светло-соломенный (300 °С), соломенный (400 °С), красно-коричневый (500 °С), фиолетово-синий (600 °С), синий (700 °С). Цвета побежалости используют для выявления локальных перегревов при трении и воздействии температур в установках и агрегатах для установления нарушений эксплуатации оборудования или установления причины пожара. Однако при оценке термических повреждений конструкций из стали при поиске очага пожара и путей распространения горения изменение цвета в данном температурном диапазоне используется редко [4, 61].

Высокотемпературный окисел, который образуется при температурах от 700 °С и выше на поверхности углеродистой стали, называется окалина. Существует зависимость толщины окалина от температурного воздействия, которая происходит по параболическому закону: толщина окалина растёт при увеличении температуры и длительности нагрева. Состав окалина зависит от температуры воздействия на поверхность углеродистой стали [4].

Окалина может содержать в себе три типа окислов, которые располагаются слоями: вустит (FeO), гематит (Fe₂O₃) и магнетит (Fe₃O₄). При увеличении

температуры, содержание в окалине вустита увеличивается, а гематита уменьшается. Вустит имеет черный цвет, а гематит рыжий. Окалина, которая образовалась в результате воздействия температур 700-750 °С, имеет малое содержание вустита, достаточно тонкая и обычно имеет рыжеватый оттенок. Окалина, образовавшаяся при более высоких температурах 900-1000 °С и более, внешне имеет черный оттенок цвета и более толстый слой. Обыкновенная ржавчина тоже является окислом железа и характеризуется рыжим цветом и рыхлой структурой. Таким образом, по цвету окалины и её толщине, возможно произвести оценку термических повреждений конструкции или изделия из стали [4, 62].

Термическая деструкция древесины оказывает воздействие на изменения цвета её поверхности. Так, к примеру, для сорта сосны при температурах 120-150 °С поверхность древесины желтеет, дальнейший нагрев до 150-200 °С приводит к изменению оттенка на коричневый. Максимальный результат термического воздействия проявляется в виде обугливания (черный цвет) или полного уничтожения материала [4, 60].

Изменение цвета лакокрасочных покрытий зависит от температуры воздействия, типа и состава краски. При достижении определенных температур, цвет, как правило, изменяется по следующей схеме: желтеет, коричневеет, чернеет, светлеет, достигает цвета пигмента [4, 63].

Исходя из того, что большинство материалов встречающихся на пожаре меняют свой цвет, в зависимости от температуры и длительности нагрева, было предложено разработать метод, который дает возможность оценивать их термические повреждения путем измерения цветовых характеристик. Необходимо отметить, что человеческий глаз воспринимает цвет субъективно, для разных людей один цвет может отличаться. Существуют различного рода световые иллюзии, а также различные условия, в которых происходят наблюдения, которые оказывают большую роль на результат. Однако электронные устройства и приборы оперируют точными значениями. Исходя из вышесказанного, было принято решение о разработке метода и прибора для его реализации при оценке

термических повреждений веществ и материалов непосредственно на месте пожара.

В качестве объектов исследования были выбраны основные материалы и вещества, встречающиеся на месте пожара (сталь, бетон, полимеры, древесина, копоть). Такой выбор объектов исследования позволяет определить термические повреждения материалов для определения путей распространения горения и установления места первоначального горения практически на всех пожарах.

2.2 Теоретические основы цветовых систем и природы света

Свет представляет собой электромагнитное излучение, которое воспринимается человеческим глазом в определенном спектре. Данное излучение имеет характеристики в виде большой частоты (ν) и малой длины волны (λ). Существующие тела могут поглощать или наоборот испускать свет отдельными прерывистыми порциями определенной величины, которые называются квантами или фотонами. Частота света (число колебаний световой волны за единицу времени) определяет величину энергии фотона (ϵ) согласно уравнению 2.1 [64]:

$$\epsilon = h \cdot \nu , \quad (2.1)$$

где: h – постоянная Планка; ν – частота световой волны.

Свет в физическом понимании имеет двойственную корпускулярно-волновую природу, которая проявляется в свойствах, как электромагнитной волны, так и частицы. Физические явления света в виде интерференции, дифракции, различной преломляемости световых лучей характерны для электромагнитных волн. Процессы поглощения и излучения света веществом, которые проявляются в качестве фотоэлектрического эффекта и люминесценции, характерны и объяснимы только квантовой теорией света. В результате воздействия на полупроводник (фотоэлемент) световых лучей в нем возникает электрический ток. Данное явление называется фотоэффектом [64].

Длина волны света характеризуется и зависит от частоты колебаний,

согласно уравнению 2.2 [64]:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (2.2)$$

где λ – длина волны; c – скорость распространения света в пустоте; ν – частота колебаний.

Единицей измерения длины волны являются нанометры.

Диапазон электромагнитного излучения с длиной волны 380-780 нм называется оптическим. При попадании на сетчатку глаза человека электромагнитного излучения данного диапазона, происходят зрительные ощущения. По этой причине данное излучение называется видимым [64].

Свет, благодаря своим свойствам, обладает определенным количеством энергии. Величина переносимой энергии характеризует интенсивность света.

Количество световой энергии в единицу времени в одном направлении, переносимой электромагнитным излучением в оптическом диапазоне, называется мощностью излучения (F) [64].

Величина световой энергии, которая оценивается по производимому зрительному ощущению, называется световым потоком (Φ). При равных световых потоках, происходят одинаковые световые ощущения. Спектральный состав света оказывает влияние на интенсивность воздействия света на приемник. В международной системе единиц световой поток измеряется в люменах (лм) [64].

Свет взаимодействует с предметом или средой с помощью таких физических явлений как: отражение от поверхности тела, пропускание и поглощение (рисунок 2. 1).

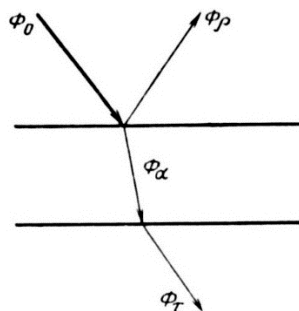


Рисунок 2.1 – Взаимодействие светового потока с объектом [64]

Все предметы вызывают зрительные ощущения благодаря тому, что

отражают часть падающего на них света. Коэффициент отражения (ρ) определяет отражательную способность объекта и показывает долю отраженного телом света согласно уравнения 2.3 [64]:

$$\rho = \frac{\Phi_{\rho}}{\Phi_0}, \quad (2.3)$$

где Φ_0 – падающий световой поток; Φ_{ρ} – отраженный световой поток.

Коэффициент поглощения (α) определяет способность поглощать часть света падающего на поверхность предмета и показывает долю поглощенного света согласно уравнения 2.4 [64]:

$$\alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi_0}, \quad (2.4)$$

где Φ_0 – падающий световой поток; Φ_{α} – поглощенный световой поток.

Коэффициент пропускания (τ) определяет прозрачность или способность объекта пропускать свет и показывает долю пропущенного света согласно уравнения 2.5 [64]:

$$\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi_0}, \quad (2.5)$$

где Φ_0 – падающий световой поток; Φ_{τ} – пропущенный световой поток.

Данные интегральные световые коэффициенты показывают соотношение между световым потоком, который падает на поверхность объекта, и физическими процессами в виде отражения, пропускания и поглощения. Из выше указанного, можно выделить уравнение 2.6 [64]:

$$\Phi_0 = \Phi_{\rho} + \Phi_{\alpha} + \Phi_{\tau}, \quad (2.6)$$

Таким образом, исходя из уравнений 2.3- 2.6, очевидно, и уравнение 2.7:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.7)$$

Максимальные значения данных световых коэффициентов не могут быть больше 1, а минимальные меньше 0. Тело является непрозрачным, если величина

коэффициента пропускания близка к нулю ($\tau \rightarrow 0$). Если тело прозрачное, то величина коэффициента отражения пренебрежимо мала ($\rho \rightarrow 0$) [64].

Исходя из выше указанного, цвет определяется свойством объектов излучать и отражать световые электромагнитные волны определенной части видимого спектра, т.е. в результате взаимодействия белого света с материей возникает цвет [65].

Как было указано выше, в диапазоне от 380 до 780 нм (рисунок 2.2) находится видимая часть спектра света. Части видимого спектра света для синего цвета 440-500 нм, для зеленого цвета длина волны приблизительно 540-580 нм, а красный цвет имеет длину волны примерно 720-780 нм [65].

Цвет	Диапазон длин волн, нм
Фиолетовый	380—450
Синий	450—480
Голубой	480—510
Зелёный	510—550
Салатовый	550—570
Жёлтый	570—590
Оранжевый	590—630
Красный	630—780

Рисунок 2.2 – Цвета видимой части спектра света [66]

Процесс получения различных цветов можно описать на основе закона Грассмана путем соединения трех основных цветов (красный, синий, зелёный). Такое получение цвета называют аддитивным, т.е. цвета получаются путём добавления трех основных цветов к черному. В результате добавления в различных пропорциях трех основных цветов (красный (Red), синий (Blue) и зеленый (Green) цвета) можно получить любой другой цвет. В теории цвета данные цвета называют первичными. Вторичными цветами являются: голубой (Cyan), желтый (Yellow), пурпурный (Magenta) и их получают при попарном смешивании первичных [67].

Следует отметить, что первичные и вторичные цвета являются основными базовыми цветами, т.е. с помощью которых возможно получить практически весь

спектр видимых цветов [67].

Аддитивные цвета нашли широкое применение в электронике и электроприборах.

Описать цвет можно математической моделью. К примеру, существует математическая цветовая модель отображения цвета RGB, которая представляет собой цветовой куб (рисунок 2.3). В этом случае, каждая его пространственная точка однозначно определяется значениями координат в трех осях, исходя из аддитивной модели отображения цвета. На диагонали куба от начала координат до точки, соответствующей белому цвету, будут располагаться серые оттенки. Это происходит потому, что значения по осям XYZ одинаковы и соответствуют диапазону от нуля до максимального значения 255. Три вершины куба на осях дают первичные цвета, две вершины соответствуют белому и черному цвету, остальные три отражают вторичные цвета: желтый, голубой и пурпурный [68].

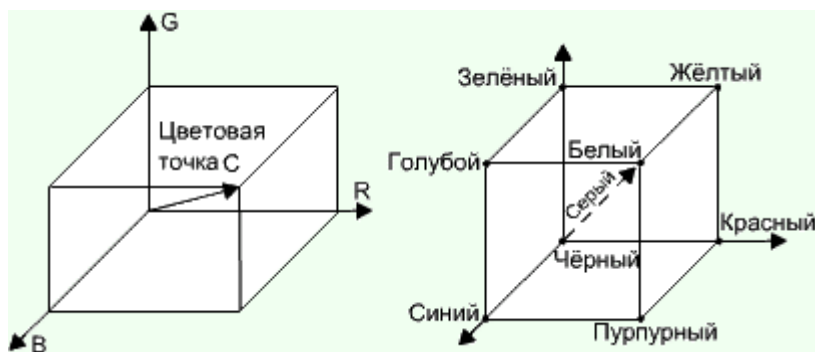


Рисунок 2.3 – Математическая модель RGB [68]

При использовании модели RGB любой цвет может быть представлен в цветовом пространстве с помощью координат и вектора, исходящего из начала координат. В данном случае направление вектора показывает цветность, а его модуль характеризует яркость [68]. Таким образом, важным показателем для оценки термических повреждений материалов является яркость, т.е. изменение цвета ближе к черному (цвету карбонизированных продуктов) или белому. Диапазон значений в таком случае будет находиться от значения модуля вектора, определяемого по координатам RGB (формула 2.8) до нулевого значения (черный

цвет).

$$|\mathcal{C}| = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2} \quad (2.8)$$

где: $|\mathcal{C}|$ - значение модуля цвета; R – значение от 0 до 255 красного цвета; G – значение от 0 до 255 зеленого цвета; B – значение от 0 до 255 синего цвета.

Принцип образования плоскости единичных цветов описан в [68]. Плоскость единичных цветов (Q) (рисунок 2.4) проходит через единичные значения выбранных основных цветов, которые отложенные на осях координат яркости. В колориметрии называют единичным цветом такой цвет, который по сумме координат цвета равен 1. Единичным местом точек в пространстве RGB можно считать, плоскость Q , которая пересекает оси координат в точках с координатами по осям B_r ($R=1, G=0, B=0$), B_g ($R=0, G=1, B=0$) и B_b ($R=0, G=0, B=1$) [68].

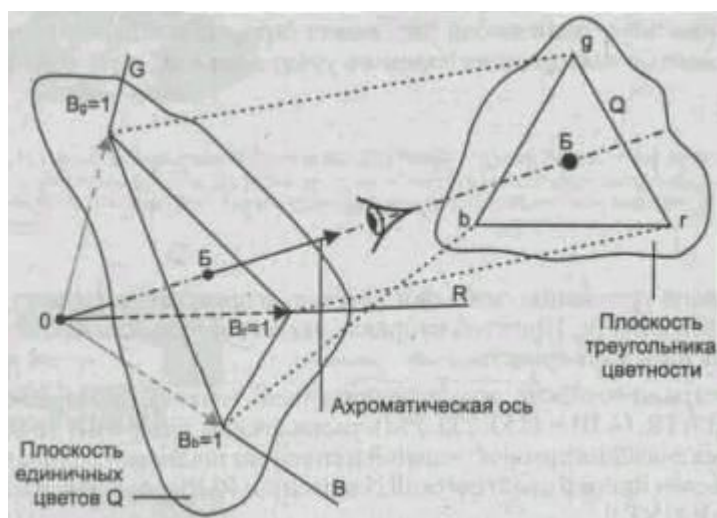


Рисунок 2.4 – Плоскость единичных цветов и образование треугольника цветности [68]

Каждой точке плоскости единичных цветов (Q) соответствует след цветового вектора, который пронизывает данную плоскость в конкретной точке на расстоянии от центра координат. Таким образом, на плоскости можно представить цветность любого излучения единственной точкой. Белому цвету, в случае на рисунке 2.4, будет соответствовать точка (Б). Данная точка является точкой пересечения плоскостью Q с ахроматической осью. Точки на вершинах

треугольника являются первичными цветами. По правилу графического сложения происходит определение других точек цветов, которые получаются смешением любых трех первичных. Полученный треугольник называется диаграммой цветности. В специальной литературе по колориметрии данный треугольник цветности называют локусом. По своей сути он является геометрическим местом всех возможных цветов, воспроизводимых определенным устройством или программой. В колориметрии для описания цветности достаточно использовать только плоскость треугольника. При его использовании цвет может быть задан только двумя координатами. Так как сумма координат цветности в данном случае равна 1, то найти третью координату по двум известным не представляет сложности. Таким образом, существует понятие координат цветности, которые могут служить для описания цвета в прямоугольной системе координат на плоскости [68].

Международная комиссия по освещению разработала стандарт CIE 1931 XYZ (рисунок 2.5), исследуя восприятие цвета человеком. Данное цветовое пространство описывает все воспринимаемые органами зрения человека цвета. В дальнейшем в 1960 году Мак-Адам предложил пространство UVW, чтобы решить задачу устранения нелинейности системы XYZ. Дальнейшее развитие системы цвета UVW было предложено в 1964 году Вишецким. Особое внимание обратил в 1948 году Ричард Хантер, который предложил модель Hunter L, a, b. Сегодняшним международным стандартом описания цвета является модель CIE L*a*b*, которая была разработана в 1976 году после устранения всех разногласий и недостатков (рисунок 2.6) [68].

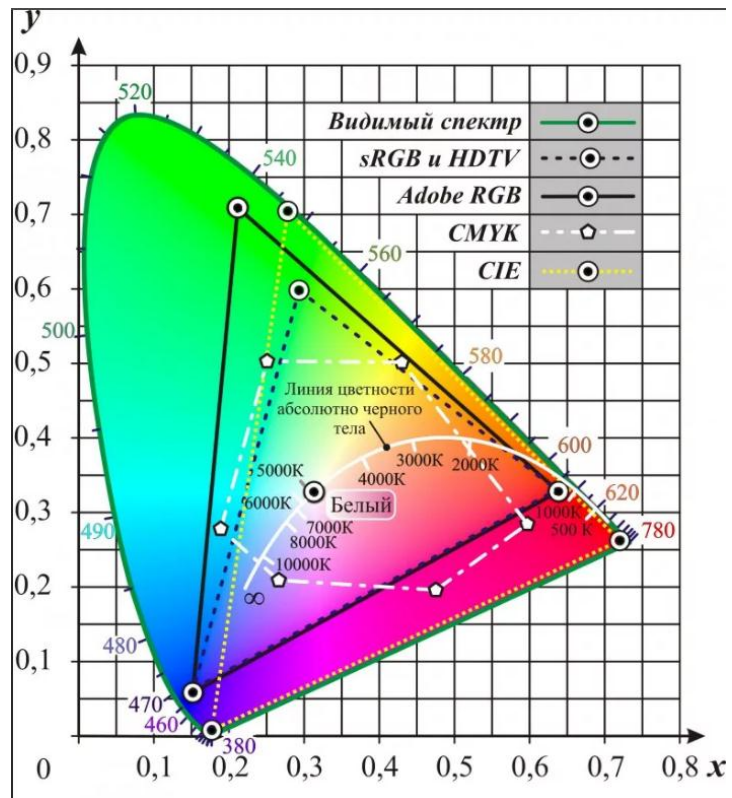


Рисунок 2.5 – Диаграмма цветности МКО 1931 с цветовым охватом цветовых систем [68]

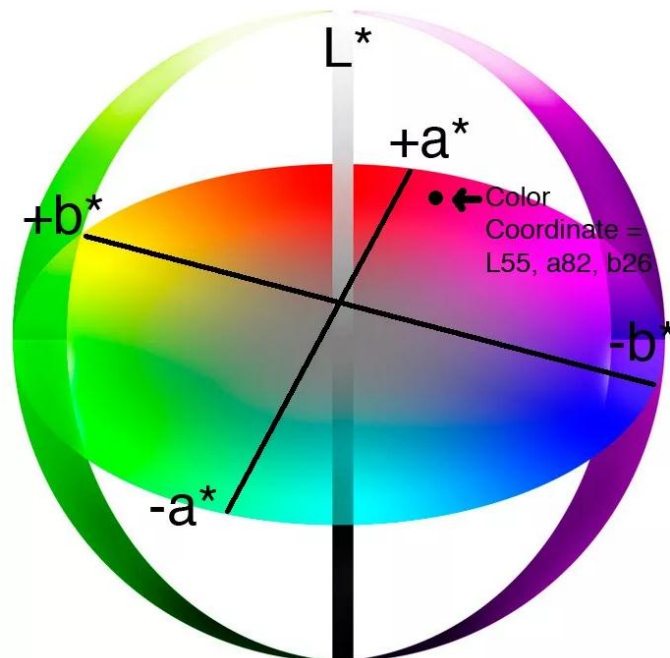


Рисунок 2.6 – Цветовая система CIE Lab [68]

Разработка цветовых пространств осуществлялась для уменьшения нелинейности изменений цвета в разных частях области цветового охвата. Однако, идеального в этом отношении стандарта, способного описать все цвета, так и не появилось. Так, к примеру, в системе Hunter Lab наблюдается расширение в синей и сжатие в желтой части цветового охвата. В системе CIELAB, которую была разработана на основе Hunter Lab, имеется более широкая часть для желтого спектра. Все цветовые пространства могут быть представлены и переведены между собой с помощью определенных математических операций [68].

В системе RGB, которая используется в технике и электронике, для представления численного значения координат используется один октет. Значения каждой грани обозначаются для удобства целыми числами от 0 до 255 включительно (рисунок 2.7) [68].

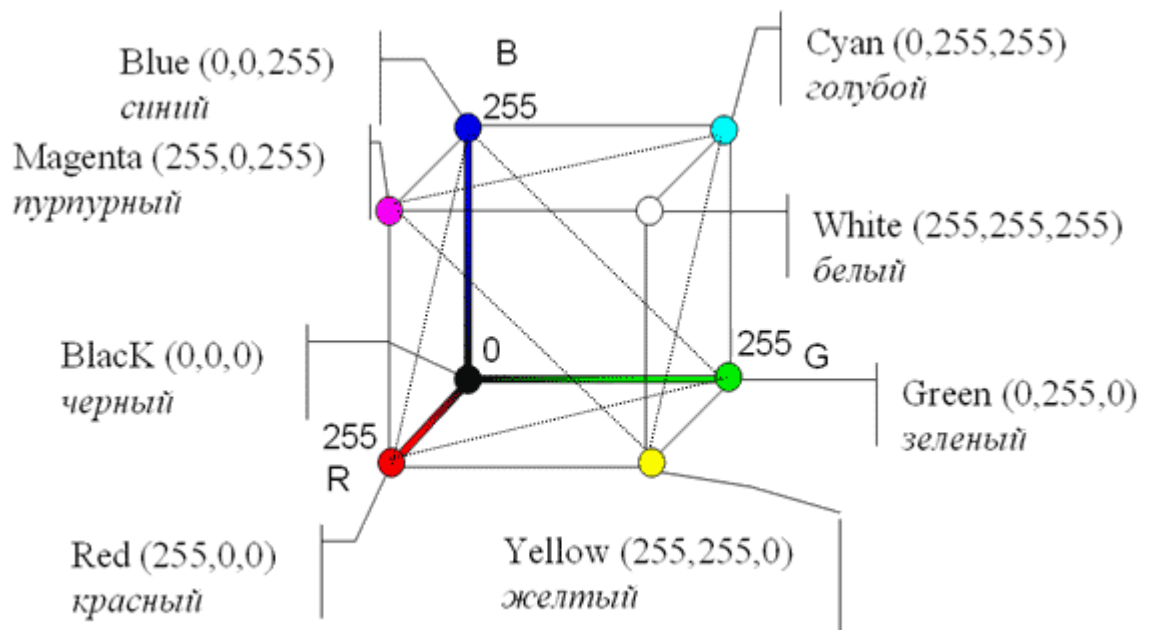


Рисунок 2.7 – Октет цвета [68]

В связи с тем, что в цветовой модели используется три независимых величины, она представляет собой трехмерную систему координат, в которой цвет определяется точкой с координатами. В результате образуется цветовое пространство модели RGB в виде куба, с расположенными внутри значениями цветовых оттенков характерными для цветового охвата данной модели (рисунок

2.8). Это значит, что объем такого куба (количество цифровых цветов) ограничен и равен числу $16\,777\,216$ значений цвета, поскольку на каждой оси можно отложить 256 значений. Таким образом, при выражении в цифровом виде цвета, он должен входить в пределы этого пространства. Данное обстоятельство означает, что в цветовой модели RGB, максимально возможно описать более 16 миллионов цветов, но это не гарантирует, что такое количество цветов может быть обеспечено на устройстве вывода или носителе [68].

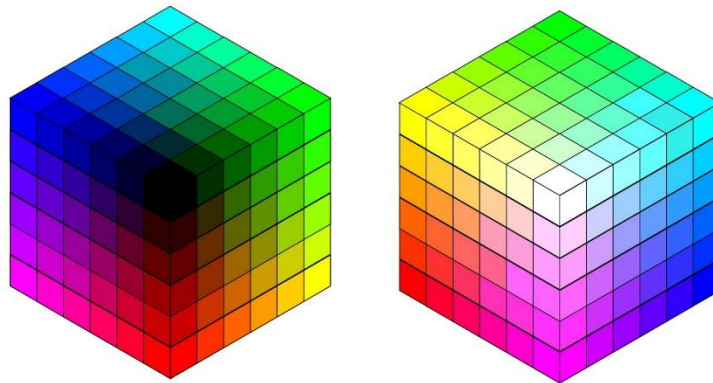


Рисунок 2.8 – Цветовой куб [68]

При использовании языка HTML, цвет выражается #RrGgBb-записью, в виде шестнадцатеричного кода. Каждая координата цвета записывается в виде двух шестнадцатеричных цифр. Например, белый цвет в системе цвета HTML будет иметь значения #FFFFFF [68].

Другая система программирования для представления цветов в Win32 является COLORREF. Данная система используется при определении цвета основанного на RGB виде с размером в 4 байта. При определении цвета, основанного на RGB, значение переменной для системы COLORREF представляется в определенном шестнадцатеричном виде 0x00bbggrr. Красная, зеленая и синяя составляющая цвета записывается в шестнадцатеричном виде на местах rr, gg, bb соответственно [68].

Таким образом, наиболее подходящей системой цвета для разработки

прибора и метода контроля термических повреждений материалов является математическая модель RGB в виде цветового куба с максимальными значениями сторон равными 255. Данная система используется в технике и имеет только положительные числовые значения для удобства обработки результатов.

2.3 Разработка прибора контроля степени термических повреждений материалов путем цветоизмерения

Из специальной литературы [4, 6, 58] известно большинство материалов встречающихся на пожаре меняют свой цвет в зависимости от температуры и длительности нагрева, что дает возможность оценивать их термические повреждения. Таким образом, существует связь между температурой нагрева, временем выдержки при данной температуре (степенью теплового повреждения) и оптическими свойствами поверхностного слоя материала (изменение цвета). При этом спектр поглощения материалом светового излучения также меняется. Измеряя цветовые характеристики материала, можно установить степень его термического повреждения.

Известно устройство для определения степени термического поражения материалов и конструкций в ходе пожарно-технической экспертизы путем анализа оптических свойств материала в части интенсивности отраженного (коэффициента отражения) и остаточного люминесцентного излучения (Патент РФ № 2604 563 С1, дата приоритета: 2015.05.29, дата публикации: 2016.12.10, Вечиомов Д.А. и др., RU) [69].

Недостатками известного аналога являются:

Во-первых: ограниченная область применения, обусловленная невозможностью учитывать цветовые характеристики объекта.

Во-вторых: недостаточная информативность, обусловленная отсутствием программируемого логического контроллера.

Наиболее близким к разрабатываемому прибору является устройство для измерения цветовых параметров поверхностей «Измеритель цвета» состоящее из

корпуса, микропроцессора, датчика цвета TCS 34725 с экраном, индикатора цвета с экраном, дисплея, блютуса, кнопки управления, USB-разъема, выключателя питания, батареи автономного питания, разъема. (Патент РФ на полезную модель № 207344 U1, дата подачи: 2021.05.11, дата публикации: 2021.10.25, Ракутько Е.Н. и Ракутько С.А., RU) [70].

Недостатками прототипа являются:

Во-первых: ограниченная область применения, обусловленная невозможностью использования устройства на месте пожара, в связи с отсутствием отдельной от корпуса измерительной камеры, исключающей влияние дыма и внешнего освещения, а также выносной штанги для возможности проводить замеры строительных конструкций различных размеров.

Во-вторых: недостаточная информативность данных, в связи с отсутствием возможности измерения интенсивности отраженного света (яркости).

Технической задачей является создание устройства, обеспечивающего измерение оптических свойств материала при определении его цветовых характеристик для анализа степени его повреждения на месте пожара.

Решение задачи по оценки степени термических повреждений и технический результат достигаются тем, что с помощью предлагаемого прибора измеряются цветовые характеристики (RGB) объекта, подвергнутого температурному воздействию в результате пожара. Данные показания (вычисляемый модуль RGB вектора и интенсивность отраженного цвета) сравниваются с показаниями такого же материала, не подвергнутого тепловому воздействию, а также ранее подвергнутым в лабораторных условиях, определенному для каждого вида материала, тепловому воздействию при различных режимах температуры и длительности нагрева. На основании разницы в значениях цветовых характеристик делается вывод о режиме теплового воздействия на материал, что позволяет установить место первоначального возникновения горения (очаг пожара). Физико-химические процессы, происходящие в материале при воздействии тепла пожара, могут характеризоваться изменением цветовых характеристик поверхности материала. Часто происходят физико-химические изменения только

на поверхности материала (в тонком слое), без глубоких структурных изменений, что делает невозможным применение других методов исследования. При этом прибор является портативным и универсальным, что достигается за счет компактных размеров, единым устройством измерительной камеры и возможности исследования различных типов и размеров материалов и конструкций. Вся матрица фотодиодов имеет ИК-фильтр, который минимизирует влияние ИК-излучения на показания. Технический результат предлагаемой полезной модели заключается в улучшенных характеристиках устройства для оценки термических повреждений материалов на месте пожара, отличающихся универсальностью в части применения для большинства материалов и конструкций, а также наибольшей точностью в определении места очага пожара путем измерения цветовых характеристик поверхности объекта.

Для решения технической задачи предлагается использовать датчик цвета (4), представляющий собой программируемый преобразователь отраженного света от исследуемого объекта (1) в цифровой сигнал, который состоит из фотодиодов 4 типов (с красным R, зеленым G и синим B светофильтром, а также прозрачные фотодиоды С без светофильтра) под общим фильтром ИК-излучения, и преобразователей тока в цифровой сигнал на одной монолитной CMOS – интегральной схеме (2). Данный датчик находится в отдельной измерительной камере (5), которая прикреплена к выносной телескопической штанге (6) для измерений различных конструкций по размерам. Также для обеспечения работы в датчике цвета имеется свой источник освещения в виде светодиода (3). Цифровые входы и цифровой выход с помощью шлейфа (7) обеспечивают прямой интерфейс с программируемым логическим контроллером (8). Информация о цветовых характеристиках выводится на ЖК-дисплей (9). Программируемый логический контроллер, ЖК-дисплей, источник питания находятся в одном корпусе (10).

На рисунке 2.9, показана принципиальная схема предлагаемого прибора для оценки степени термических повреждений материалов путем цветоизмерения.

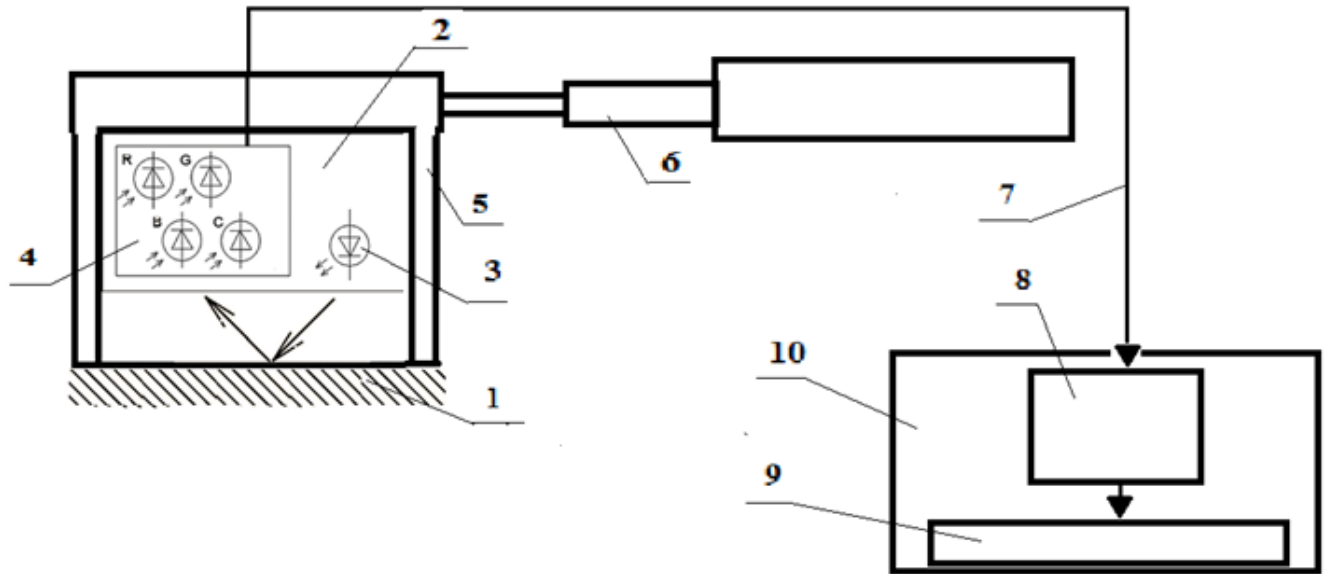




Рисунок 2.9 – Принципиальная схема прибора для оценки степени термических повреждений материалов путем цветоизмерения. 1 – исследуемый образец; 2 – интегральная схема датчика цвета; 3 – светодиод; 4 – фотодиоды R, G, B, C; 5 – корпус измерительной камеры; 6 – телескопическая штанга; 7 – шлейф проводников; 8 – программируемый логический контроллер; 9 – ЖК-дисплей; 10 – корпус прибора с источником питания.

Датчик цвета – это устройство преобразующее свет в фототок и аналоговый или цифровой сигнал. В связи с тем, что для измерения цветовых характеристик материала необходимо фиксировать отраженный свет, то в конструкции датчика необходим светодиод.

На рынке существуют различные датчики цвета от разных производителей, отличающиеся конструкцией и функционалом. Основные характеристики наиболее распространённых датчиков приведены в таблице 2.1 [71, 72, 73].

Таблица 2.1 – Описание наиболее распространённых датчиков цвета на рынке

Модель	Тип	Применение	Наличие светодиода
HDJD-S722-QR999 	Аналоговый QFN 5×5×1	Используется для контроля цвета в промышленности и автоматике. При управлении светодиодной подсветкой ЖК-телевизоров и другого оборудования. Обнаружение красного, зеленого, синего оттенков цветов	Нет
TCS3472 	Цифровой, программируемый, матрица 3x4, наличие ИК-фильтра	Обнаружение красного, зеленого, синего оттенков цветов, измерение уровня окружающего света, измерение цветовой температуры света	Один светодиод
TCS3200 	Цифровой, матрица 8x8	Обнаружение красного, зеленого, синего оттенков цветов, измерение окружающего света	Четыре светодиода

В связи с наличием ИК-фильтра и возможностью получать цифровой сигнал, для разрабатываемого прибора наиболее подходит датчик цвета TCS3472.

Датчик TCS3472 обеспечивает цифровой сигнал значений красного, зеленого, синего (RGB) и отраженного света. Фильтр, блокирующий

ИК-излучение, встроенный в микросхему и локализованный на светочувствительных фотодиодах, сводит к минимуму спектральную составляющую ИК-излучения входящего света и позволяет проводить точные измерения цвета [72].

Функциональная блок схема датчика цвета показана на рисунке 2.10.

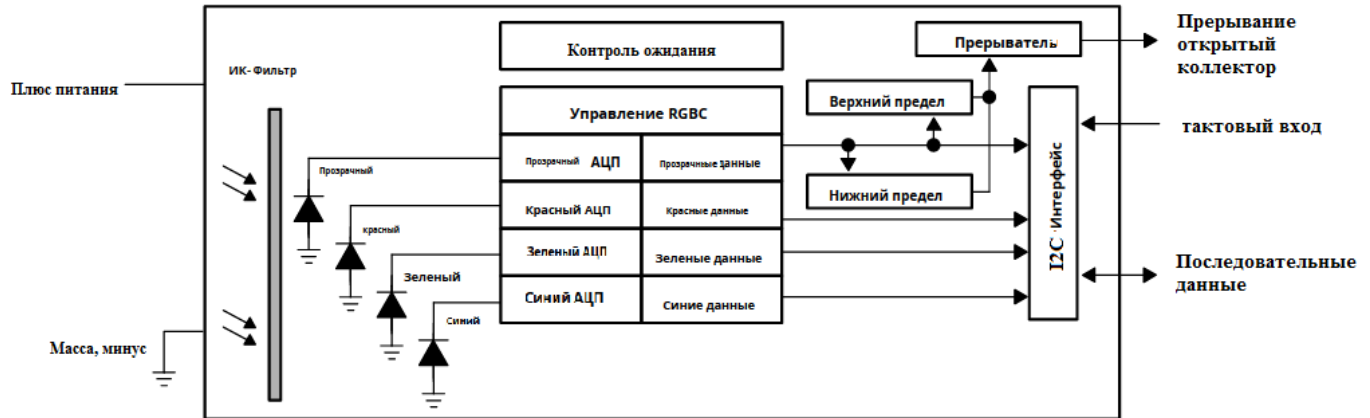


Рисунок 2.10 – Функциональная блок схема датчика цвета [72]

Внешние световые помехи могут повлиять на результат измерения цветовых характеристик, поэтому датчик цвета помещен в отдельную изоляционную (измерительную) камеру на корпусе прибора. Также для обеспечения работы в датчике цвета имеется свой источник освещения в виде LED-подсветки. Также датчик цвета может переходить в режим ожидания с низким энергопотреблением между измерениями [72].

Светоцифровой преобразователь TCS3472 содержит матрицу из 12 фотодиодов, четыре аналого-цифровых преобразователя (АЦП), регистры данных, конечный автомат и I²C интерфейс. Матрица 3x4 фотодиодов состоит из фотодиодов с красной, зеленой, синей фильтрацией и прозрачных (без фильтров) фотодиодов. Кроме того, фотодиоды покрыты фильтром, блокирующим ИК-излучение. Четыре интегрирующих АЦП одновременно преобразуют усиленные токи фотодиодов в 16-битное цифровое значение. По завершении цикла преобразования результаты передаются в регистры данных, которые подвергаются двойной буферизации для обеспечения целостности данных. Вся внутренняя синхронизация, а также состояние ожидания с низким энергопотреблением

контролируются конечным автоматом [72].

Передача данных TCS3472 осуществляется по быстрому, до 400 кГц, двухпроводной последовательной шине I²C. Промышленный стандарт I²C упрощает прямое подключение к микроконтроллерам и встроенным процессорам.

Наличие логического программируемого контроллера позволяет минимизировать погрешность измерения путем программного усреднения результатов в каждом канале по выборке, состоящей из нескольких десятков циклов измерений [72].

Технические характеристики датчика цвета TCS3472 отображены в таблице 2.2. Спектральная чувствительность изображена на рисунке 10 [72].

Таблица 2.2 – Технические характеристики датчика цвета TCS3472 [72].

Технические характеристики	Значения
Детектируемые цвета	Красный, зеленый, синий, интенсивность отраженного света
Подсветка	Белый светодиод (LED)
Напряжение питания	2,7-5,5 В
Потребляемый ток	<300 мкА
Температурный диапазон работы	-40...85 °С
Чувствительность к излучению (фотодиодов без светофильтра)	$\lambda = 465 \text{ нм } 331 \text{ Гц } (13,8 \text{ мкВт/см}^2)$ $\lambda = 525 \text{ нм } 386 \text{ Гц } (16,6 \text{ мкВт/см}^2)$ $\lambda = 615 \text{ нм } 474 \text{ Гц } (19,5 \text{ мкВт/см}^2)$
Чувствительность к излучению (фотодиодов с синим светофильтром) V=3 В, t=25 °С	$\lambda = 465 \text{ нм от } 65\text{-}88\%$ $\lambda = 525 \text{ нм от } 10\text{-}45\%$ $\lambda = 615 \text{ нм от } 5\text{-}24\%$
Чувствительность к излучению (фотодиодов с красным светофильтром) V=3 В, t=25 °С	$\lambda = 465 \text{ нм от } 0\text{-}15\%$ $\lambda = 525 \text{ нм от } 4\text{-}25\%$ $\lambda = 615 \text{ нм от } 80\text{-}110\%$
Чувствительность к излучению (фотодиодов с зеленым светофильтром) V=3 В, t=25 °С	$\lambda = 465 \text{ нм от } 10\text{-}42\%$ $\lambda = 525 \text{ нм от } 60\text{-}85\%$ $\lambda = 615 \text{ нм от } 0\text{-}14\%$

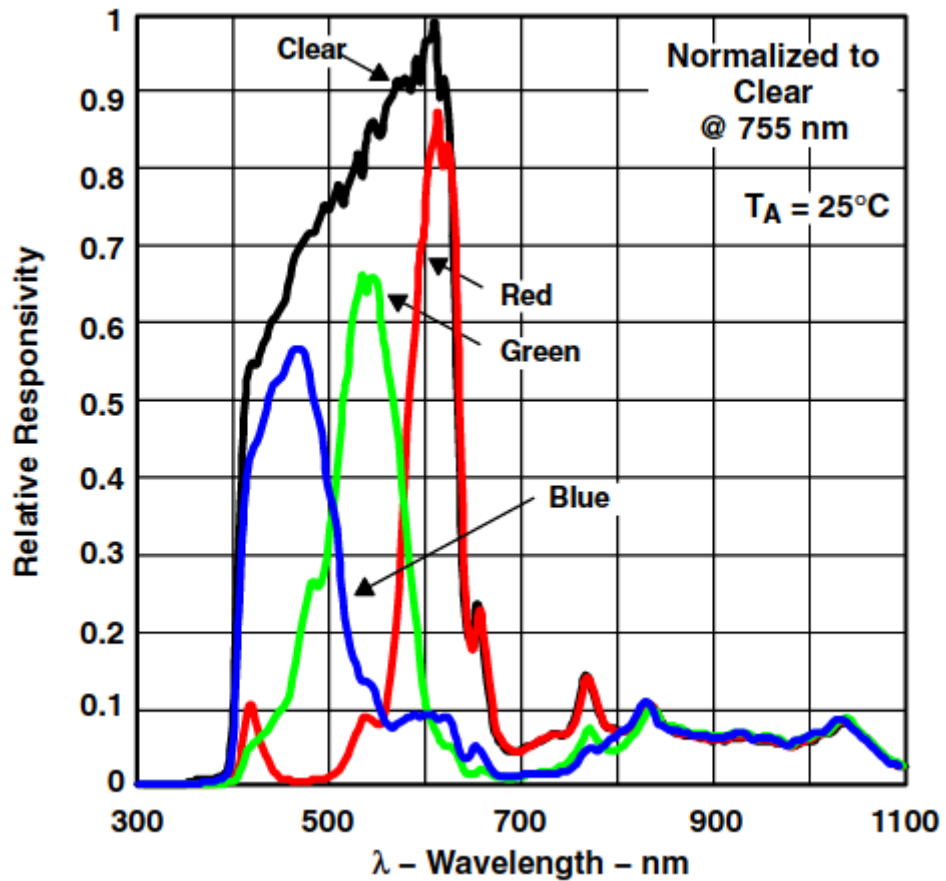


Рисунок 2.11 – Спектральная чувствительность фотодиодов датчика TCS3472 [72]

Таким образом, технические характеристики позволяют использовать устройство в интервале температур встречающихся при работе после ликвидации горения на месте пожара. Малое энергопотребление позволяет использовать небольшие по размеру источники питания, которые будут располагаться в приборе и обеспечат мобильность и удобство при работе. Малая чувствительность в ИК диапазоне позволяет производить замеры только видимой части спектра, что позволяет использовать прибор для измерения цветовых характеристик без влияния температуры поверхности в нормальных условиях.

Технический результат предлагаемой полезной модели заключается в улучшенных характеристиках устройства для оценки термических повреждений материалов на месте пожара, отличающихся универсальностью в части применения для большинства материалов и конструкций, а также наибольшей точностью в определении места очага пожара путем измерения цветовых характеристик поверхности объекта.

При этом технико-экономическая эффективность предлагаемого устройства

обусловлена:

1. Снижением потерь от возникающих пожаров за счет качественного расследования пожаров и направления правильного курса профилактической работы.

2. Снижением затрат на доставку и содержание разного оборудования для оценки каждого типа материала.

3. Снижением трудовых затрат при экспертизе и расследовании пожаров.

Принцип работы разработанного прибора контроля термических повреждений веществ, материалов и изделий на месте пожара изображен на рисунке 2.12.

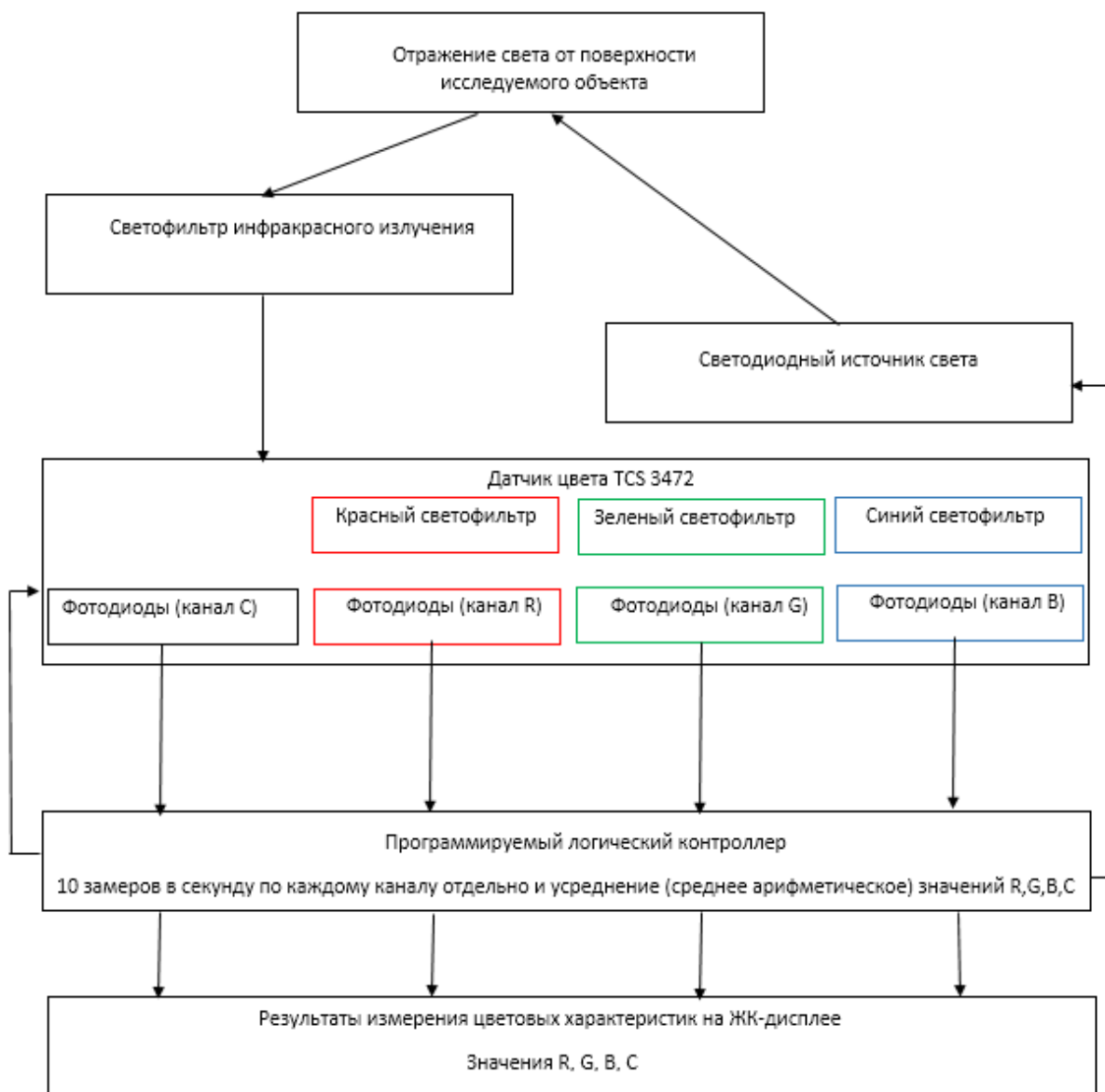


Рисунок 2.12 – Схема работы прибора контроля термических повреждений

Внешний вид рабочей модели прибора контроля термических повреждений веществ, материалов и изделий на месте пожара, с помощью которого проводились дальнейшие исследования, изображен на рисунке 2.13.

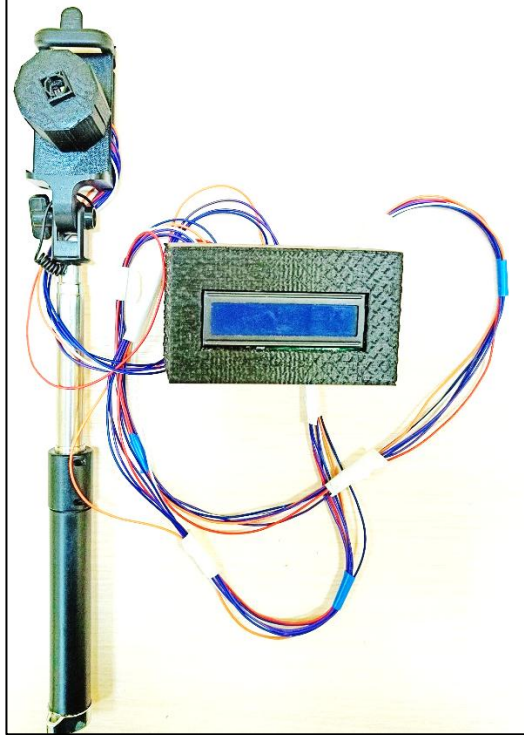


Рисунок 2.13 – Внешний вид рабочей модели прибора контроля термических повреждений веществ и материалов на месте пожара

При условии использования стандартного источника света (D50, D64, A и т. Д.) для стандартного наблюдателя CIE1931 определяются специальные функции фильтра. При использовании светодиодной подсветки в виде белого света в системе измерения CIE1931 XYZ это условие нарушается, поскольку светодиод не является определенным стандартным источником света [74].

Следовательно, условия источника света необходимо учитывать в измерениях датчика. Также особое влияние оказывает расстояние до поверхности измеряемого материала.

Калибровка должна обеспечить одинаковое поведение датчика в реальном цветовом пространстве для точного измерения цветов. Калибровка датчика заключается в нахождении функциональной взаимосвязи между измеренными

значениями датчика в реальных условиях при известных или измеренных цветовых объектах. Необходима функция коррекции, которую можно использовать для адаптации измеренных значений при восприятии цвета [74].

Распространенным и простым методом калибровки датчика является коррекция с помощью целевой матрицы коррекции. С геометрической точки зрения вычисляется прямая линия, для которой целевое и фактическое значения целей представляют собой наименьшее квадратное расстояние. Регрессия возвращает функцию с наименьшей ошибкой. Этот метод основан на общем сравнении существующих значений образца (или данных спектрометра) с фактическими значениями датчика. Различия между образцом и фактическим значением будут использоваться для расчета корректирующей матрицы, которая исправит дальнейшие измеренные значения и гарантирует высокую точность датчика.

Цель калибровки вычислить матрицу преобразования, основанную на измеренных значениях датчика и абсолютных значениях цвета цветового пространства (цветовых эталонов) [74].

Данные измерения позволяют установить связь между значениями датчика и эталонными значениями с помощью матричного уравнения 2.9 [74].

$$T=K*S \quad (2.9)$$

где: T – матрица эталонного измерения, S – матрица сигналов датчика (датчик XYZ), и K – матрица преобразования и результат калибровки.

Тогда матрица преобразования будет вычислена с помощью формулы 2.10 [74].

$$K=(T*S^T)(S*S^T)^{-1} \quad (2.10)$$

Необходимо выполнить измерение в полной темноте, чтобы учесть возможные источники ошибок, вызванные добавленными электронными компонентами. Так называемый темновой ток будет измеряться, если закрыть или отключить светодиод (подсветку) в измерительной камере. Уровни усиления цветных и темных измерений должны быть идентичными. Таким образом, это смещение вычитается из нормального измерительного сигнала датчика и

учитывается в матрице измерений датчика [74].

Для выполнения этой матричной операции необходимо сгенерировать обратную матрицу. Метод исключения Гаусса - Жордана будет использоваться для создания единичной матрицы вместе с инвертированной матрицей того же ранга [74].

Идентификационная матрица будет сгенерирована из исходной матрицы путем умножения и последующего добавления определенных строк. Кроме того, те же шаги расчета будут выполнены для единичной матрицы [74].

После создания матрицы коррекции цвета можно проводить измерения с помощью датчика. Значения будут скорректированы и согласованы с цветовым пространством RGB с помощью матрицы коррекции [74].

Для калибровки датчика цвета TCS3472 использовалось программное обеспечение фирмы TAOS, Arduino IDE и Microsoft Excel [74].

Достоверность показаний прибора для оценки степени термических повреждений (цветовых характеристик) материалов оценивалось по сопоставимости результатов с координатами цвета, характерных для эталонов и измерений спектрофотометром ВУК spectro-guide 45/0 gloss 6801 ser. № 1035525 [75] (рисунок 2.14 и таблица 2.3), расчётом абсолютной и относительной погрешностей (таблица 2.4).



Рисунок 2.14 – Спектрофотометр ВУК spectro-guide 45/0 gloss 6801 ser. № 1035525

Таблица 2.3 – Технические характеристики спектрофотометра ВУК spectro-guide 45/0 gloss 6801 ser. № 1035525 [75]

Спектральный диапазон	400...700 нм
Геометрия измерения	45/0
Спектральное разрешение	10 нм
Сходимость	0,01 ΔE
Воспроизводимость	0,2 ΔE
Системы цвета	CIELab/Ch; Lab(h); XYZ; Yxy
Стандартные источники света	D50; D55; D65; D75; F2; F6; F7; F8; F10; F11; UL30
Индексы	YI E313; YI D1925; WI E313; CIE; Berger; Color strength; Opacity; Metamerism
Цветовые различия	ΔE*; ΔE(h); ΔEFMC2; ΔE94; ΔECMC; ΔE99; ΔE2000

В таблице 2.4 представлены результаты калибровки датчика цвета TCS3472.

Таблица 2.4 – Результаты калибровки и оценки погрешности измерений датчика цвета TCS3472

Показатель	Черный цвет			Зеленый цвет			Белый цвет		
	Значения эталонов цвета в системе Lab	0	0	0	80,18	-13,59	13,10	95,45	-0,83
Значения эталонов цвета в системе RGB	0	0	0	182	206	174	241	242	240
Показания спектрофотометра ВУК spectro-guide 45/0 gloss 6801 ser. № 1035525 в системе Lab	0,33	0,16	0,33	80,17	-13,59	13,12	95,45	-0,83	1,10

Продолжение таблицы 2.4

Показания спектрофотометра ВУК spectro-guide 45/0 gloss 6801 ser. № 1035525 в системе RGB	0	0	0	182	206	174	241	242	240
Показания датчика цвета TCS3472	1	1	1	188	210	179	249	247	245
Абсолютная погрешность	1	1	1	6	4	5	8	5	5
Относительная погрешность, %	-	-	-	3,30	1,94	2,87	3,32	2,00	2,08

Таким образом, относительная погрешность прибора не превышает 3,32 % после калибровки. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений RGB характеристик ± 8 .

2.4 Разработка метода контроля степени термических повреждений материалов на месте пожара путем измерения цветовых характеристик

Известны инструментальные методы для оценки и контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара. В частности, известны:

– способ определения места возникновения пожара. А.С. СССР № 1096546, 1984 (И.Д. Чешко, К.П. Смирнов, Б.С. Егоров, В.Г. Голяев, Т.С. Максимович) – способ заключается в определении интенсивности люминесценции экстрактов проб обугленных остатков древесины, отобранных в различных зонах пожара [10];

– способ определения места возникновения пожара. А.С. СССР № 538290, 1975 (В.А. Макагонов, М.К. Зайцев, В.С. Глинчиков и др.) – способ заключается в определении скорости распространения ультразвуковых волн в бетонных и железобетонных конструкциях [19].

К недостаткам данных способов можно отнести достаточно ограниченную сферу их применения – объектом исследования могут быть только материалы определенной природы, характерные для применяемого способа.

Наиболее близок к предлагаемому способу, и потому может быть выбран в качестве прототипа, способ выявления скрытых признаков очага пожара, путей распространения горения и устройство для его реализации (Патент РФ № 2275 624 С1, дата заявки: 2004.11.25, дата публикации: 2004.11.25, И.Д. Чешко, С.В. Вакуленко, А.Н. Соколова). По данному способу признаки очага пожара выявляются непосредственно на месте пожара путем измерения электросопротивления копоти на различных неэлектропроводных конструкциях и предметах [51].

К недостаткам способа-прототипа можно отнести достаточно ограниченную сферу его применения – объектом исследования могут быть только конструкции и изделия на которых имеется копоть. На пожаре в зонах открытого горения и при температурах более 600°C копоть отсутствует, что делает невозможным применение данного способа в связи с отсутствием объекта исследования.

Инструментальное исследование материалов после пожара производится в несколько этапов [25, 76]:

1 этап – выбор объектов исследования и оценка возможности проведения измерений;

2 этап – проведение измерений с помощью прибора контроля термических повреждений;

3 этап – анализ и установление зон с наибольшими термическими повреждениями, выявление очаговых признаков и признаков распространения пожара.

На первой стадии производится визуальное исследование, сохранившихся

конструкций на месте пожара. Для этого, исходя из внешних визуальных признаков, определяется материал, из которого изготовлен конструктивных элемент. Оценивается состояние поверхности объекта исследования, а также пригодность для проведения инструментального исследования. При необходимости проводится предварительная подготовка поверхностей материалов для проведения измерений (очистка от пожарного мусора).

Далее на втором этапе выбираются точки исследования с построением плана-схемы измерений и с помощью предлагаемого в работе прибора проводятся измерения цветовых характеристик объекта. В связи с тем, что предлагаемый метод исследования является неразрушающим контролем (согласно ГОСТ 56542 – 2019 «Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов» оптический, метод отраженного излучения, спектральный), то никаких процессуальных ограничений при использовании прибора и метода нет. Исследуемый материал остается в исходном состоянии после исследования. На план-схему в отмеченных точках наносят значения цветовых характеристик.

На третьем этапе, на основании полученной информации, производится анализ и определяется зона с максимальными термическими повреждениями. Далее происходит идентификация очаговых признаков и признаков распространения пожара и в заключении устанавливается очаг пожара.

Общий вид метода оценки степени термических повреждений и установления очага пожара представлен на рисунке 2.15.

Исследования необходимо проводить после полной ликвидации пожара и отсутствии опасных факторов пожара, пара, на сохранившихся строительных конструкциях и материалах.

Для сравнительного анализа степени термических повреждений конструкции и материалы должны быть однородны и идентичны.

После фиксации показаний RGB и интенсивности отраженного света необходимо произвести статистическую обработку результатов, а затем построить картину (карту или план) распределения зон термических повреждений, цветовых характеристик (далее по тексту КРТП).

КРТП бывают трех видов [25, 77]:

- поверхностная, в том случае, когда измерения производились по всей площади конструкции;
- линейная, когда измерения производились на одной линии (высоте) по конструкции;
- объемная, когда строится зона по трем измерениям (длина, ширина, высота).

Построение карт распределения термических повреждений наиболее удобно строить с помощью компьютерных программ, предназначенных для построения графического представления данных, таких как Excel, Infogram, Mathsoft Axum и другие [4, 25].

Измерения значений цветовых характеристик в каждой точке проводятся 12 раз. Максимальное и минимальное значения в каждой точке измерений не учитываются для обработки результатов, в связи с исключением случайной ошибки. Для определения среднего результата данные 10 измерений заносятся в таблицу. Далее производится статистическая обработка результатов измерений. Доверительный интервал для среднего рассчитывался с доверительной вероятностью 0,99 [78, 79].

При анализе полученной информации с целью установления очага пожара необходимо помнить, что мы определяем зону с максимальными термическими поражениями. Образование данной зоны обусловлено действием двух факторов температурой и длительностью горения, причем температура оказывает существенно большее влияние, чем длительность. По данной причине при установлении очага пожара необходимо учитывать пожарную нагрузку, воздухообмен в помещении, а также действия пожарных подразделений при тушении пожара.

Разработанный способ контроля степени термических повреждений, включающий исследование на месте пожара сохранившихся конструкций и материалов, отличается тем, что в качестве объектов исследования выступают материалы, которые под воздействие температуры меняют свои цветовые

характеристики. Способ является универсальным в части применения для большинства материалов встречающихся на пожаре. Способ позволяет оценить температуру воздействия на материалы в пределах, характерных для физических изменений конкретного исследуемого объекта, и может находиться в температурном интервале пожара. Очаговую зону и пути распространения пожара выявляют по анализу цветовых характеристик поверхности материала.

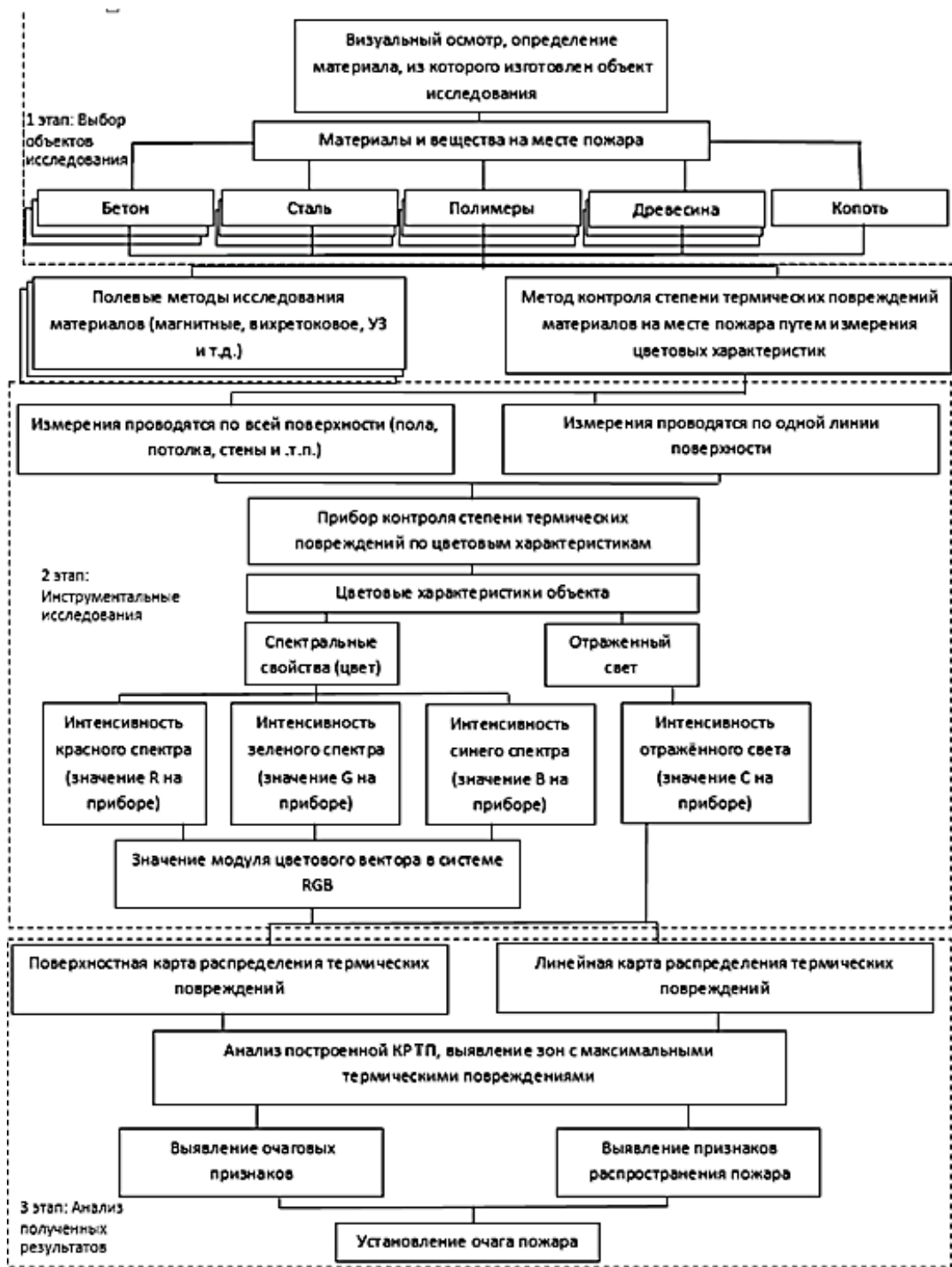


Рисунок 2.15 – Блок-схема метода

2.5 Выводы по главе

1. Обоснован выбор объектов исследования для разработанного метода.
2. Разработан прибор контроля термических повреждений веществ и материалов на месте пожара, имеющий лучшие характеристики по сравнению с аналогами, позволяющий проводить измерения цветовых характеристик различных по размерам объектов в полевых условиях, выполненного на основе логического программируемого контроллера, что минимизирует погрешность измерений, полученных путем усреднения результатов в каждом канале по выборке, состоящей из нескольких десятков циклов.
3. Разработан метод неразрушающего контроля веществ и материалов, позволяющий инструментально по изменению цветовых характеристик установить степень термических повреждений и очаг пожара, что позволит повысить объективность сделанных выводов.
4. Метод является универсальным в части применения для большинства материалов встречающихся на пожаре и позволяет оценить температуру воздействия на материалы в пределах характерных для физических изменений конкретного исследуемого объекта

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЙ ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

3.1 Результаты исследования изменений цветовых характеристик бетона при термическом воздействии

Для исследований было подготовлено 24 образца из бетонной тротуарной плитки (ГОСТ 17608-2017 [80]) в виде равных осколков с размерами по выступающим частям 25x90x60 мм, отклонение от размеров по длине и ширине не превышает 10 мм. Размеры образцов были обусловлены ограничениями оборудования – внутреннего пространства муфельной печи LOIP LF 7/13-G1 с цифровым терморегулятором (рисунок 3.1).

Муфельная печь LOIP LF 7/13-G1 предназначена для проведения нагрева, закалки, обжига различных материалов в воздушной среде при температуре до +1300 °С. Размеры камеры 200x110x285 мм. Мощность 3300 Вт, точность поддержания температур ± 10 °С [81].



Рисунок 3.1 – Муфельная печь LOIP LF 7/13-G1 [81]

Образцы бетона без видимых повреждений и загрязнений. Перед исследованием образцы были предварительно высушены в сушильном шкафу

LOIP LF 25/350-GG1 при температуре 50 °С в течение 8 часов (рисунок 1.2). Лабораторные сушильные шкафы LOIP LF предназначены для нагрева, высушивания и тепловой обработки различных материалов в воздушной среде при температурах до 350°С. Точность поддержания температуры ± 2 °С, диапазон температур от 50 до 350 °С, материал камеры сталь, потребляемая мощность 1200 Вт [82].



Рисунок 3.2 – Сушильный шкаф LOIP LF 25/350-GG1 [82]

План проведения эксперимента предусматривал 8 серий исследований (по 3 образца в каждой) и включал нагревание образцов от 200°С до 900°С (с шагом в 100°С). В нагретую муфельную печь до определенной температуры для каждой серии, помещали три исследуемых образца, за промежуток времени не превышающий 3 сек. Образцы из одной серии (при определенной температуре) выдерживали в течение 10, 20 и 30 минут соответственно, извлекая по одному образцу из муфельной печи при достижении временного промежутка. Охлаждение образцов проводилась при условиях окружающей среды в помещении естественным путем.

Температурные пределы исследования были выбраны исходя из физических свойств бетона, а время – от средних промежутков времени развития и тушения пожара.

Бетон является искусственным каменным строительным материалом, получаемым в результате формования и затвердевания, тщательно перемешанной и уплотнённой смеси из минерального (например, цемент) или органического вяжущего вещества, крупного или мелкого заполнителей, воды. В ряде случаев может иметь в составе специальные добавки [83].

Портландцементный клинкер имеет, как известно, следующий минералогический состав [83 - 88]: трехкальциевый силикат, алит (3CaO SiO_2 , он же условно обозначается C3S) - 42-60 %; двухкальциевый силикат, белит (2CaO SiO_2 ; C2S) - 15-35 %; трехкальциевый алюминат ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$; C3A) - 5-14 %; четырехкальциевый алюмоферрит ($4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$) - 10-16 %. После смешения портландцемента с водой (изготовления цементного теста) и его затвердевания образуется, так называемый, цементный камень [4].

При воздействии температуры в условиях пожара, указанные соединения начинают терять воду, вплоть до ее полной потери. Так, например, тоберморитовый гель, наиболее важная составная часть затвердевшего портландцементного камня и бетона, по данным ТГА постепенно дегидратируется в интервале температур от 100 до 700 °С. Другой основной компонент - CSH II начинает терять воду при температурах 120-150 °С; при 300 °С он отщепляет 0,5 молекулы воды, а при 600-700 °С переходит в C2S, т.е. в 2CaO SiO_2 [4, 85].

Процессу разложения при нагревании подвергаются и отдельные примесные компоненты. Гидрат окиси кальция (портландит) разлагается до окиси кальция при 550 °С, гидрат окиси магния (брусит) - при 400-550 °С; карбонаты кальция (кальцит) и магния (магнезит), соответственно, при температурах 860 и 540-650 °С [4, 86].

На рисунке 3.3 представлен внешний вид образцов после лабораторных исследований. По горизонтали, начиная с нижней строки временные промежутки термического воздействия (10, 20, 30 минут), по вертикали в рядах температуры воздействия от 200 до 900 °С. Так, с помощью визуального осмотра выявлено, что изменение цвета бетона начинает происходить при температурах от 400-600 °С серый цвет меняется на розоватый оттенок, а при температурах выше 700 °С бетон

начинает бледнеть и начинают образовываться трещины. Также видно, что изменение внешнего вида зависит от времени и температуры [89].

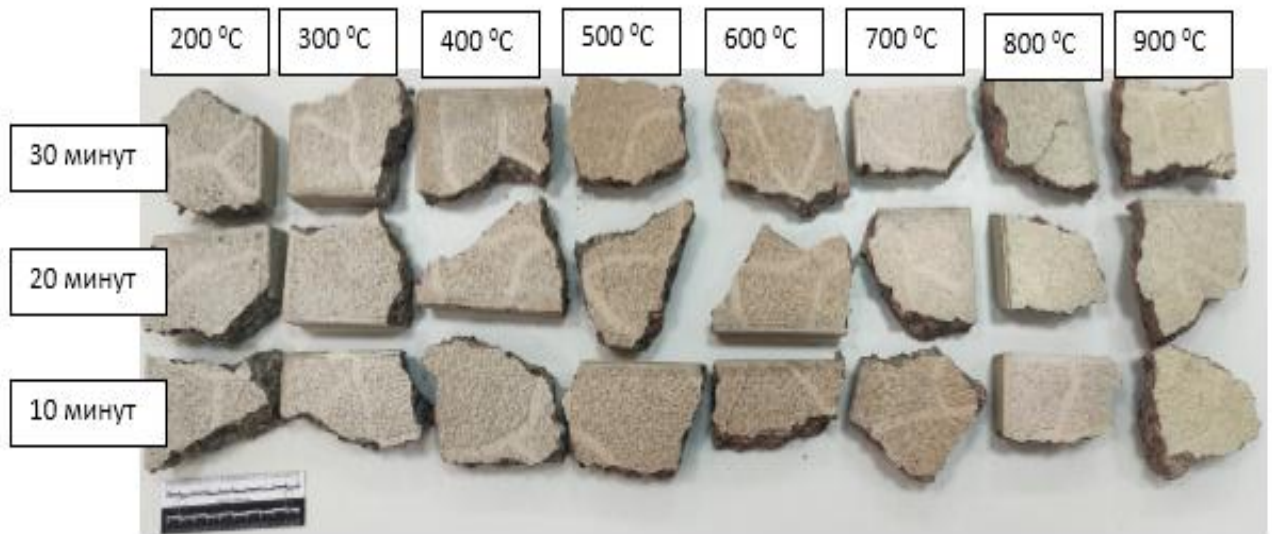


Рисунок 3.3 – Вид образцов бетона после термического воздействия

В таблице 3.1 представлены результаты измерений цветовых характеристик образцов, разработанным прибором контроля термических повреждений после статистической обработки по ГОСТ Р 50779.22 – 2005 [79]. Измерения проводились на поверхности образцов путем измерения в 5 точках на каждом образце. Достоверность результатов измерения цветовых характеристик оценивалось при трехкратном измерении одного образца. Средние значения измерений определяли, как среднее арифметическое из полученных результатов. Для вычисления среднего значения для каждого образца, стандартного отклонения, доверительных интервалов, средней относительной погрешности измерений использовалось программное обеспечение Microsoft Excel. Таким образом, в доверительные интервалы укладываются 95 % результатов всех измерений. Значение средней относительной погрешности каждого измерения не превышает 5 % [89].

Таблица 3.1 – Средние значения измерений цветовых характеристик образцов из бетона [89].

№ образца	Температура, °С	Время, минут	R	G	B	C, люкс	Модуль цветового вектора
1	100	10	110	106	96	510	180
2	200	10	111	105	96	513	180
3	300	10	110	108	99	504	183
4	400	10	106	100	99	474	176
5	500	10	102	91	78	440	157
6	600	10	100	90	76	438	155
7	700	10	98	90	77	440	154
8	800	10	134	124	110	598	213
9	900	10	138	131	110	618	220
10	1000	10	136	130	110	615	218
11	100	20	111	107	96	511	182
12	200	20	111	108	96	513	182
13	300	20	110	108	96	510	182
14	400	20	104	100	99	474	175
15	500	20	100	89	76	430	154
16	600	20	100	90	76	433	155
17	700	20	134	124	110	598	213
18	800	20	137	129	113	616	219
19	900	20	140	132	113	624	223
20	1000	20	139	132	112	620	222
21	100	30	111	107	96	511	182
22	200	30	111	108	96	513	182
23	300	30	110	108	96	510	182
24	400	30	104	100	99	474	175
25	500	30	100	89	76	430	154
26	600	30	100	90	76	433	155
27	700	30	130	120	110	596	208
28	800	30	137	129	113	616	219
29	900	30	140	132	113	624	223
30	1000	30	140	132	113	624	223

На рисунках 3.4-3.8 представлены сводные графики зависимости цветковых характеристик от температуры и времени воздействия на образцы бетона [89].

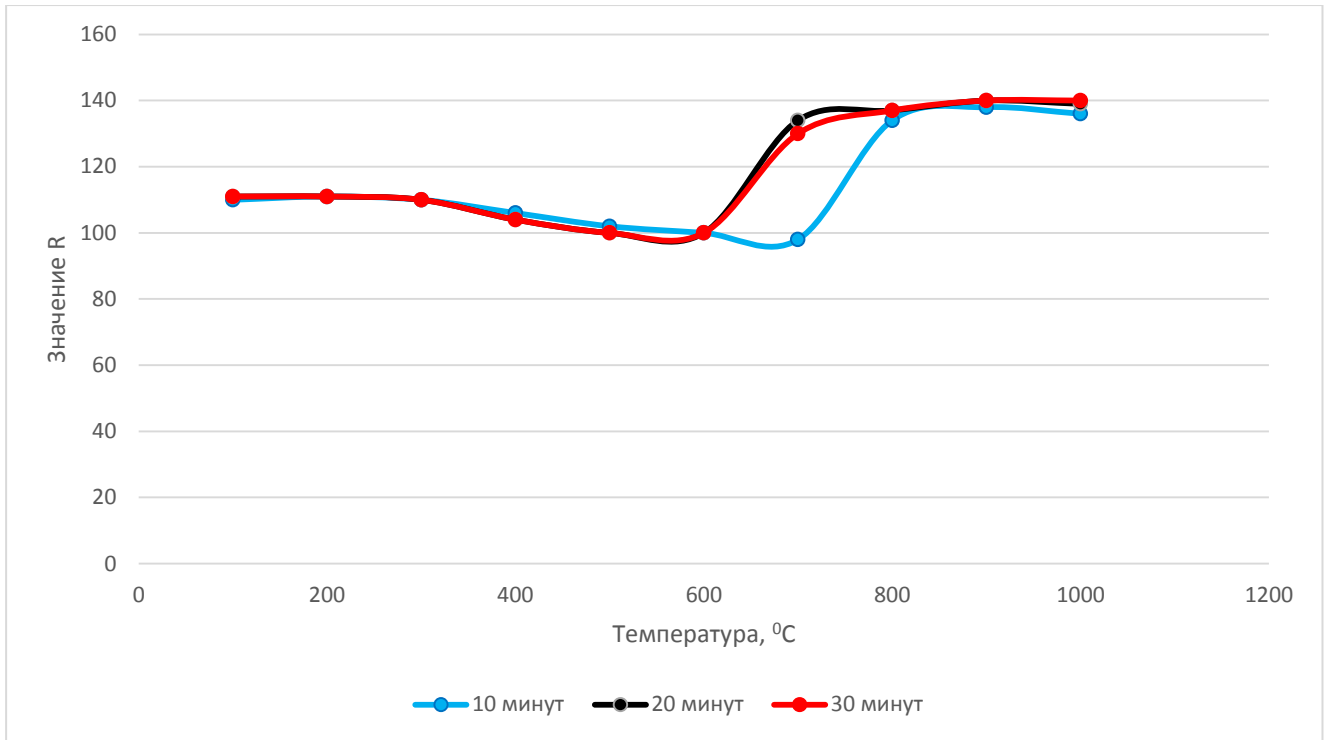


Рисунок 3.4 – Графики зависимости значений R (красный цвет) от температуры и времени воздействия на образцы бетона

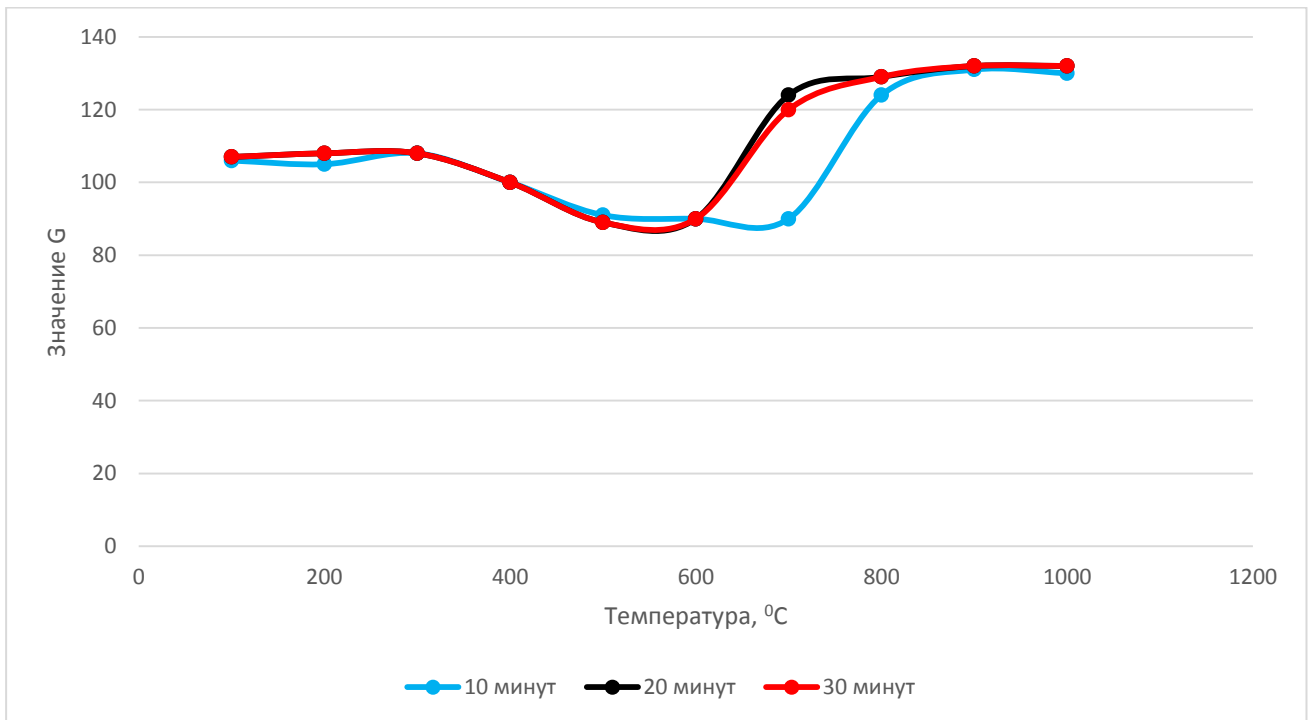


Рисунок 3.5 – Графики зависимости значений G (зеленый цвет) от температуры и времени воздействия на образцы бетона

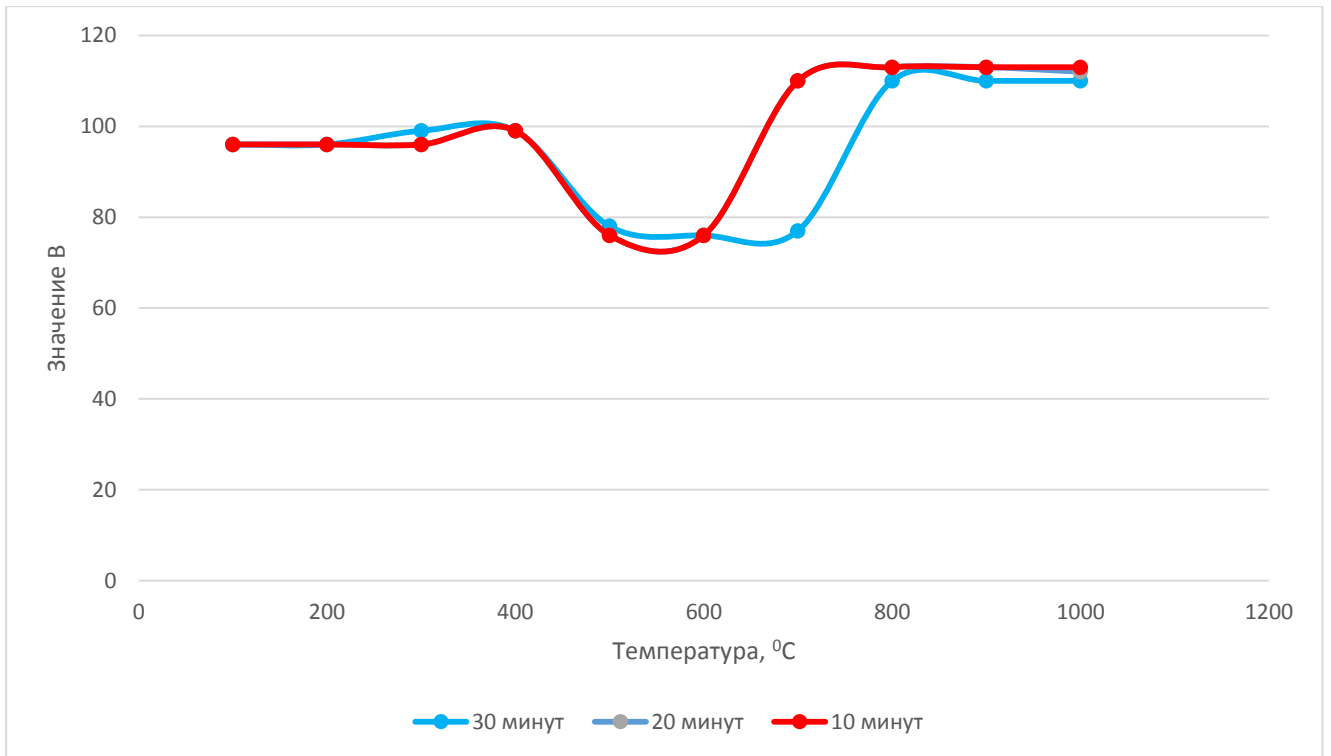


Рисунок 3.6 – Графики зависимости значений В (синий цвет) от температуры и времени воздействия на образцы бетона

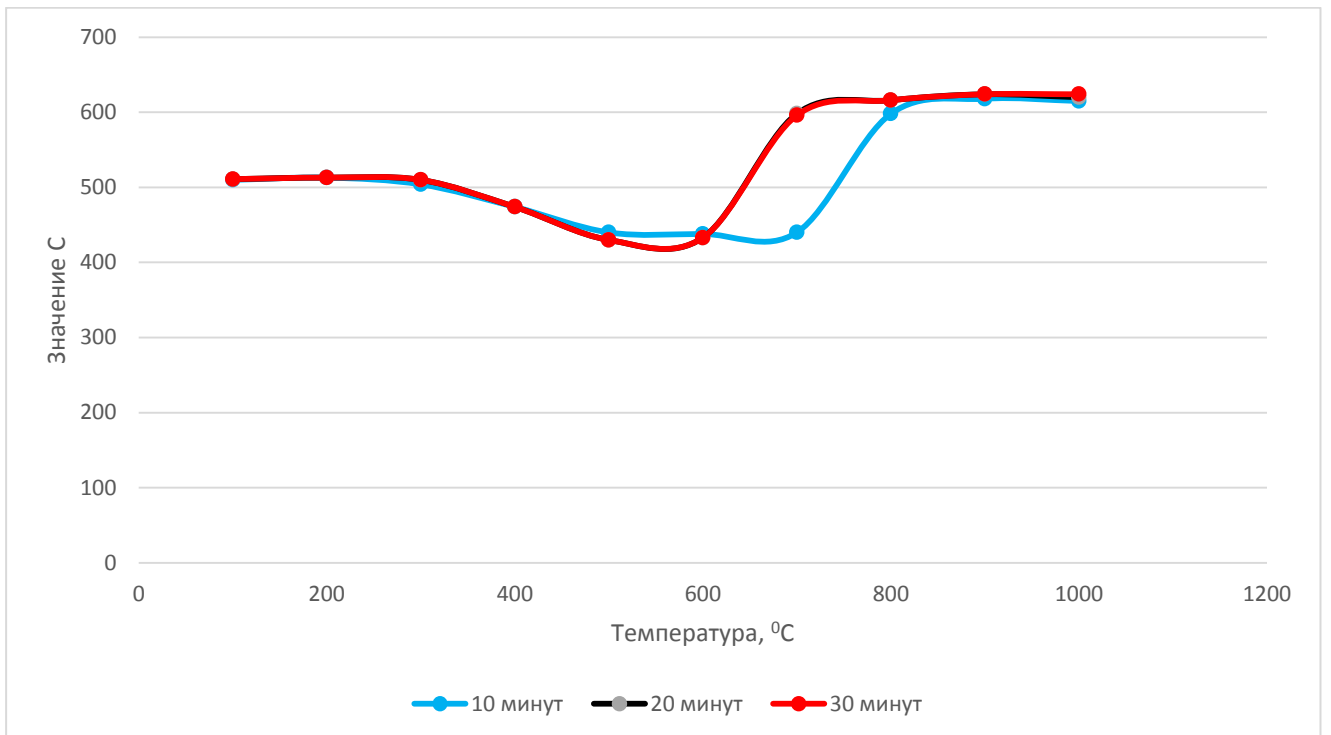


Рисунок 3.7 – Графики зависимости значений С (отраженный свет) от температуры и времени воздействия на образцы бетона

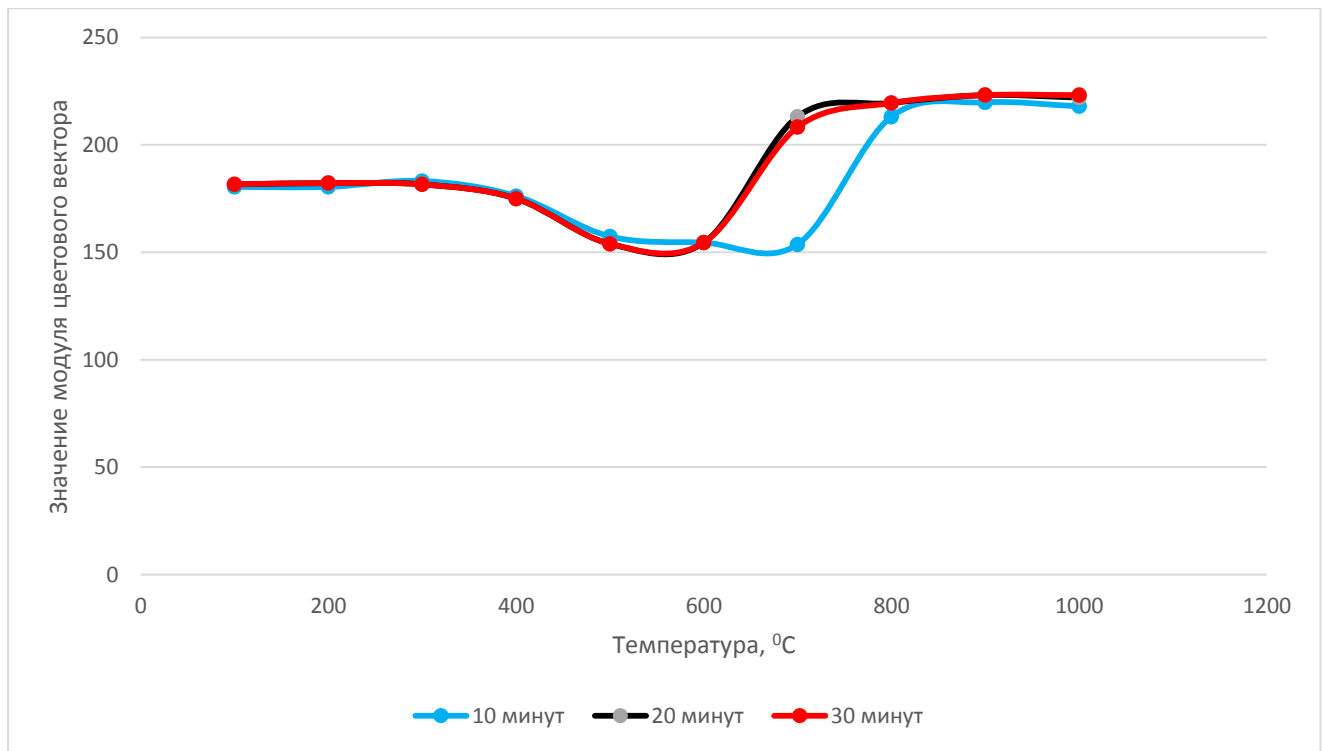


Рисунок 3.8 – Графики зависимости значений модуля цветового вектора от температуры и времени воздействия на образцы бетона

Из рисунков 3.4-3.8 видно, что при увеличении температуры значения показателей R , S , а также значения модуля цветового вектора уменьшаются в пределах от 300 до 600 °C и резко увеличиваются от 600 °C на всех временных промежутках температурного воздействия, за исключением графика 10 минут воздействия, резкий рост происходит от 700 °C. Также графики для времени температурного воздействия 20 и 30 минут практически совпадают, что говорит о более существенном влиянии температуры по сравнению с длительностью воздействия. На промежутках температур до 300 °C и выше 900 °C изменений значений цветовых характеристик материала не происходит [89].

Для количественной оценки связи цветовых характеристик и температуры была построена корреляционная матрица с помощью оператора анализа данных Microsoft Excel. Для данной оценки связи между полученными значениями и выбора критерия для контроля термических повреждений использовался коэффициент корреляции Пирсона. Данный коэффициент имеет значения от -1 до 1. Чем больше отличается от 0 коэффициент Пирсона, тем сильнее связь между

двумя переменными. Отрицательные значения указывают на отрицательную линейную корреляцию между переменными, соответственно значения в положительном диапазоне за прямую линейную связь.

В таблице 3.2 представлена построенная матрица корреляции для каждой парной комбинации полученных значений температуры и цветовых характеристик бетона.

Таблица 3.2 – Корреляционная матрица цветовых характеристик и температуры для образцов бетона.

10 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	0,515831	1				
<i>G</i>	0,515271	0,984152	1			
<i>B</i>	0,283137	0,888022	0,935916	1		
<i>Ц</i>	0,612573	0,986421	0,995197	0,947962	1	
<i>С</i>	0,522258	0,988886	0,995474	0,922692	0,993902	1
20 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	0,652593	1				
<i>G</i>	0,635435	0,981334	1			
<i>B</i>	0,499069	0,905168	0,954246	1		
<i>Ц</i>	0,742095	0,98424	0,995944	0,963128	1	
<i>С</i>	0,639988	0,987063	0,998178	0,950094	0,997068	1
30 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	0,654511	1				
<i>G</i>	0,632827	0,980528	1			
<i>B</i>	0,506926	0,9053	0,951266	1		
<i>Ц</i>	0,748639	0,98426	0,996302	0,963761	1	
<i>С</i>	0,644403	0,986265	0,99357	0,951183	0,996157	1

Из таблицы 3.2 видно, что имеется сильная связь между цветовыми характеристиками. Далее графики были разбиты на отрезки для описания происходящих процессов. За основу были взяты графики модуля цветового

вектора, так как они имеют сильную положительную корреляцию с температурой. Условно графики можно разделить на четыре отрезка.

В таблице 3.3 приведены уравнения зависимости модуля цветового вектора от температуры, построенные путем аппроксимации методом наименьших квадратов с помощью Microsoft Excel. Из графиков 3.9-3.11 и уравнений видно, что до температуры 300 °С изменений цветовых характеристик не происходит. При температурах от 300 до 600 °С значение модуля цветового вектора при увеличении температуры уменьшается, далее от 600 до 900 °С происходит увеличение значения модуля цветового вектора до значений выше, чем термически неповрежденный. При температурах выше 900 °С изменений значений модуля цветового вектора не происходит [89].

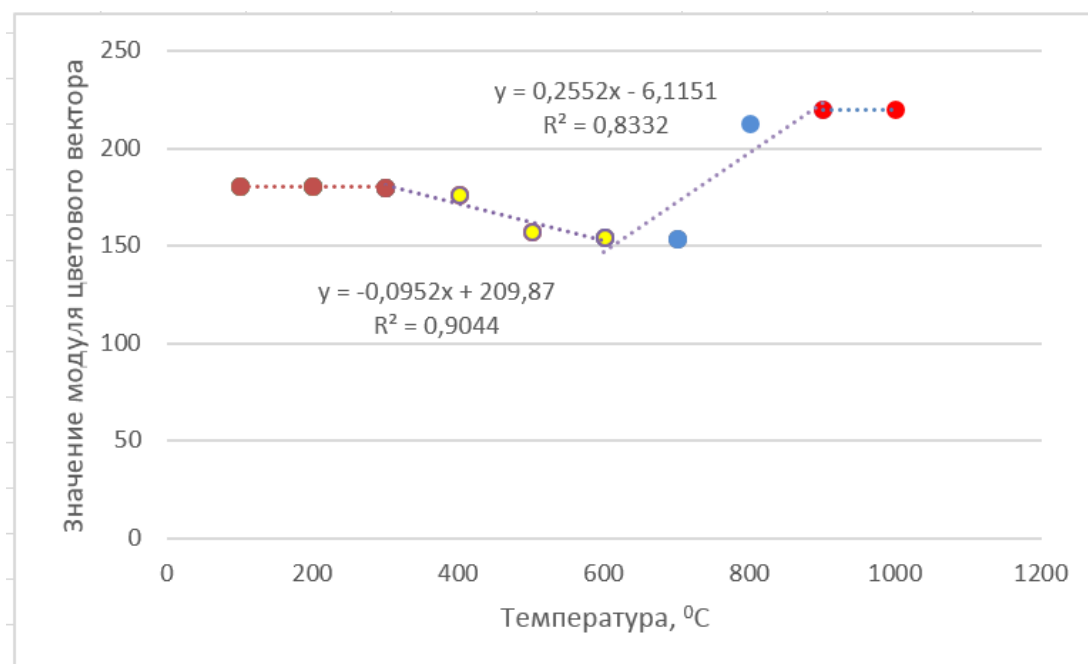


Рисунок 3.9 – График зависимости значений модуля цветового вектора от температуры для 10 минут воздействия на образцы бетона

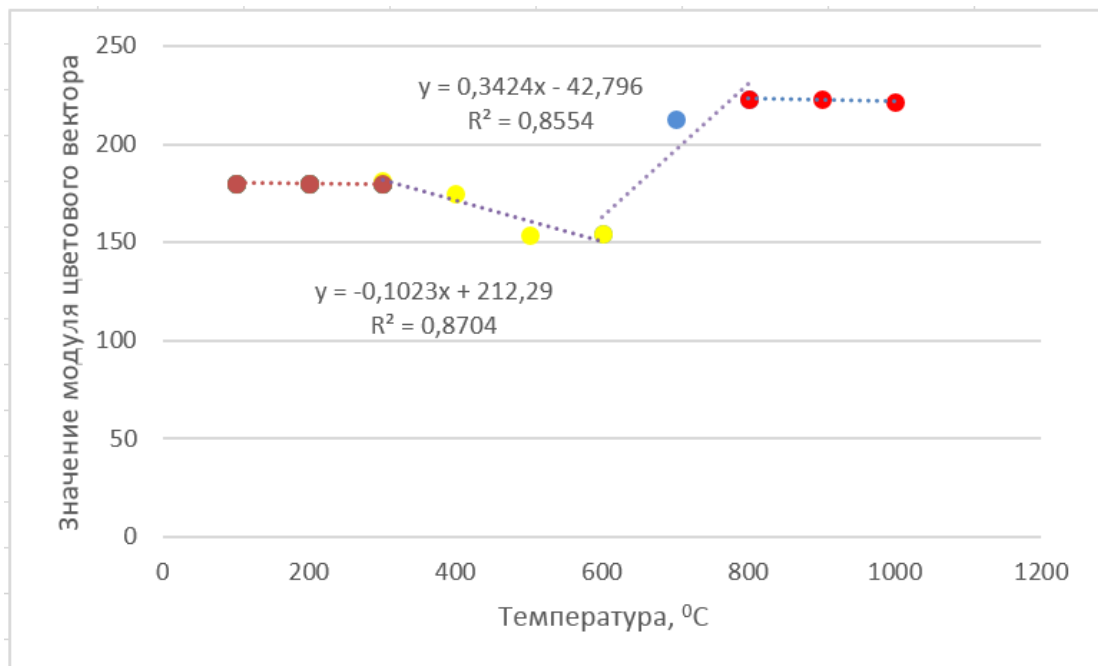


Рисунок 3.10 – График зависимости значений модуля цветового вектора от температуры для 20 минут воздействия на образцы бетона

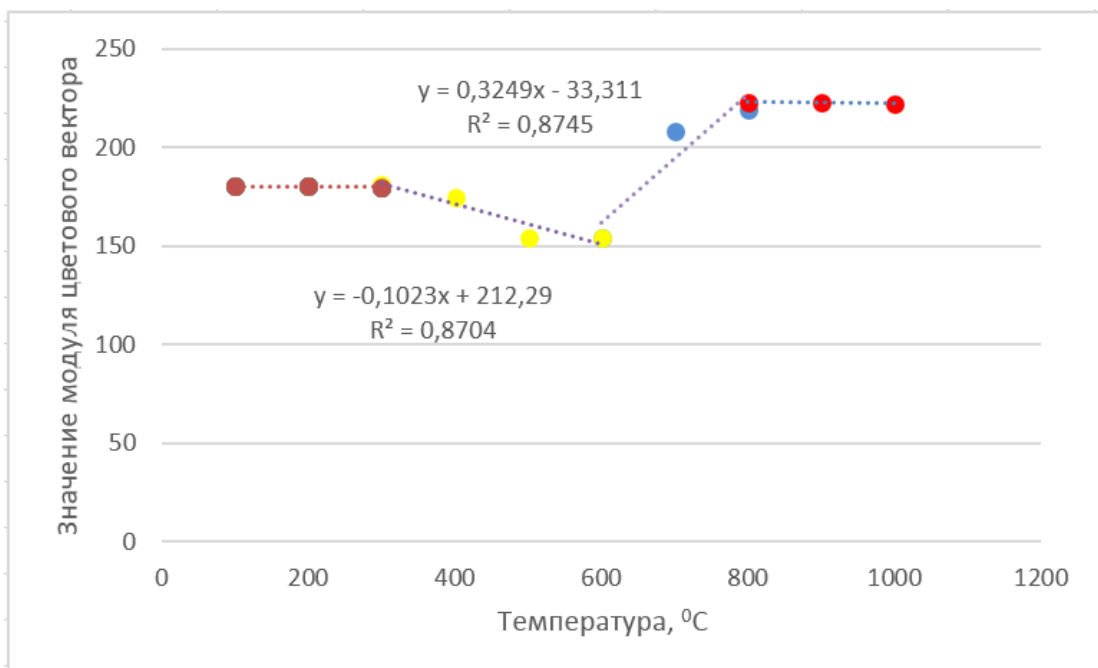


Рисунок 3.11 – График зависимости значений модуля цветового вектора от температуры для 30 минут воздействия на образцы бетона

Таблица 3.3 – Уравнения зависимости модуля цветового вектора образцов бетона от температуры [89]

№	Интервал температуры и время воздействия	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации
1.	до 300 0С на всех промежутках времени	$\Psi=180$	1
2.	От 300 до 600 0С при 10 минутах	$\Psi=-0,0952T+209,87$	0,9044
3.	От 600 до 900 0С при 10 минутах	$\Psi=0,2552T-6,1151$	0,8332
4.	От 300 до 600 0С при 20 минутах	$\Psi=-0,1023T +212,29$	0,8704
5.	От 600 до 800 0С при 20 минутах	$\Psi=0,3424T-42,796$	0,8554
6.	От 300 до 600 0С при 30 минутах	$\Psi=-0,1023T+212,29$	0,8704
7.	От 600 до 800 0С при 30 минутах	$\Psi=0,3249T-33,311$	0,8745
8.	От 900 до 1000 0С на 10 минутах, а на промежутках при 20 и 30 минутах от 800 до 1000 0С	$\Psi=220$	1

Данные изменения в бетоне связаны с потерей химически связанной воды, вплоть до ее полной потери. Так, например, тоберморитовый гель (часть портландцементного камня и бетона) постепенно дегидратируется в интервале температур 100-700 °С. Гидросиликаты кальция начинают терять воду при температурах 120-150 °С; при 300 °С отщепляется 0,5 молекулы воды, а при 600-700 °С переходят в $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ [88].

Таким образом, можно построить физическую модель изменений модуля цветового вектора от температуры. Условная модель представлена на рисунке 3.12.

Модель состоит из 4 этапов: 1 этап – изменения значений Ψ отсутствует (без повреждений); 2 этап – уменьшение значений Ψ , что соответствует дегидратации тоберморитового геля (потеря 0,5 молекул воды); 3 этап – увеличение значений Ψ , что соответствует переходу в $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ гидросиликатов кальция; 4 этап – изменения значений Ψ отсутствует (максимальные повреждения).

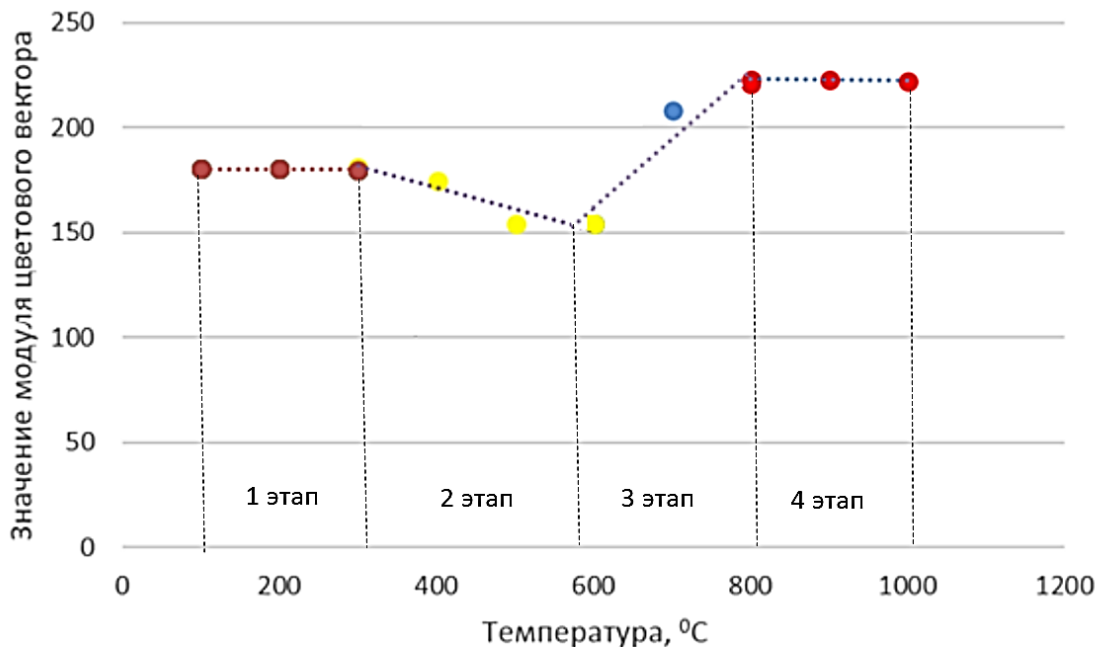


Рисунок 3.12 – Физическая модель изменения модуля цветового вектора от температуры

В работе [88] образцы бетона с различными добавками были исследованы на термическое поведение с помощью термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе синхронного термического анализа. По результатам данной работы было установлено, что на всем протяжении термического воздействия из образцов происходит выделение воды до 900 °С. В интервале температур 600-800 °С регистрировался эндотермический эффект и падение массы, связанное с разложением карбонатов. Наличие эндотермического эффекта с минимумом около 600 °С согласуется с переходом кварца из α в β форму, а также с разложением гидроксида кальция [88]. Данные температурные точки подтвердились изменением цветовых характеристик. На рисунке 3.12 также имеется минимум в точке 600 °С, а в интервале температур 600-800 °С происходит рост значений модуля цветового вектора [89].

Таким образом, имеется взаимосвязь изменений цветовых характеристик образцов бетона с химическими процессами при термическом воздействии.

Полученные данные совпадают с физическими и химическими процессами,

происходящими в бетоне при термическом воздействии. Таким образом, имеется возможность решения задачи определения и сравнения степени термического повреждения строительных конструкций из бетона разработанным инструментальным методом и прибором по изменениям цветовых характеристик RGB.

3.2 Результаты исследования изменений цветовых характеристик стали при термическом воздействии

Для исследований было подготовлено 24 образца из стальной горячекатаной пластины (ГОСТ 19903-2015 [90]) в виде равных частей с размерами 80x40x5 мм, отклонение от размеров по длине и ширине не превышает 5 мм. Размеры образцов были обусловлены ограничениями оборудования – внутреннего пространства муфельной печи LOIP LF 7/13-G1 с цифровым терморегулятором.

Образцы стали без видимых повреждений и загрязнений. Перед исследованием образцы были предварительно обработаны на шлифовальном станке для снятия окислов до металлического блеска.

План проведения эксперимента предусматривал 8 серий исследований (по 3 образца в каждой) и включал нагревание образцов от 100°C до 800°C (с шагом в 100°C). В нагретую муфельную печь до определенной температуры для каждой серии, помещали три исследуемых образца, за промежуток времени не превышающий 3 сек. Образцы из одной серии (при определенной температуре) выдерживали в течение 10, 20 и 30 минут соответственно, извлекая по одному образцу из муфельной печи при достижении временного промежутка. Охлаждение образцов проводилась при условиях окружающей среды в помещении естественным путем [91].

Температурные пределы исследования были выбраны исходя из физических свойств стали, а время – от средних промежутков времени развития и тушения пожара.

Сталь является сплавом железа и углерода (содержание углерода до 2,14 %) с

примесями других элементов [92]. Стали широко используются в строительстве, машиностроении и в других областях, где необходимы свойства в виде прочности, твердости, пластичности, упругости и выносливости. Для исследования можно разделить стали на две группы горячекатаные и холоднодеформированные. Основное отличие в термической обработке при производстве деталей и конструкций. Данное обстоятельство накладывает ограничения на температурные пределы для исследования после пожара [91].

Термическое воздействие на сталь в ходе пожара приводит к изменениям в структуре, свойствах, форме и внешнего вида. Изменение цвета поверхности является одним из признаков, по которому можно судить о термическом воздействии на сталь [91].

При термическом воздействии на поверхности стали образуется слой оксидов. В температурных пределах 200-400 °С образуется тонкий слой оксида железа. При увеличении температуры толщина оксидной пленки увеличивается. Из-за интерференции белого света в тонких пленках оксида, на отражающей поверхности стали, последовательно возникают условия гашения лучей определенной длины волны. Из специальной литературы известно, что для углеродистой стали характерны следующие переходы цвета: соломенный (220 °С), коричневый (240 °С), пурпурный (260 °С), синий (300 °С), светло-серый (330-350 °С). Данная особенность поведения металла называется «цвета побежалости». При более высоких температурах от 700 °С на поверхности металла образуется окалина. Окалина состоит из трех слоев: вустит (FeO), гематит (Fe_2O_3) и магнетит (Fe_3O_4). Чем больше на поверхности металла вустита, тем окалина черней, а значит температура и длительность нагрева больше. Окалина рыжего и коричневого цвета образуется при более низких температурах 500-700 °С [93].

На рисунке 3.13 представлен внешний вид образцов после лабораторных исследований. По горизонтали, начиная с нижней строки временные промежутки термического воздействия (10, 20, 30 минут), по вертикали в рядах температуры воздействия от 100 до 800 °С. Так, с помощью визуального осмотра выявлено, что изменение цвета стали начинает происходить при температурах от 200 °С серый

цвет меняется на соломенный, бордовый, синий, а при температурах выше 500 °С сталь изменяет свой цвет от тёмно-коричневого до темно-серого. Также видно, что изменение внешнего вида зависит от времени и температуры [91].

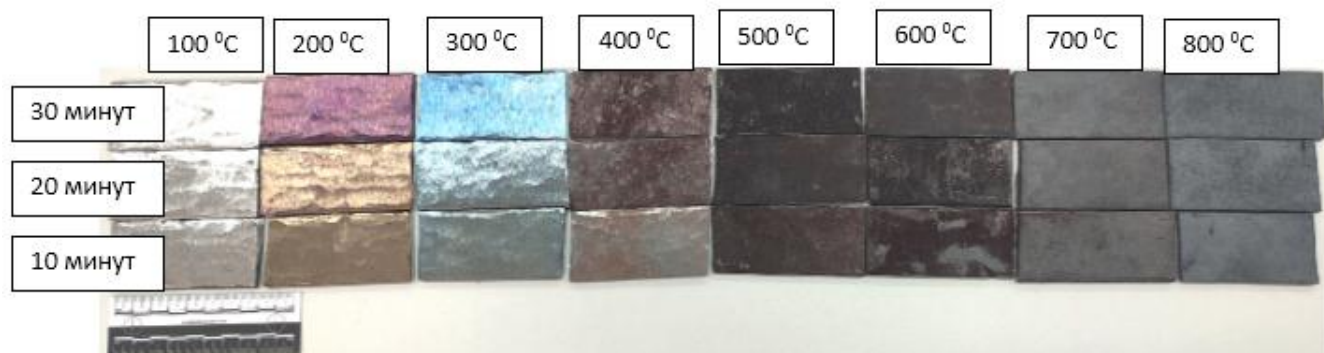


Рисунок 3.13 – Вид образцов стали после термического воздействия [91]

В таблице 3.4 представлены результаты измерений цветовых характеристик образцов, разработанным прибором контроля термических повреждений после статистической обработки по ГОСТ Р 50779.22 – 2005 [79]. Измерения проводились на поверхности образцов путем измерения в 5 точках на каждом образце. Достоверность результатов измерения цветовых характеристик оценивалось при трехкратном измерении одного образца. Средние значения измерений определяли, как среднее арифметическое из полученных результатов. Для вычисления среднего значения для каждого образца, стандартного отклонения, доверительных интервалов, средней относительной погрешности измерений использовалось программное обеспечение Microsoft Excel. Таким образом, в доверительные интервалы укладываются 95 % результатов всех измерений. Значение средней относительной погрешности каждого измерения не превышает 5 % [91].

Таблица 3.4 – Средние значения измерений цветовых характеристик образцов из стали [91].

№ образца	Температура, °С	Время, минут	R	G	B	C, люкс	Модуль цветового вектора
1	100	10	90	90	90	410	156
2	200	10	79	59	49	296	110
3	300	10	50	54	51	254	90
4	400	10	48	41	37	201	73
5	500	10	18	17	15	84	29
6	600	10	15	14	13	67	24
7	700	10	24	25	24	119	42
8	800	10	34	38	38	182	64
9	100	20	90	90	90	410	156
10	200	20	64	46	39	260	88
11	300	20	51	56	55	263	94
12	400	20	30	26	22	125	45
13	500	20	16	17	15	81	28
14	600	20	13	14	13	68	23
15	700	20	25	27	26	129	45
16	800	20	34	34	34	160	64
17	100	30	90	90	90	410	156
18	200	30	32	24	26	134	48
19	300	30	31	41	46	192	69
20	400	30	23	21	19	103	36
21	500	30	13	14	13	68	23
22	600	30	17	18	17	87	30
23	700	30	28	30	30	143	51
24	800	30	34	36	36	169	64

На рисунках 3.14-3.18 представлены сводные графики зависимости цветовых характеристик от температуры и времени воздействия на образцы стали [91].

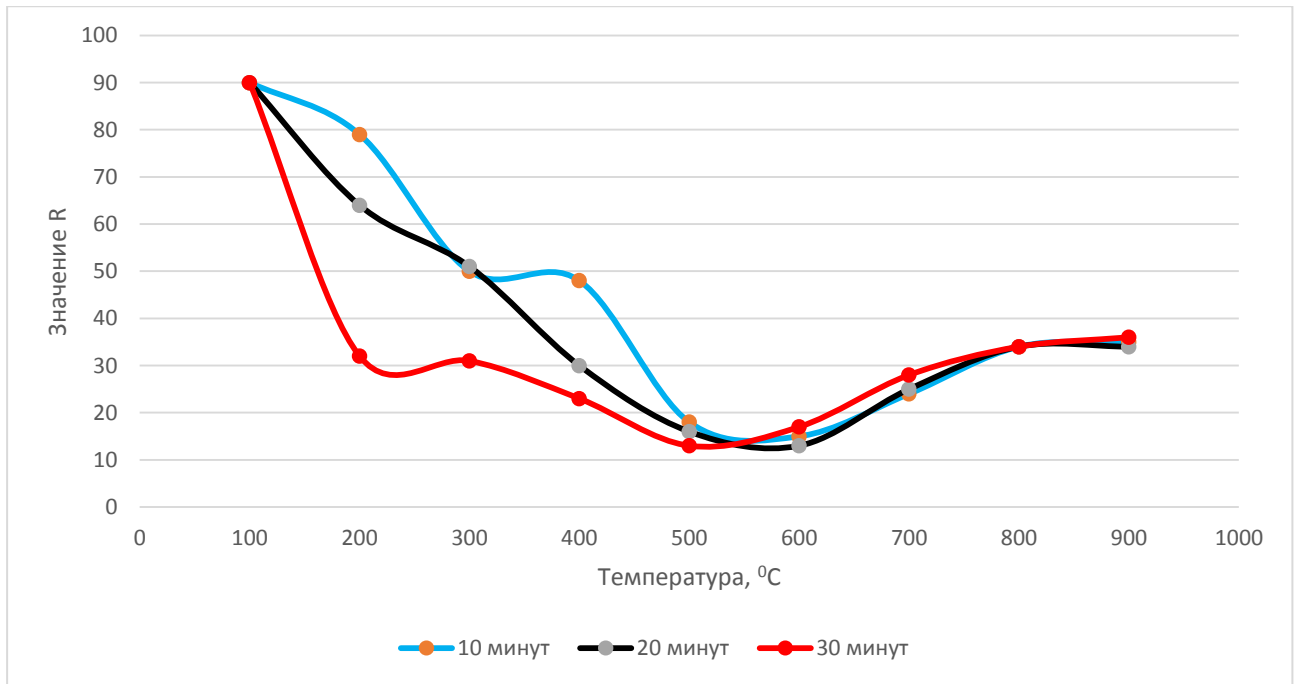


Рисунок 3.14 – Графики зависимости значений R (красный цвет) от температуры и времени воздействия на образцы стали

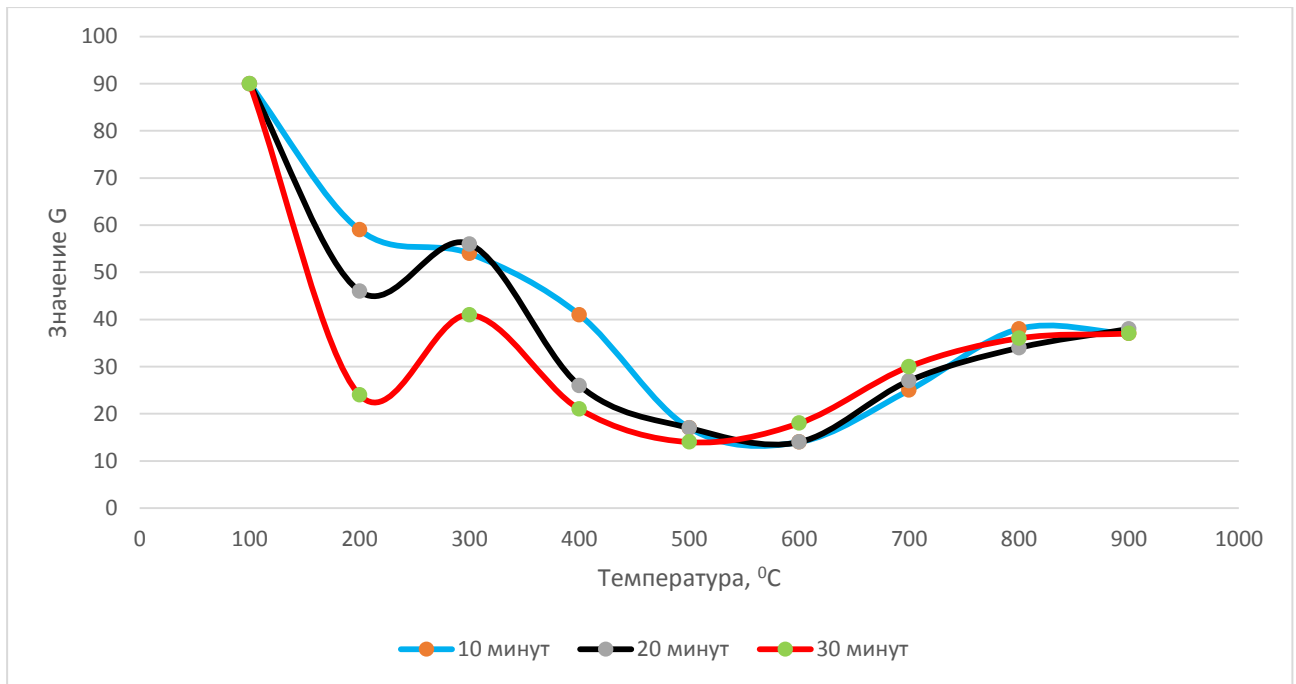


Рисунок 3.15 – Графики зависимости значений G (зеленый цвет) от температуры и времени воздействия на образцы стали

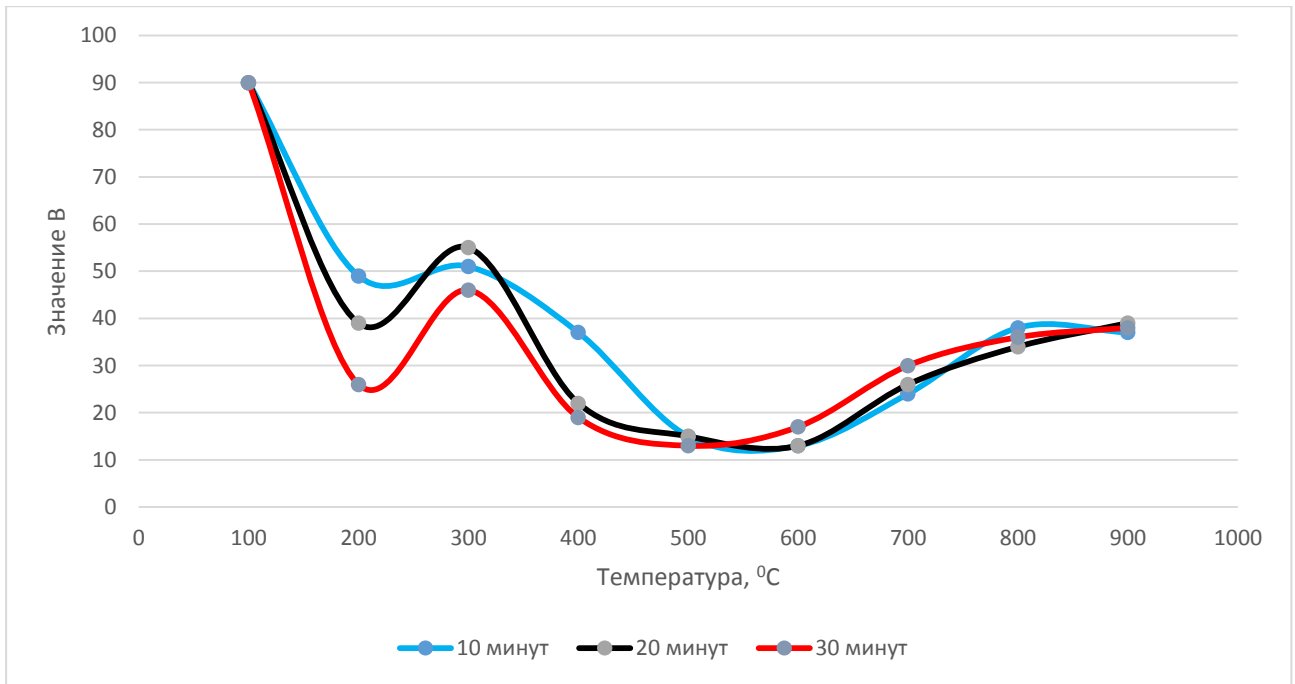


Рисунок 3.16 – Графики зависимости значений В (синий цвет) от температуры и времени воздействия на образцы стали

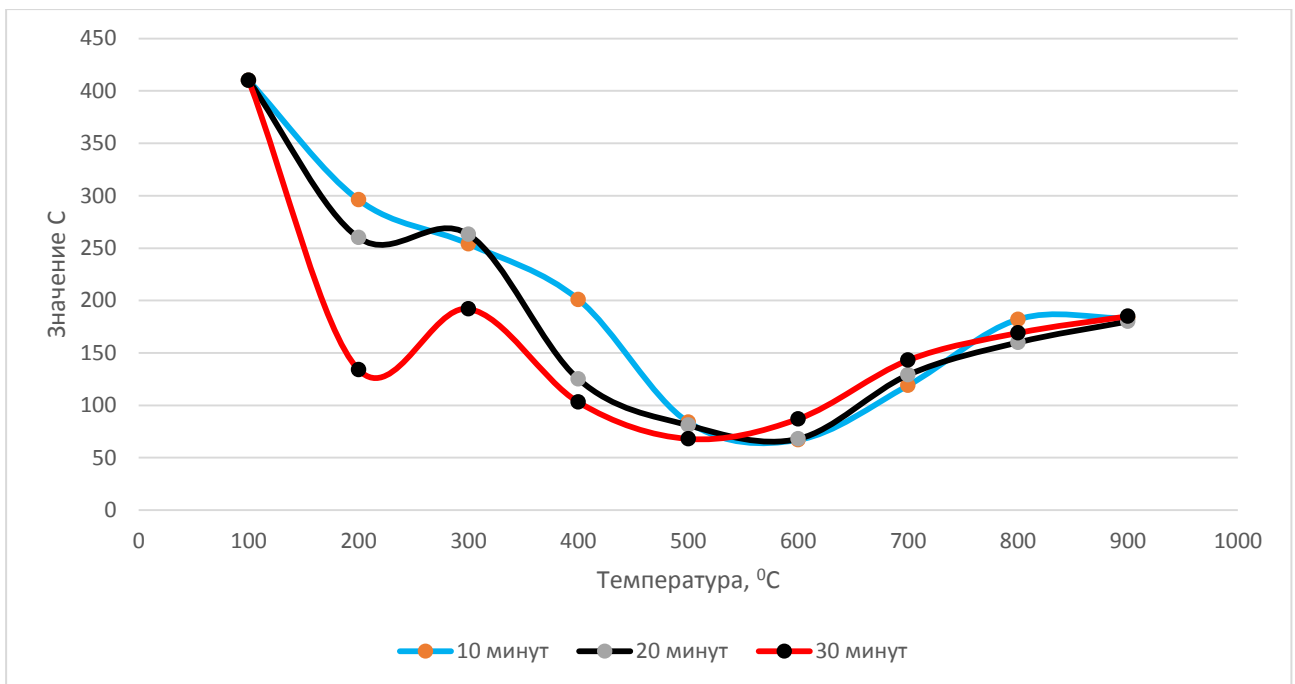


Рисунок 3.17 – Графики зависимости значений С (отраженный свет) от температуры и времени воздействия на образцы стали

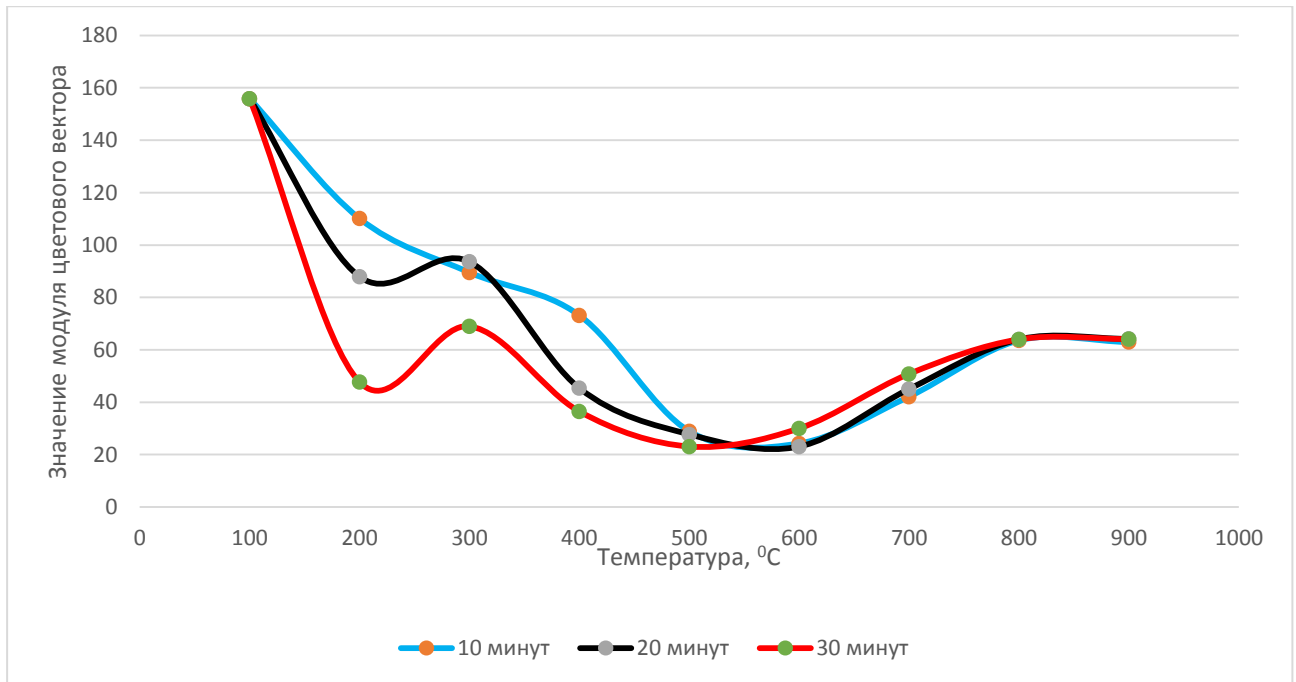


Рисунок 3.18 – Графики зависимости значений модуля цветового вектора от температуры и времени воздействия на образцы стали

Из рисунков 3.14-3.18 видно, что при увеличении температуры значения показателей R, G, B, C, модуль цветового вектора увеличиваются от 600 °C на всех временных промежутках температурного воздействия. Полученные данные совпадают с процессом образования окалины на поверхности углеродистой стали. В промежутке от 100 до 600 °C наблюдаются процессы образования «цветов побежалости» разных оттенков [91].

В таблице 3.5 представлена построенная матрица корреляции для каждой парной комбинации полученных значений температуры и цветовых характеристик стали.

Таблица 3.5 – Корреляционная матрица цветовых характеристик и температуры для образцов стали.

10 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	-0,76664	1				
<i>G</i>	-0,69468	0,959626	1			
<i>B</i>	-0,6337	0,916191	0,990824	1		
<i>Ц</i>	-0,71534	0,978416	0,996878	0,979018	1	
<i>С</i>	-0,69443	0,973196	0,997262	0,979867	0,9984	1
20 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	-0,7065	1				
<i>G</i>	-0,6121	0,960747	1			
<i>B</i>	-0,54701	0,929951	0,994812	1		
<i>Ц</i>	-0,62046	0,978221	0,995799	0,984874	1	
<i>С</i>	-0,64983	0,986282	0,990016	0,972883	0,995463	1
30 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	-0,45093	1				
<i>G</i>	-0,40348	0,97884	1			
<i>B</i>	-0,41612	0,967628	0,996206	1		
<i>Ц</i>	-0,41929	0,987128	0,998074	0,994785	1	
<i>С</i>	-0,40994	0,984886	0,997552	0,996104	0,999047	1

Из таблицы 3.5 видно, что имеется сильная связь между цветовыми характеристиками. Далее графики были разбиты на отрезки для описания происходящих процессов. За основу были взяты графики значений *R*, так как они имеют сильную отрицательную корреляцию с температурой. Условно графики можно разделить на четыре отрезка.

В таблице 3.6 приведены уравнения зависимости значений *R* от температуры, построенные путем аппроксимации методом наименьших квадратов с помощью Microsoft Excel. Из графиков 3.19-3.21 и уравнений видно, что до температуры 100 °С изменений цветовых характеристик не происходит. При температурах от 100 до 600 °С значение *R* при увеличении температуры

уменьшается, далее от 600 до 800 °С происходит увеличение значения R. При температурах выше 800 °С изменений значений R не происходит [91].

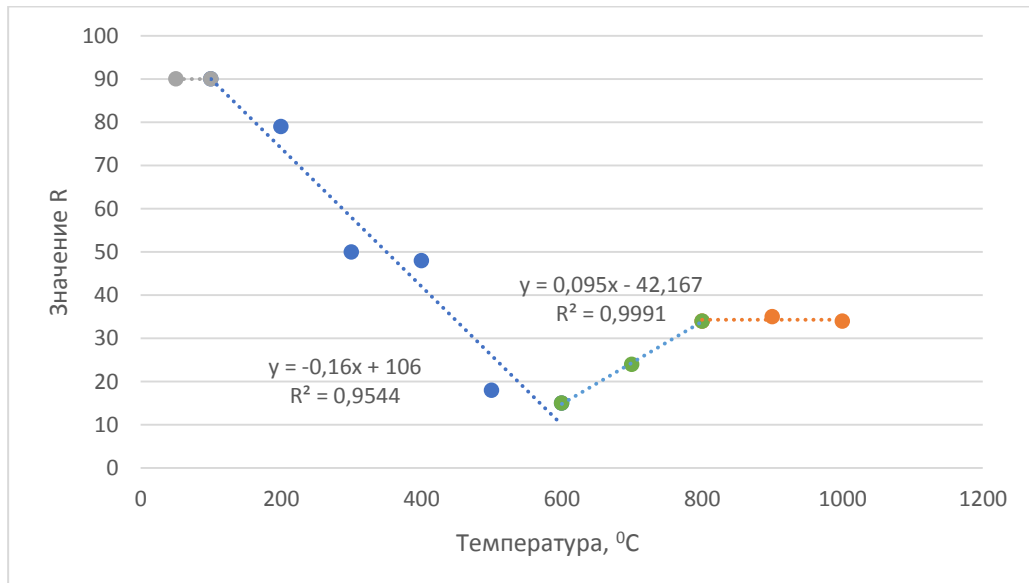


Рисунок 3.19 – График зависимости значений R от температуры для 10 минут воздействия на образцы стали

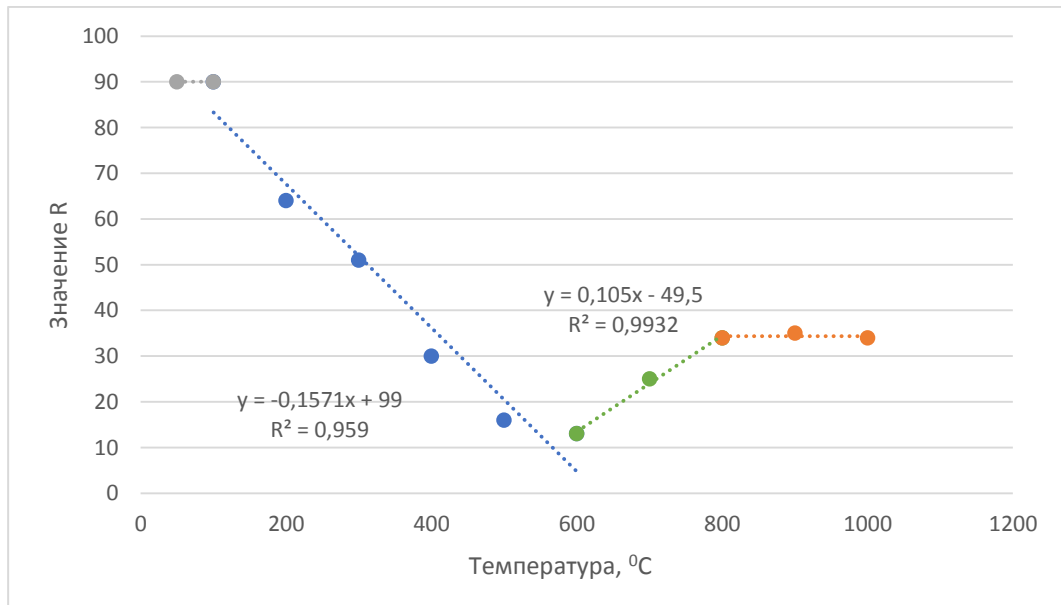


Рисунок 3.20 – График зависимости значений R от температуры для 20 минут воздействия на образцы стали

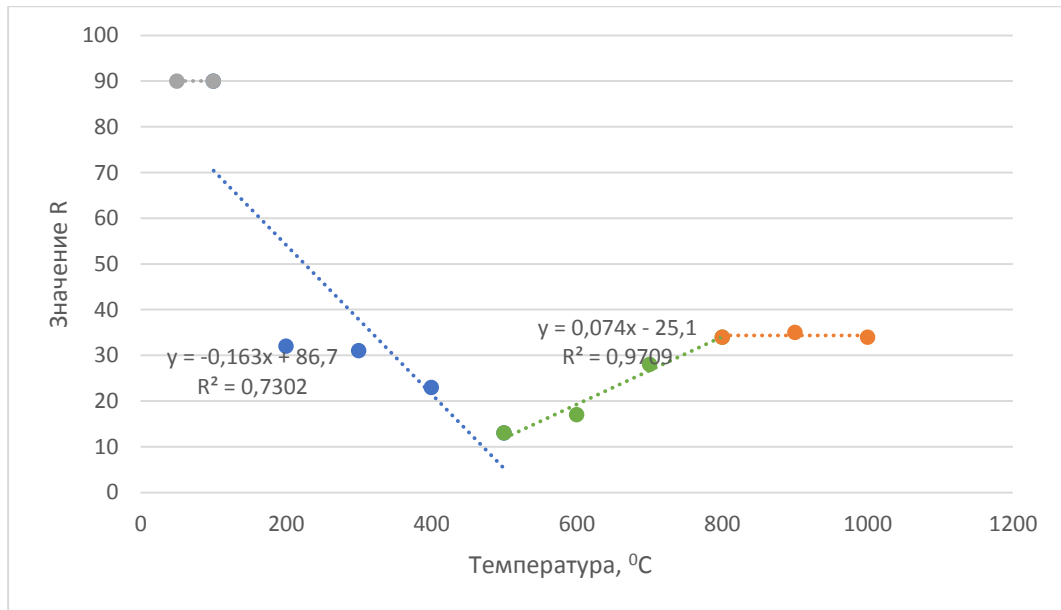


Рисунок 3.21 – График зависимости значений R от температуры для 30 минут воздействия на образцы стали

Таблица 3.6 – Уравнения зависимости значений R образцов стали от температуры [91]

№	Интервал температуры и время воздействия	Уравнение зависимости	Коэффициент детерминации
1.	до 100 °C на всех промежутках времени	$R=90$	1
2.	От 100 до 600 °C при 10 минутах	$R=-0,16T+106$	0,9544
3.	От 600 до 800 °C при 10 минутах	$R=0,095T-42,167$	0,9991
4.	От 100 до 600 °C при 20 минутах	$R=-0,1571T+99$	0,959
5.	От 600 до 800 °C при 20 минутах	$R=0,105T-49,5$	0,9932
6.	От 100 до 500 °C при 30 минутах	$R=-0,163T+66,7$	0,7302
7.	От 500 до 800 °C при 30 минутах	$R=0,074T-25,1$	0,9709
8.	От 800 до 1000 °C	$R=34$	1

Полученные данные совпадают с температурными пределами образования «цветов побежалости» и окалины. Таким образом, можно построить физическую модель изменений значений R от температуры. Условная модель представлена на рисунке 3.22.

Модель состоит из 4 этапов: 1 этап – изменения значений R отсутствует (без повреждений); 2 этап – уменьшение значений R , что соответствует образованию тонких окисных пленок «цветов побежалости»; 3 этап – увеличение значений R , что соответствует образованию высокотемпературных окислов (окалины); 4 этап – изменения значений R отсутствует (максимальные повреждения).

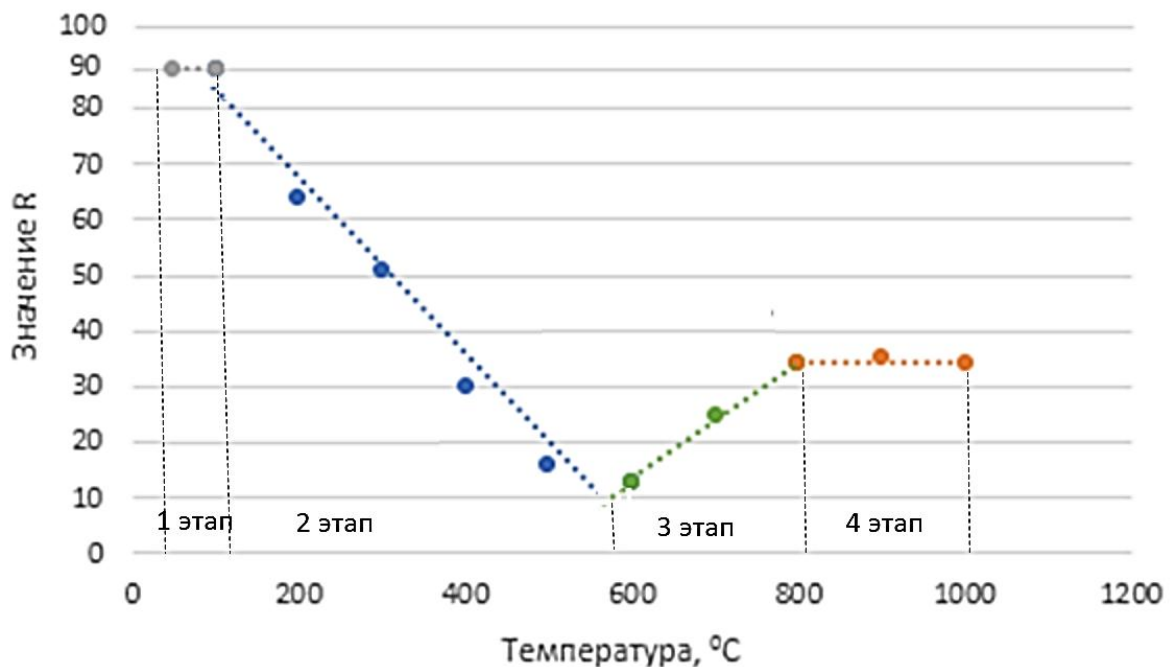


Рисунок 3.22 – Физическая модель изменения значений R от температуры для образцов стали

Первый отрезок до 100 °C соответствует термически неповрежденной холоднодеформированной стали.

На отрезке от 100 °C до 600 °C образуется тонкая пленка оксидов железа, которая формирует «цвета побежалости». Наименьшему значению R (составляющей красного цвета) соответствуют наибольшие термические повреждения для холоднодеформированной стали.

На отрезке от 600 °C начинают образовываться оксиды железа в виде

окалины. При увеличении значений R , а также других показателей цветовых характеристик RGB, степень термических повреждений увеличивается. Данное условие можно использовать, как для горячекатаных, так и для холоднодеформированных сталей. Увеличение значений цветовых характеристик происходит до температуры 800 °С, далее значения цвета остаются на одном уровне [91].

Таким образом, имеется возможность решения задачи определения и сравнения степени термического повреждения строительных конструкций из стали разработанным инструментальным методом и прибором при температурах от 100 °С до 800 °С. При больших температурах изменения цветовых характеристик не происходит.

3.3 Результаты исследования изменений цветовых характеристик древесины при термическом воздействии

Для исследований был подготовлен 21 образец прямослойной воздушно-сухой древесины сосны в виде прямоугольных брусков с размерами 25x50x150 мм, отклонение от размеров по длине не превышает 10 мм. Размеры образцов были обусловлены ограничениями оборудования – внутреннего пространства муфельной печи LOIP LF 7/13-G1 с цифровым терморегулятором. Образцы древесины без видимых пороков и смоляных включений. Боковые поверхности образцов остроганы, торцы опилены и обработаны наждаком. Перед исследованием образцы были предварительно высушены в сушильном шкафу LOIP LF при температуре 50 °С в течение 8 часов.

План проведения эксперимента предусматривал 7 серий исследований (по 3 образца в каждой) и включал нагревание образцов от 100°С до 400°С (с шагом в 50°С). Однако во время проведения эксперимента, появилась необходимость расширить количество образцов в температурных пределах 200-250 °С. По данной причине было добавлено еще две серии (по 3 образца) при температурах 220 и 230 °С. В нагретую муфельную печь до определенной температуры для каждой серии,

помещали три исследуемых образца, за промежуток времени не превышающий 3 сек. Образцы из одной серии (при определенной температуре) выдерживали в течение 10, 20 и 30 минут соответственно, извлекая по одному образцу из муфельной печи при достижении временного промежутка. Охлаждение образцов проводилась при условиях окружающей среды в помещении естественным путем.

Температурные пределы исследования были выбраны исходя из физических и пожароопасных свойств древесины для хвойных пород, а время – от средних промежутков времени развития и тушения пожара.

Как известно, древесина является природным полимером – лигниноцеллюлозным комплексом, который состоит из двух основных групп компонентов – примерно 70 – 75% целлюлозы и гемицеллюлозы, и 25 – 30% лигнина. Кроме того, древесина содержит поглощенную влагу, количество которой меняется в зависимости от влажности окружающей атмосферы, условий хранения. Древесина хвойных пород (сосновая, еловая) при влажности 8,7-9,0% имеет плотность 414-510 кг/м³; теплоту сгорания 18730- 20850 кДж/кг [46]. Теплоемкость древесины сосны - 2,512 кДж/кг·К; теплопроводность вдоль волокон 0,291, поперек волокон -0,174 Вт/мК [4, 94].

Процесс термического разложения древесины протекает в несколько этапов. До 125 °С из древесины испаряется влага, после этого она разлагается с выделением горючих летучих веществ. При температуре выше 210 – 240 °С и наличии источника открытого огня летучие вещества воспламеняются. Длительное устойчивое горение летучих продуктов пиролиза древесины с образованием пламени наблюдается при температуре 260 °С и выше. После выгорания летучих (450 °С и выше) процесс переходит в стадию беспламенного гетерогенного горения угля, температура которого может достигать 900 °С [9]. Чем выше температура нагрева, тем более существенные внешние изменения претерпевает древесина. При температуре 200-250 °С древесина теряет свой цвет и обугливается по поверхности в течение нескольких минут. Эта температурная граница не случайна. По данным термогравиметрического анализа, гемицеллюлоза разлагается с выделением летучих продуктов именно при 200-260 °С, целлюлоза – при 240-350 °С, лигнин –

при 280-500 °С [4, 95].

В [43] отмечается, что уже при температуре, приближающейся к 200 °С, заметно снижается степень полимеризации полисахаридов, особенно гемицеллюлоз, происходит плавление лигнина и его конденсация. За пределами 300 °С обычная структура древесины полностью исчезает, уступая место конденсированным ароматическим системам, присущим углю [4].

На рисунке 3.21 представлен внешний вид образцов после лабораторных исследований. Так, с помощью визуального осмотра выявлено, что изменение цвета древесины начинает происходить при температурах от 150 °С, и при температурах выше 350 °С происходит образование обугленного остатка на поверхности образцов. Также видно, что изменение внешнего вида зависит от времени и температуры, с увеличением, термические повреждения в виде потемнения и обугливания увеличиваются.



Рисунок 3.23 – Вид образцов древесины после термического воздействия

В таблице 3.7 представлены результаты измерений цветовых характеристик образцов древесины, разработанным прибором контроля термических повреждений после статистической обработки по ГОСТ Р 50779.22 – 2005 [79]. Измерения проводились на поверхности образцов путем измерения в 5 точках на каждом образце, избегая сучков и других влияющих на внешний вид областей. Достоверность результатов измерения цветовых характеристик оценивалось при трехкратном измерении одного образца. Средние значения измерений определяли, как среднее арифметическое из полученных результатов. Для вычисления среднего

значения для каждого образца, стандартного отклонения, доверительных интервалов, средней относительной погрешности измерений использовалось программное обеспечение Microsoft Excel. Таким образом, в доверительные интервалы укладываются 95 % результатов всех измерений. Значение средней относительной погрешности каждого измерения не превышает 5 %

Таблица 3.7 – Средние значения измерений цветовых характеристик образцов древесины.

№ образца	Температура, °С	Время, минут	R	G	B	C, люкс	Модуль цветового вектора
1	100	10	200	158	124	772	283
2	150	10	190	150	112	728	267
3	200	10	186	134	98	665	249
4	220	10	174	125	90	630	232
5	230	10	168	118	82	580	221
6	250	10	147	96	65	489	187
7	300	10	73	50	40	259	97
8	350	10	32	24	21	125	45
9	400	10	18	19	19	94	32
10	100	20	200	158	124	772	283
11	150	20	190	150	113	728	267
12	200	20	170	121	87	601	226
13	220	20	161	107	76	549	208
14	230	20	147	99	71	503	191
15	250	20	65	38	29	208	81
16	300	20	32	25	22	127	46
17	350	20	27	24	21	120	42
18	400	20	19	20	20	96	34
19	100	30	202	158	124	772	285
20	150	30	194	148	108	718	267
21	200	30	171	120	86	595	226
22	220	30	132	86	62	443	169

Продолжение таблицы 3.7

23	230	30	74	43	37	232	93
24	250	30	59	36	27	193	74
25	300	30	26	29	21	118	44
26	350	30	24	22	20	113	38
27	400	30	19	20	20	99	34

На рисунках 3.24-3.28 представлены сводные графики зависимости цветовых характеристик от температуры и времени воздействия на образцы древесины.

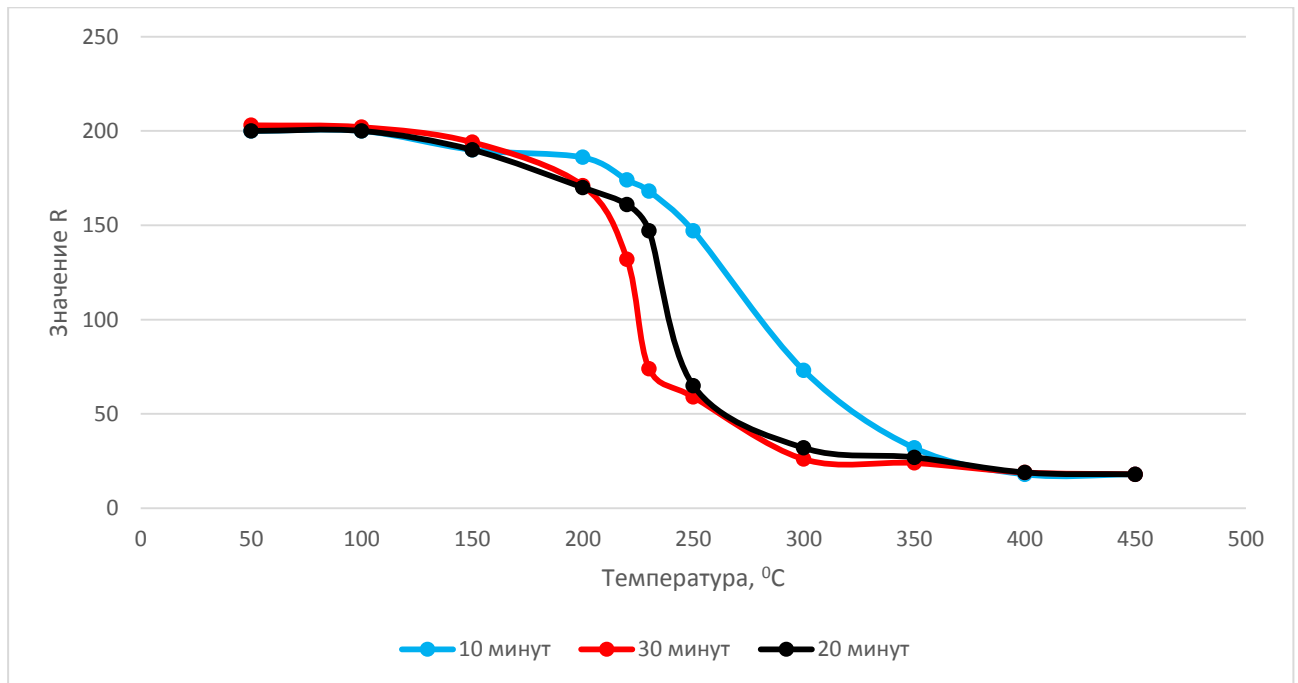


Рисунок 3.24 – Графики зависимости значений R (красный цвет) от температуры и времени воздействия на образцы древесины

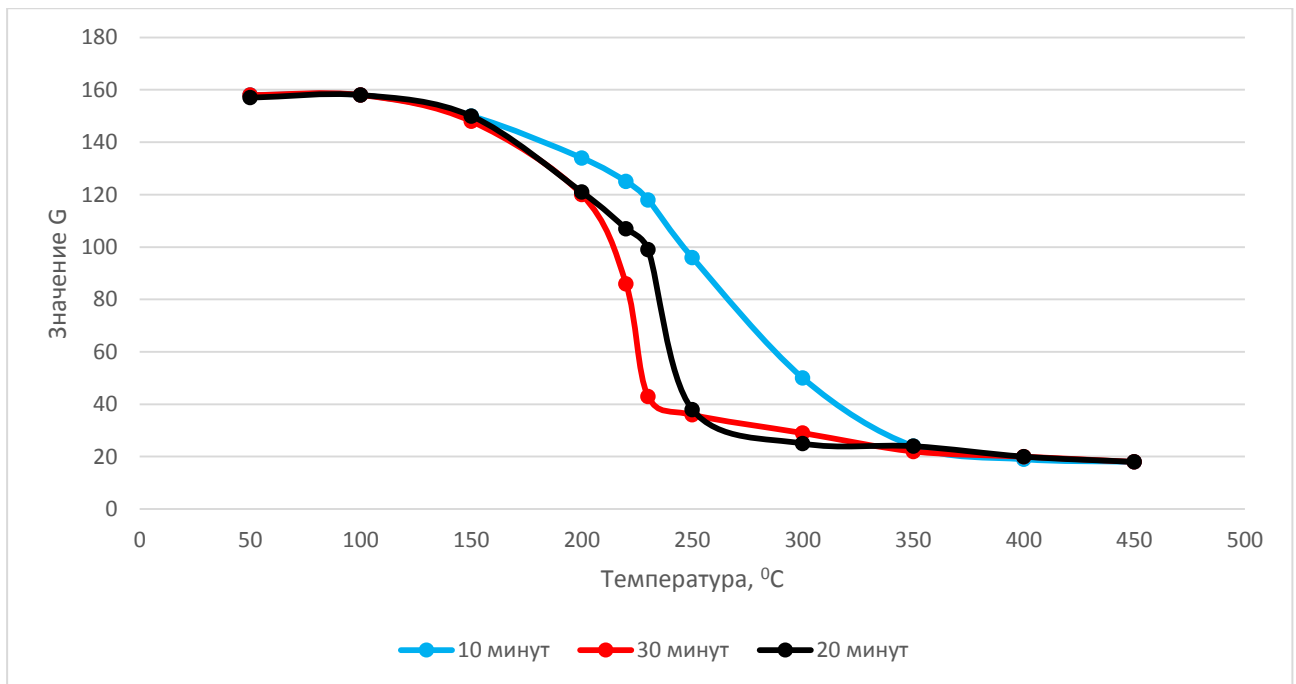


Рисунок 3.25 – Графики зависимости значений G (зелёный цвет) от температуры и времени воздействия на образцы древесины

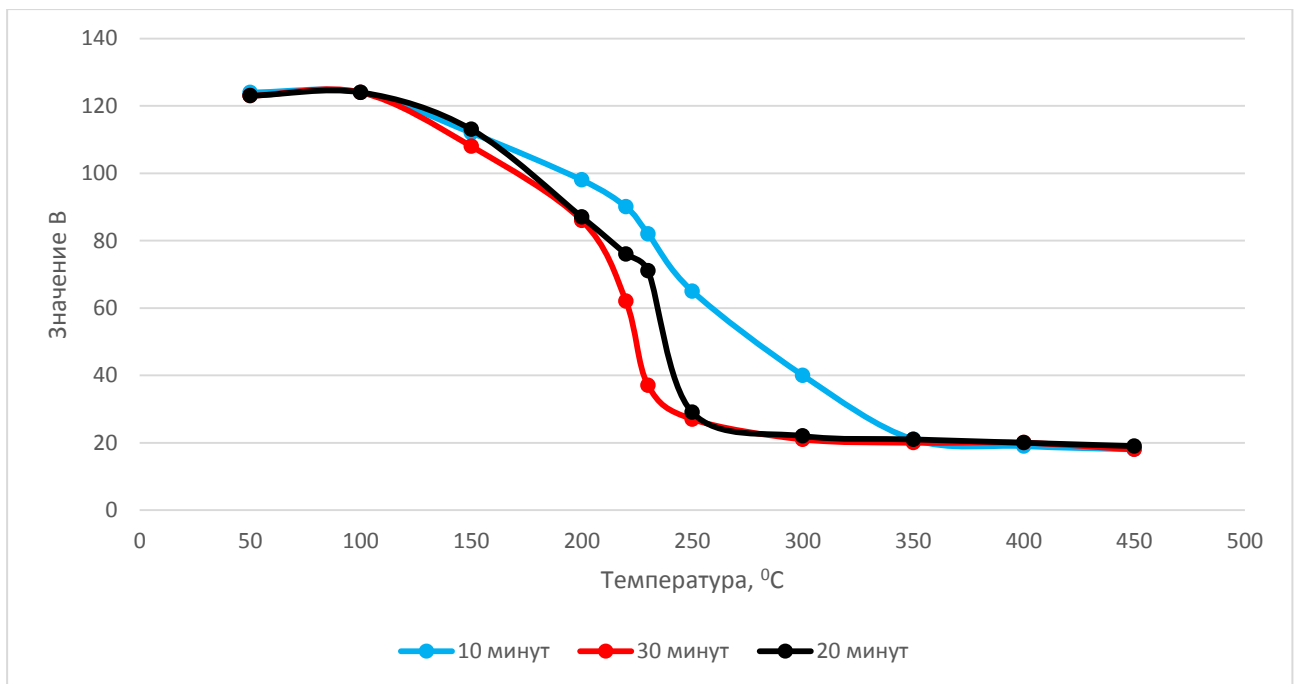


Рисунок 3.26 – Графики зависимости значений B (синий цвет) от температуры и времени воздействия на образцы древесины

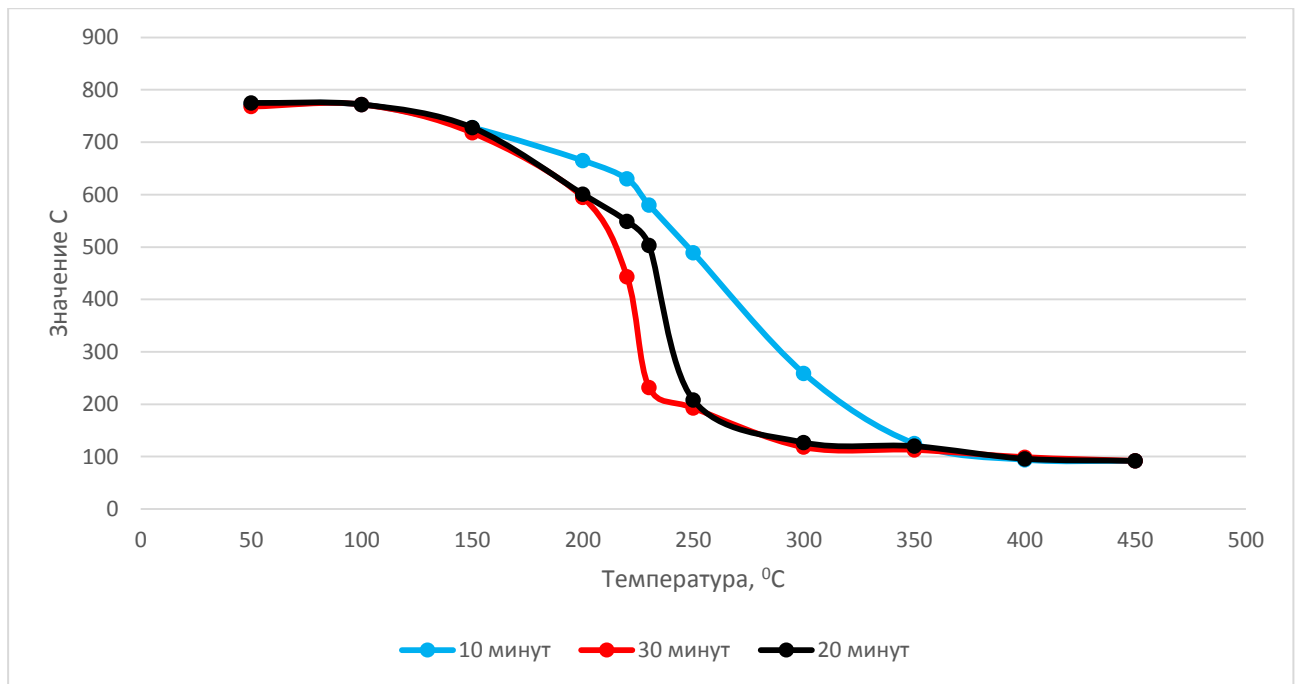


Рисунок 3.27 – Графики зависимости значений C (отраженный свет) от температуры и времени воздействия на образцы древесины

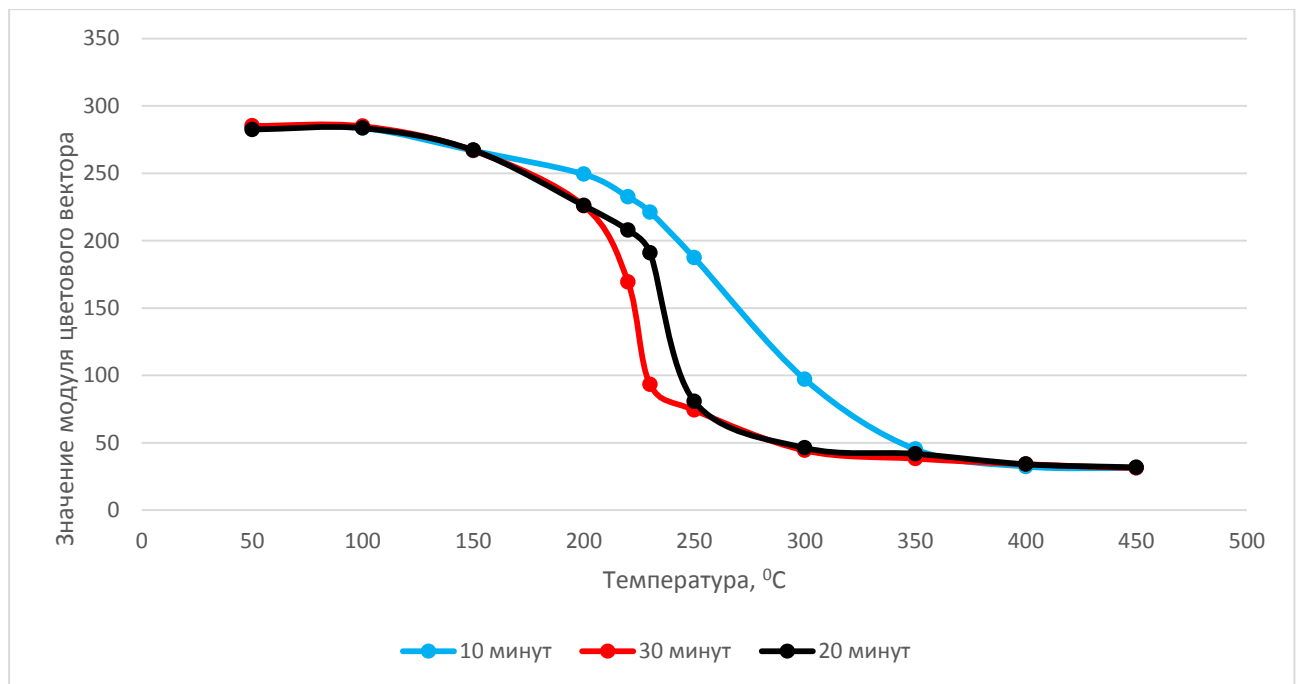


Рисунок 3.28 – Графики зависимости значений модуля цветового вектора от температуры и времени воздействия на образцы древесины

Из рисунков 3.24-3.28 видно, что при увеличении температуры значения показателей RGBС, а также значения модуля цветового вектора уменьшаются в

пределах от 100 до 350 °С на всех временных промежутках температурного воздействия. Также графики для времени температурного воздействия 20 и 30 минут практически совпадают, что говорит о более существенном влиянии температуры по сравнению с длительностью воздействия.

В таблице 3.8 представлена построенная матрица корреляции для каждой парной комбинации полученных значений температуры и цветовых характеристик древесины.

Таблица 3.8 – Корреляционная матрица цветовых характеристик и температуры для образцов древесины.

10 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	-0,93229	1				
<i>G</i>	-0,95332	0,99108	1			
<i>B</i>	-0,94792	0,971971	0,993955	1		
<i>Ц</i>	-0,96612	0,996896	0,998444	0,98733	1	
<i>С</i>	-0,9516	0,993912	0,999572	0,991549	0,999428	1
20 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	-0,91981	1				
<i>G</i>	-0,92126	0,989834	1			
<i>B</i>	-0,92097	0,975266	0,99629	1		
<i>Ц</i>	-0,92465	0,996836	0,997956	0,989674	1	
<i>С</i>	-0,92362	0,993903	0,999374	0,993554	0,999499	1
30 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	-0,91054	1				
<i>G</i>	-0,90074	0,990031	1			
<i>B</i>	-0,89861	0,98192	0,996631	1		
<i>Ц</i>	-0,9144	0,997348	0,997498	0,992726	1	
<i>С</i>	-0,90406	0,994674	0,998925	0,995413	0,999447	1

Из таблицы 3.8 видно, что имеется сильная связь между цветовыми характеристиками. За основу были взяты графики значений модуля цветового

вектора, так как они имеют сильную отрицательную корреляцию с температурой.

Ввиду нелинейности функции для описания полученных зависимостей использовалась логистическая кривая вида (уравнение 3.1):

$$\Psi(t) = \frac{\Psi_{max} - \Psi_{min}}{1 + e^{k(t-t_0)}} + \Psi_{min}, \quad (3.1)$$

где в качестве Ψ_{max} и Ψ_{min} брались максимальные и минимальные экспериментальные значения зависимой переменной (модуля цветового вектора); t_0 – абсцисса (температура) точки перегиба, определялась визуально по графику; k – значение производной в точке t_0 (подбиралось путем компьютерного перебора в диапазоне значений от 0,01 до 0,1, по сетке с шагом 0,01, с целью максимизации значения коэффициента детерминации линейной зависимости экспериментальных и подобранных значений).

Путем ручного подбора функции с помощью Microsoft Excel были подобраны уравнения зависимости модуля цветового вектора от температуры (таблица 3.9). Так как фактические значения F-критерия Фишера больше табличного при уровне значимости 0,05, то полученные уравнения и показатели тесноты связи являются статистически значимыми.

Таблица 3.9 – Уравнения зависимости модуля цветового вектора образцов древесины от температуры и времени

№	Интервал температуры и время воздействия	Уравнение зависимости	R ²	F-критерий Фишера
1.	10 минут воздействия 27-450 °С	$\Psi = \frac{251}{1 + e^{0,03(T-260)}} + 32$	0,9955	1548,56
2.	20 минут воздействия 27-450 °С	$\Psi = \frac{249}{1 + e^{0,06(T-230)}} + 34$	0,9771	298,68
3.	30 минут воздействия 27-450 °С	$\Psi = \frac{251}{1 + e^{0,07(T-220)}} + 34$	0,9878	566,77

На рисунках 3.29-3.31 отображены линейные зависимости экспериментальных и подобранных значений.

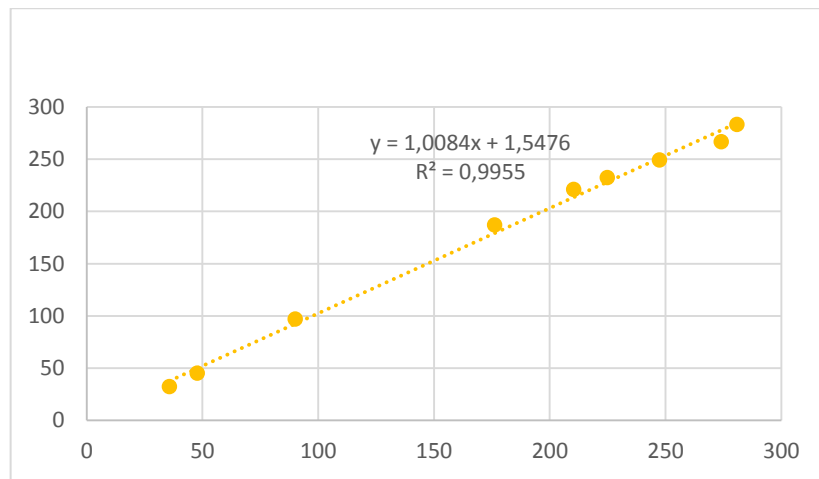


Рисунок 3.29 – Сопоставимость результатов исследования с подобранным уравнением для графика 10 минут воздействия

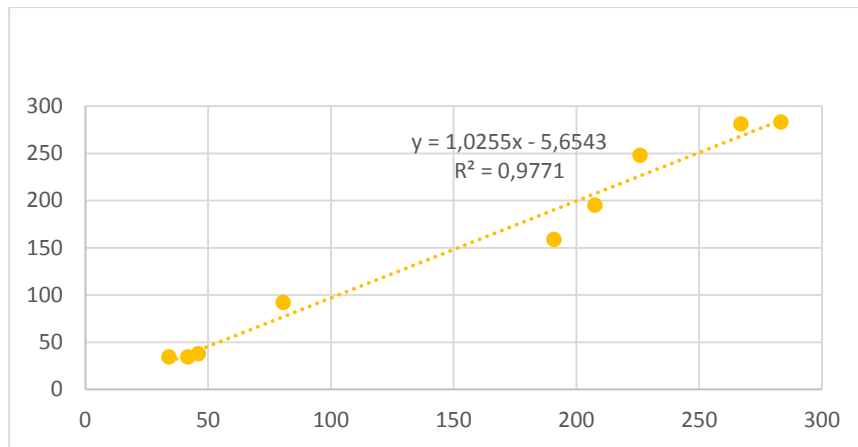


Рисунок 3.30 – Сопоставимость результатов исследования с подобранным уравнением для графика 20 минут воздействия

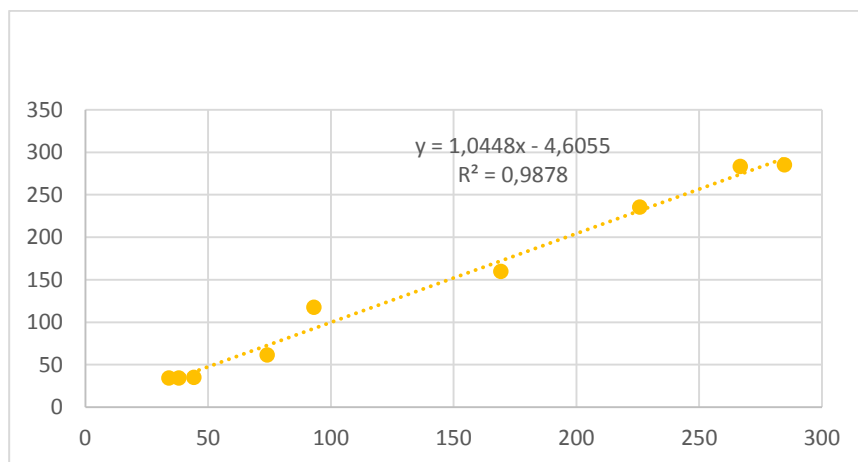


Рисунок 3.31 – Сопоставимость результатов исследования с подобранным уравнением для графика 30 минут воздействия

Полученные данные совпадают с химическими и физическими процессами, происходящими в древесине при термическом воздействии. Процесс термического разложения древесины протекает в несколько этапов. На первом этапе до 125 °С из древесины испаряется влага. При повышении температуры начинают выделяться горючие летучие компоненты [11, 12]. Чем выше температура нагрева, тем более существенные внешние изменения претерпевает древесина. При температурах от 300 до 350 °С древесина теряет свой цвет и обугливается по поверхности в течение нескольких минут. Гемиллюлоза разлагается с выделением летучих продуктов при температурах от 200 до 260 °С, целлюлоза – от 240 до 350 °С, лигнин – от 280 до 500 °С. Данные диапазоны температур приведены по данным термогравиметрического анализа представленных в работе [95].

Таким образом, можно построить физическую модель изменений значений модуля цветового вектора от температуры. Условная модель представлена на рисунке 3.32.

Модель состоит из 3 этапов: 1 этап – изменения значений Ц отсутствуют (без повреждений); 2 этап – уменьшение значений Ц, что соответствует процессу пиролиза; 3 этап – изменения значений Ц отсутствуют (максимальные повреждения в виде обугливания).

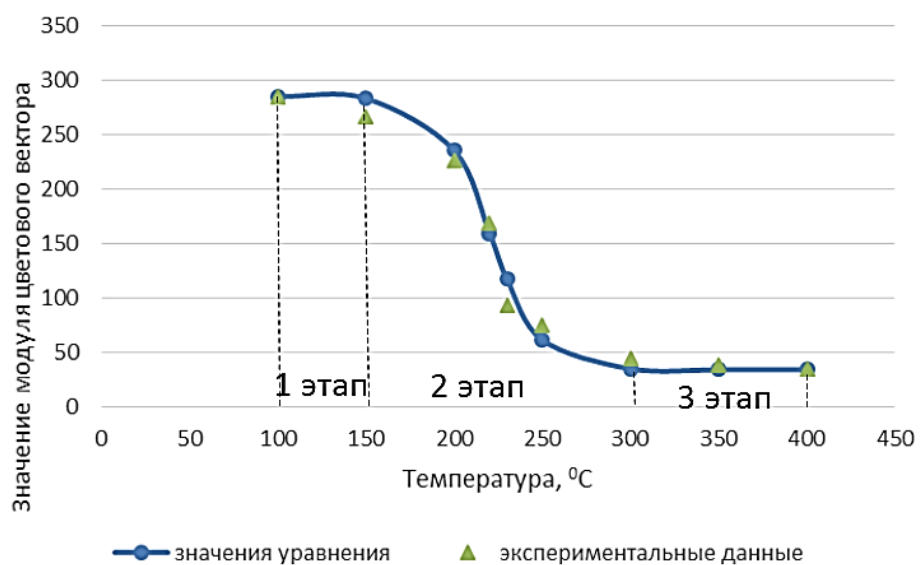


Рисунок 3.32 – Физическая модель изменения значений модуля цветового вектора от температуры для образцов древесины

Таким образом, имеется возможность решения задачи определения и сравнения степени термического повреждения древесины разработанным инструментальным методом и прибором при температурах от 150 °С до 300 °С. При больших температурах изменения цветовых характеристик не происходит.

3.4 Результаты исследования изменений цветовых характеристик полимеров при термическом воздействии

Для исследований было подготовлено 27 образцов белой панели ПВХ в виде прямоугольных частей с размерами 60x60x20 мм, отклонение от размеров по длине и ширине не превышает 10 мм. Размеры образцов были обусловлены ограничениями оборудования – внутреннего пространства муфельной печи LOIP LF 7/13-G1 с цифровым терморегулятором. Образцы панели ПВХ без видимых нарушений и пятен. Боковые поверхности образцов обработаны канцелярским ножом. Перед исследованием образцы были предварительно высушены в сушильном шкафу LOIP LF при температуре 50 °С в течение 2 часов [96].

План проведения эксперимента предусматривал 6 серий исследований (по 3 образца в каждой) и включал нагревание образцов от 100 °С до 350 °С (с шагом в 50 °С). В процессе исследований появилась необходимость расширить количество серий в промежутке температур 200-250 °С. Были добавлены три серии исследований по три образца в каждой при термическом воздействии при температурах 210, 220, 230 °С. В нагретую муфельную печь до определенной температуры для каждой серии, помещали три исследуемых образца, за промежуток времени не превышающий 3 сек. Образцы из одной серии (при определенной температуре) выдерживали в течение 10, 20 и 30 минут соответственно, извлекая по одному образцу из муфельной печи при достижении временного промежутка. Охлаждение образцов проводилось при условиях окружающей среды в помещении естественным путем [96].

Температурные пределы исследования были выбраны исходя из физических

и пожароопасных свойств ПВХ, а время от средних промежутков времени развития и тушения пожара.

Температура начала процесса термической деструкции у ряда полимеров довольно низка. Так, например, термическое разложение поливинилхлорида начинается с его дегидрохлорирования (отщепления хлористого водорода) при 240 °С. Поливинилхлорид к 260 °С теряет за счет разложения 50 % своей массы. В результате термической деструкции полимеров образуется, как правило, две группы продуктов – низкомолекулярные летучие продукты (осколки макромолекул) и твердый угольный остаток [4, 97, 98].

На рисунке 3.33 представлен внешний вид образцов после лабораторных исследований. Так, с помощью визуального осмотра выявлено, что изменение цвета образцов начинает происходить при температурах от 200 °С, и при температурах выше 300 °С происходит образование обугленного остатка. Также видно, что изменение внешнего вида зависит от времени и температуры, с увеличением, термические повреждения в виде потемнения и обугливания увеличиваются [96].

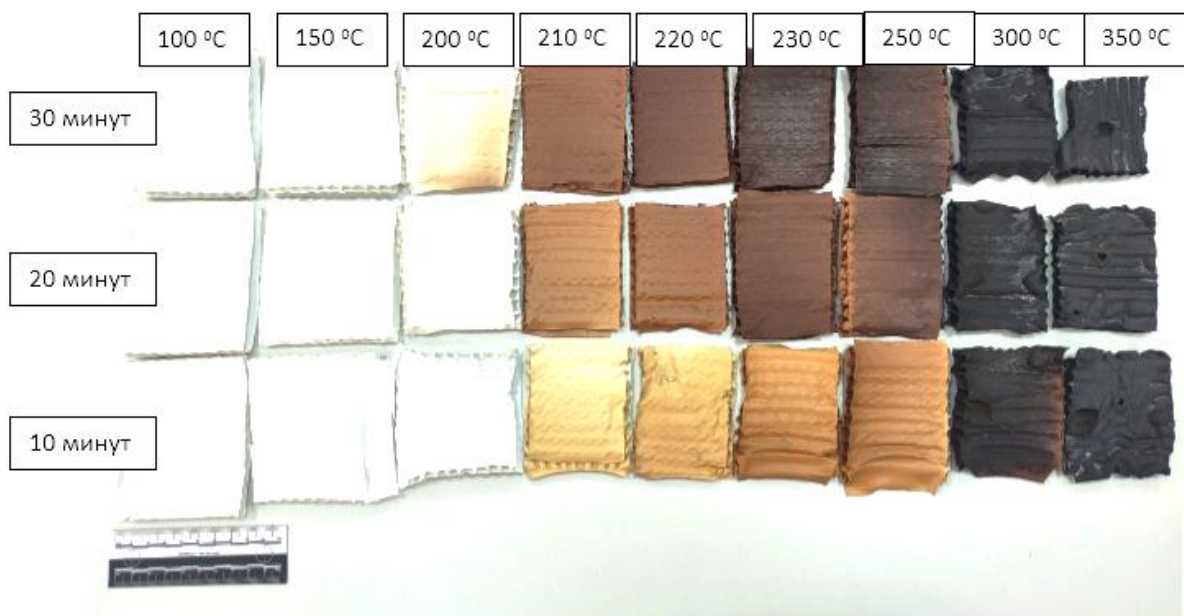


Рисунок 3.33 – Вид образцов ПВХ после термического воздействия [96]

В таблице 3.10 представлены результаты измерений цветовых характеристик

образцов, разработанным прибором контроля термических повреждений материалов после статистической обработки по ГОСТ Р 50779.22 – 2005 [79]. Измерения проводились на поверхности образцов путем измерения в 5 точках на каждом образце. Достоверность результатов измерения цветовых характеристик оценивалось при трехкратном измерении одного образца. Средние значения измерений определяли, как среднее арифметическое из полученных результатов. Для вычисления среднего значения для каждого образца, стандартного отклонения, доверительных интервалов, средней относительной погрешности измерений использовалось программное обеспечение Microsoft Excel. Таким образом, в доверительные интервалы укладываются 95 % результатов всех измерений. Значение средней относительной погрешности каждого измерения не превышает 5 % [96].

На рисунках 3.34-3.38 представлены сводные графики зависимости цветовых характеристик от температуры и времени воздействия на образцы ПВХ [96].

Таблица 3.10 – Средние значения измерений цветовых характеристик образцов ПВХ [96].

№ образца	Температура, °С	Время, минут	R	G	B	C, люкс	Модуль цветового вектора
1	100	10	200	202	195	959	345
2	150	10	196	198	192	950	338
3	200	10	183	185	178	879	315
4	210	10	161	128	89	607	224
5	220	10	140	100	68	491	185
6	230	10	108	66	46	346	135
7	250	10	71	43	31	230	89
8	300	10	24	19	17	97	35
9	350	10	13	15	14	72	24
10	100	20	200	202	195	967	345
11	150	20	196	198	192	950	338
12	200	20	186	186	161	850	308
13	210	20	90	54	38	288	112

Продолжение таблицы 3.10

14	220	20	62	37	28	202	77
15	230	20	42	25	21	127	53
16	250	20	35	23	20	100	46
17	300	20	12	13	13	64	22
18	350	20	11	13	12	61	21
19	100	30	200	201	195	961	344
20	150	30	198	197	189	942	337
21	200	30	148	119	90	572	210
22	210	30	54	33	26	178	68
23	220	30	37	26	22	136	50
24	230	30	22	19	17	91	34
25	250	30	21	18	16	91	32
26	300	30	13	15	14	71	24
27	350	30	11	13	12	61	21

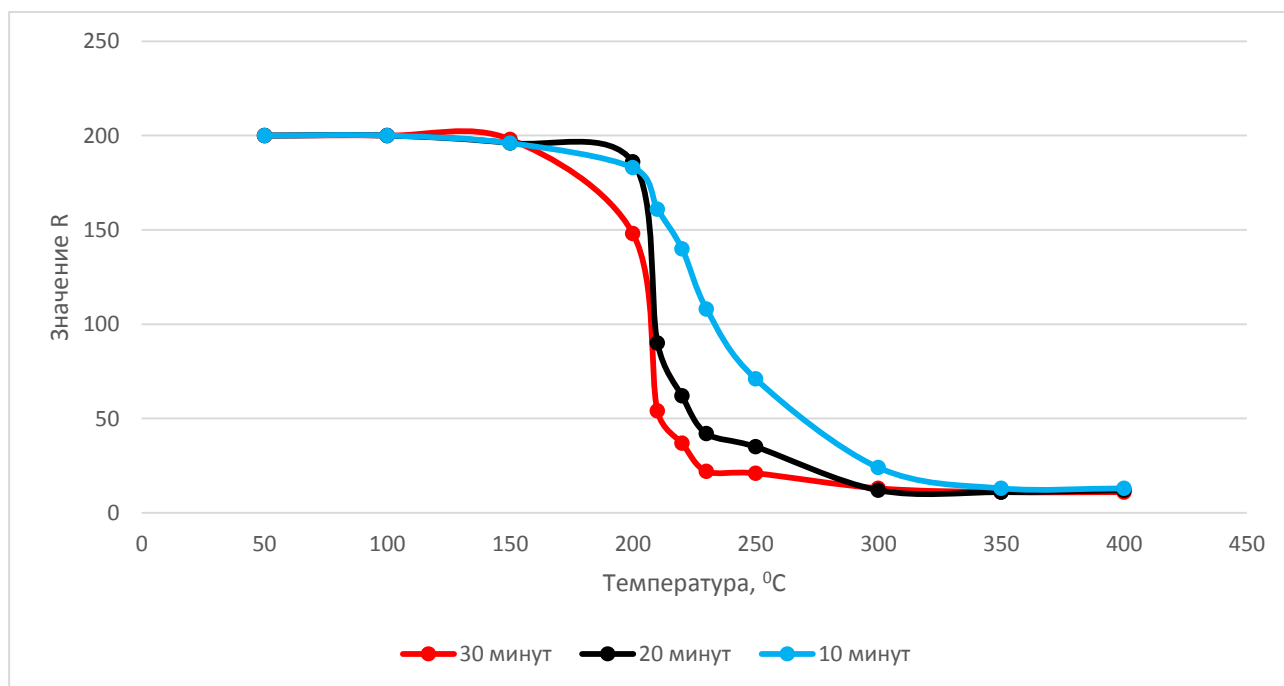


Рисунок 3.34 – Графики зависимости значений R (красный цвет) от температуры и времени воздействия на образцы ПВХ

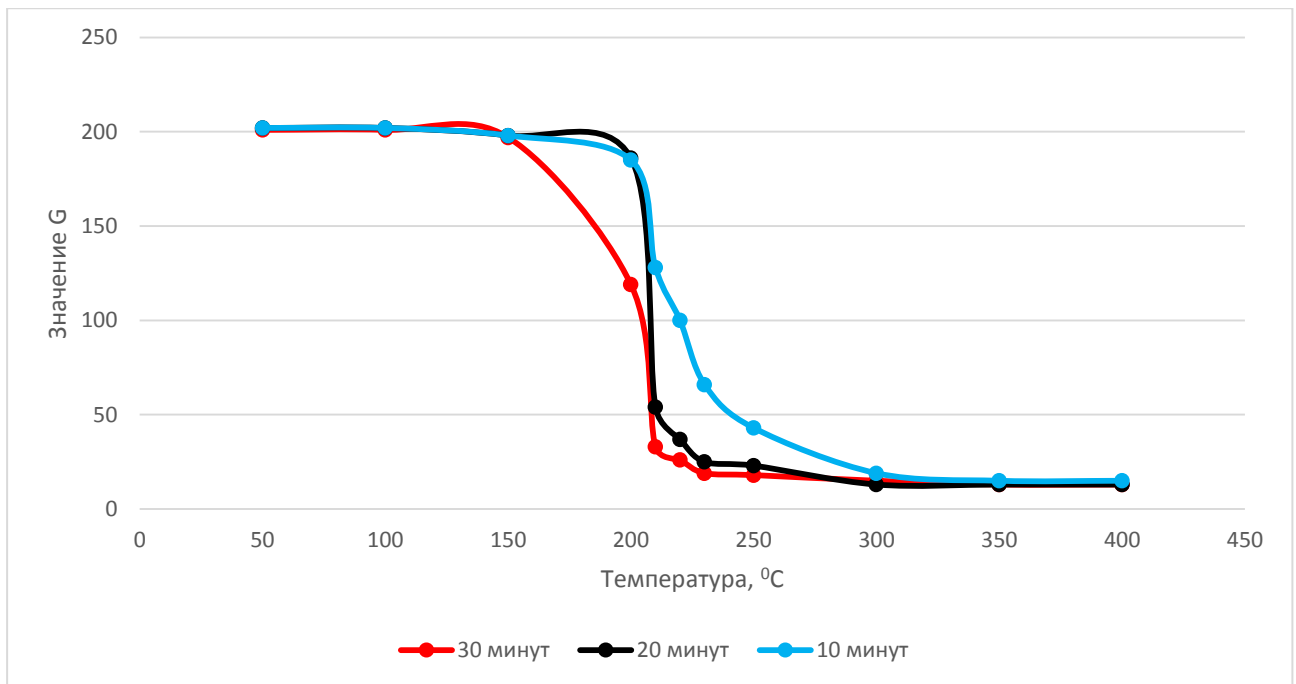


Рисунок 3.35 – Графики зависимости значений G (зелёный цвет) от температуры и времени воздействия на образцы ПВХ

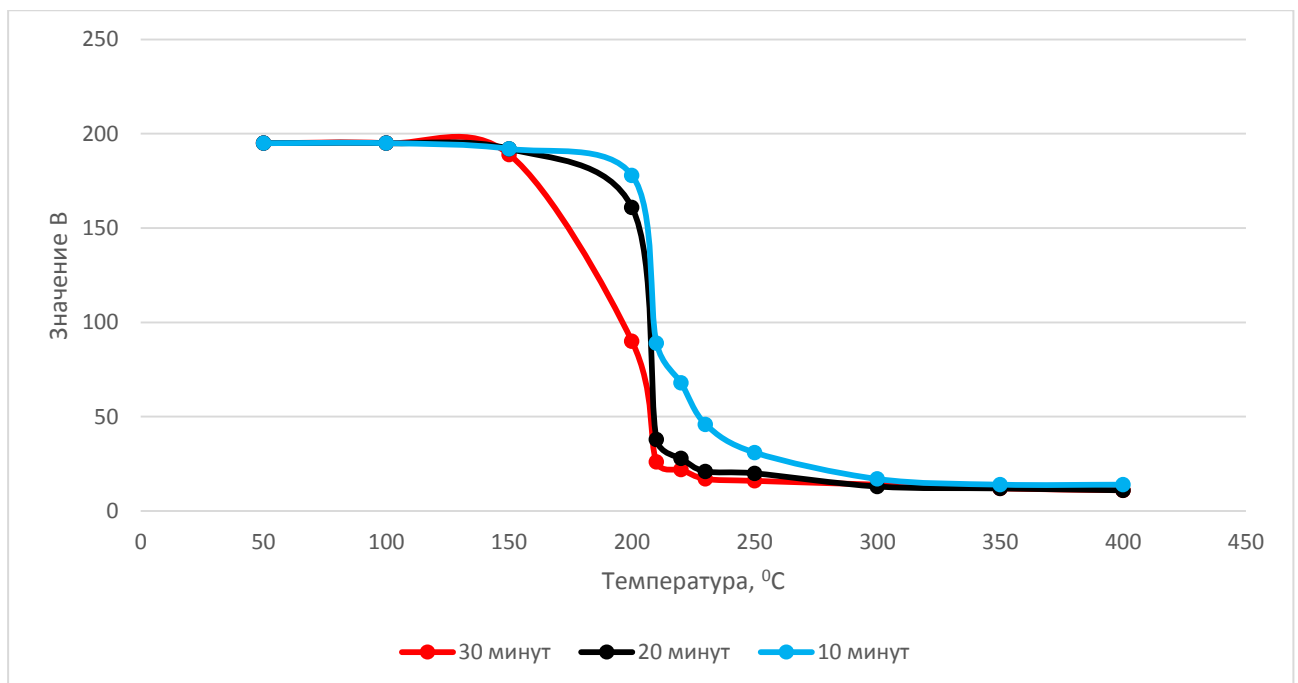


Рисунок 3.36 – Графики зависимости значений B (синий цвет) от температуры и времени воздействия на образцы ПВХ

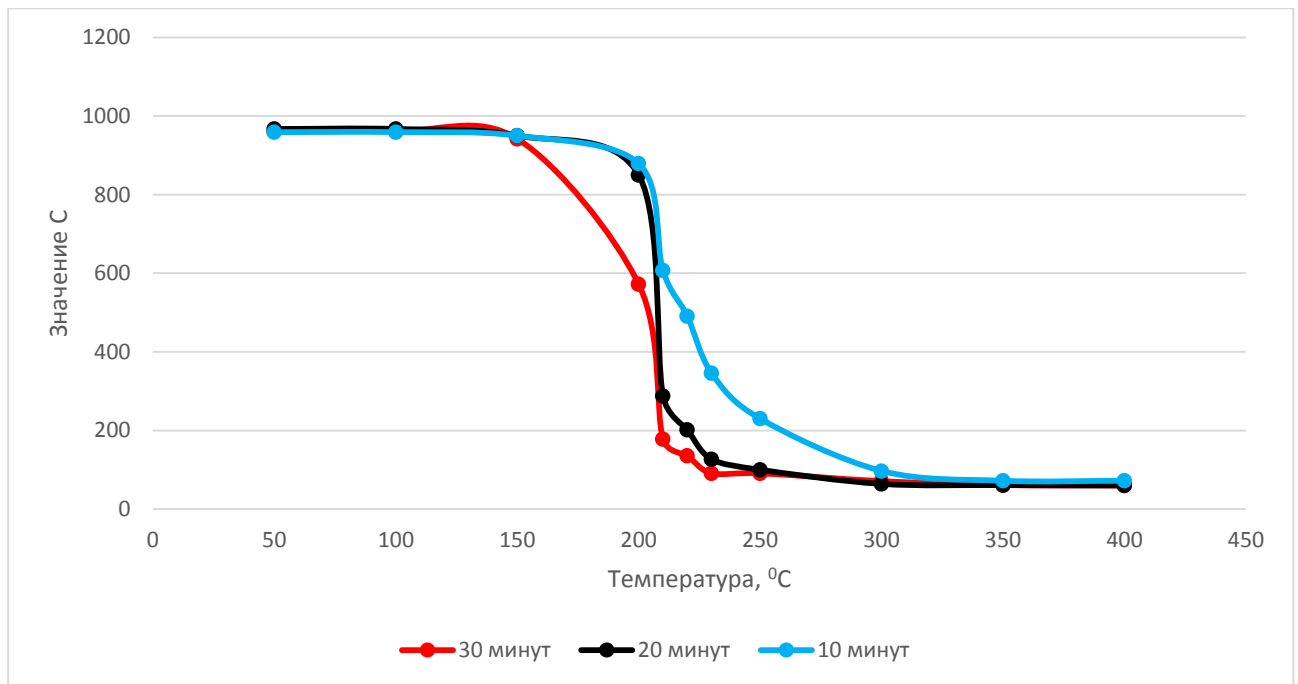


Рисунок 3.37 – Графики зависимости значений C (отраженный свет) от температуры и времени воздействия на образцы ПВХ

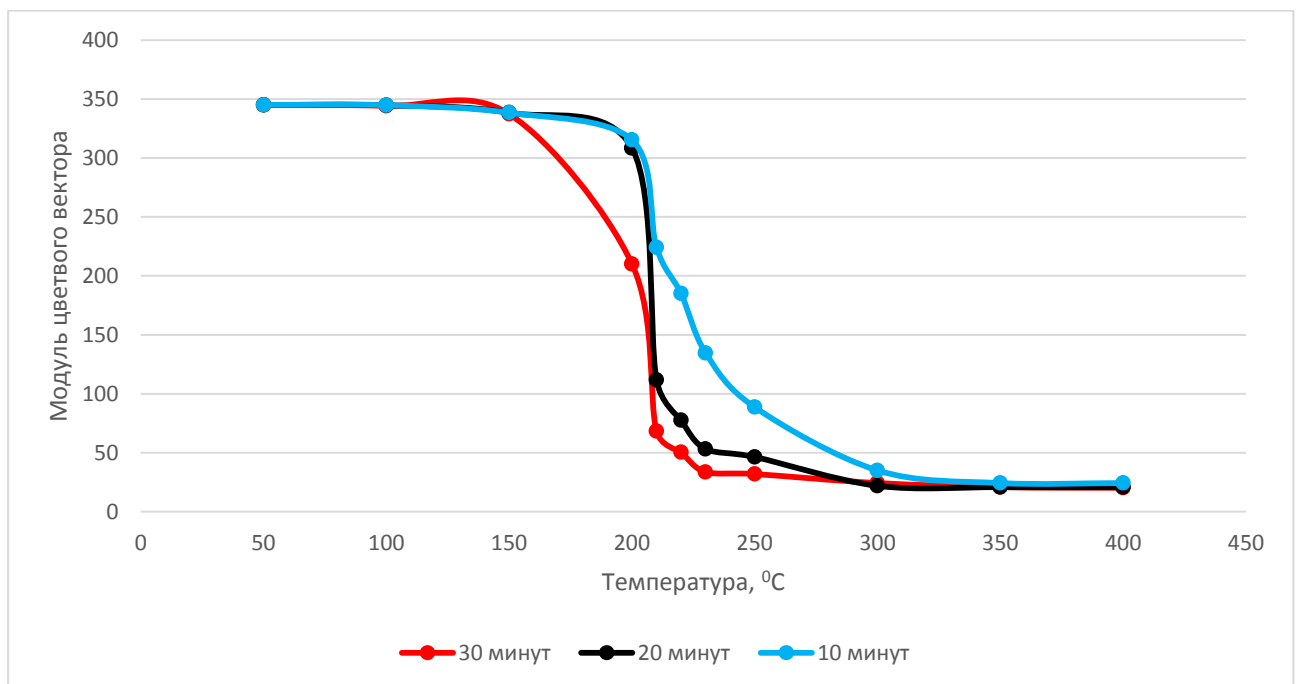


Рисунок 3.38 – Графики зависимости значений модуля цветового вектора от температуры и времени воздействия на образцы ПВХ

Из рисунков 3.34-3.38 видно, что при увеличении температуры значения показателей RGBС, а также значения модуля цветового вектора уменьшаются в пределах от 150 до 250 °C на всех временных промежутках температурного

воздействия. Также графики для времени температурного воздействия 20 и 30 минут практически совпадают, что говорит о более существенном влиянии температуры по сравнению с длительностью воздействия [96].

В таблице 3.11 представлена построенная матрица корреляции для каждой парной комбинации полученных значений температуры и цветовых характеристик ПВХ.

Таблица 3.11 – Корреляционная матрица цветовых характеристик и температуры для образцов ПВХ.

10 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	-0,91902	1				
<i>G</i>	-0,90089	0,971143	1			
<i>B</i>	-0,87513	0,923952	0,986962	1		
<i>Ц</i>	-0,91346	0,982194	0,998283	0,979245	1	
<i>С</i>	-0,90696	0,975598	0,999562	0,985003	0,99943	1
20 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	-0,87049	1				
<i>G</i>	-0,82681	0,989052	1			
<i>B</i>	-0,82634	0,979426	0,997016	1		
<i>Ц</i>	-0,84816	0,994714	0,998688	0,994816	1	
<i>С</i>	-0,83989	0,991877	0,99916	0,996659	0,999563	1
30 минут температурного воздействия						
	<i>T</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
<i>T</i>	1					
<i>R</i>	-0,85122	1				
<i>G</i>	-0,83614	0,992136	1			
<i>B</i>	-0,83426	0,978138	0,995897	1		
<i>Ц</i>	-0,84516	0,994949	0,999559	0,994016	1	
<i>С</i>	-0,84163	0,993369	0,999862	0,995418	0,999878	1

Из таблицы 3.11 видно, что имеется сильная связь между цветовыми характеристиками. За основу были взяты графики значений *R*, так как они имеют сильную отрицательную корреляцию с температурой.

Ввиду нелинейности функции для описания полученных зависимостей использовалась логистическая кривая вида (уравнение 3.1).

Путем ручного подбора функции с помощью Microsoft Excel были подобраны уравнения зависимости значений R от температуры (таблица 3.12). Так как фактические значения F-критерия Фишера больше табличного при уровне значимости 0,05, то полученные уравнения и показатели тесноты связи являются статистически значимыми.

Таблица 3.12 – Уравнения зависимости значений R образцов ПВХ от температуры и времени [96]

№	Интервал температуры и время воздействия	Уравнение зависимости	R ²	F-критерий Фишера
1.	10 минут воздействия 20-450 °C	$R = \frac{187}{1 + e^{0,06(T-230)} + 13}$	0,9956	1583,91
2.	20 минут воздействия 20-450 °C	$R = \frac{189}{1 + e^{0,08(T-220)} + 11}$	0,9303	93,43
3.	30 минут воздействия 20-450 °C	$R = \frac{189}{1 + e^{0,08(T-200)} + 11}$	0,9708	232,73

На рисунках 3.39-3.41 отображены линейные зависимости экспериментальных и подобранных значений для образцов ПВХ [96].

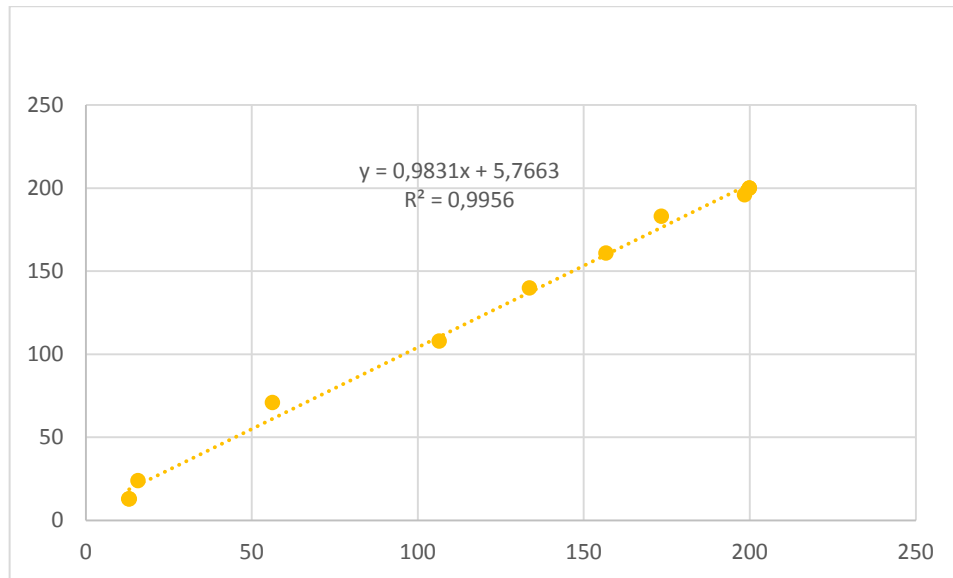


Рисунок 3.39 – Сопоставимость результатов с подобранным уравнением для графика ПВХ 10 минут воздействия

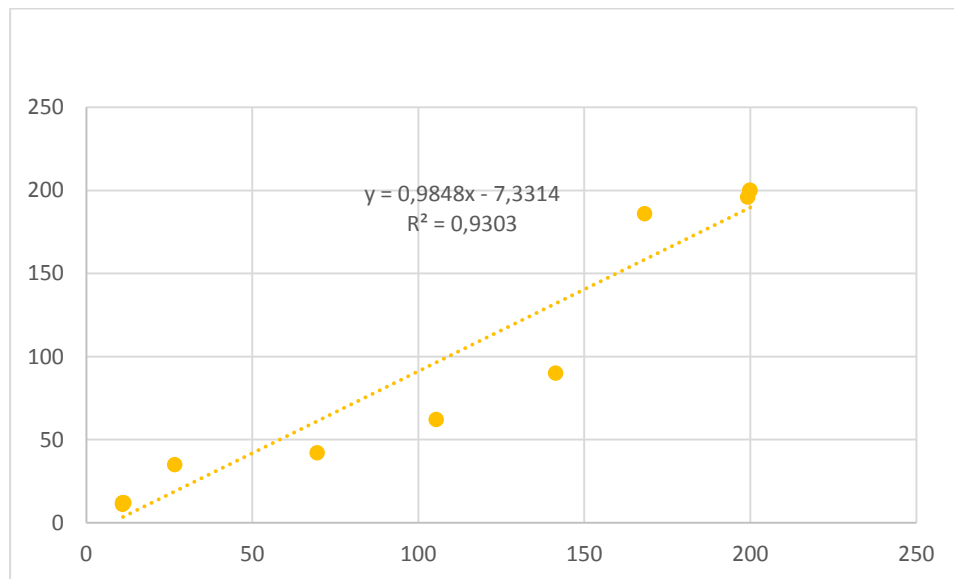


Рисунок 3.40 – Сопоставимость результатов с подобранным уравнением для графика ПВХ 20 минут воздействия

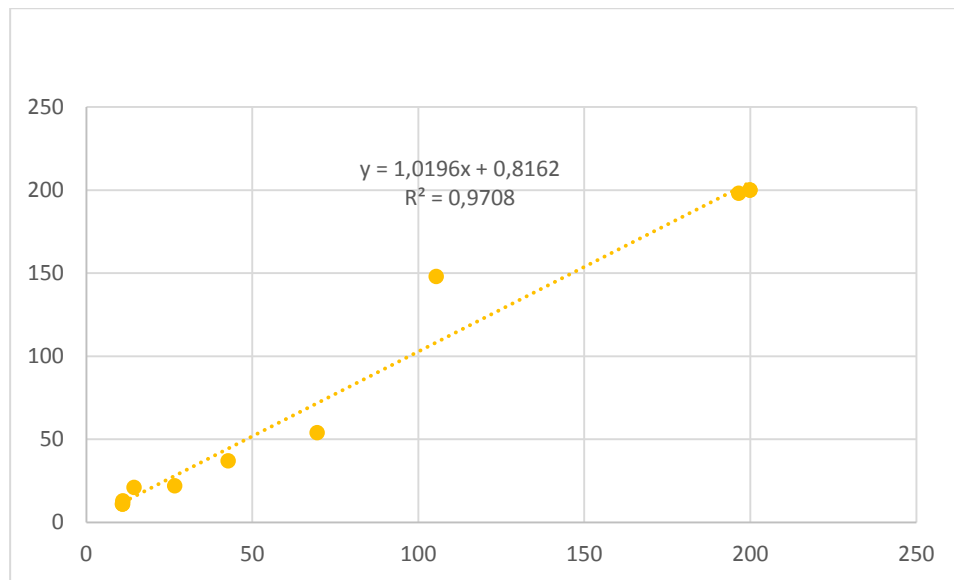


Рисунок 3.41 – Сопоставимость результатов с подобранным уравнением для графика ПВХ 30 минут воздействия

Таким образом, можно построить физическую модель изменений значений R от температуры. Условная модель представлена на рисунке 3.42.

Модель состоит из 3 этапов: 1 этап – изменения значений R отсутствует (без повреждений); 2 этап – уменьшение значений R, что соответствует процессу термической деструкции; 3 этап – изменения значений R отсутствует (максимальные повреждения в виде обугливания).

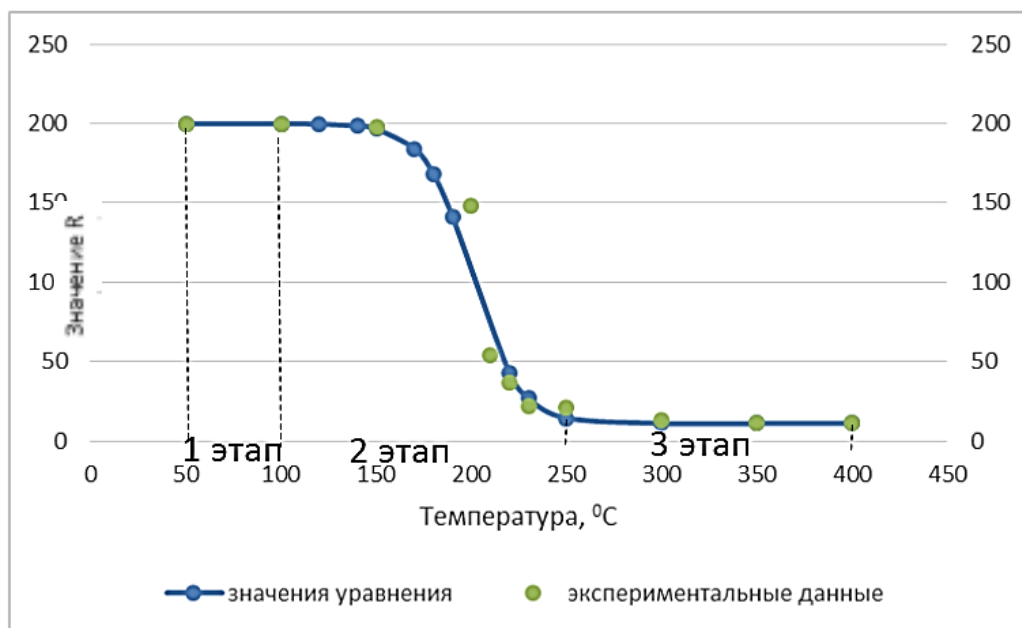


Рисунок 3.42 – Физическая модель изменения значений R от температуры для образцов ПВХ

Полученные данные совпадают с химическими процессами, происходящими с ПВХ при термическом воздействии. Таким образом, имеется возможность решения задачи определения и сравнения степени термического повреждения строительных конструкций из ПВХ разработанным инструментальным методом и прибором.

3.5 Результаты исследования изменений цветовых характеристик копоти

Для исследований было подготовлено 7 образцов из бетонной тротуарной плитки (ГОСТ 17608-2017 [80]) в виде равных осколков с размерами по выступающим частям 25x90x60 мм, отклонение от размеров по длине и ширине не превышает 10 мм.

Для создания копоти была выбрана смесь автомобильного масла и бензина. В металлическом противне в вытяжном шкафу данная смесь поджигалась. Далее образцы крепились на лабораторный штатив поочередно на одной высоте 40 см.

План проведения эксперимента предусматривал нахождение каждого образца бетона (5 образцов) над горящим противнем на лабораторном штативе в промежутке времени от 1 до 5 секунд с шагом в 1 секунду. Образец № 1 воздействию копоти не подвергался. Образец № 7 находился над противнем 5 секунд, после был помещен в муфельную печь LOIP LF 7/13-G1 с предварительным нагревом 600 °С на 20 минут.

Наряду с утолщением слоя копоти, согласно описанным в литературе [4] механизмам этого процесса, на пожаре имеет место выгорание и газификация копоти при воздействии высоких температур. Известно, что копоть на пожаре выгорает при нагреве поверхности конструкций выше 600 - 650 °С [4].

На рисунке 3.43 представлен внешний вид образцов после лабораторных исследований. Так, с помощью визуального осмотра выявлено, что в зависимости от длительности воздействия дыма толщина слоя копоти возрастает, а при температурах выше 600 °С происходит полное выгорание копоти.



Рисунок 3.43 – Вид образцов бетона с копотью после исследований

В таблице 3.13 представлены результаты измерений цветовых характеристик образцов, разработанным прибором контроля термических повреждений после статистической обработки по ГОСТ Р 50779.22 – 2005 [79]. Измерения проводились на поверхности образцов путем измерения в 5 точках на каждом образце. Достоверность результатов измерения цветовых характеристик оценивалось при трехкратном измерении одного образца. Средние значения измерений определяли, как среднее арифметическое из полученных результатов. Для вычисления среднего значения для каждого образца, стандартного отклонения, доверительных интервалов, средней относительной погрешности измерений использовалось программное обеспечение Microsoft Excel. Таким образом, в доверительные интервалы укладываются 95 % результатов всех измерений. Значение средней относительной погрешности каждого измерения не превышает 5 %.

На рисунках 3.44-3.48 представлены графики зависимости цветовых характеристик от времени воздействия на образцы дыма и уравнений. В таблице 3.14 приведены уравнения зависимости цветовых характеристик от времени воздействия продуктов горения, построенные путем аппроксимации методом наименьших квадратов с помощью Microsoft Excel. Для описания процесса образования копоти графики были разбиты на два участка: от 0 до 4 секунд происходит увеличение слоя копоти, более 4 секунд изменений цветовых характеристик не наблюдается.

Таблица 3.13 – Средние значения измерений цветовых характеристик образцов бетона с копотью.

№ образца	Время, секунд	R	G	B	C, люкс	Модуль цветового вектора
1	Без воздействия	111	107	96	511	182
2	1	73	66	57	317	114
3	2	31	28	24	134	48
4	3	18	18	17	87	31
5	4	12	13	13	68	22
6	5	12	13	13	63	22
7	6	11	13	12	60	21
8	После отжига	100	90	76	432	155

Таблица 3.14 – Уравнения зависимости цветовых характеристик от времени воздействия продуктов горения

№	Уравнение зависимости на промежутке времени от 0 до 4 секунд	Коэффициент детерминации
1.	$R = 113,49e^{-0,585t}$	0,9846
2.	$G = 102,82e^{-0,552t}$	0,9746
3.	$B = 88,098e^{-0,521t}$	0,9586
4.	$C = 483,5e^{-0,533t}$	0,9643
5.	$\text{Ц} = 176,24e^{-0,554t}$	0,9759

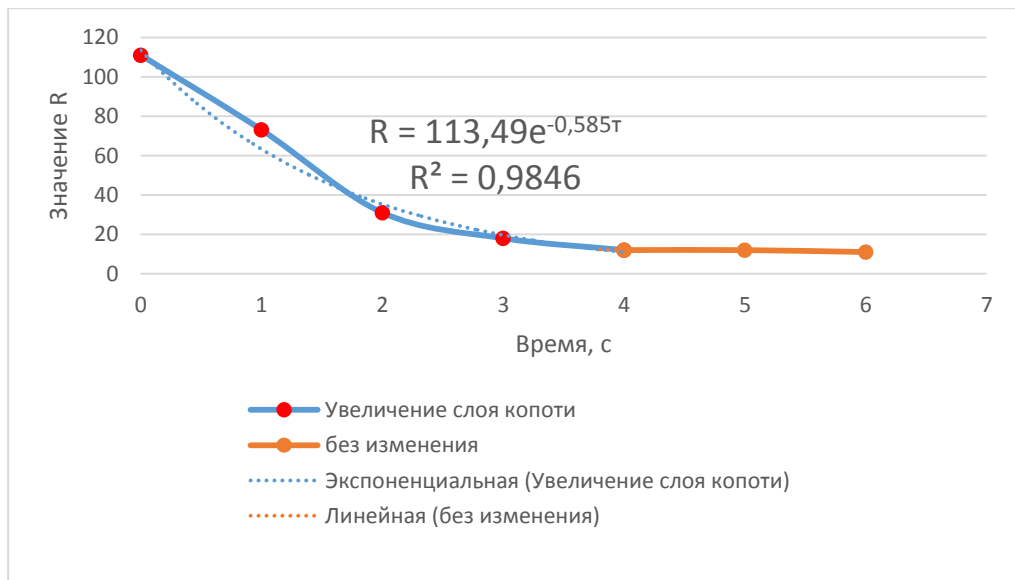


Рисунок 3.44 – График изменения значений R от времени воздействия продуктов горения

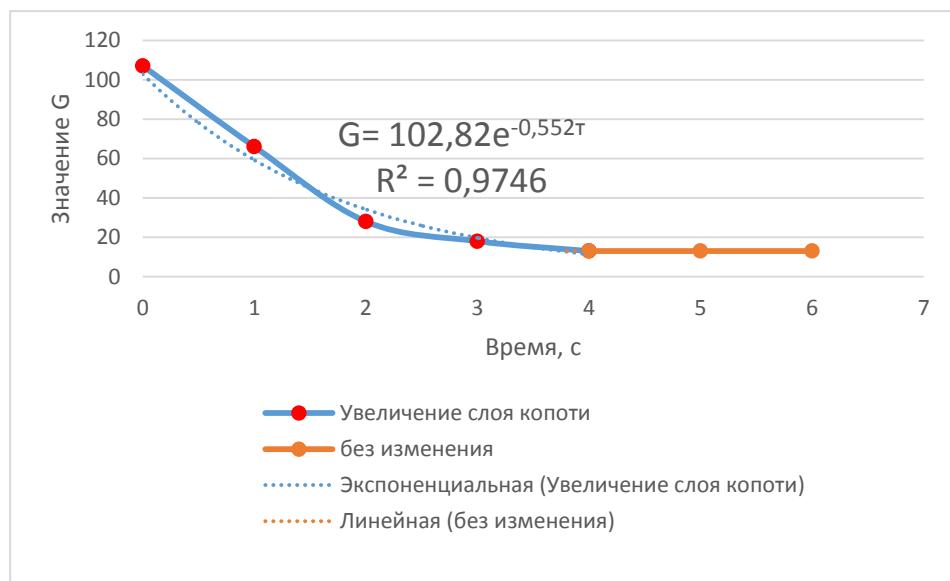


Рисунок 3.45 – График изменения значений G от времени воздействия продуктов горения

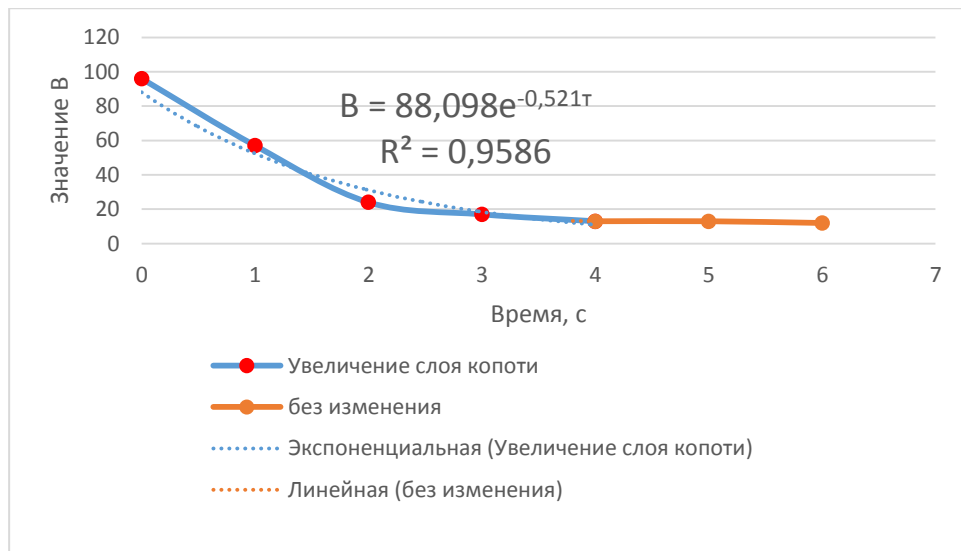


Рисунок 3.46 – График изменения значений B от времени воздействия продуктов горения

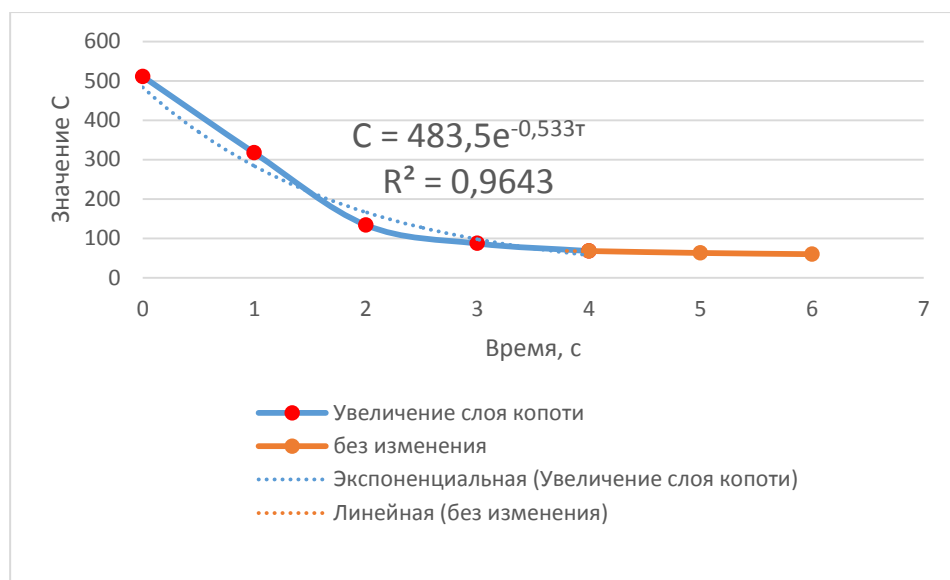


Рисунок 3.47 – График изменения значений C от времени воздействия продуктов горения

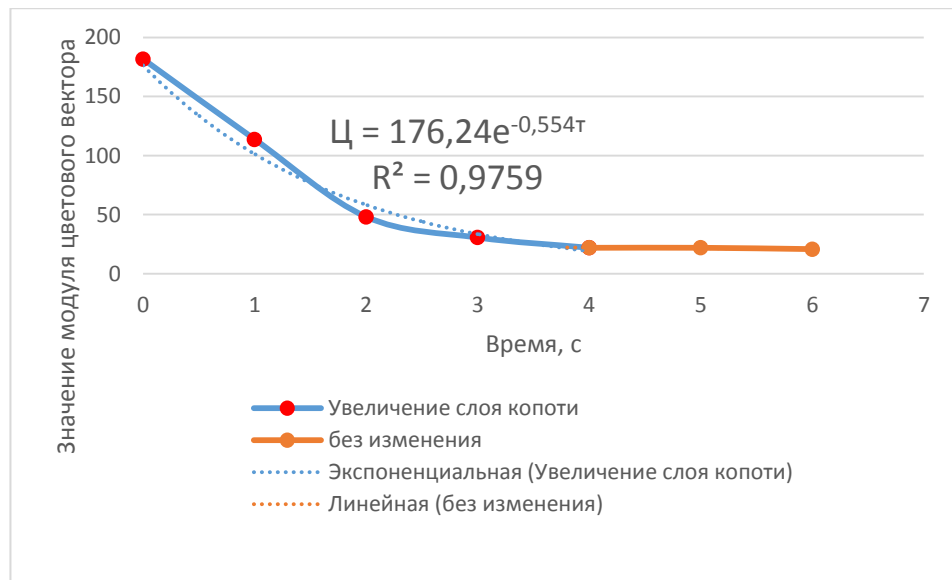


Рисунок 3.48 – График изменения значений модуля цветового вектора от времени воздействия продуктов горения

В таблице 3.15 представлена построенная матрица корреляции для каждой парной комбинации полученных значений времени и цветовых характеристик копоти.

Таблица 3.15 – Корреляционная матрица цветовых характеристик и времени для образцов копоти.

	<i>Время</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Ц</i>	<i>С</i>
Время	1					
R	-0,87445	1				
G	-0,85628	0,998513	1			
B	-0,84772	0,99612	0,999349	1		
Ц	-0,86135	0,999101	0,999914	0,99894	1	
С	-0,85914	0,998548	0,999903	0,99934	0,999892	1

Из таблицы 3.15 видно, что имеется сильная связь между цветовыми характеристиками. В качестве критерия оценки степени термических повреждений был взят график значений R, так как он имеет сильную отрицательную корреляцию с временем закопчения.

При увеличении времени воздействия продуктов горения на образцы бетона

увеличивается толщина слоя копоти. Из графиков 3.44-3.48 и уравнений видно, что при увеличении слоя копоти цветовые характеристики RGBЦ уменьшаются. Таким образом, имеется возможность решения задачи определения и сравнения степени закопчения строительных конструкций разработанным инструментальным методом и прибором.

3.6 Выводы по главе

1. Установлены зависимости изменений цветовых характеристик от температуры и длительности нагрева для бетона, стали, древесины и ПВХ. Также представлены результаты исследования образцов копоти;

2. Изменения цветовых характеристик совпадают с физико-химическими процессами, происходящими в материалах;

3. Предложены критерии контроля степени термических повреждений материалов в виде значений модуля цветового вектора для бетона, древесины, и значений R для стали, ПВХ и копоти.

ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА И ПРИБОРА КОНТРОЛЯ

4.1 Практическое применение предложенного метода и прибора на пожарах

Методика выполнения измерений – установленная логическая последовательность операций и правил при измерении, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений в соответствии с принятым методом измерений [99].

Верификация методики – предоставление объективных свидетельств того, что данная методика соответствует установленным требованиям [100].

Валидация методики – верификация, при которой установленные требования связаны с предполагаемым использованием методики [100].

Согласно п 7.2.2 ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий (Переиздание) от 15 июля 2019 [100] лаборатория должна проводить валидацию нестандартных методов, методов, разработанных лабораторией, и стандартных методов, используемых за пределами их области применения или каким-либо иным образом модифицированных. Валидация должна быть настолько полной, насколько это необходимо, чтобы отвечать потребностям данного применения или области применения [100].

Для валидации метода может применяться один из следующих способов либо их комбинация [100]:

- a) калибровка или оценивание смещения и прецизионности с использованием эталонов или стандартных образцов;
- b) систематическая оценка факторов, влияющих на результат;
- c) проверка устойчивости метода посредством изменения управляемых параметров;
- d) сравнение с результатами, полученными с помощью других

валидированных методов;

е) межлабораторные сличения;

ф) оценивание неопределенности измерений, связанной с результатами измерений, на основании понимания теоретических принципов метода и опыта его реализации при отборе образцов или проведении испытаний.

На основании указанных документов была проведена валидация предлагаемой методики на пожарах с помощью сравнения с результатами, полученных с использованием других утвержденных для экспертных исследований методик.

4.1.1 Исследование конструкций из бетона

Бетонная стена, на которой производились измерения остаточных температурных зон, а также с помощью ультразвукового импульсного метода и предложенного метода цветоизмерения, была расположена с правой стороны от входной двери, в помещении комнаты в квартире многоэтажного дома (рисунок 4.1). На данной стене отсутствуют следы копоти. При визуальном осмотре стена имеет гладкую поверхность бетона, трещины отсутствуют. Измерения производились через 10 минут после ликвидации пожара.



Рисунок 4.1 – Представленная для измерений бетонная стена

Измерения производились в точках указанных на схеме на рисунке 4.2.

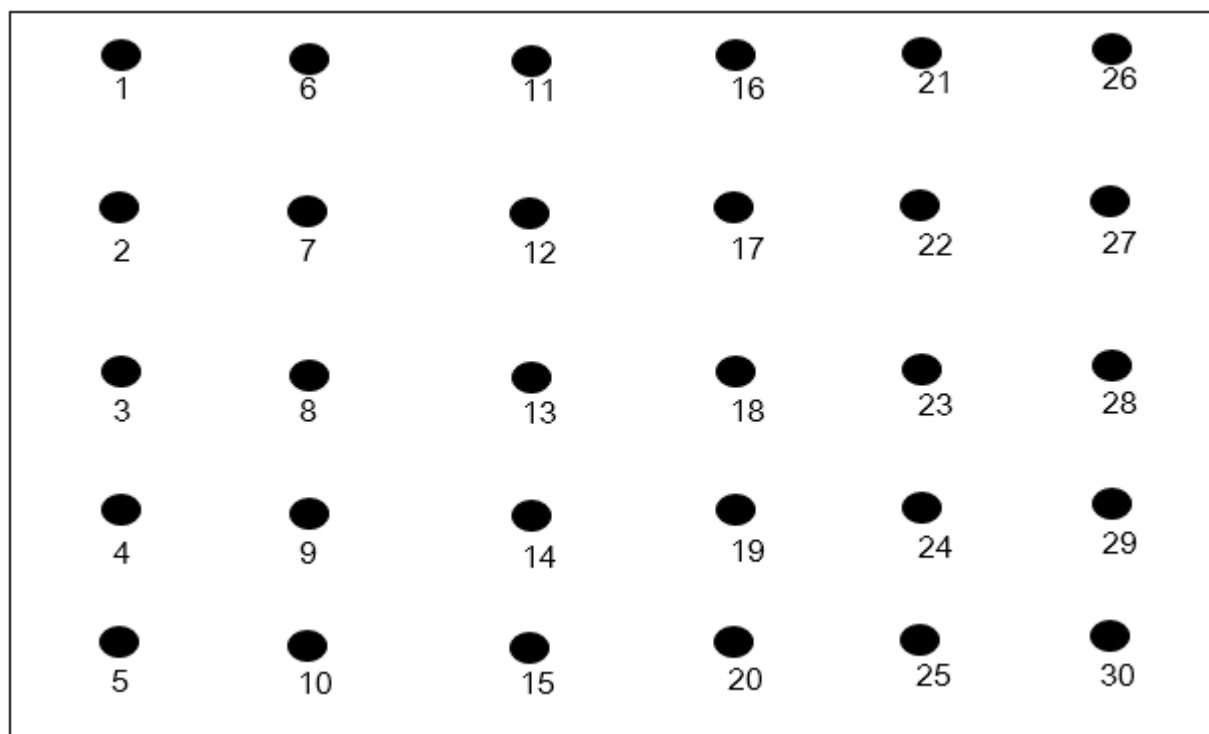


Рисунок 4.2 – Схема измерения на бетонной стене

Как видно из схемы расстояние между точками измерений составляет 50 см в вертикальной и 60 см в горизонтальной плоскости. Измерения проводились на площади 2,5 x 3,6 м.

Для определения степени термических повреждений проводятся инструментальные исследования.

На первом этапе проводятся исследования остаточных температурных зон на стене. Методика рассчитана на исследование остаточных температурных зон на конструкциях элементов зданий и сооружений, обладающих малой теплопроводностью и достаточно высокой теплоёмкостью, к ним относятся кирпичные и бетонные стены и т.д. Прогреваясь в ходе пожара стены, по его окончании постепенно отдают тепло в окружающую среду. В зонах, где прогрев был достаточно длительным, стена успевает прогреться лучше. И остывает она в этих зонах, соответственно, более медленнее, чем в менее прогретых участках [4, 6].

Исследования по данной методике производилось при помощи поверенного прибора – пирометра инфракрасного Кельвин-911. Пирометр является сложным оптико-электронным устройством, предназначенным для измерения температуры объектов бесконтактным способом. В основе работы пирометра лежит принцип преобразования потока инфракрасного излучения объекта, принимаемого чувствительным элементом, в электрический сигнал, пропорциональный спектральной мощности потока излучения, и отраженный на жидкокристаллическом экране [6, 101].

В данном случае исследование производилось на бетонной стене. Измерения значений в каждой точке проводилось 5 раз, для определения среднего результата значения заносились в таблицу 4.1 [25].

Таблица 4.1 – Средние значения остаточных температур на бетонной стене

Номер точки измерения	№ измерения и значения остаточных температур T, °C					Среднее значение остаточных температур, T _{ср} , °C
	1	2	3	4	5	
1	51,8	52,1	51,0	51,9	52,2	52,0
2	62,5	62,4	62,5	62,6	62,5	62,5
3	59,8	60,2	60,0	60,1	59,9	60,0
4	53,5	53,3	53,6	53,5	53,6	53,5
5	50,3	50,6	50,5	50,4	50,7	50,3
6	54,4	54,5	54,6	54,6	54,4	54,5
7	61,4	61,3	61,6	61,7	61,5	61,5
8	61,8	62,0	62,2	62,0	62,0	62,0
9	60,6	60,3	60,4	60,8	60,9	60,6
10	53,3	53,4	53,6	53,5	53,7	53,5
11	50,3	50,6	50,4	50,5	50,7	50,5
12	54,0	54,1	54,2	53,9	53,8	54,0
13	60,6	60,6	60,5	60,4	60,4	60,5
14	62,3	62,6	62,7	62,4	62,5	62,5
15	62,4	62,5	62,5	62,6	62,5	62,5
16	48,0	47,9	48,1	48,0	48,0	48,0

Продолжение таблицы 4.1

17	48,3	48,4	48,5	48,7	48,6	48,5
18	45,9	45,8	46,1	46,2	46,0	46,0
19	47,7	47,6	47,5	47,3	47,4	47,5
20	44,4	44,5	44,5	44,6	44,5	44,5
21	48,5	48,5	48,4	48,6	48,5	48,5
22	46,3	46,6	46,4	46,7	46,5	46,5
23	43,9	43,9	44,1	44,0	44,1	44,0
24	43,4	43,4	43,6	43,6	43,5	43,5
25	40,5	40,4	40,6	40,6	40,4	40,5
26	45,0	45,2	45,0	44,9	44,9	45,0
27	43,9	43,9	44,1	44,0	44,1	44,0
28	43,2	42,9	42,9	43,0	43,0	43,0
29	42,4	42,5	42,5	42,6	42,5	42,5
30	40,5	40,5	40,5	40,6	40,4	40,5

Результаты измерения остаточных температур наносятся на схему. В очаговой зоне исследуемые конструкции успевают прогреться лучше, чем в других, что и наблюдается после пожара по остаточным температурам. Наглядно эти зоны можно увидеть на построенной карте зон термических повреждений при помощи компьютерной программы Microsoft Office Excel.

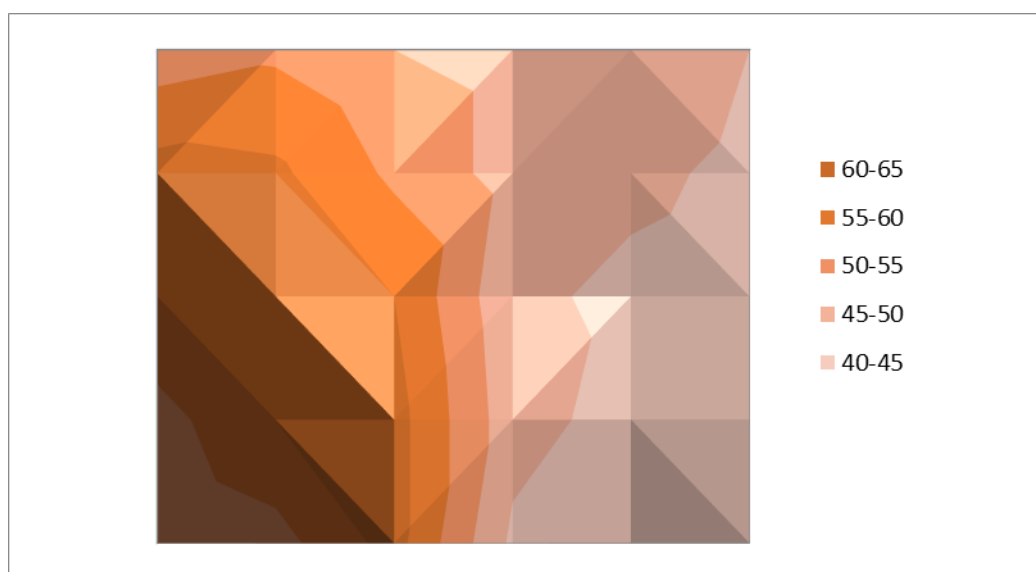


Рисунок 4.3 – Карта распределения остаточных температур на бетонной стене

Наибольшая величина остаточных температур, согласно методике, соответствует наибольшей степени термического повреждения, следовательно, места проведения измерений под №№ 2, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15 подверглись наибольшей степени термического повреждения, что наглядно видно на рисунке 4.3. Из рисунка 4.3 видно, что зона с наибольшими значениями распределения остаточных температур в данном случае одна.

Для изучения состояния бетона, подвергавшегося нагреву, и выявления зон термических повреждений используется ультразвуковой импульсный метод. Метод основан на определении скорости распространения в бетоне ультразвуковых волн. Наиболее информативными являются поверхностные волны [4, 25].

Зона наибольших термических повреждений соответствует расположению конструкций со значениями наибольшего времени прохождения импульса (по мере разрушения бетона при нагревании скорость ультразвуковых волн в нём снижается).

Исследования по данной методике производились при помощи прибора УД2Н-ПМ, предварительный усилитель входящего сигнала на 60 кГц и электроакустический преобразователь на 60 кГц (два ультразвуковых датчика Константа-2007-№ 040 П 111-0.06-П26 и Константа-2007-№ 043 П 111-0.06-П26 с конусообразными наконечниками) [101].

В основе работы ультразвукового дефектоскопа лежит принцип определения времени прохождения ультразвукового импульса между датчиками (преобразователями), и одновременно с этим ультразвуковая волна отражается на жидкокристаллическом экране. Подробно работа с ультразвуковым дефектоскопом описана в руководстве по эксплуатации [101].

Для выполнения измерения выбраны следующие параметры работы: усиление входного сигнала - 60,0 dB, задержка входного сигнала на экран - 0 мкс, компенсированная отсечка сигнала - 0 %; а-порог - амплитуда строп импульса, который составляет 20% от величины экрана и находится в отрицательной области.

Измерения проводили по фронту первой отрицательной полуволны в месте

пересечения ее со стробом. Описание параметров прибора отражено в руководстве по эксплуатации прибора УД2Н-ПМ [101, 25].

На очищенную и подготовленную согласно методике поверхность устанавливался «шаблон» с преобразователями и измерялось время прохождения ультразвуковой волны между датчиками. После чего измерения значений в указанных точках проводилось 10 раз. Первые пять измерений проводились в горизонтальной (г.п.), а вторые в вертикальной (в.п.) плоскостях. Затем рассчитывалось среднее значение времени прохождения ультразвуковой волны в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Из полученных двух средних значений времени прохождения ультразвуковой волны в каждой точке выбиралось наибольшее среднее значение и значения заносились в таблицу 4.2.

При помощи компьютерной программы Microsoft Office Excel по результатам измерений была построена карта зон термических повреждений.

Таблица 4.2 – Средние значения времени прохождения ультразвуковой волны

№ точки на стене		№ измерения и значения T, мкс					Среднее значение, T _{ср} , мкс	Наибольшее из средних значений, T _{ср.н} , мкс
		1	2	3	4	5		
1	Г.П.	144,2	153,2	149,3	147,1	149,7	148,7	148,7
	В.П.	147,3	148,9	145,9	149,6	150,2	148,4	
2	Г.П.	153,4	158,7	156,6	154,2	157,4	156,0	156,0
	В.П.	144,4	148,1	150,4	146,0	143,8	146,5	
3	Г.П.	151,8	154,0	161,5	157,5	160,4	157,1	157,1
	В.П.	152,8	158,2	160,4	153,2	154,5	155,8	
4	Г.П.	153,4	152,7	145,1	147,6	145,8	148,9	148,9
	В.П.	150,8	149,0	145,9	144,3	145,1	147,0	
5	Г.П.	142,9	155,6	147,0	148,5	151,5	149,1	149,1
	В.П.	150,1	147,9	149,8	144,3	144,2	147,2	
6	Г.П.	144,6	149,2	145,9	149,4	146,7	147,3	147,3
	В.П.	133,6	138,2	134,3	133,7	136,6	135,3	

Продолжение таблицы 4.2

7	Г.П.	152,4	158,5	154,6	151,3	157,7	154,9	154,9
	В.П.	156,8	151,0	152,2	157,2	153,0	154,0	
8	Г.П.	156,7	159,1	158,5	155,2	161,7	158,2	158,2
	В.П.	153,5	157,7	151,0	154,1	149,0	153,1	
9	Г.П.	153,8	152,4	157,4	155,8	160,3	155,9	155,9
	В.П.	129,9	135,5	130,8	125,3	131,4	130,6	
10	Г.П.	143,4	147,2	153,0	148,4	151,7	148,7	148,7
	В.П.	141,8	151,1	144,1	151,0	145,5	146,7	
11	Г.П.	138,1	144,8	129,6	130,2	137,4	136,0	136,0
	В.П.	90,8	97,1	85,8	94,7	97,4	93,1	
12	Г.П.	127,6	134,4	128,9	128,1	135,1	130,8	130,8
	В.П.	122,9	130,6	127,2	130,7	121,6	126,6	
13	Г.П.	145,4	148,8	154,5	151,7	150,9	150,3	150,3
	В.П.	154,5	152,0	147,0	154,2	143,3	150,2	
14	Г.П.	153,8	152,4	157,9	156,8	159,7	156,1	156,1
	В.П.	154,8	149,5	156,3	148,4	156,5	153,1	
15	Г.П.	158,3	149,8	152,9	153,6	156,6	154,2	154,2
	В.П.	149,5	154,8	155,7	152,2	149,6	152,3	
16	Г.П.	128,2	124,0	127,6	131,4	129,7	128,2	128,2
	В.П.	126,5	130,8	124,3	120,2	118,4	124,0	
17	Г.П.	116,8	128,3	127,8	120,3	129,8	124,6	124,6
	В.П.	111,7	118,8	110,5	112,3	122,4	115,2	
18	Г.П.	125,6	124,0	120,3	114,8	118,9	120,7	120,7
	В.П.	120,0	123,9	125,1	117,4	115,3	120,4	
19	Г.П.	123,9	117,5	121,2	129,6	113,7	121,2	121,2
	В.П.	122,5	114,9	115,2	109,8	113,7	115,2	
20	Г.П.	119,4	117,5	122,6	123,1	119,8	120,5	120,5
	В.П.	113,9	112,4	119,3	123,5	131,3	120,1	
21	Г.П.	128,4	120,7	126,4	123,4	120,1	123,8	123,8
	В.П.	114,8	116,4	120,3	128,5	121,6	120,3	
22	Г.П.	112,6	121,9	125,7	124,7	119,0	120,8	120,8
	В.П.	121,9	119,9	117,8	119,9	120,5	120,0	

Продолжение таблицы 4.2

23	Г.П.	116,8	114,3	109,5	111,9	114,5	113,4	113,4
	В.П.	106,5	109,6	111,5	113,7	112,4	110,7	
24	Г.П.	107,7	100,6	103,0	102,6	100,3	102,9	102,9
	В.П.	106,6	98,2	102,3	95,3	101,2	100,7	
25	Г.П.	98,8	85,8	96,9	101,6	97,6	96,1	96,1
	В.П.	82,4	83,4	87,6	90,3	86,8	86,1	
26	Г.П.	120,7	116,3	122,1	124,4	121,6	121,0	121,0
	В.П.	113,6	120,8	114,4	116,3	118,3	116,7	
27	Г.П.	126,6	116,2	123,4	118,6	114,2	119,8	119,8
	В.П.	100,5	103,6	106,7	104,9	105,3	104,2	
28	Г.П.	108,2	111,9	110,5	112,8	109,8	110,6	110,6
	В.П.	107,4	102,6	106,9	110,6	101,2	105,7	
29	Г.П.	104,5	103,6	93,6	98,3	93,6	98,7	98,7
	В.П.	95,1	97,4	94,6	97,2	98,2	96,5	
30	Г.П.	89,1	91,7	89,1	95,7	88,0	90,7	90,7
	В.П.	85,1	88,8	91,5	93,9	91,2	90,1	

Примечание: г.п. – горизонтальная плоскость;

в.п. – вертикальная плоскость.

Далее была произведена статистическая обработка результатов измерений значений времени прохождения ультразвуковой волны согласно ГОСТ Р 50779.22-2005 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего» (таблица 4.3) [79]. Доверительный интервал рассчитывался с доверительной вероятностью 0,99.

Таблица 4.3 – Результаты статистической обработки данных времени прохождения ультразвуковой волны

№	Значение среднего времени, мкс	Стандартное отклонение, мкс	Коэффициент вариации, %	Граница доверительного интервала для среднего значения, мкс	
				Нижняя	Верхняя
1	148,7	3,3	2,2	141,9	155,5
2	156,0	2,2	1,4	151,5	160,6
3	157,1	4,1	2,6	148,6	165,5
4	148,9	3,9	2,6	140,9	156,9
5	149,1	4,8	3,2	139,3	158,9
6	147,2	2,1	1,4	142,8	151,5
7	154,9	3,2	2,1	148,3	161,5
8	158,2	2,5	1,6	153,1	163,4
9	155,9	3,1	2,0	149,6	162,2
10	148,7	3,8	2,6	140,9	156,6
11	136,0	6,3	4,6	123,1	149,0
12	130,8	3,6	2,8	123,4	138,2
13	150,3	3,4	2,3	143,2	157,3
14	156,1	3,0	1,9	150,0	162,3
15	154,2	3,3	2,2	147,4	161,1
16	128,2	2,7	2,1	122,5	133,8
17	124,6	5,7	4,6	112,8	136,4
18	120,7	4,3	3,5	111,9	129,5
19	121,2	6,1	5,0	108,6	133,7
20	120,5	2,3	1,9	115,7	125,2
21	123,8	3,6	2,9	116,4	131,2
22	120,8	5,3	4,4	109,9	131,6
23	113,4	2,8	2,5	107,6	119,1
24	102,9	3,0	2,9	96,8	108,9
25	96,1	6,0	6,3	83,7	108,5
26	121,0	3,0	2,4	114,9	127,1
27	119,8	5,1	4,3	109,3	130,3
28	110,6	1,8	1,6	106,9	114,3
29	98,7	5,3	5,3	87,9	109,5
30	90,7	3,1	3,4	84,3	97,1

Из представленной выше таблицы 4.2 видно, что значение более 150 мкс времени прохождения ультразвуковой волны соответствует месту проведения измерений под №№ 2, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15.



Рисунок 4.4 – Карта зон термических поражений бетонной конструкции ультразвуковым методом

Представленная карта зон термического поражения изображённая на рисунке 4.4 наглядно подтверждает, что зона с наибольшим значением времени прохождения ультразвукового импульса в данном случае и совпадает с зоной, выявленной с помощью остаточных температурных полей. Эти показания прибора указывают на то, что данное место больше остальных подверглось термическому повреждению.

Далее с помощью предложенного метода и прибора контроля степени термических повреждений путем измерения цветовых характеристик были проведены исследования бетонной стены.

Измерения значений модуля цветового вектора в каждой точке проводилось 12 раз. Максимальное и минимальное значения измерений не учитывались для обработки результатов, в связи с исключением случайной ошибки. Для определения среднего результата данные 10 измерений заносились в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Средние значения модуля цветового вектора на бетонной стене

Номер точки измерения	№ измерения и значения модуля цветового вектора										Ц ср
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	159	164	159	159	161	160	161	160	160	160	160
2	216	221	220	220	220	219	220	220	220	220	220
3	216	219	214	214	220	217	217	216	217	217	217

Продолжение таблицы 4.4

4	156	156	157	157	156	156	156	157	156	156	156
5	152	152	154	154	150	152	152	153	152	152	152
6	159	161	160	160	162	160	161	161	161	161	161
7	217	220	222	222	223	221	222	222	222	222	221
8	225	224	220	220	225	223	222	222	222	223	223
9	232	237	232	232	230	233	233	232	232	232	232
10	154	157	157	157	158	157	157	157	157	157	157
11	160	159	164	161	160	161	161	161	161	161	161
12	181	182	182	182	181	182	182	182	182	182	182
13	226	226	229	228	227	227	227	228	227	227	227
14	228	226	223	220	223	224	223	223	223	223	224
15	225	221	222	220	225	223	222	222	222	223	223
16	182	185	182	182	182	183	183	182	182	182	183
17	182	181	182	182	181	182	182	182	182	181	182
18	186	186	183	183	185	185	184	184	184	184	184
19	184	183	182	182	184	183	183	183	183	183	183
20	182	183	182	182	181	182	182	182	182	182	182
21	188	187	187	187	185	187	187	186	186	186	187
22	191	187	192	192	190	190	190	191	191	190	190
23	190	190	193	193	190	191	191	192	191	191	191
24	186	187	187	187	186	187	187	187	187	187	187
25	191	192	191	191	191	191	191	191	191	191	191
26	180	180	181	180	180	180	180	181	180	180	180
27	186	190	188	188	191	189	189	189	189	189	189
28	184	187	187	187	186	186	187	187	186	186	186
29	185	188	188	188	187	187	188	188	187	187	187
30	181	183	185	185	182	183	184	184	184	183	183

Далее была произведена статистическая обработка результатов измерений значений модуля цветового вектора согласно ГОСТ Р 50779.22-2005 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего» (таблица 4.5) [79]. Доверительный

интервал рассчитывался с доверительной вероятностью 0,99.

Таблица 4.5 – Результаты статистической обработки значений модуля цветового вектора

№	Среднее значение модуля цветового вектора	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Граница доверительного интервала для среднего значения	
				Нижняя	Верхняя
1	160	1,47	0,92	159	161
2	220	1,33	0,61	218	221
3	217	1,88	0,87	215	218
4	156	0,37	0,24	156	157
5	152	1,13	0,74	151	153
6	161	0,78	0,49	160	161
7	221	1,67	0,76	219	222
8	223	1,75	0,79	221	224
9	232	1,78	0,77	231	234
10	157	1,05	0,67	156	158
11	161	1,29	0,80	160	162
12	182	0,37	0,20	181	182
13	227	0,89	0,39	226	228
14	224	2,14	0,96	221	225
15	223	1,55	0,70	221	224
16	183	0,91	0,50	182	183
17	182	0,37	0,20	181	182
18	184	1,04	0,56	183	185
19	183	0,67	0,37	182	183
20	182	0,49	0,27	181	182
21	187	0,76	0,41	186	187
22	190	1,40	0,73	189	191
23	191	1,11	0,58	190	192
24	187	0,37	0,20	186	187
25	191	0,30	0,16	191	191
26	180	0,39	0,22	180	181
27	189	1,33	0,71	187	190
28	186	0,89	0,48	185	187
29	187	0,89	0,47	186	188
30	183	1,21	0,66	182	184

Результаты измерения модуля цветового вектора наносятся на схему, а также выделяется зона (зоны) с экстремально высокими значениями данного параметра. Наглядно эти зоны можно увидеть на построенной карте зон термических

повреждений при помощи компьютерной программы Microsoft Office Excel.

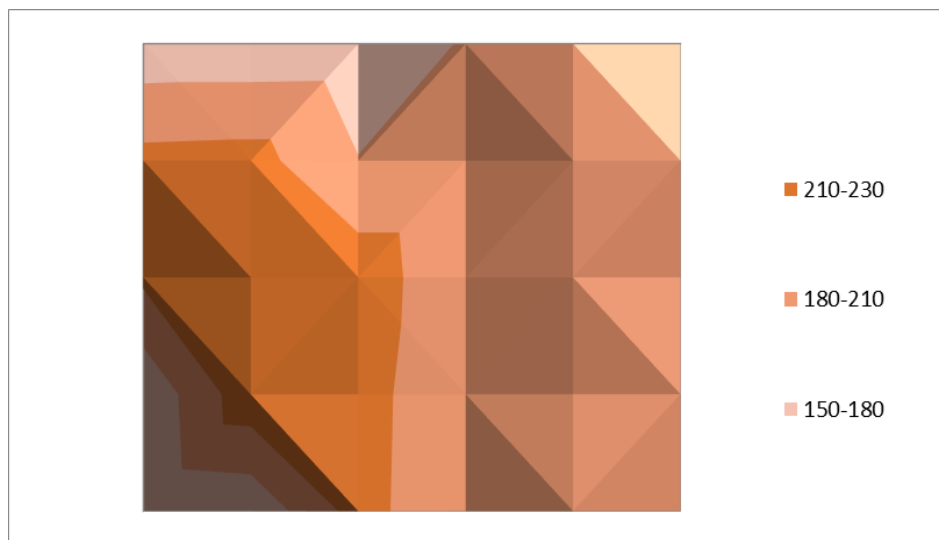


Рисунок 4.5 – Карта распределения значений модуля цветового вектора на бетонной стене

Из рисунка 4.5 видно, что имеются 3 различных зоны, наибольшим термическим повреждениям в данном случае соответствует зона со значениями 210-230. Данная зона в точках № 2, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15 совпадает с зонами, выявленными другими методами, основанными на других физических принципах работы. Таким образом, можно заключить, что данный метод является рабочим и достоверным.

4.1.2 Исследование конструкций из металла

Для исследований конструкций и объектов из металла была выбрана труба, проходящая по стене комнаты в жилом доме. Труба для воды проходит по северо-восточной стене комнаты, на высоте 2 м от уровня пола. Диаметр трубы 50 мм, толщина стенок 2 мм. На рисунке 4.6 представлены точки, где производились измерения свойств поверхности данной трубы с указанием надписей от «1» до «8».



Рисунок 4.6 – Вид трубы и точек измерения в комнате жилого дома

Далее была составлена схема измерения степени термических повреждений металлической трубы на рисунке 4.7.

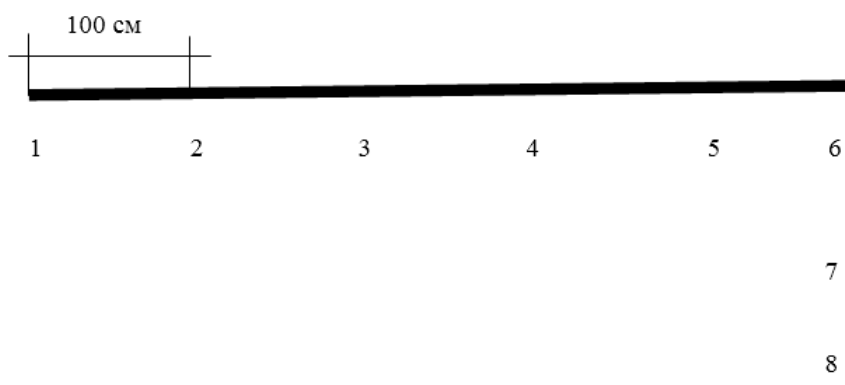


Рисунок 4.7 – Схема измерения металлической трубы

Расстояние между точками измерений составляет 100 см. Для определения степени термического повреждения металлической трубы, необходимо проведение инструментальных исследований. Для пожарно-технических исследований в

настоящее время используются различные вихретоковые приборы [4].

Наиболее распространённым является прибор МВП-2М. Принцип действия вихретокового прибора основан на измерении величины ЭДС, возникающей в измерительной обмотке преобразователя, при установке его на изделие [103].

Для вихретокового прибора МВП-2М величина ЭДС (U , мкВ) обратно пропорциональна содержанию ферритной фазы в окалине на металлических изделиях, а следовательно, чем меньше величина ЭДС, тем сильнее было термическое воздействие на конструкцию (изделие) [25, 6].

Для исследования по данной методике был использован поверенный прибор МВП-2М с измерительным преобразователем М 150. Подробно работа с вихретоковым прибором описана в руководстве по эксплуатации [103].

Сравнительная оценка степени термического повреждения металлической трубы определяется по величине ЭДС (U , мкВ). Результаты измерения наносятся на схему, после чего выявляются зоны со средними значениями измеряемой величины ЭДС, а также выделяются зона (зоны) с экстремально низкими значениями данного параметра. Наглядно эти зоны можно увидеть на построенной карте зон термических поражений при помощи компьютерной программы Microsoft Office Excel на рисунке 4.8.

Согласно методике [25] количество измерений в каждой точке исследования повторяются 12 раз. Минимальное и максимальное значение отбрасывается для устранения случайной погрешности. Полученные данные представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Результаты исследования вихретоковым методом металлической трубы

№	№ измерения и значения U , мкВ												Усп, мкВ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	4978	4979	4978	4977	4980	4975	4974	4971	4978	4973	4982	4977	4977
2	4946	4940	4950	4943	4955	4944	4952	4949	4956	4947	4951	4942	4948
3	4891	4896	4898	4895	4893	4892	4892	4891	4891	4894	4895	4896	4894
4	4942	4948	4949	4941	4957	4952	4947	4942	4946	4946	4956	4941	4947

Продолжение таблицы 4.6

5	4987	4985	4973	4973	4977	4978	4985	4980	4982	4978	4978	4972	4979
6	5002	5003	5008	5003	5004	5002	5009	5007	5010	5003	5003	5008	5005
7	5077	5070	5076	5071	5072	5072	5074	5074	5077	5078	5075	5070	5074
8	5195	5186	5187	5182	5198	5190	5197	5195	5190	5185	5198	5186	5191

На основании проведенных измерений, представленных в таблице 4.6, было установлено, что наибольшее значение $U_{ср}$, мкВ на металлической трубе зафиксировано в точке измерения № 8, а наименьшее в точке измерения № 3.

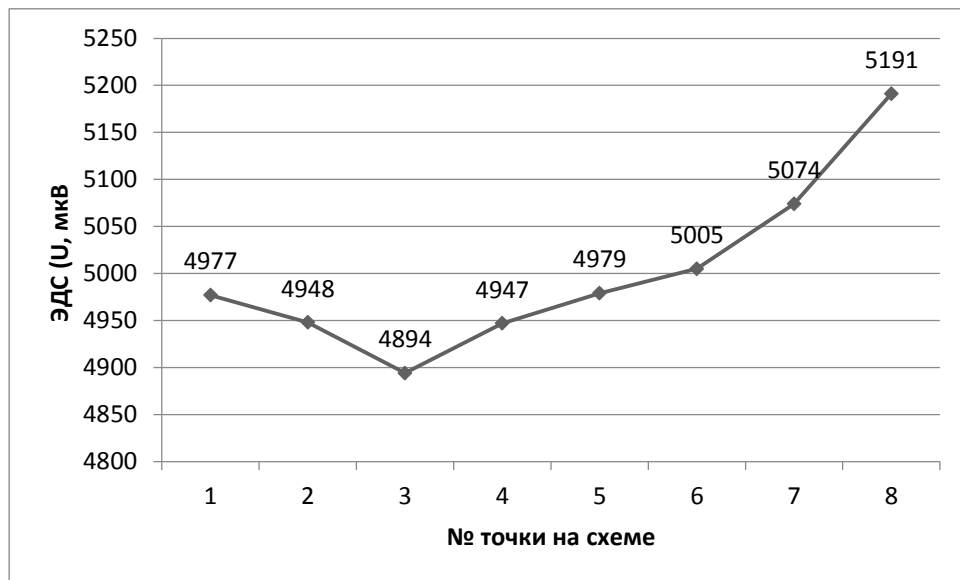


Рисунок 4.8 – Карта распределения значений ЭДС на металлической трубе

Из представленного выше рисунка 4.8 видно, что наименьшие значения ЭДС находятся в зоне расположения точки измерения под № 3. По мере удаления от этой зоны значение ЭДС возрастает.

На основании проведенных измерений, представленных в таблице 4.6 и рисунке 4.8 было установлено, что зона наибольшего термического поражения расположена в месте проведения измерений под № 3.

Далее с помощью предложенного метода и прибора контроля степени термических повреждений путем измерения цветовых характеристик были проведены исследования поверхности металлической трубы.

Измерения значений R (красный цвет) на поверхности металлической трубы в каждой точке проводились 10 раз, для определения среднего результата данные заносились в таблицу 4.7 [25].

Таблица 4.7 – Средние значения R на металлической трубе

Номер точки измерения	№ измерения и значения R										R ср
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	13	14	17	16	14	15	15	15	14	12	15
2	28	26	25	29	23	25	23	26	25	26	26
3	39	34	37	37	36	36	38	33	36	31	36
4	34	35	38	35	33	36	37	33	35	37	35
5	23	23	25	24	25	27	24	27	25	26	25
6	25	25	25	26	24	26	26	25	27	24	25
7	24	25	23	25	24	24	23	26	24	24	24
8	17	15	15	16	17	18	16	17	16	17	16

Далее была произведена статистическая обработка результатов измерений значений R согласно ГОСТ Р 50779.22-2005 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего» (таблица 4.8) [79].

Таблица 4.8. Результаты статистической обработки значений R

№	Среднее значение R	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Граница доверительного интервала для среднего значения	
				Нижняя	Верхняя
1	15	1,43	9,89	13	16
2	26	1,90	7,41	24	27
3	36	2,41	6,74	33	37
4	35	1,70	4,82	34	37

Продолжение таблицы 4.8

5	25	1,45	5,82	23	26
6	25	0,95	3,75	24	26
7	24	0,92	3,80	23	25
8	16	0,97	5,89	15	17

Результаты измерения R на схему, а также выделяется зона (зоны) с экстремально высокими значениями. Наглядно эти зоны можно увидеть на построенной карте зон термических повреждений при помощи компьютерной программы Microsoft Office Excel.

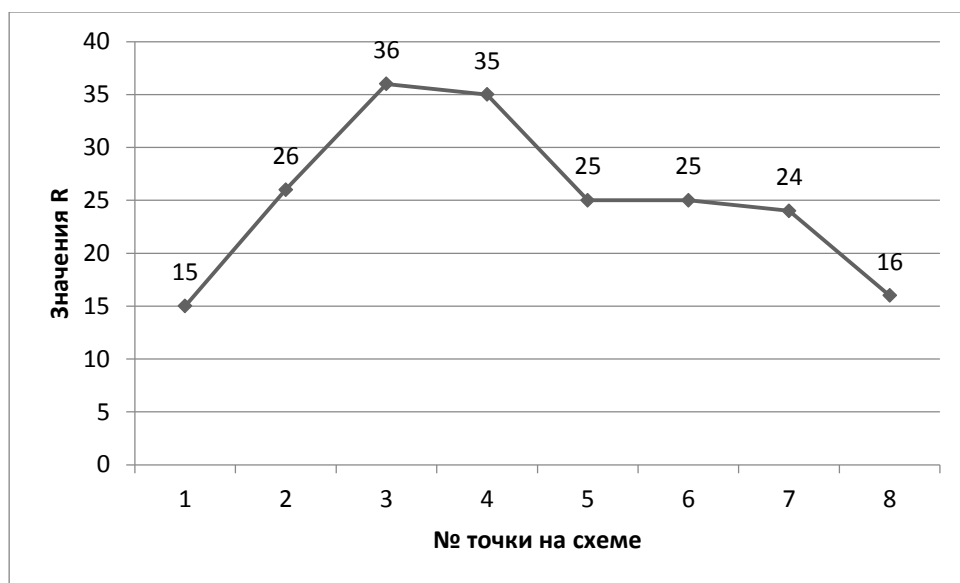


Рисунок 4.9 – Карта распределения значений R на металлической трубе

На основании проведенных измерений, представленных в таблице 4.7 и рисунке 4.9 было установлено, что зона наибольшего термического повреждения расположена в месте проведения измерений под № 3. Полученный результат совпадает с результатами вихретокового метода измерения. Таким образом, можно заключить, что предложенный метод является рабочим и достоверным.

4.2 Практические рекомендации по применению метода и прибора контроля степени термических повреждений материалов на месте пожара путем измерения цветовых характеристик

После предварительного осмотра, сохранившихся конструкций после пожара, специалист выбирает объекты для исследования. Далее составляется план-схема с точками измерения (объемная, поверхностная или линейная).

Объектами исследования могут быть любые однородные материалы, распределенные по месту пожара. Устанавливается наличие копоти на поверхности. При её обнаружении подготовку поверхности к исследованиям производить не требуется. Подготовка поверхности материала для измерения конструкций и изделий из бетона, ПВХ, металла, древесины необходимо лишь в части очистки кисточкой с исследуемой поверхности остатков пожарного мусора, обгоревшей краски и т.п.

Измерительная камера прибора устанавливается на поверхности конструкции или изделия в определенной точке, а затем измеряются цветовые характеристики соответствующие материалу в течение 5 секунд в одной точке. Предложены критерии контроля степени термических повреждений материалов в виде значений модуля цветового вектора для бетона, древесины, и значений R для стали, ПВХ, копоти. Измерения значений цветовых характеристик в каждой точке проводятся 12 раз. Максимальное и минимальное значения в каждой точке измерений не учитывается для обработки результатов, в связи с исключением случайной ошибки. Для определения среднего результата данные 10 измерений заносятся в таблицу.

Далее производится статистическая обработка результатов измерений значений модуля цветового вектора согласно ГОСТ Р 50779.22-2005 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего» [79]. Доверительный интервал для среднего рассчитывался с доверительной вероятностью 0,99.

Измерительную камеру прибора необходимо устанавливать строго

перпендикулярно поверхности измерения. Конфигурация исследуемого материала должна обеспечивать надежный контакт по всей площади измерительной камеры в точках измерения.

На рисунке 4.10 представлена методика исследования материалов с помощью метода и прибора контроля степени термических повреждений путем цветоизмерения.

Для сталей и бетона в связи с разными химическими и физическими процессами, происходящими в материале, необходимо проводить предварительный анализ температур на месте пожара. И в дальнейшем разделять выявленные зоны на карте распределения термических повреждений.

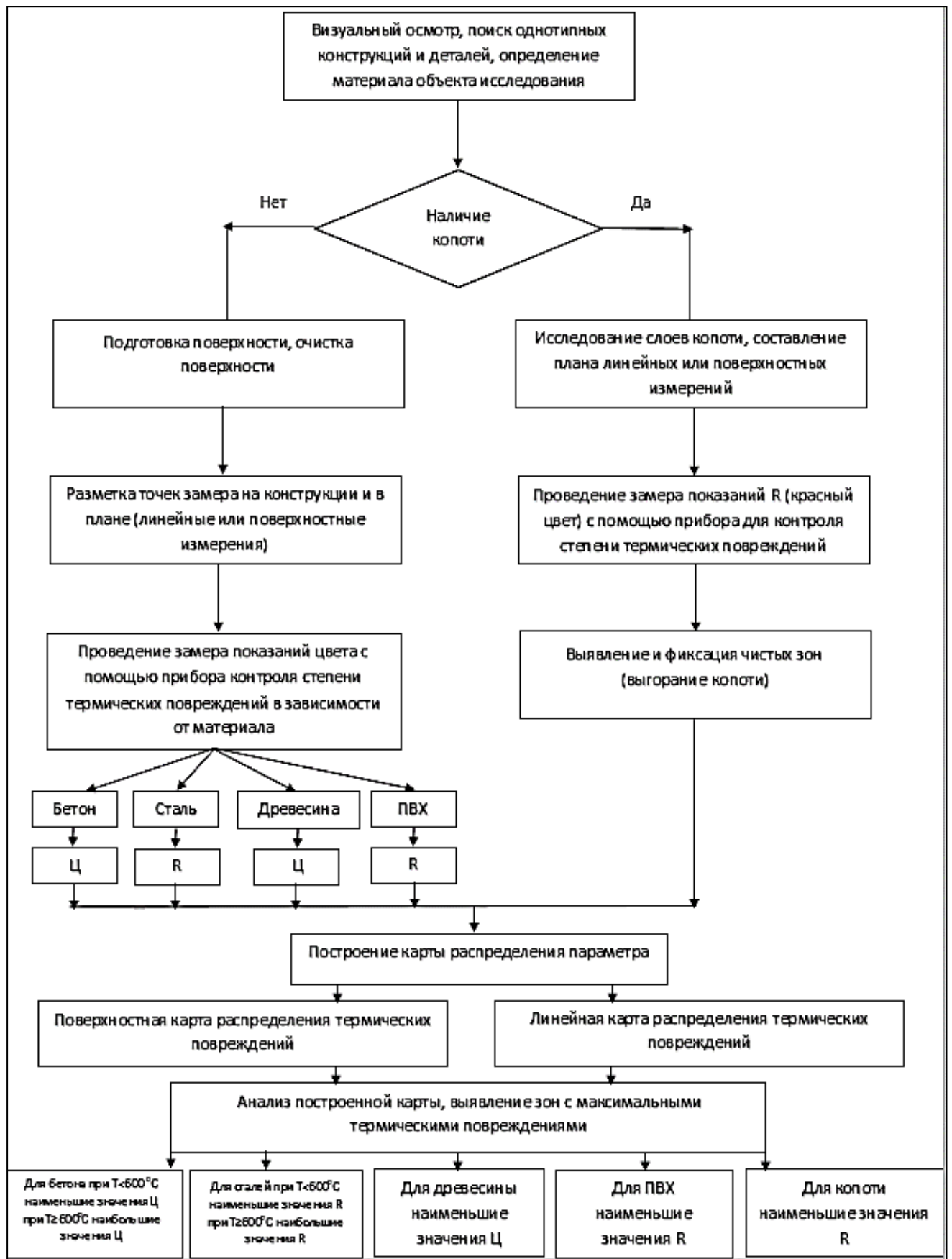


Рисунок 4.10 – Методика исследования материалов путем цветоизмерения

4.3 Выводы по главе

1. Результаты, полученные с помощью других валидированных методов оценки степени термических повреждений совпадают с результатами предложенного метода. Таким образом, метод контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара путем измерения цветовых характеристик позволяет объективно принять решение по установлению очага пожара.

2. Разработана методика по применению метода и прибора контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара, которая позволит укрепить доказательную базу по расследованию пожаров и повысить объективность в принятии решения по установлению места первоначального горения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, на основании выполненных исследований, решены научные задачи по обоснованию и разработке метода и прибора контроля степени термических повреждений материалов, что позволит повысить качество проведения расследования пожаров и обеспечит повышение пожарной и экологической безопасности страны.

Основные выводы, научные и практические результаты, полученные автором, и представленные в диссертации заключаются в следующем:

1. Разработан метод неразрушающего контроля веществ и материалов, позволяющий инструментально по изменению цветовых характеристик установить степень термических повреждений и очаг пожара, что позволит повысить объективность сделанных выводов. Метод является универсальным в части применения для большинства материалов встречающихся на пожаре и позволяет оценить температуру воздействия на материалы в пределах характерных для физический изменений конкретного исследуемого объекта.

2. Разработан прибор контроля термических повреждений веществ, материалов и изделий на месте пожара, имеющий лучшие характеристики по сравнению с аналогами, позволяющий проводить измерения цветовых характеристик различных по размерам объектов в полевых условиях, выполненного на основе логического программируемого контроллера, что минимизирует погрешность измерений, полученных путем усреднения результатов в каждом канале по выборке, состоящей из нескольких десятков циклов.

3. Установлены зависимости изменений цветовых характеристик от температуры и времени термического воздействия на объекты исследования. Получены аналитические модели изменений цветовых характеристик при термическом воздействии на исследуемые материалы. Предложены критерии оценки степени термических повреждений веществ и материалов в виде значений модуля цветового вектора для бетона и древесины, и значений R для стали, ПВХ и

копоти.

4. Результаты, полученные с помощью других валидированных методов оценки степени термических повреждений совпадают с результатами предложенного метода. Таким образом, метод контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара путем измерения цветовых характеристик позволяет объективно принять решение по установлению очага пожара. Разработана методика по применению метода и прибора контроля степени термических повреждений веществ и материалов на месте пожара.

Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по практическому применению предложенного метода и прибора контроля. Использование разработанных метода и прибора при расследовании пожаров специалистами испытательных пожарных лабораторий, а также дознавателями и следователями позволит укрепить доказательную базу по расследованию пожаров и повысить объективность в принятии решения по установлению места первоначального горения.

Главная технико-экономическая эффективность метода и прибора заключается в фиксации термических повреждений различных материалов, для установления очага пожара и путей распространения, что позволит вывозить меньшее количество оборудования на место пожара, а также увеличит качество расследования пожаров, что в дальнейшем уменьшит их количество, в связи с выбором правильного курса профилактики пожаров.

На основании проведенного исследования перспективами дальнейшей разработки темы будут являться следующие направления: разработка критериев оценки степени термических повреждений различных материалов (разные типы металлов, полимеров, пород древесины и т.д); разработка метода по дифференциации аварийных режимов работы электросети по цвету окисных пленок на поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О пожарной безопасности: [Федеральный закон от 21.12.1994 № 69] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/9028718?section=text> (дата обращения: 17.01.2022).
2. Полехин П. В. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году. –М.: ВНИИПО, 2021, – 112 С.
3. Мегорский Б.В. Методика установления причин пожаров – М.: Стройиздат, 1966. – 347 с.
4. Чешко И.Д. Расследование и экспертиза пожаров – СПб: СПбИБ МВД РФ, 1997. – 562с.
5. Россинская Е. Р. Реалии и перспективы использования специальных знаний по новому УПК РФ //Расследование пожаров. – 2007. – С. 6-16.
6. Чешко И.Д. Технические основы расследования пожаров: Методическое пособие. - М: ВНИИПО, 2002. – 330 с.
7. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров/Пер. с англ. Под ред. Ю.А. Кошмарова и В.Е. Макарова) – М.: Стройиздат, 1990. – 424с.
8. Thomas P. H. Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms //Fire and Materials. – 1981. – Т. 5. – №. 3. – С. 103-111.
9. Смирнов К.П., Чешко И.Д, Егоров Б.С. и др. Комплексная методика определения очага пожара – Л.: ЛФ ВНИИПО МВД СССР, 1987 –114 с.
10. Авторское свидетельство № 1096546 А1 СССР, МПК G01N 21/64. Способ определения места возникновения пожара: № 3519133: заявл. 08.12.1982: опубл. 07.06.1984 / И. Д. Чешко, К. П. Смирнов, Б. С. Егоров [и др.].
11. Чешко И. Д. и др. Исследование процесса обугливания древесины при горении и изучение свойств обугленных остатков. 1. Кинетика обугливания древесины //Химия древесины. – 1986. – №. 2. – С. 89-93.
12. Чешко И. Д. и др. Исследование процесса обугливания древесины при горении и изучение свойств обугленных остатков. 2. Свойства обугленных остатков //Химия древесины. – 1986. – №. 2. – С. 94-100.
13. Леонович С. Н., Литвиновский Д. А. Свойства конструкционного

бетона после пожара //Судебная экспертиза Беларуси. – 2017. – №. 2. – С. 51-57.

14. Ильин Н.А. Техническая экспертиза зданий, поврежденных пожаром. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.

15. Методические рекомендации по оценке свойств бетона после пожара. – М.: НИИЖБ ИТБ. 1985.

16. Ларионова З. М., Соломонов В. В., Леднева Н. П. Определение температуры нагрева бетона по изменению его состояния после пожара //Пром. строительство – 1989. – №. 2. – С. 20.

17. Вайншток И. С. Ультразвуковой импульсный метод испытания бетона/Применение достижений современной физики в строительстве //М.: Стройиздат. – 1967. – С. 71-81.

18. Kupilík V. Stavební konstrukce z požárního hlediska. – Grada Publishing as, 2006.

19. Авторское свидетельство № 538290 А1 СССР, МПК G01N 29/07, G01N 29/04, G08B 17/00. Способ определения места возникновения пожара: № 2098505 : заявл. 29.01.1975: опубл. 05.12.1976 / В. А. Макагонов, М. К. Зайцев, В. С. Глинчиков [и др.]

20. Макагонов В. А. Бетон в условиях высокотемпературного нагрева //М.: Стройиздат. – 1979.

21. Косарев Б. В., Кошмаров Ю. А., Кутуев Р. Х. Определение очаговых признаков пожара на бетонных и железобетонных конструкциях с помощью ультразвуковых волн //Проблемы пожарной безопасности зданий и сооружений: Материалы X Всес. науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО. – 1990.

22. Косарев Б.В. Разработка метода обнаружения очаговых признаков пожара на бетонных и железобетонных конструкциях с помощью УЗ-волн. Дис. канд. техн. наук. – М.: ВИПТШ. 1991. – 185 с.

23. Авторское свидетельство № 1377791 А1 СССР, МПК G01R 33/16. Способ определения очага пожара: № 3658368: заявл. 24.10.1983: опубл. 28.02.1988 / А. В. Данилов.

24. Брушлинский Н.Н., Беляев А.В., Данилов А.В. и др.

Магнитометрический метод экспертизы мест пожаров //Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях: Реф. сборник ВИНТИ, 1992. – Вып. 4. – С. 87-91.

25. Елисеев Ю. Н., Чешко И. Д., Плотников В. Г. и др. Экспресс-методы экспертного исследования неорганических материалов при установлении очага пожара /Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2019. – 61 с.

26. Зенков Н. И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара //М.: ВИПТШ МВД СССР. – 1974.

27. Поль Д. К. Естественно-научная криминалистика: (Опыт применения научно-технических средств при расследовании отдельных видов преступления). – Юрид. лит, 1985. – 304 с.

28. Тихомиров В. И. Окалинообразование на железе и железных сплавах при высоких температурах: Дис. д-ра хим. наук //Л.: ЛГУ. – 1959.

29. Паршин С. Г., Кархин В. А., Левченко А. М. Металлургические основы сварки. Конденсированная фаза: учебное пособие. – 2014.

30. Елисеев Ю. Н., Копкин Е. В., Бардулин Е. Н. Применение инструментальных методов при исследовании последствий пожаров транспортных средств //УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В ТЕХНОСФЕРЕ. – 2017. – С. 75.

31. Выскребцов В. Г. Экспертное исследование металлических объектов после пожара //Экспертная техника – М.: ВНИИСЭ. – 1979. – №. 64. – С. 37-74.

32. Граненков Н. М., Денисова О. О., Дюбаров Г. А. Комплексное определение параметров нагрева полимерных материалов и металлических изделий, используемых на железнодорожном и авиационном транспорте: Методические рекомендации //М.: ВНИИПО МВД СССР. – 1991.

33. Патент № 2329077 С2 Российская Федерация, МПК А62С 3/00, G01N 29/04. Способ выявления скрытых очаговых признаков пожара: № 2006108124/12: заявл. 16.03.2006: опубл. 20.07.2008 / И. Д. Чешко, А. Н. Соколова, Ю. Н. Елисеев.

34. Кулагин В. Н., Матюк В. Ф. Контроль структуры, механических

свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии //Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – №. 3.

35. Яковлев А. И., Бушев В. П., Олимпиев В. Г. Руководство по испытанию строительных конструкций на огнестойкость //М.: ВНИИПО. – 1980.

36. Ильин, Н. А. Техническая экспертиза зданий, поврежденных пожаром / Н. А. Ильин. – Москва: Стройиздат, 1983. – 200 с.

37. Арцыбашева О. В. и др. Исследование параметров обугливания деревянных конструкций длительного срока эксплуатации //Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2013. – №. 3. – С. 64-68.

38. Асеева Р. М., Серков Б. Б., Сивенков А. Б. Горение и пожарная опасность древесины //Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – №. 1. – С. 19-32.

39. Ding Y. et al. Experimental and numerical simulation of multi-component combustion of typical charring material //Combustion and Flame. – 2020. – Т. 211. – С. 417-429.

40. Таубкин И. С. Определение температуры и длительности горения древесины на пожаре по параметрам обугленного слоя: методические рекомендации //Теория и практика судебной экспертизы. – 2017. – Т. 12. – №. 4. – С. 37-47.

41. Тараканова В. А. и др. Экспериментальное исследование на восприимчивость к зажиганию древесных и теплоизоляционных материалов при воздействии на них модельных очагов горения различной интенсивности: магистерская диссертация по направлению подготовки: 01.04. 03-Механика и математическое моделирование. – 2020.

42. Лобода Е. Л. и др. Моделирование теплофизических процессов при зажигании деревянной дощечки. – 2015.

43. Попова Л. Г. Исследование некоторых вопросов механизма образования древесного угля: автореф //Л.: Лесотехническая академия им. СМ Кирова. – 1970.

44. Гиндулин И. К. и др. Исследование процесса окисления активного

древесного угля кислородом воздуха //Химия растительного сырья. – 2007. – №. 4. – С. 117-120.

45. Василевич С. и др. Исследование процесса получения древесного угля путем пиролиза под давлением //Energetica Moldovei. Aspecte regionale de dezvoltare. – 2016. – С. 163-167.

46. Базарнова Н. Г. и др. Методы исследования древесины и ее производных. – 2013.

47. Патент на полезную модель № 136174 U1 Российская Федерация, МПК G01N 27/00. Пресс-форма для измерения электрического сопротивления карбонизированных остатков органических материалов при экспертизе пожаров: № 2013130626/28: заявл. 03.07.2013: опубл. 27.12.2013 / А. Н. Соколова, И. Д. Чешко, С. Н. Данилов [и др.].

48. Беляк А. Л., Руденко М. Б. Определение степени обугливания древесностружечных материалов в условиях низкотемпературной деструкции в рамках производства пожарно-технической экспертизы //Криминалистика: вчера, сегодня, завтра. – 2018. – №. 3 (7). – С. 8-11.

49. Вакуленко С.В. Использование данных о составе и свойств копоти при реконструкции пожара: Дис. на соискание ученой степени к-та техн. наук / СПбУ МВД России. – Санкт-Петербург, 2000. – 150 с.

50. Чешко И.Д., Соколова А.Н. Выявление очаговых признаков и путей распространения горения методом исследования слоев копоти на месте пожара: Метод. реком. – М. : ВНИИПО, 2008. – 49 с.

51. Патент № 2275624 С1 Российская Федерация, МПК G01N 27/02. Способ выявления скрытых признаков очага пожара, путей распространения горения и устройство для его реализации: № 2004134368/28: заявл. 25.11.2004: опубл. 27.04.2006 / И. Д. Чешко, С. В. Вакуленко, А. Н. Соколова.

52. Neiser I., Sevecek P. Studium slozeni a struktury pevnych uhlikatych zbytku po tepelne degradaci lehceneho polyuretanu./Sb. pr //Red. fak. Ostrave. – 1984. – С. 41-48.

53. Sevecek P., Zapletalova I., Neiser J. Studium struktury a slozeni tuhych

uhlikatych zbytku po tepelne degradacie plastu./Nekoriav //Polymer, mater. – С. 60-66.

54. Веттергренъ В. И. и др. Термическое расширение скелета цепных молекул в кристаллах полимеров //Физика твердого тела. – 2003. – Т. 45. – №. 8. – С. 1528-1534.

55. Коптелов А. А., Коптелов И. А. Статистическая модель термического разложения линейных полимеров //Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2009. – Т. 51. – №. 8. – С. 1578-1584.

56. Фролова, Т. В. Методы идентификации полимерных материалов при производстве пожарно-технической экспертизы / Т. В. Фролова, Е. С. Захватов // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов Международной научно-практической конференции, посвященной Году культуры безопасности, Иваново, 19 сентября 2018 года. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 183-186.

57. Национальная ассоциация противопожарной защиты и др. Руководство пользователя для NFPA 921: руководство по расследованию пожаров и взрывов. - Jones & Bartlett Learning, 2006.

58. Чешко И.Д., Юн Н.В., Плотников В.Г. и др. Осмотр места пожара: методическое пособие / – М.: ВНИИПО, 2004. – 503 с.

59. Хаматов Р. Р., Ситор Р. С., Иванов Ю. П. Повреждения строительных конструкций при пожарах //Инновационная наука. – 2015. – №. 10-1. – С. 123-126.

60. Горбунов, А. С. Возможность применения оптического прибора для определения цвета в экспертизе пожаров / А. С. Горбунов, А. Н. Слепов, И. Н. Пожаркова // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Железногорск, 23 апреля 2021 года. – Железногорск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирская пожарно-спасательная академия" Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий", 2021. – С. 616-619.

61. Жигулина, Ю. А. Цвета каления и побежалости стали / Ю. А. Жигулина, Я. С. Стецура // XI Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство»: Материалы форума, Белгород, 01–20 октября 2019 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 903-906.
62. Парийская, А. Ю. Исследование окалины, образовавшейся на поверхности стальных конструкций после пожара, для целей пожарно-технических экспертиз / А. Ю. Парийская, Т. Д. Теплякова // Modern Science. – 2022. – № 6-4. – С. 216-221.
63. Галишев М. А. и др. Расследование и экспертиза пожаров. – 2019. – 136 с.
64. Душеин С. В., Егоров А. Г., Зайцев В. В., Хрусталёв В. Н. Судебная фотография / Под ред. заслуженного юриста РФ, профессора А. Г. Егорова — СПб.: Питер, 2005. — 368 с.
65. Агостон Ж. Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 184 с.
66. Hunt R. W. C. The Reproduction of Colour. — 6th edition. — John Wiley & Sons, 2004. — P. 4—5. — 724 p. — ISBN 978-0-470-02425-6.
67. Фершильд М.Д. Модели цветового восприятия, второе издание: пер. с англ. – СПб. 2006.
68. Цветовые системы. История вопроса (часть 59) Режим доступа: <https://natural-colours.livejournal.com/35541.html> (дата обращения: 16.05.2022).
69. Патент РФ № 2604 563 С1, дата приоритета: 2015.05.29, дата публикации: 2016.12.10, Вечиомов Д.А. и др., RU «Устройство для определения степени термического поражения материалов и конструкций в ходе пожарно-технической экспертизы путём анализа оптических свойств материала (КСЛ-01)».
70. Патент РФ на полезную модель № 207344 U1, дата подачи: 2021.05.11, дата публикации: 2021.10.25, Ракутько Е.Н. и Ракутько С.А., RU «Измеритель цвета».

71. Паспорт на датчик цвета HDJD-S722-QR999 Режим доступа: <https://natural-chipfind.ru/static/pdf/avago/hdjd-s722-qr999.pdf> (дата обращения: 16.05.2022).
72. Паспорт на датчик цвета TCS34725 Режим доступа: <https://natural-https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TCS34725.pdf> (дата обращения: 16.05.2022).
73. Паспорт на датчик цвета TCS3200 Режим доступа: <https://natural-http://files.amperka.ru/datasheets/TCS3200.pdf> (дата обращения: 16.05.2022).
74. Методика калибровки датчик цвета TCS3200 Режим доступа: https://ams.com/documents/20143/4421878/Calibration_TrueColorSensors_EmittedApplication_AN001022_1-00.pdf (дата обращения: 16.05.2022).
75. Spectro-guide 45/0 sphere. Спектрофотометр для измерения цвета Режим доступа: <http://www.spectro-guide.ru> (дата обращения: 16.05.2022).
76. Сукало Г. М. Расследование и экспертиза пожаров в 2 частях: Часть 2. Экспертиза пожаров. – ООО ДиректМедиа, 2021 – 172 с.
77. Тумановский А. А., Елисеев Ю. Н., Чешко И. Д. Компьютерное моделирование температурных зон в различных объемах с учетом пожарной нагрузки //Расследование пожаров. – 2007. – С. 224-248.
78. Агамиров Л. В. Методы статистического анализа результатов научных исследований. – Москва: Изд-во МЭИ, 2018. – 71 с.
79. ГОСТ Р 50779.22-2005 (ИСО 2602:1980) Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего от 31 мая 2005 - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200039939> (дата обращения: 16.05.2022).
80. ГОСТ 17608-2017 Плиты бетонные тротуарные. Технические условия (с Поправками) от 26 октября 2017 - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200157324> (дата обращения: 16.05.2022).
81. Паспорт на муфельную печь LOIP LF 7/13-G1 - Режим доступа: <https://loip.ru/catalog/laboratorное-oborudovanie-proizvodstva-loip/sushilnyie-shkafyi-i-mufelnyie-pechi-loip/mufelnyie-pechi-loip/lf-7-13-g1-pech-mufelnaya/> (дата обращения: 16.05.2022).

82. Паспорт на сушильный шкаф LOIP LF 25/350-GG1 - Режим доступа: <https://loip.ru/catalog/laboratorное-oborudovanie-proizvodstva-loip/sushilnyie-shkafyi-i-mufelnyie-pechi-loip/sushilnyie-shkafyi-loip/lf-25-350-gg1-shkaf-sushilnyi/> (дата обращения: 16.05.2022).
83. Баженов Ю.М. Технология бетона. — М.: Издательство АСВ, 2002. — 500 с. — ISBN 5-93093-138-0.
84. Никольский Б. П. Справочник химика. — Рипол Классик, 2014. — 926 с.
85. Harmathy T. Z. Thermal properties of concrete at elevated temperatures //Journal of Materials. — 1970.
86. Мчедлов-Петросян О.П. Химия неорганических строительных материалов. — М.: Стройиздат, 1988. 304 с.
87. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. — М.: Высшая школа, 1981. — 335 с.
88. Корзанов В. С., Красновских М. П. Влияние термического воздействия на прочность бетона //Вестник Пермского университета. Серия: Химия. — 2020. — Т. 10. — №. 3.
89. Горбунов, А. С. Исследование изменений цветовых характеристик бетона при термическом воздействии / А. С. Горбунов, М. В. Елфимова, Ю. Н. Безбородов // Южно-Сибирский научный вестник. — 2022. — № 2(42). — С. 60-65. — DOI 10.25699/SSSB.2022.42.2.005. — EDN JMIQTT.
90. ГОСТ 19903-2015 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент (с Поправкой) от 07 апреля 2016 — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200133726> (дата обращения: 16.05.2022).
91. Горбунов, А. С. Исследование изменений цветовых характеристик стали при термическом воздействии / А. С. Горбунов, М. В. Елфимова, Ю. Н. Безбородов // Омский научный вестник. — 2022. — № 2(182). — С. 119-124. — DOI 10.25206/1813-8225-2022-182-119-124. — EDN ZVONKS.
92. Адрианова В. П. Механические свойства сталей. Краткий справочник металлурга \ М.: Государственное Научно-Техническое Издательство, 1960. — С. 370.

93. Чешко И. Д., Антонов А. О., Чистов Е. А. Об оксидных слоях, образующихся на стали при пожаре // Расследование пожаров. – 2014. – С. 82-84.
94. Баратов А.Н. и Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ, материалов и средства их тушения: Справ, изд. в 2 х книгах. / – М.: Химия, 1990.
95. Марьяндышев П. А. и др. Термогравиметрическое исследование процесса термического разложения и горения древесного топлива, углей и гидролизного лигнина // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – №. 5. – С. 26-31.
96. Горбунов, А. С. Результаты исследования изменения цветовых характеристик полимеров при термическом воздействии / А. С. Горбунов, М. В. Елфимова, Ю. Н. Безбородов // Контроль. Диагностика. – 2022. – Т. 25. – № 10(292). – С. 40-47. – DOI 10.14489/td.2022.10.pp.040-047. – EDN ССІІJG.
97. Ван -Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров: Пер. с англ. – М.: Химия, 1976. – 414 с.
98. Сирота А.Г. Модификация структуры и свойств полиолефинов. –Л.: Химия, 1974. – 176с.
99. ГОСТ 8.010-2013 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики выполнения измерений. Основные положения (с Изменением N 1) от 22 ноября 2013 – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200108158> (дата обращения: 16.05.2022).
100. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий (Переиздание) от 15 июля 2019 – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200166732> (дата обращения: 16.05.2022).
101. Паспорт прибора Кельвин 911 – Режим доступа: <https://zaoeuromix.ru/files/docs/kelvin911.pdf> (дата обращения: 16.05.2022).
102. Паспорт прибора УД2Н-ПМ – Режим доступа: https://kropus.com/pdf/old/omnp_rus.pdf (дата обращения: 16.05.2022).
103. Паспорт прибора МВП-2М – Режим доступа: <https://ntcexpert.ru/documents/mvp2m-pass.pdf> (дата обращения: 16.05.2022).

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Методика определения степени термических повреждений
веществ, материалов и изделий методом и прибором, основанном на измерении
цветовых характеристик

Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны,
чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий
ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

УТВЕРЖДАЮ

Начальник ФГБОУ ВО Сибирская
пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России
полковник внутренней службы


И.Ю. Сергеев
«28» августа 2022 г.

СОГЛАСОВАНО

Заместитель начальника ФГБОУ ВО
Сибирская пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России
по научной работе – начальник
научно-технического центра
подполковник внутренней службы


А.Н. Батуро
«28» августа 2022 г.

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ТЕРМИЧЕСКИХ
ПОВРЕЖДЕНИЙ ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ
И ПРИБОРОМ, ОСНОВАННОМ НА ИЗМЕРЕНИИ ЦВЕТОВЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК
(2022)**

Рассмотрена на заседании НТС ФГБОУ ВО
Сибирская пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России,
протокол № 31 от «28» августа 2022 г.

Разработал:

Преподаватель кафедры инженерно-технических
экспертиз и криминалистики



Горбунов А.С.

Содержание

1 Общие положения.....	3
2 Термины и определения.....	3
3 Сущность методики.....	4
4 Оборудование для проведения исследований.....	9
5 Подготовка к проведению исследований.....	10
6 Порядок проведения исследований.....	10
7 Оценка результатов исследований.....	13
8 Практическое применение методики.....	17
9 Требование безопасности.....	26
10 Список использованных источников.....	27

1 Общие положения

Настоящая методика позволяет на основе полученных экспериментальных данных (измеренных на поверхности материалов цветовых характеристик) определить максимальные термические повреждения на однотипных материалах, что позволяет повысить объективность в принятии решения по установлению очага пожара.

Документ предназначен для организаций и испытательных лабораторий, занимающихся проведением расследования и исследования пожаров для установления места первоначального горения (очага пожара), а также других исследовательских и испытательных лабораторий.

Методика рекомендуется к применению для оценки и контроля степени термических повреждений веществ, материалов и изделий при расследовании пожаров, а также при контроле на различных технологических процессах.

2 Термины и определения

Очаг пожара – место первоначального возникновения пожара [1].

Признаки очага пожара – характерные термические повреждения материалов и конструкций, процессы, события, прямо или косвенно указывающие на возможное место возникновения пожара [1].

Термические повреждения – изменения в веществе, материале, конструкции, предмете, произошедшие под воздействием тепла (в данном случае – пожара) [1].

Степень термических повреждений – безразмерный количественный критерий, показывающий, насколько сильно разрушен материал (конструкция) в результате теплового воздействия. Степень термических повреждений может определяться путем измерения тех или иных характеристик материала (в данном случае – цветовые характеристики), которые последовательно изменяются с увеличением температуры и

длительности теплового воздействия и объективно отражают величину (глубину, масштабы) разрушений [1].

Цветовые характеристики материала – показатели цвета материала в данном случае в системе RGB.

Цветовая система RGB – аддитивное цветовое пространство, которое описывает способ кодирования цветов за счет комбинации трех основных цветов – красного (Red), зеленого (Green) и синего (Blue) [2].

Цветовой вектор – вектор в цветовой системе RGB исходящий из начала координат, направление которого показывает цветность, а его модуль характеризует яркость, т.е. изменение цвета ближе к черному.

3 Сущность методики

Из научно-технической литературы [3] известны сведения об изменении цвета поверхностей материалов при термическом воздействии. Данные изменения вызваны физико-химическими процессами, происходящими в материалах. Так, к примеру, для бетона по изменению цвета и степени закопчения можно судить о термическом воздействии. В результате воздействия температуры цвет бетона изменяется следующим образом: при температуре от 300 °С бетон начинает розоветь, при температуре 900–1000 °С становится бледно-серым, а при температурах более 600 °С копоть полностью выгорает. Продукты горения в виде копоти имеют разную толщину слоя, тем самым, формируют оттенки черного. Изменение цвета стали холодного проката начинает происходить при температурах от 200 °С, при этом серый цвет меняется на соломенный, бордовый, синий, а при температурах выше 500 °С сталь изменяет свой цвет от тёмно-коричневого до темно-серого. При термической деструкции древесина тоже меняет цвет. При температуре от 120-150 °С поверхность древесины желтеет, при 150-200 °С становится коричневой, дальнейший нагрев приводит к обугливанию (черный цвет). Как правило, лакокрасочное покрытие также меняет цвет при воздействии

различной температуры. В зависимости от состава и типа краски при определенных температурах цвет изменяется по следующей схеме: желтеет, коричневеет, чернеет, светлеет, достигает цвета пигмента.

На рисунке 1 представлен метод исследования материалов с помощью метода и прибора контроля степени термических повреждений путем цветоизмерения.

Решение задачи по оценки степени термических повреждений достигается тем, что с помощью предлагаемого прибора измеряются цветовые характеристики (RGB) объекта, подвергнутого температурному воздействию в результате пожара. Данные показания (цветовые характеристики RGB) сравниваются с показаниями такого же материала, не подвергнутого тепловому воздействию, а также ранее подвергнутым в лабораторных условиях, определенному для каждого вида материала, тепловому воздействию при различных режимах температуры и длительности нагрева. На основании разницы в значениях цветовых характеристик делается вывод о режиме теплового воздействия на материал, что позволяет установить место первоначального возникновения горения (очаг пожара). Физико-химические процессы, происходящие в материале при воздействии тепла пожара, могут характеризоваться изменением цветовых характеристик поверхности материала. Часто происходят физико-химические изменения только на поверхности материала (в тонком слое), без глубоких структурных изменений, что делает невозможным применение других методов исследования.

Инструментальное исследование материалов после пожара производится в несколько этапов.

1 этап – выбор объектов исследования и оценка возможности проведения измерений;

2 этап – проведение измерений с помощью прибора контроля термических повреждений;

3 этап – Анализ и установление зон с наибольшими термическими повреждениями, выявление очаговых признаков и признаков распространения пожара.

На первой стадии производится визуальное исследование, сохранившихся конструкций на месте пожара. Для этого, исходя из внешних визуальных признаков, определяется материал, из которого изготовлен конструктивных элемент. Оценивается состояние поверхности объекта исследования, а также пригодность для проведения инструментального исследования. При необходимости проводится предварительная подготовка поверхностей материалов для проведения измерений (очистка от пожарного мусора).

Далее на втором этапе выбираются точки исследования с построением плана-схемы измерений и с помощью предлагаемого в работе прибора проводятся измерения цветовых характеристик объекта. В связи с тем, что предлагаемый метод исследования является неразрушающим контролем, то никаких процессуальных ограничений при использовании прибора и метода нет. Исследуемый материал остается в исходном состоянии после исследования. На план-схему в отмеченных точках наносят значения цветовых характеристик.

На третьем этапе на основании полученной информации производится анализ и определяется зона с максимальными термическими повреждениями. Далее происходит идентификация очаговых признаков и признаков распространения пожара и в заключении устанавливается очаг пожара.

При использовании модели RGB любой цвет может быть представлен в цветовом пространстве с помощью вектора, описываемого уравнением 1. Уравнение идентично уравнению свободного вектора в пространстве, рассматриваемому в векторной алгебре. При этом направление вектора характеризует цветность, а его модуль выражает яркость. Таким образом, важным показателем для оценки термических повреждений материалов

7

является яркость, т.е. изменение цвета ближе к черному (цвету карбонизированных продуктов).

$$|U| = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2}, \quad (1)$$

где: R – значение по оси красного цвета; G – значение по оси зеленого цвета; B – значение по оси синего цвета.

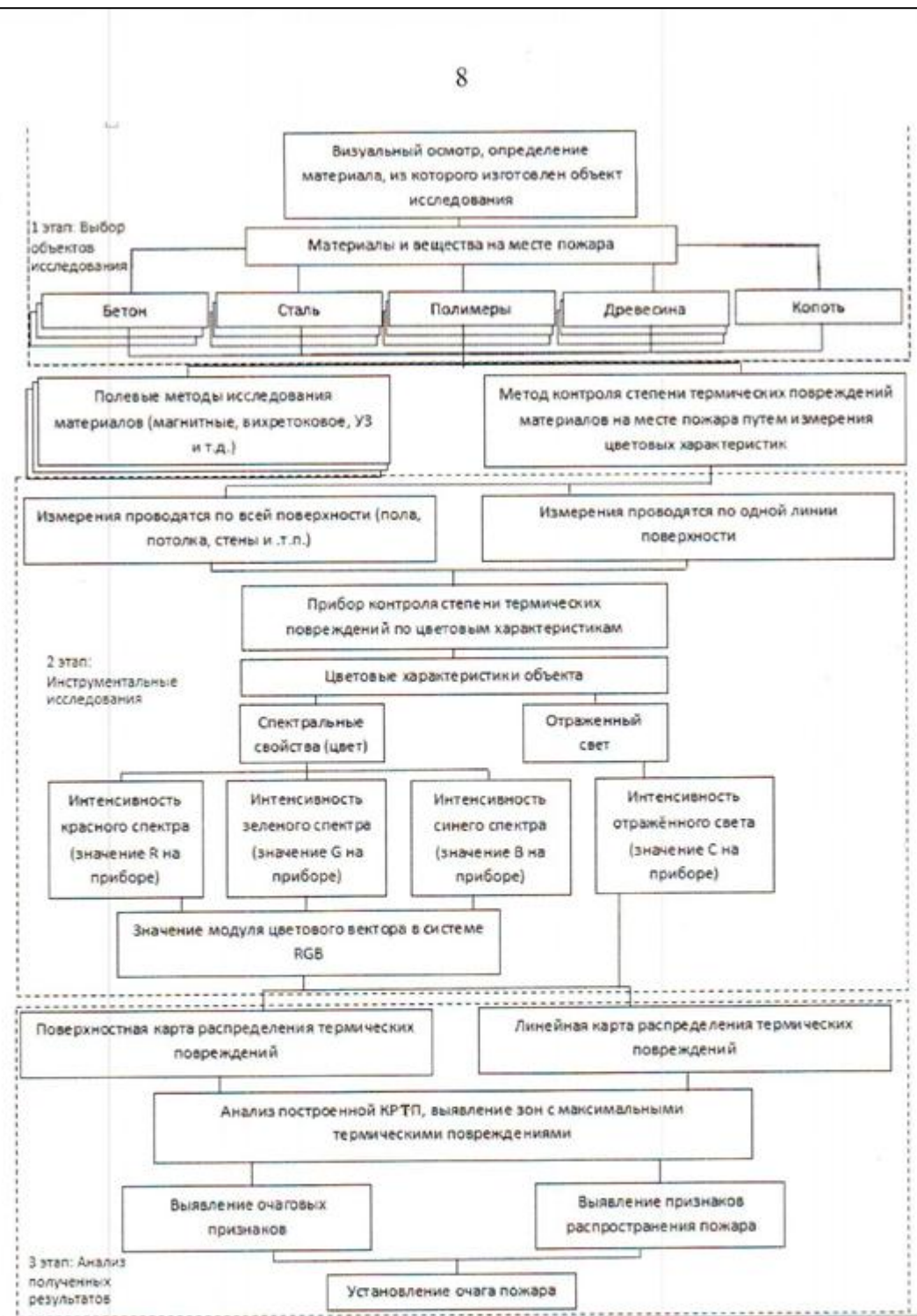


Рисунок 1 – Блок-схема метода

4 Оборудование для проведения исследований

На рисунке 2, показана принципиальная схема прибора для оценки степени термических повреждений материалов путем цветоизмерения.

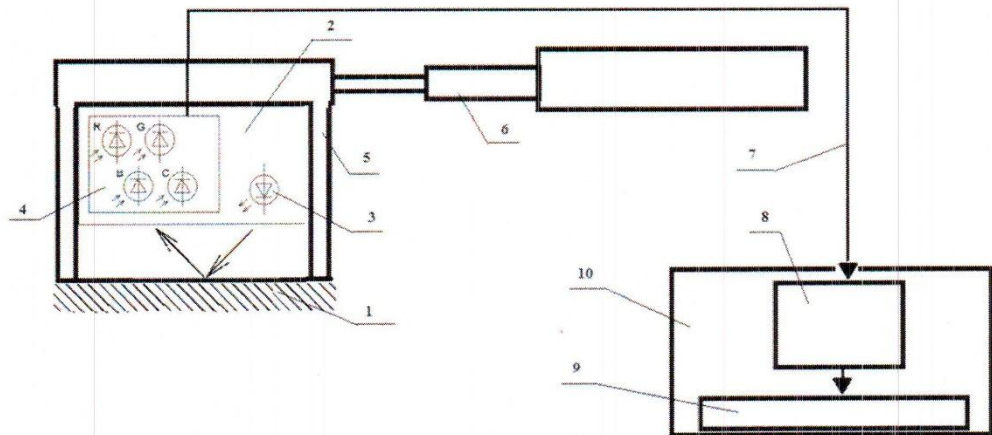


Рисунок 2.9 – Принципиальная схема прибора для оценки степени термических повреждений материалов путем цветоизмерения.

1 – исследуемый образец; 2 – интегральная схема датчика цвета; 3 – светодиод; 4 – фотодиоды R, G, B, C; 5 – корпус измерительной камеры; 6 – телескопическая штанга; 7 – шлейф проводников; 8 – программируемый логический контроллер; 9 – ЖК-дисплей; 10 – корпус прибора с источником питания.

Датчик цвета – это устройство преобразующее свет в фототок и аналоговый или цифровой сигнал. В связи с тем, что для измерения цветовых характеристик материала необходимо фиксировать отраженный свет, то в конструкции датчика необходим светодиод.

Предлагается использовать прибор, состоящий из датчика цвета (4), представляющий собой программируемый преобразователь отраженного света от исследуемого объекта (1) в цифровой сигнал, который состоит из фотодиодов 4 типов (с красным R, зеленым G и синим B светофильтром, а

также прозрачные фотодиоды С без светофильтра) под общим фильтром ИК-излучения, и преобразователей тока в цифровой сигнал на одной монолитной CMOS – интегральной схеме (2). Данный датчик находится в отдельной измерительной камере (5), которая прикреплена к выносной телескопической штанге (6) для измерений различных конструкций по размерам. Также для обеспечения работы в датчике цвета имеется свой источник освещения в виде светодиода (3). Цифровые входы и цифровой выход с помощью шлейфа (7) обеспечивают прямой интерфейс с программируемым логическим контроллером (8). Информация о цветовых характеристиках выводится на ЖК-дисплей (9). Программируемый логический контроллер, ЖК-дисплей, источник питания находятся в одном корпусе (10).

5 Подготовка к проведению исследований

1. Прибор для оценки степени термических повреждений материалов путем цветоизмерения должен быть откалиброван и обеспечить единство измерений.
2. Проводить исследования необходимо после полной ликвидации пожара.
3. Поверхность исследуемых объектов должна быть очищена от пожарного мусора и выполнена из одного типа материала.

6 Порядок проведения исследований

Методика исследования материалов путем цветоизмерения представлена на рисунке 3.

После предварительного осмотра, сохранившихся конструкций после пожара, специалист выбирает объекты для исследования. Далее составляется план-схема с точками измерения (объемная, поверхностная или линейная).

Объектами исследования могут быть любые однородные материалы, распределенные по месту пожара. Устанавливается наличие копоти на

поверхности. При её обнаружении подготовку поверхности к исследованиям производить не требуется. Подготовка поверхности материала для измерения конструкций и изделий из бетона, ПВХ, металла, древесины необходимо лишь в части очистки кисточкой с исследуемой поверхности остатков пожарного мусора, обгоревшей краски и т.п.

Измерительная камера прибора устанавливается на поверхности конструкции или изделия в определенной точке, а затем измеряются цветовые характеристики соответствующие материалу в течении 5 секунд в одной точке. Предложены критерии контроля степени термических повреждений материалов в виде значений модуля цветового вектора для бетона, древесины, и значений R для стали, ПВХ, копти. Измерения значений цветовых характеристик в каждой точке проводятся 12 раз. Максимальное и минимальное значения в каждой точке измерений не учитывается для обработки результатов, в связи с исключением случайной ошибки. Для определения среднего результата данные 10 измерений заносятся в таблицу.

Далее производится статистическая обработка результатов измерений значений модуля цветового вектора согласно ГОСТ Р 50779.22-2005 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего». Доверительный интервал для среднего рассчитывался с доверительной вероятностью 0,99.

Измерительную камеру прибора необходимо устанавливать строго перпендикулярно поверхности измерения. Конфигурация исследуемого материала должна обеспечивать надежный контакт по всей площади измерительной камеры в точках измерения.

Для сталей и бетона в связи с разными химическими и физическими процессами, происходящими в материале, необходимо проводить предварительный анализ температур на месте пожара. И в дальнейшем разделять выявленные зоны на карте распределения термических повреждений.

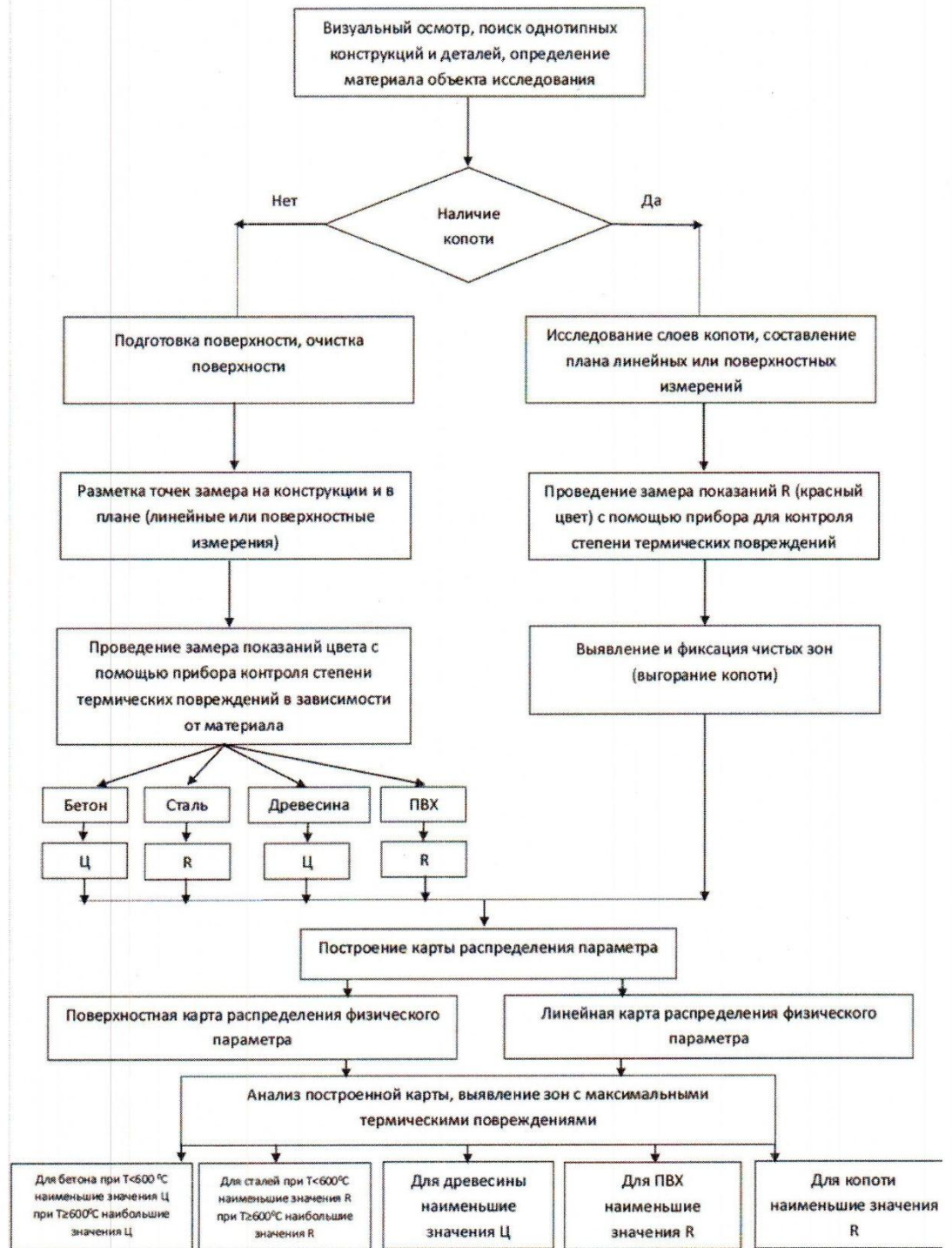


Рисунок 3 – Методика исследования материалов путем цветоизмерения

7 Оценка результатов исследований

Оценка результатов, полученных путем измерения цветовых характеристик, производится с помощью сравнения с аналитическими схемами характерными для материалов. Графики зависимостей показателей цвета от температуры представлены на рисунках 4-8.

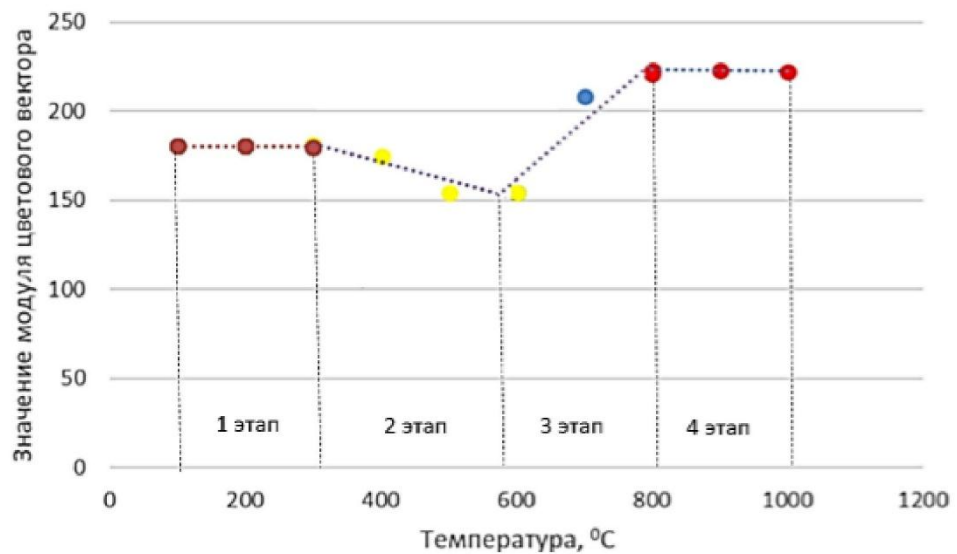


Рисунок 4 – Зависимость значений модуля цветового вектора образцов бетона от температуры воздействия.

1 этап: изменения значений Ц отсутствует (без повреждений);

2 этап: уменьшение значений Ц – соответствует дегидратации тоберморитового геля (потеря 0,5 молекул воды);

3 этап: увеличение значений Ц – соответствует переходу в $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ гидросиликатов кальция;

4 этап: изменения значений Ц отсутствует (максимальные повреждения).

Таким образом, для бетона до температуры $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ наибольшим термическим повреждениям соответствует наименьшие значения модуля цветового вектора, а при температурах выше $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ наибольшие значения Ц.

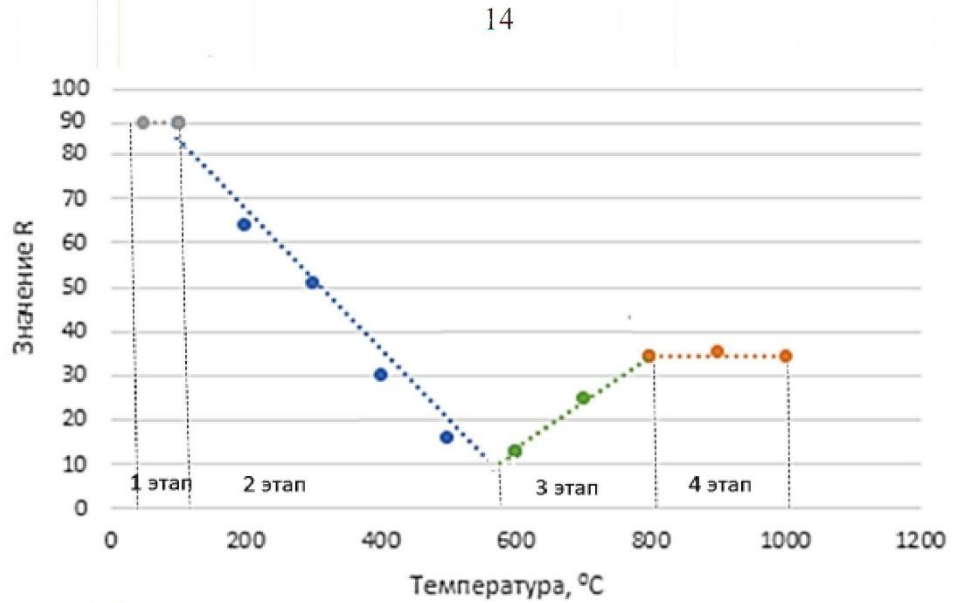


Рисунок 5 – Зависимость значений R образцов стали при термическом воздействии

1 этап: изменения значений R отсутствует (без повреждений);

2 этап: уменьшение значений R – соответствует образованию тонких окисных пленок «цветов побежалости»;

3 этап: увеличение значений R – соответствует образованию высокотемпературных окислов (окалины);

4 этап: изменения значений R отсутствует (максимальные повреждения).

На отрезке от 100 °C до 600 °C наименьшему значению R соответствуют наибольшие термические повреждения для холоднодеформированной стали.

На отрезке от 600 °C при увеличении значений R степень термических повреждений увеличивается. Данное условие можно использовать, как для горячекатаных, так и для холоднодеформированных сталей. Увеличение значений цветных характеристик происходит до температуры 800 °C, далее значения цвета остаются на одном уровне.

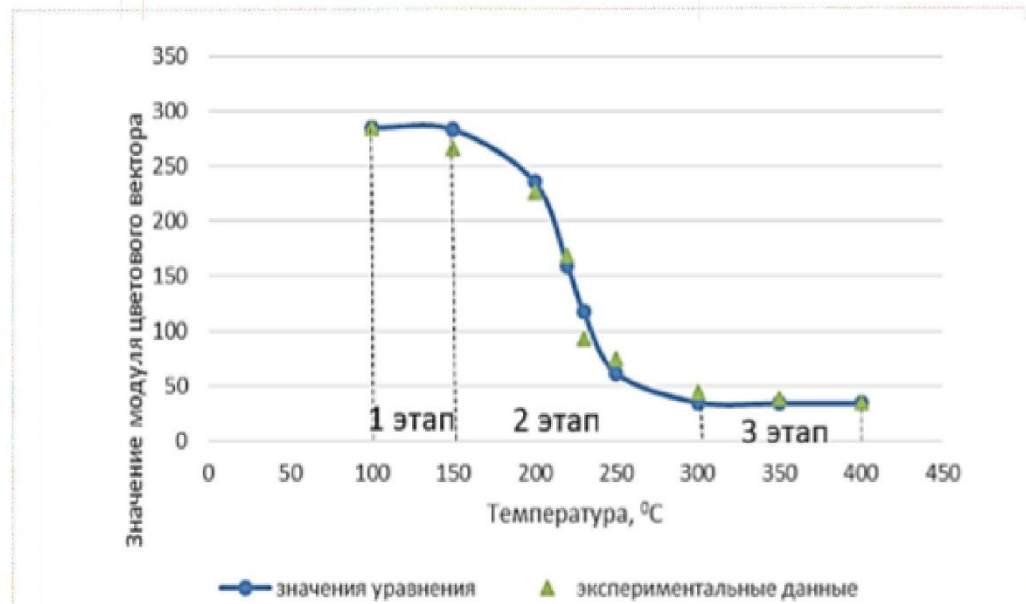


Рисунок 6 – Зависимость значений модуля цветового вектора образцов древесины при термическом воздействии

1 этап: изменения значений Ц отсутствует (без повреждений);

2 этап: уменьшение значений Ц – соответствует процессу пиролиза;

3 этап: изменения значений Ц отсутствует (максимальные повреждения в виде обугливания).

Значения модуля цветового вектора уменьшаются в пределах от 100 до 350 °C на всех временных промежутках температурного воздействия. Таким образом, наибольшим термическим повреждениям древесины соответствуют наименьшие значения Ц.

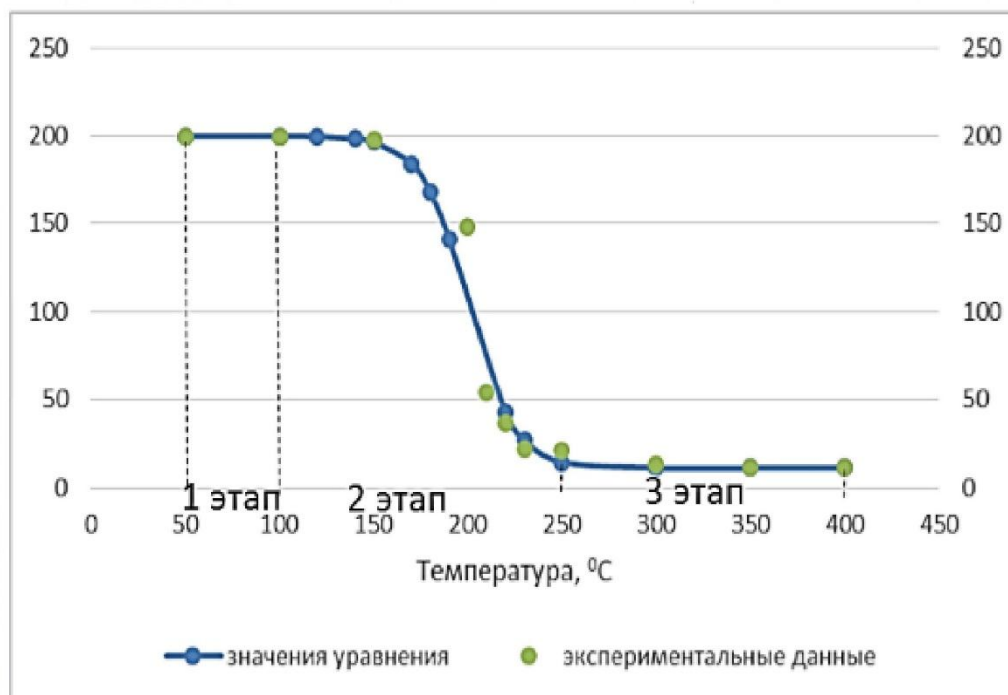


Рисунок 7 – Зависимости значений R образцов ПВХ при термическом воздействии

1 этап: изменения значений R отсутствует (без повреждений);

2 этап: уменьшение значений R – соответствует процессу термической деструкции;

3 этап: изменения значений R отсутствует (максимальные повреждения в виде обугливания).

Значения R уменьшаются в пределах от 150 до 350 °C на всех временных промежутках температурного воздействия. Таким образом, наибольшим термическим повреждениям ПВХ соответствуют наименьшие значения R.

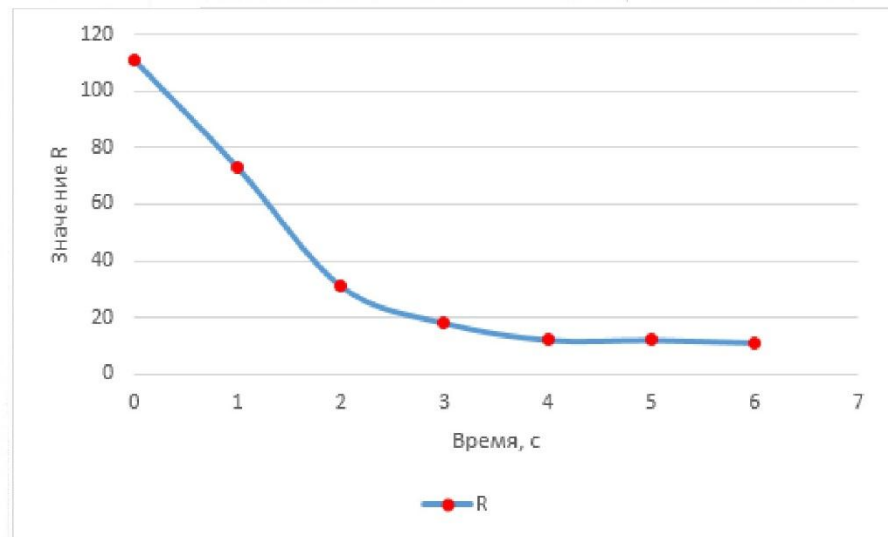


Рисунок 8 – График изменения значений R от времени воздействия продуктов горения

При увеличении времени воздействия продуктов горения на образцы бетона увеличивается толщина слоя копоти. Из графика 8 видно, что при увеличении слоя копоти цветовые характеристики в виде R уменьшаются. Наряду с утолщением слоя копоти, согласно описанным в литературе [3] механизмам этого процесса, на пожаре имеет место выгорание и газификация копоти при воздействии высоких температур, а также испарение легких конденсированных органических веществ и преобразование их в полиароматические дегидрированные соединения. Таким образом, необходимо учитывать следы выгорания копоти которые будут соответствовать значениям цветовых характеристик поверхности материала.

8 Практическое применение методики

Бетонная стена, на которой производились измерения цветовых характеристик, была расположена с правой стороны от входной двери, в помещении комнаты в квартире многоэтажного дома (рисунок 9). На данной

18

стене отсутствуют следы копоти. При визуальном осмотре стена имеет гладкую поверхность бетона, трещины отсутствуют.



Рисунок 9 – Представленная для измерений бетонная стена

Измерения производились в точках указанных на схеме на рисунке 10

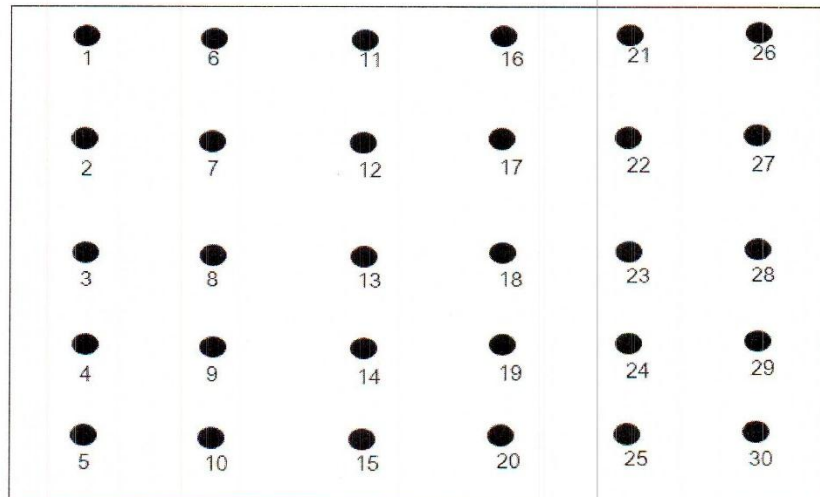


Рисунок 10 – Схема измерения на бетонной стене

Как видно из схемы расстояние между точками измерений составляет 50 см в вертикальной и 60 см в горизонтальной плоскости. Измерения проводились на площади 2,5 x 3,6 м.

С помощью предложенного метода и прибора контроля степени термических повреждений путем измерения цветовых характеристик были проведены исследования бетонной стены.

Измерения значений модуля цветового вектора в каждой точке проводилось 5 раз, для определения среднего результата данные заносились в таблицу 1.

Таблица 1 – Средние значения модуля цветового вектора на бетонной стене

Номер точки измерения	№ измерения и значения модуля цветового вектора										Ц ср
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	159	164	159	159	161	160	161	160	160	160	160
2	216	221	220	220	220	219	220	220	220	220	220
3	216	219	214	214	220	217	217	216	217	217	217
4	156	156	157	157	156	156	156	157	156	156	156
5	152	152	154	154	150	152	152	153	152	152	152
6	159	161	160	160	162	160	161	161	161	161	161
7	217	220	222	222	223	221	222	222	222	222	221
8	225	224	220	220	225	223	222	222	222	223	223
9	232	237	232	232	230	233	233	232	232	232	232
10	154	157	157	157	158	157	157	157	157	157	157
11	160	159	164	161	160	161	161	161	161	161	161
12	181	182	182	182	181	182	182	182	182	182	182

13	226	226	229	228	227	227	227	228	227	227	227
14	228	226	223	220	223	224	223	223	223	223	224
15	225	221	222	220	225	223	222	222	222	223	223
16	182	185	182	182	182	183	183	182	182	182	183
17	182	181	182	182	181	182	182	182	182	181	182
18	186	186	183	183	185	185	184	184	184	184	184
19	184	183	182	182	184	183	183	183	183	183	183
20	182	183	182	182	181	182	182	182	182	182	182
21	188	187	187	187	185	187	187	186	186	186	187
22	191	187	192	192	190	190	190	191	191	190	190
23	190	190	193	193	190	191	191	192	191	191	191
24	186	187	187	187	186	187	187	187	187	187	187
25	191	192	191	191	191	191	191	191	191	191	191
26	180	180	181	180	180	180	180	181	180	180	180
27	186	190	188	188	191	189	189	189	189	189	189
28	184	187	187	187	186	186	187	187	186	186	186
29	185	188	188	188	187	187	188	188	187	187	187
30	181	183	185	185	182	183	184	184	184	183	183

Далее была произведена статистическая обработка результатов измерений значений модуля цветового вектора согласно ГОСТ Р 50779.22-2005 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего» (таблица 4.5) [79]. Доверительный интервал рассчитывался с доверительной вероятностью 0,99.

Таблица 2 – Результаты статистической обработки значений модуля цветового вектора

№	Среднее значение модуля цветового вектора	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Граница доверительного интервала для среднего значения	
				Нижняя	Верхняя
1	160	1,47	0,92	159	161
2	220	1,33	0,61	218	221
3	217	1,88	0,87	215	218
4	156	0,37	0,24	156	157
5	152	1,13	0,74	151	153
6	161	0,78	0,49	160	161
7	221	1,67	0,76	219	222
8	223	1,75	0,79	221	224
9	232	1,78	0,77	231	234
10	157	1,05	0,67	156	158
11	161	1,29	0,80	160	162
12	182	0,37	0,20	181	182
13	227	0,89	0,39	226	228
14	224	2,14	0,96	221	225
15	223	1,55	0,70	221	224
16	183	0,91	0,50	182	183
17	182	0,37	0,20	181	182
18	184	1,04	0,56	183	185
19	183	0,67	0,37	182	183
20	182	0,49	0,27	181	182
21	187	0,76	0,41	186	187
22	190	1,40	0,73	189	191
23	191	1,11	0,58	190	192
24	187	0,37	0,20	186	187
25	191	0,30	0,16	191	191
26	180	0,39	0,22	180	181
27	189	1,33	0,71	187	190
28	186	0,89	0,48	185	187
29	187	0,89	0,47	186	188
30	183	1,21	0,66	182	184

Результаты измерения модуля цветового вектора наносятся на схему, а также выделяется зона (зоны) с экстремально высокими значениями данного параметра. Наглядно эти зоны можно увидеть на построенной карте зон

термических повреждений при помощи компьютерной программы Microsoft Office Excel.

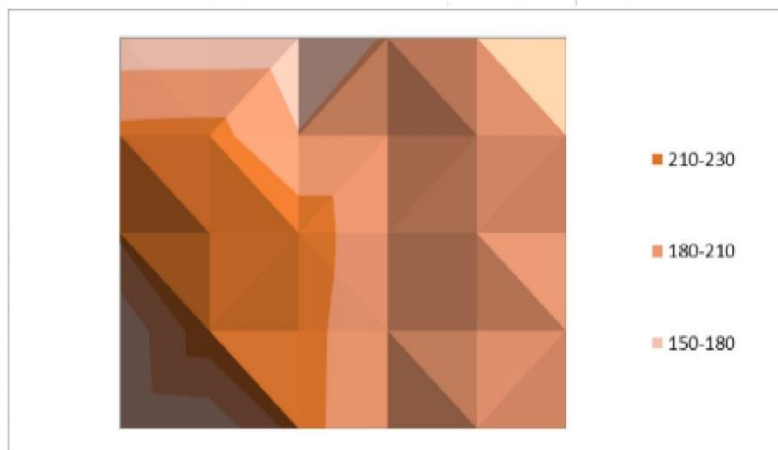


Рисунок 11 – Карта распределения значений модуля цветового вектора на бетонной стене

Из рисунка 11 видно, что имеются 3 различных зоны, наибольшим термическим повреждениям в данном случае соответствует зона со значениями 210-230.

Для исследований конструкций и объектов из металла была выбрана труба, проходящая по стене комнаты в жилом доме. Труба для воды проходит по северо-восточной стене комнаты, на высоте 2,3 м от уровня пола. Диаметр трубы 50 мм, толщина стенок 1,1 мм. На рисунке 12 представлены точки, где производились измерения свойств поверхности данной трубы с указанием надписей от «1» до «8».



Рисунок 12 – Вид трубы и точек измерения в комнате жилого дома

Далее была составлена схема измерения степени термических повреждений металлической трубы на рисунке 13.

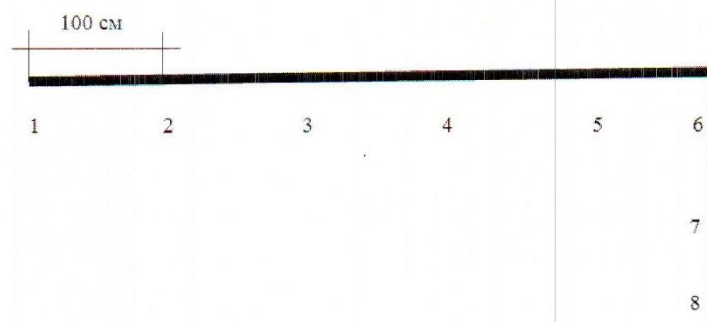


Рисунок 13 – Схема измерения металлической трубы

Расстояние между точками измерений составляет 100 см.

С помощью предложенного метода и прибора контроля степени термических повреждений путем измерения цветовых характеристик были проведены исследования поверхности металлической трубы.

Измерения значений R (красный цвет) на поверхности металлической трубы в каждой точке проводилось 12 раз, для определения среднего результата данные заносились в таблицу 3.

Таблица 3 – Средние значения R на металлической трубе

Номер точки измерения	№ измерения и значения R										R ср
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	13	14	17	16	14	15	15	15	14	12	15
2	28	26	25	29	23	25	23	26	25	26	26
3	39	34	37	37	36	36	38	33	36	31	36
4	34	35	38	35	33	36	37	33	35	37	35
5	23	23	25	24	25	27	24	27	25	26	25
6	25	25	25	26	24	26	26	25	27	24	25
7	24	25	23	25	24	24	23	26	24	24	24
8	17	15	15	16	17	18	16	17	16	17	16

Далее была произведена статистическая обработка результатов измерений значений R согласно ГОСТ Р 50779.22-2005 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего» (таблица 4).

Таблица 4. Результаты статистической обработки значений R

№	Среднее значение R	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, %	Граница доверительного интервала для среднего значения	
				Нижняя	Верхняя
1	15	1,43	9,89	13	16
2	26	1,90	7,41	24	27
3	36	2,41	6,74	33	37
4	35	1,70	4,82	34	37
5	25	1,45	5,82	23	26
6	25	0,95	3,75	24	26
7	24	0,92	3,80	23	25
8	16	0,97	5,89	15	17

Результаты измерения R на схему, а также выделяется зона (зоны) с экстремально высокими значениями. Наглядно эти зоны можно увидеть на построенной карте зон термических повреждений при помощи компьютерной программы Microsoft Office Excel.

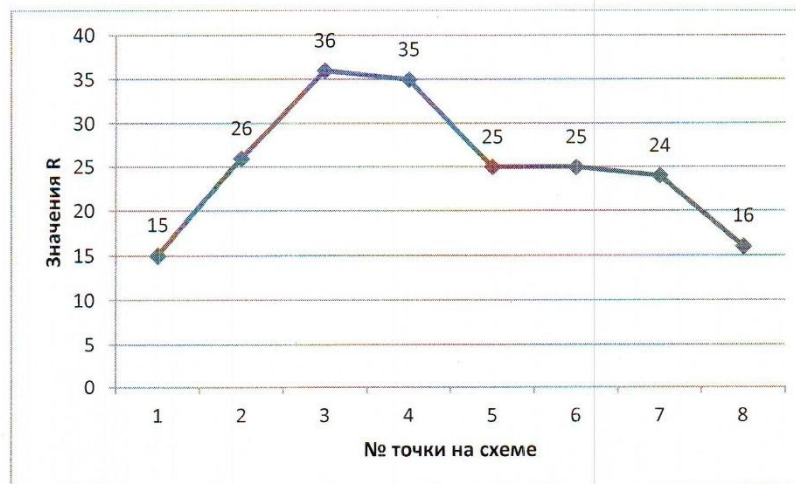


Рисунок 14 – Карта распределения значений R на металлической трубе

На основании проведенных измерений, представленных в таблице 4 и рисунке 14 было установлено, что зона наибольшего термического повреждения расположена в месте проведения измерений под № 3

9 Требование безопасности

К исследованию места пожара допускаются лица, которые:

- ознакомлены с правилами безопасности труда при исследовании пожаров;
- прошли инструктаж по безопасным методам работы при исследовании места пожара.

Основными вредными и опасными факторами при исследовании места пожара являются:

- возможность обрушения конструкционных и декоративных элементов зданий и сооружений;
- возможность влияния тепловых потоков, огня и раскаленных поверхностей;
- опасность поражения электрическим током;
- опасность отравления токсичными веществами;
- опасность контакта с нагретыми до высоких температур поверхностями;
- опасность травмирования колючими и режущими предметами и обломками стекла. Во время исследования места пожара необходимо применять меры безопасности во избежание влияния перечисленных факторов.

Все работы на месте пожара необходимо выполнять точно, тщательно, без суеты.

Участники исследования должны быть снабжены средствами индивидуальной защиты.

В случае возникновения опасности сдвигов, обвалов, поражения электрическим током немедленно закончить выполнение работы, выйти из зоны возможного поражения и не начинать работу до устранения опасных факторов.

10 Список использованных источников

1. Исследование и экспертиза пожаров. Словарь общих и специальных терминов. Под ред. д.т.н., профессора, засл. деят. науки РФ И.Д. Чешко. – М.:ВНИИПО, 2009. – 520 с.
2. Синтез цвета // Фотокинетика: Энциклопедия / Гл. ред. Е. А. Иофис. — М.: Советская энциклопедия, 1981. — 447 с.
3. Осмотр места пожара: Методическое пособие/ И.Д. Чешко, Н.В. Юн, В.Г. Плотников и др. – М.:ФГУ ВНИИПО, 2004. – 503 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты внедрения основных результатов диссертационной
работы



МЧС РОССИИ
Сектор № 3 федерального государственного бюджетного учреждения
«Судебно-экспертное учреждение
федеральной противопожарной службы № 93
«Испытательная пожарная лаборатория» МЧС России»
(Сектор № 3 ФГБУ «СЭУ ФПС № 93 «ИПЛ» МЧС России)»

пр. Ленинградский, 10 г. Железногорск Красноярского края, 662978
телефон/факс (3919) 74-70-34, sector3ip193@mail.ru

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника ФГБУ «СЭУ
ФПС № 93 «ИПЛ» МЧС России»
подполковник внутренней службы



Шатов М.А.
20__ г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт, подтверждает, что результаты работы Горбунова Александра Сергеевича, представленные в диссертационной работе на тему «Разработка метода и прибора контроля степени термических повреждений на месте пожара», использованы и внедрены в работу для исследования веществ, материалов и изделий на месте пожара специалистами и экспертами Сектора № 3 ФГБУ «СЭУ ФПС № 93 «ИПЛ» МЧС России».

Разработанный метод и прибор неразрушающего контроля термических повреждений веществ, материалов и изделий Горбунова Александра Сергеевича позволяет объективно определить максимальные зоны термических повреждений на пожаре, что способствует установлению места первоначального горения (очага пожара).

Рекомендации по практическому применению данного метода и прибора контроля приняты для дальнейшего использования в работе при исследовании пожаров.

Начальник Сектора № 3 ФГБУ «СЭУ
ФПС № 93 «ИПЛ» МЧС России»
майор внутренней службы

А.В. Коровченко

Главный эксперт Сектора № 3 ФГБУ «СЭУ
ФПС № 93 «ИПЛ» МЧС России»
подполковник внутренней службы

А.А. Шереметьев

УТВЕРЖДАЮ
Начальник ФГБОУ ВО
Уральский институт ГПС МЧС России
генерал-майор внутренней службы


А.М. Тарарыкин
« » 20__ г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования
Горбунова Александра Сергеевича на тему: «Разработка метода и прибора контроля
степени термических повреждений материалов на месте пожара»

Комиссия в составе председателя начальника учебно-научного комплекса обеспечения пожарной безопасности объектов и населенных пунктов кандидата технических наук, полковника внутренней службы Сатюкова Романа Сергеевича и членов комиссии: профессора кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз кандидата технических наук Беззапонной Оксаны Владимировны, старшего преподавателя кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз подполковника внутренней службы Глухих Павла Александровича составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Горбунова А.С. на тему: «Разработка метода и прибора контроля степени термических повреждений на месте пожара», а именно:

1. Метод неразрушающего контроля термических повреждений веществ, материалов и изделий на месте пожара, основанный на измерении цветовых характеристик;

2. Прибор контроля термических повреждений веществ, материалов и изделий на месте пожара;

3. Результаты исследований изменений цветовых характеристик материалов от температуры и времени термического воздействия и критерий оценки степени их повреждений;

4. Методика определения степени термических повреждений веществ, материалов и изделий методом и прибором, основанном на измерении цветовых характеристик.

внедрены в образовательный процесс и используются при проведении лекционных, практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Расследование пожаров», «Расследование и экспертиза пожаров», «Пожарно-техническая экспертиза».

Председатель комиссии:
начальник УНК ОПБО и НП
кандидат технических наук
полковник вн.сл.

 Сатюков Р.С.

Члены комиссии
профессор кафедры К и ИТЭ
кандидат технических наук

 Беззапонная О.В.

старший преподаватель кафедры
К и ИТЭ
подполковник вн.сл.

 Глухих П.А.

УТВЕРЖДАЮ
Начальник ФГБОУ ВО Сибирская
пожарно-спасательная академия
ГПС МЧС России
полковник внутренней службы

И.Ю. Сергеев
20 22 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования
Горбунова Александра Сергеевича на тему: «Разработка метода и прибора контроля
степени термических повреждений на месте пожара»

Комиссия в составе председателя – заместителя начальника кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики кандидата педагогических наук Трояка Евгения Юрьевича и членов комиссии: профессора кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики кандидата технических наук Пожарковой Ирины Николаевны; старшего преподавателя кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики Слепова Александра Николаевича составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Горбунова А.С. на тему: «Разработка метода и прибора контроля степени термических повреждений на месте пожара», а именно:

1. Метод неразрушающего контроля термических повреждений веществ, материалов и изделий на месте пожара, основанный на измерении цветовых характеристик;

2. Прибор контроля термических повреждений веществ, материалов и изделий на месте пожара;

3. Результаты исследований изменений цветовых характеристик материалов от температуры и времени термического воздействия и критерий оценки степени их повреждений;

4. Методика определения степени термических повреждений веществ, материалов и изделий методом и прибором, основанном на измерении цветовых характеристик.

внедрены в образовательный процесс и используются при проведении лекционных, практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Расследование пожаров», «Расследование и экспертиза пожаров», «Пожарно-техническая экспертиза».

Председатель комиссии:
Заместитель начальника кафедры
инженерно-технических экспертиз и криминалистики
кандидат педагогических наук



Е.Ю. Трояк

Члены комиссии
Профессор кафедры
инженерно-технических экспертиз и криминалистики
кандидат технических наук



И.Н. Пожаркова

Старший преподаватель кафедры
инженерно-технических экспертиз и криминалистики



А.Н. Слепов