

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Кропотова Светлана Сергеевна

**ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ И
ОТДЕЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗГОРАНИЯХ В
ПОМЕЩЕНИЯХ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

1.3.17 Химическая физика, горение и взрыв, физика
экстремальных состояний вещества

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Стрижак Павел Александрович

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Киверин Алексей Дмитриевич

доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Объединенный институт
высоких температур Российской академии наук,
главный научный сотрудник

Мазной Анатолий Сергеевич

доктор технических наук, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Томский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук, заместитель
директора по научной работе

Защита состоится 26 декабря 2023 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.06 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан 26 октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.06
д.т.н., доцент

Глушков Дмитрий Олегович

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized Cyrillic letters, likely representing the name of the official.

Общая характеристика работы

Актуальность. Обеспечение пожарной безопасности зданий и сооружений является приоритетной задачей в любой отрасли промышленности. Для обеспечения необходимых противопожарных мер важно повысить эффективность систем идентификации возгораний и пожаротушения. Современные технологии имеют ограничения. В частности, в большинстве систем, установленных в здании для обнаружения возгорания, используются данные, поступающие с пожарных извещателей (тепловых, дымовых и др.), достоверность и скорость обнаружения очага возгорания которыми зачастую довольно низкие. Для повышения достоверности идентификации возгорания помимо пожарных датчиков используются специализированные системы алгоритмического анализа изображений. Однако надежность срабатывания таких систем не всегда высокая, что обусловлено задержками обнаружения очага горения, большим объемом вычислений при реализации алгоритмов обнаружения, а также ручным и автоматическим извлечением данных с изображений. Системы, в которых используются алгоритмы, заданные на основе правил машинного обучения с применением изображений, не всегда могут адаптироваться к быстрым изменениям среды. В связи с этим актуальность приобретают вопросы увеличения входных данных в виде дополнительных индикаторов, идентифицирующих возгорание. Наиболее существенно меняющимися в условиях возгораний твердых материалов являются механические, физические (в том числе плотность, пористость, влагопоглощение), теплофизические (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность) и термокинетические характеристики, а также свойства, отражающие пожарную опасность (горючесть, тепловыделение, дымообразование, интенсивность образования токсичных продуктов горения). В связи с этим актуальна задача определения характеристик процессов тепломассопереноса, возникающих на ранних стадиях возникновения горения, а также свойств потенциально горючих материалов с учетом неоднородности последних (их типа, плотности, пористости, размеров элементов и др.), которые позволят выявить ключевые особенности протекания данных процессов и их характеристики при различных параметрах внешней среды. Это мотивировало настоящее исследование.

Исследованиям процессов термического разложения материалов и анализу теплофизических характеристик материалов, а также определению термокинетических констант их термического разложения посвящены работы коллективов под руководством ученых Гришина А.М., Лободы Е.Л., Киверина А.Д., Коробейничева О.П., Конева Э.В., Кузнецова Г.В., Копылова Н.П., Мазного А.С., Салганского Е.А. и др. Установлены состав и концентрации продуктов термического разложения и горения материалов и веществ. Определены условия воспламенения строительных, отделочных, лесных горючих и других материалов. Особенно можно выделить результаты научно-исследовательской деятельности ВНИИПО МЧС РФ. Коллектив данной организации проводит прикладные научно-исследовательские, опытно-конструкторские работы по созданию систем и методов предупреждения и тушения пожаров, изучению процессов самовозгорания веществ и материалов и тушению последних специализированными огнетушащими составами. Однако пока недостаточно результатов экспериментальных и теоретических исследований, которые необходимы для наиболее полного описания процессов тепломассопереноса, предшествующих воспламенению горючих материа-

лов при типичных причинах возгораний. Эти данные особенно необходимы для развития физических и математических моделей возникновения возгораний и распространения пожаров в зданиях и сооружениях, а также для их использования в прогностическо-программно-аппаратном комплексе систем тушения с обратной связью.

Цель диссертационной работы – определение необходимых условий для ранней идентификации и локализации термического разложения строительных и отделочных материалов на базе результатов экспериментальных исследований взаимосвязанных процессов тепломассопереноса при возгораниях в помещениях.

Для достижения поставленной цели решались **задачи**:

1. Сравнительный анализ известных способов раннего обнаружения термического разложения и пламенного горения в помещениях, обоснованный выбор номенклатуры типичных строительных и отделочных материалов, разработка методик и стендов для проведения исследований процессов тепломассопереноса с учетом физико-химических превращений.

2. Экспериментальное определение свойств типичных горючих строительных и отделочных материалов с дальнейшим созданием информационной базы экспериментальных данных со значениями теплофизических характеристик и констант термического разложения материалов с учетом неоднородности их состава.

3. Регистрация характеристик очага возгорания на начальной стадии термического разложения материалов и перехода к пламенному горению: особенностей выделения газообразных продуктов термического разложения для каждого из группы использованных строительных и отделочных материалов, а также минимальных температур и тепловых потоков, при которых данные продукты достоверно регистрируются газоаналитическим оборудованием.

4. Исследование влияния температуры внешней среды, массы и типа материала, а также его огнезащитной обработки на диапазоны концентраций газообразных продуктов термического разложения и пламенного горения.

5. Обоснование возможности ранней идентификации возгораний материалов по результатам регистрации газообразных продуктов их термического разложения.

6. Определение характеристик процессов тепломассопереноса, происходящих на ранних стадиях взаимодействия огнетушащих составов с материалом при подавлении его термического разложения.

7. Разработка рекомендаций по использованию полученных результатов для повышения пожарной безопасности зданий и сооружений.

Научная новизна работы. По результатам экспериментальных исследований получены зависимости коэффициентов теплопроводности, удельной теплоемкости, температуропроводности, энергии активации и предэкспоненциального множителя от размеров частиц и плотности слоя горючего материала. При исследовании термокинетических констант показано, что наибольшие значения энергии активации зарегистрированы при минимальной плотности и максимальной дисперсности измельченного горючего материала. Обоснована возможность идентификации очага возгорания и типа доминирующего в очаге материала по концентрациям газов в продуктах термического разложения и горения, а также по совокупности численных значений скоростей изменения температур и концентраций. Сформулированы рекомендации по применению газоаналитического оборудования при идентификации продуктов термического разложения и пламенного горения материалов на ранних стадиях пожаров в помещениях с це-

лью их эффективного подавления. Обосновано, что получение своевременной информации о доминирующем материале в очаге горения позволит определить условия подачи огнетушащей жидкости с рациональной плотностью орошения. Установлены необходимые и достаточные для эффективного тушения разлагающихся материалов способы подачи воды и огнетушащих составов на ее основе.

Теоретическая значимость работы. Результаты выполненных экспериментальных и численных исследований процессов тепломассопереноса представляют новые знания об условиях и характеристиках локализации термического разложения строительных и отделочных горючих материалов для наиболее частых по статистике причин возгораний: неосторожное обращение с огнем, нарушение правил эксплуатации нагревательного оборудования. Экспериментально установленные факторы, характеризующие поведение материалов на начальных стадиях термического разложения, а также тенденции изменения газообразных продуктов их термического разложения, являются основой для разработки математической модели тепломассопереноса, позволяющей прогнозировать условия, предшествующие пожарам в помещениях.

Практическая значимость работы. Полученные результаты экспериментальных исследований процессов тепломассопереноса, а также сформулированные заключения и аппроксимационные выражения являются основами разработки новых и совершенствования применяющихся в настоящее время технологий, направленных на повышение пожарной безопасности зданий и сооружений. К ним относятся технологии: определения потенциально пожароопасных участков; обнаружения и тушения возгораний в зданиях и помещениях различного назначения, тушения пожаров тонкораспыленной водой. Возможна настройка параметров активации и приостановки работы системы пожаротушения по показателям группы сенсоров с целью снижения расхода воды и предотвращения чрезмерного заливания площади помещения. Практическая значимость диссертации подтверждена полученными патентами и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Разработана группа технических решений в области пожарной безопасности в виде способов ранней идентификации возгораний строительных и отделочных материалов в помещениях по характеристикам работы комбинации технических средств разного назначения: тепловые и дымовые пожарные извещатели, газоаналитическое и видеорегистрирующее оборудование, с использованием которых осуществляется контроль изменения во времени концентраций CO , CO_2 , O_2 и других компонентов газовой среды, а также температуры в зоне регистрации.

Методология и методы исследования. Для определения теплофизических характеристик (температуропроводности, теплопроводности и удельной теплоемкости) материалов использовался метод лазерной вспышки (система «DLF-1200 TA Instruments»). Термокинетические константы термического разложения материалов определены с использованием термоанализатора «NETZSCH STA 449F3». Изучение состава газообразных продуктов термического разложения и горения материалов проводилось с использованием ИК-спектроскопии и газоаналитического оборудования. Для численного исследования термического разложения материалов в изолированном пространстве использовалось программное обеспечение COMSOL Multiphysics.

Положения и основные результаты, выносимые на защиту:

1. Основными факторами, влияющими на теплофизические характеристики твердых материалов, являются: пористость, плотность, размеры дисперсной фазы. В частности, теплопроводность образцов древесины возрастает на 40–47 % при повышении

плотности с 750 кг/м^3 до 1120 кг/м^3 , и на 30–35 % с ростом размеров частиц материала с 60 мкм до 150 мкм. Получены математические выражения для прогнозирования значений теплофизических характеристик материалов при изменении выделенных свойств в диапазонах, соответствующих промышленным приложениям.

2. Плотность слоев материалов оказывает более существенное влияние на термодинамические константы их термического разложения по сравнению с пористостью и размерами частиц дисперсной фазы. Зарегистрировано увеличение энергии активации на 4–34 % при повышении размеров частиц от 60 мкм до 140 мкм и изменение энергии активации на 4–41 % при повышении плотности образца с 206 кг/м^3 до 955 кг/м^3 .

3. С применением газоаналитических систем на основе электрохимических и оптических анализаторов, спектрометров и промышленных сенсоров определены скорости и длительности изменения концентраций продуктов термического разложения и пламенного горения древесины, линолеума, ДСП, ДВП, ПВХ, пластика и других строительных и отделочных материалов в помещениях. Полученные данные обосновывают возможность использования газового состава смеси, образующейся на начальной стадии термического разложения и горения материалов, для идентификации очага возгорания.

4. Разработаны прогностические модели тепломассопереноса для проектирования малоинерционных систем идентификации термического разложения и возгораний материалов под воздействием наиболее типичных источников пожарной опасности (неосторожное обращение с огнем, нарушения правил эксплуатации нагревательного оборудования, замыкание электрических цепей, локальные источники нагрева), отличающиеся учетом совокупности взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и химического реагирования.

5. На базе результатов экспериментальных и теоретических исследований предложены технические решения для малоинерционной идентификации пожароопасных условий в помещениях различного назначения. Предложенные способы позволяют идентифицировать на ранней стадии (в несколько раз быстрее существующих аналогов) термическое разложение и горение, причину и тип материала, площадь реагирования, определить рациональные условия применения огнетушащих составов.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность полученных результатов подтверждается оценкой систематических и случайных погрешностей проведенных измерений. Случайные ошибки рассчитывались по результатам серии экспериментов, проведенных в идентичных условиях при фиксированных значениях варьируемых факторов. Выполненное сравнение результатов экспериментальных исследований с известными данными других исследователей и результатами математического моделирования процессов тепломассопереноса, термического разложения и пламенного горения материалов, позволило обосновать адекватность разработанных моделей и методик.

Связь работы с научными программами и грантами. Исследования выполнены при поддержке грантов Российского научного фонда: № 18-19-00056 «Подавление пламенного горения и термического разложения конденсированных веществ на больших площадях при специализированной подаче воды перед и во фронте горения», 2018–2020 г., № 21-19-00009 «Обоснование по результатам экспериментальных и теоретических исследований возможности создания технологий с обратной связью для подавления горения и дымоосаждения в закрытых и изолированных от внешней среды помещениях», 2021–2023 г., № 18-71-10002-П «Коагуляция, дробление и фрагментация

капель жидкости в многофазных и многокомпонентных газопарокапельных средах, 2021–2023 г. Тестирование технических решений, полученных в рамках диссертационной работы, выполнено в рамках научного проекта передовой инженерной школы ТПУ совместно с государственной корпорацией «Росатом».

Личный вклад состоит в планировании и проведении экспериментальных исследований; анализе, обработке и обобщении полученных результатов; оценке систематических и случайных погрешностей; формулировании практических рекомендаций; апробации результатов на научных конференциях и их опубликовании в рецензируемых периодических научных изданиях; формулировке основных защищаемых положений и выводов. Автор выражает благодарность коллегам по лаборатории тепломассопереноса ТПУ за помощь в проведении исследовании, обсуждении полученных результатов и подготовке совместных публикаций.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на XXII Международном симпозиуме имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2018 г.); XXII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 125-летию со дня основания Томского политехнического университета (г. Томск, 2021 г.); Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых ученых «XXXVII Сибирский теплофизический семинар» (г. Новосибирск, 2021 г.), XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2021 г.), Шестнадцатой Всероссийской (восьмой Международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Энергия 2021» (г. Иваново, 2021 г.), Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену, 17–22 октября 2022 г. Москва, НИУ «МЭИ», XVII Всероссийской школе-конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (п. Шерегеш, 2023 г.).

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 8 статьях в рецензируемых научных изданиях, из них 7 работ в периодических изданиях, индексируемых международными наукометрическими базами данных «Web of Science» и «Scopus» (Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (Q1, ИФ=6); Powder Technology (Q1, ИФ=4,142); Fire Safety Journal (Q1, ИФ=3,78); Forests (Q1, ИФ=3,282); Journal of Engineering Physics and Thermophysics (Q2, ИФ=0,331); Thermal Science (Q3, ИФ=1,971)), 1 работа в рецензируемом российском научном издании. Кроме этого, результаты исследований опубликованы в виде 7 докладов и тезисов в сборниках научных трудов конференций, 1 коллективной монографии в издательстве СО РАН. Получены 3 патента на изобретения и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 187 страницах, состоит из введения, 3 глав, основных результатов и выводов, списка литературы, включающего 167 наименований, содержит 31 таблицу, 42 рисунка и приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, а также практическая и теоретическая значимость работы, научная новизна и достоверность результатов, личный вклад автора.

В первой главе проанализированы современные представления о принципах идентификации термического разложения материалов и последующей локализации горения. Выделены основные нерешенные пока задачи, связанные с ранним обнаружением возгораний в помещениях и определением пожароопасных свойств горючих материалов. В выводах к первой главе отмечено, что пока недостаточно внимания уделено изучению особенностей термического разложения материалов на ранних стадиях при типичных причинах возгораний (особенно в помещениях). Теплофизические характеристики материалов, термокинетические константы их термического разложения, способность к возгоранию и поддержанию горения необходимо учитывать в системах прогноза пожарной опасности, поскольку это позволит унифицировать методы обнаружения возгораний, уйти от описательной основы к физическому обоснованию. Важной задачей является установление особенностей типичных потенциально горючих материалов, присутствующих в различных категориях изолированных помещений. Такие исследования необходимы для анализа как особенностей начальных стадий возникновения горения и распространения пожара, так и локализации огня и ликвидации последствий. В первой главе также отмечается, что настройка параметров систем пожаротушения, а также современных систем обнаружения пожарной опасности в зданиях базируется на анализе параметров газовой среды в контролируемом помещении. Изучение тенденций изменения газообразных продуктов термического разложения и горения типичных материалов является фундаментальным шагом к изучению диапазонов выделения летучих соединений, которые поддерживают воспламенение и горение материала. На сегодняшний день данных по диапазонам изменения концентраций газов, выделяющихся на стадии термической деструкции строительных и отделочных материалов, недостаточно для разработки физических и математических моделей возникновения и распространения пожаров и, как следствие, повышения эффективности пассивных и активных методов локализации горения.

Во второй главе приведены результаты экспериментального определения характеристик термического разложения материалов при разных источниках пожарной опасности. Изучено влияние неоднородности структуры материала на его теплофизические характеристики и термокинетические константы термического разложения и окисления. Исследован состав газообразных продуктов термического разложения твердых материалов. Получены данные по качественному и количественному составу продуктов горения древесины, текстильных и отделочных материалов. Установлены отличия концентраций газов при горении материалов при температурах, типичных для пожаров в помещениях. В § 2.1 приведены результаты экспериментального определения теплофизических характеристик горючих материалов (коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и удельной теплоемкости). Эксперименты проводились с использованием метода лазерной «вспышки» и системы «DLF-1200 TA Instruments». Погрешности определения коэффициентов температуропроводности данным методом составляют $\pm 2,3\%$, теплоемкости – $\pm 4\%$, теплопроводности – $\pm 5\%$. Измерения проводились в диапазоне температур 295–450 К. Выбор данного диапазона обусловлен условиями, при которых происходит интенсивный нагрев материала, выход связанной воды и начинается термическое разложение. Варьирование плотности навески и размеров частиц проводилось в диапазонах, характерных реальным значениям исходных материалов: 750–1200 кг/м³ для плотности навески материала и 50–150 мкм для размеров частиц. При проведении исследований выбраны материалы, имеющие широкое распро-

странение в энергетике и строительной индустрии, и представляющие наибольшую пожарную опасность – древесина и отходы ее переработки (древесина, используемая в теплоэнергетике, хвоя, листья). По результатам экспериментальных исследований установлено, что размер частиц оказывает существенное влияние на теплофизические характеристики, так как заметны достаточно существенные изменения таких характеристик с увеличением (уменьшением) степени измельчения исходного материала. Определены значения теплофизических характеристик рассматриваемых видов горючих материалов, проведен расчёт при насыпной плотности материала. Полученные таким образом результаты позволяют рассчитывать значения теплофизических характеристик исследованных материалов при различной плотности.

В § 2.2 приведены результаты экспериментального определения термокинетических констант (энергия активации и предэкспоненциальный множитель) процесса термического разложения хвои сосны. Исследования проводились на синхронном термоанализаторе «NETZSCH STA 449F3». Термический анализ проводился в следующих условиях: температура 300 К – 1270 К, скорость нагрева 10 К/мин в среде аргона и кислорода с расходом газа 100 мл/мин. Методом дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) определена кинетика процесса термического разложения хвои сосны. Результатом термогравиметрического анализа являются зависимости (рис. 1), демонстрирующие связь скорости убыли массы и температуры, а также тепловые эффекты реакций. Определены пиковые температуры, при которых происходят существенные изменения скорости убыли массы, максимальные значения которых на рис. 1 иллюстрируются локальными экстремумами. По ТГ и ДТГ кривым, приведенным на рис. 1, выделены начальная стадия (выход влаги) и продолжительность процесса сушки. Видно, что процесс выхода влаги для исследованных материалов происходит в диапазоне температур 293–428 К (с пиковым значением при температуре около 373 К).

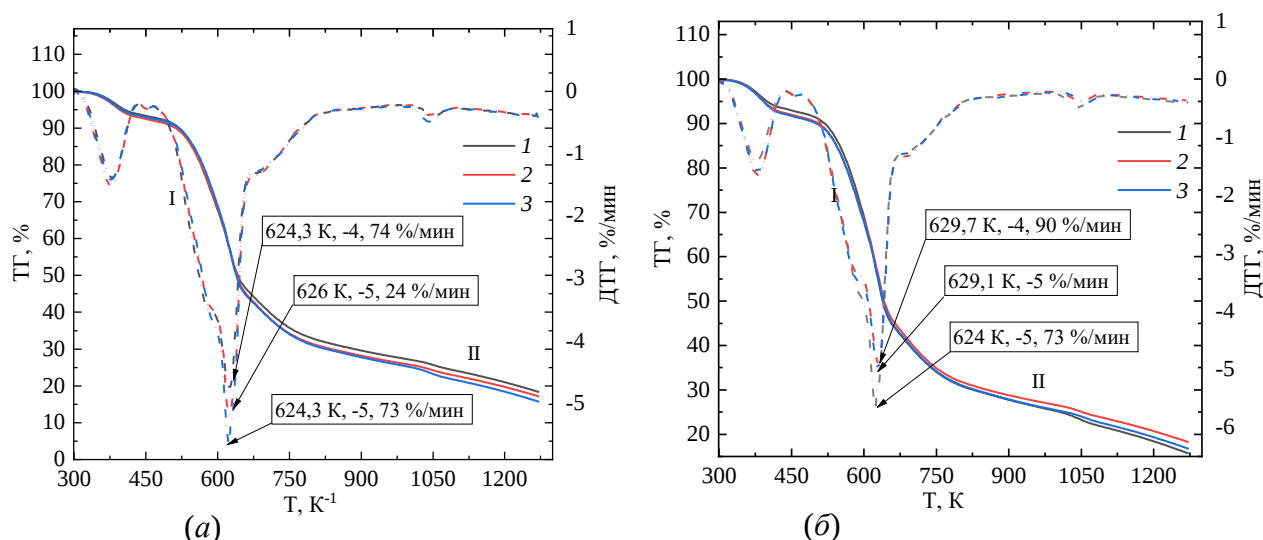


Рисунок 1 – Результаты ТГ (I), ДТГ (II) анализов в среде аргона для хвои сосны при насыпной плотности материала и варьировании размера частиц (а): 1 – 60 мкм; 2 – 100 мкм; 3 – 140 мкм; при размерах частиц около 140 мкм и варьировании плотности навески материала (б): 1 – 206 кг/м³; 2 – 736 кг/м³; 3 – 955 кг/м³

Стадия выхода летучих веществ соответствует диапазону температур 473–773 К и оказывает существенное влияние на процесс термического разложения горючего материала. Пик скорости выхода летучих веществ в зависимости от размера частиц материала соответствует диапазону температур 624–626 К. На рис. 1 видно, что размер ча-

стиц практически не влияет на пиковые значения температур стадий разложения. Однако изменение размера частиц оказывает существенное влияние на скорость потери массы, которая, в свою очередь, соответствует изменению химической кинетики. В частности, видно (рис. 1), что увеличение размера частиц приводит к росту скорости потери массы при пиковых значениях температур. Сформулирована гипотеза, что повышенный градиент температуры оказывает заметное влияние на скорость потери массы частиц более крупных размеров. Из рис. 1 видно, что на начальных стадиях частицы меньшего размера разлагаются быстрее, чем более крупные. При повышении температуры скорость реакции для частиц меньшего размера увеличивается медленнее, чем для крупных – пиковая скорость потери массы становится выше. На завершающей стадии термического разложения горючего материала происходило незначительное изменение его массы. Для вычисления кинетических параметров осуществлялась линеаризация экспериментальных данных в координатах $\ln(k) = f(1000/T)$. Полученные термокинетические константы разложения горючего материала в инертной и окислительной средах при варьировании размеров частиц и плотности материала приведены в таблицах 1 и 2. Наибольшие значения энергии активации зарегистрированы для материала с насыпной плотностью 206 кг/м³ и размерами частиц 140 мкм, т.е. при минимальной плотности и максимальной дисперсности измельченного материала.

Таблица 1 – Термокинетические константы процесса термического разложения хвои сосны в инертной и окислительной среде при варьировании размера частиц (при плотности материала 206 кг/м³)

Размер частиц, мкм	Инертная среда					
	E_1 , кДж/моль 450–540 К	k_2 , 1/с	E_2 , кДж/моль 540–650 К	k_2 , 1/с	E_3 , кДж/моль 650–900 К	k_3 , 1/с
60	113,8	$8,12 \cdot 10^{10}$	82,93	$4,12 \cdot 10^6$	38,5	$1,154 \cdot 10$
100	107,1	$1,15 \cdot 10^{10}$	85,06	$5,21 \cdot 10^6$	44,22	$2,28 \cdot 10^2$
140	108,3	$1,125 \cdot 10^{10}$	103	$1,73 \cdot 10^8$	50,08	$6,25 \cdot 10^2$
Размер частиц, мкм	Окислительная среда (450–900 К)					
	E , кДж/моль		k , 1/с			
60	197,2		$1,02 \cdot 10^{13}$			
100	134,7		$6,26 \cdot 10^8$			
140	183,8		$2,11 \cdot 10^8$			

Таблица 2 – Термокинетические константы процесса термического разложения хвои сосны в инертной и окислительной среде при размерах частиц около 140 мкм и варьировании плотности материала

Плотность материала, кг/м ³	Инертная среда					
	E_1 , кДж/моль 450–540 К	k_2 , 1/с	E_2 , кДж/моль 540–650 К	k_2 , 1/с	E_3 , кДж/моль 650–900 К	k_3 , 1/с
206	108,3	$1,125 \cdot 10^{10}$	103	$1,73 \cdot 10^8$	50,08	$6,25 \cdot 10^2$
736	88,66	$1,18 \cdot 10^8$	106,7	$3,25 \cdot 10^8$	22,85	5,26
955	81,62	$9,5 \cdot 10^7$	98,49	$6,75 \cdot 10^7$	29,9	16,05
Плотность материала, кг/м ³	Окислительная среда (450–900 К)					
	E , кДж/моль		k , 1/с			
206	183,8		$2,11 \cdot 10^8$			
736	211		$2,14 \cdot 10^{14}$			
955	185,2		$5,6 \cdot 10^{12}$			

Параграф 2.3 посвящен определению состава газообразных продуктов термического разложения группы строительных и отделочных материалов. Проведение экспериментальных исследований осуществлялось с использованием стенда, схема которого представлена на рис. 2.

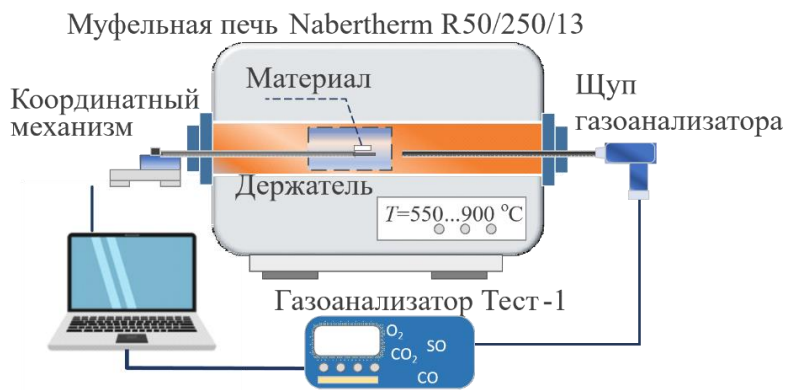


Рисунок 2 – Схема стенда при регистрации концентраций газов, формирующихся при нагреве материалов

В помещениях пожар может быть следствием действия открытого источника огня или предметов, нагретых до высоких температур. В связи с этим в экспериментах воспроизводились условия возникновения горения материалов в закрытом помещении, вызванные лучистым теплообменом с нагретыми до высоких температур объектами, а также действием открытого пламени. Для создания среды высокотемпературного окислителя

использовалась теплоизолированная трубчатая муфельная печь Nabertherm R 50/250/13 (максимальная температура 1573 К). Контроль и установка необходимой температуры в печи обеспечивались с помощью встроенных регулятора и термопары типа S (платинородий-платиновая; максимальная рабочая температура 1623 К, предел допускаемых отклонений ± 1 К). В ходе проведения экспериментов температура окислителя варьировалась в диапазоне 523–1173 К. Такие условия нагрева выбраны для воспроизведения условий объемного нагрева материалов в помещении, температура в котором достаточна для инициирования процесса термического разложения. Анализ литературных источников показал, что в зависимости от размеров помещения, массы горючих материалов и условий нагрева, температура окислителя может соответствовать диапазону 623–1273 К. Состав газовой среды анализировался с использованием анализатора Тест-1 (погрешность измерения компонентов газовой смеси не превышает 5%, инерционность измерения для использованных сенсоров составляла 5–15 с). Специализированное программное обеспечение позволяло регистрировать на ПК изменение концентраций газообразных продуктов термического разложения в реальном времени. Вычисление средних значений концентраций газообразных веществ проводилось с применением метода трапеций. Экспериментальные исследования позволили определить качественный и количественный состав продуктов термического разложения древесины, текстильных и отделочных материалов. Полученные численные значения концентраций газообразных продуктов термического разложения использованы для расчета их удельного выхода Y_i , представляющего собой отношение массы образующегося газа (г) к массе исследуемого материала (г). Для расчета использовалась следующая формула (на примере расчета для CO): $Y_i = \frac{CO^{avg} \cdot v \cdot t}{m}$, (г/г), где CO^{avg} – среднее значение концентрации CO, мг/м³; t – время, с; v – производительность насоса газоанализатора (расход газа, отбираемый газоанализатором во время эксперимента (0,00001 м³/с)); m – начальная масса материала, г.

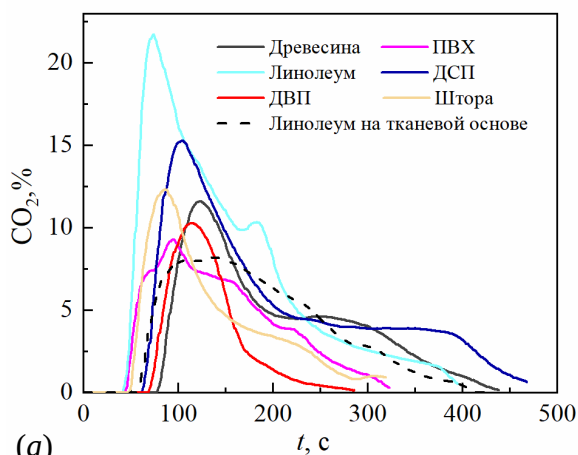
Горение отделочных материалов (древесина, пластик, текстиль) характеризуется определенными особенностями изменения концентраций двух основных газов: CO и CO₂. На этапе возгорания во время термической деструкции материала концентрации оксида углерода растут, а при переходе к интенсивному пламенному горению начинают снижаться. При этом концентрации углекислого газа, наоборот, увеличиваются. На рис. 3 представлены тренды концентраций компонентов газовой смеси при температуре, соответствующей температуре в зданиях при пожаре (1173 К). Полученные

тренды иллюстрируют существенные отличия не только концентраций анализируемых газов, но и длительностей сохранения высоких значений последних.

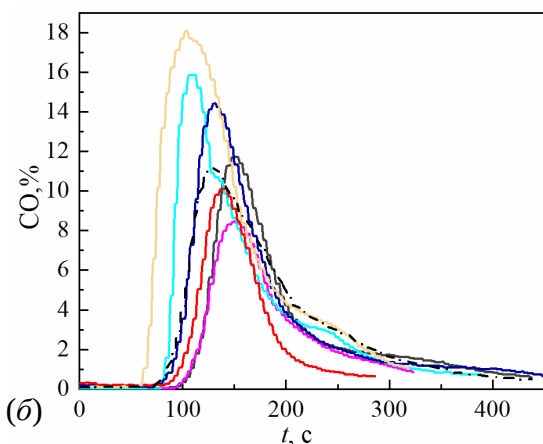
В частности, видно, что максимальный выход CO_2 и CO происходит при термическом разложении линолеума, рулонных штор и древесно-стружечных плит (ДСП). Это объясняется высоким содержанием углерода в данных материалах по сравнению с остальными (около 65% в линолеуме, пластике и полиэстере и около 48% в ДСП). Повышенное содержание золы в материале приводит к образованию зольной оболочки. Это затрудняет диффузию кислорода внутрь материала при горении, вызывая тем самым его неполное сгорание. Зарегистрированные в проведенных экспериментах

концентрации основных дымовых газов, выделяемых при горении материалов помещений, обосновывают возможность обнаружения возгорания и идентификации очага горения по изменению состава газовой среды в помещении, так как для каждого из материалов зарегистрирована отличительная особенность газового состава продуктов сгорания.

В третьей главе представлены результаты экспериментального определения концентраций компонентов продуктов термического разложения строительных и отделочных материалов с применением газоаналитических систем на основе лабораторных анализаторов, спектрометров и промышленных датчиков. Определены пороговые значения концентраций компонентов газовой смеси (таблица 3). Полученные результаты свидетельствуют о достаточности анализа газовой смеси, образующейся при термическом разложении материалов помещений, для идентификации очага с выделением типа материала, площади реагирования и причины возгорания. Установлено, что интенсивное термическое разложение ДСП, которое происходит при температуре 823 К, может быть идентифицировано по минимальным значениям концентраций соот-



(а)



(б)

Рисунок 3 – Тренды CO_2 (а) и CO (б), регистрируемые при горении материалов

ответствующих газов (для данного материала зарегистрированы минимальные значения CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , SO_2 и H_2S). Горение древесины характеризуется максимальными значениями H_2 (0,77%), SO_2 (17 ppm) и H_2S (35 ppm). Для ДВП характерно увеличение концентраций CO_2 и CO (15,42 и 23,64%, соответственно). Линолеум на тканевой основе достоверно идентифицируется по средним (относительно остальных исследуемых материалов) значениям концентраций CO_2 , CO и CH_4 . Отличительными особенностями процесса горения ПВХ являются минимальные значения концентраций CH_4 и H_2S . Идентификация горения древесины на начальном этапе может быть проведена по максимальным значениям концентраций CH_4 и минимальным значениям концентраций CO , H_2 и H_2S . Термическое разложение ДВП и ДСП происходит при 623 К, поливинилхлоридного линолеума и линолеума на тканевой основе при 573–623 К и характеризуется практически идентичным составом смеси газообразных продуктов. Так, для ДСП

и ДВП характерны максимальные значения концентраций CO и H_2 . Термическое разложение линолеума может быть идентифицировано по средним значениям концентраций H_2 , CH_4 , SO_2 и H_2S . Начало термического разложения рулонной шторы из пластика и полиэстера сопровождается выделением максимальных значений концентраций CO_2 и минимальных значений SO_2 и H_2S . Полученный результат обосновывает возможность идентификации очага возгорания на этапе термической деструкции материала.

Таблица 3 – Максимальные значения концентраций газообразных продуктов, образующихся при термическом разложении и горении материалов помещений

Материал	Максимальные (пиковые значения концентраций, определяемые по трендам изменения газообразных продуктов)					
	CO_2 %	CO %	H_2 %	CH_4 %	SO_2 ppm	H_2S ppm
Древесина (523 K)	0	0,22 (2)	0,03 (2)	0,08 (1)	5 (3)	1 (2)
ДСП (623 K)	2,74 (3)	0,57 (1)	0,06 (1)	0	6 (1)	2 (3)
ДВП (623 K)	2,06 (3)	0,68 (1)	0,06 (1)	0	5 (3)	3 (1)
Рулонная штора (пластик, полиэстер) (673 K)	3,57 (1)	0,44 (3)	0,04	0	4 (2)	1 (2)
ПВХ (573 K)	0	0,2 (2)	0,04	0	5 (3)	1 (2)
Линолеум (573 K)	0	0,47	0,05 (3)	0,03 (3)	5 (3)	2 (3)
Линолеум на тканевой основе (623 K)	0,09	0,42 (3)	0,05 (3)	0	6 (1)	2 (3)
	Максимальные значения*	(1)	Минимальные значения*	(2)	Средние значения*	(3)

*Максимальные, минимальные и средние концентрации определены по вертикальному столбцу таблицы (для определенной концентрации компонента газовой среды: CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , SO_2 , H_2S) относительно среднего значения для всех исследовавшихся материалов в одинаковых условиях (температурах газовой среды).

В § 3.2 приведены результаты анализа газообразных продуктов термического разложения материалов с использованием инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье. Для анализа проб газовой среды использовался ИК-спектрометр с однокюветовой газовой кюветой (длина оптического пути 50 мм). ИК-Фурье-спектрометр позволяет в реальном времени анализировать количество и тип газообразных продуктов, образующихся при термическом разложении материала. Выделяющиеся газы идентифицируются по спектру их поглощения, который при характерном волновом числе линейно зависит от концентрации газа. Как следствие, темпы изменения показателей поглощения в процессе термического разложения материала иллюстрируют динамику изменения концентраций образующихся газообразных продуктов. Анализ проводился в диапазоне спектра $400\text{--}6000\text{ см}^{-1}$ с разрешением $0,5\text{ см}^{-1}$ и временем накопления 30 секунд. Осуществлялась регистрация во времени концентраций токсичных газов при заданной постоянной температуре, после чего с использованием специализированного программного обеспечения и спектральных эталонных библиотек определялось наличие в газовой смеси органических и неорганических соединений. На рис. 4 приведены результаты анализа газообразных продуктов, образующихся при термическом разложении древесины, ДСП, ДВП, линолеума и рулонных штор из пластика и полиэстера. Получены ИК-спектры продуктов сгорания, соответствующие максимальному значению коэффициентов поглощения в процессе термического разложения исследуемых материалов. На рис. 4 показано, что полосы поглощения газообразных продуктов термического разложения исследовавшихся материалов имеют одинаковые волновые числа. Зарегистрированы различия в поглощении. Из этого следует, что продукты термического

разложения данных материалов различаются по концентрациям достаточно существенно.

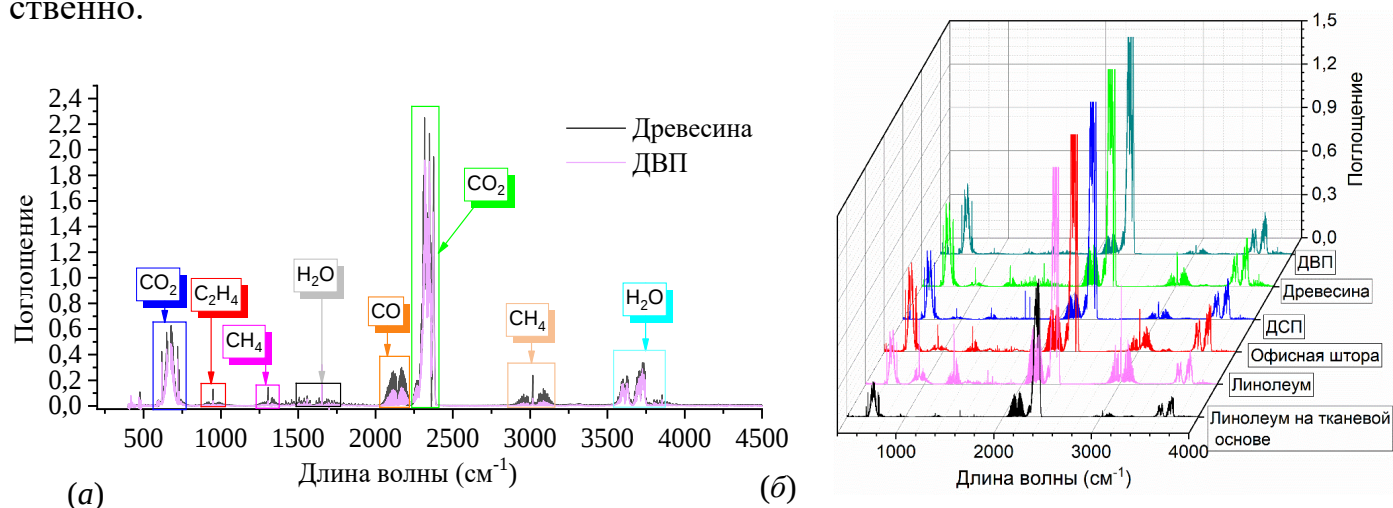


Рисунок 4 – Сравнение FTIR-спектров летучих компонентов термического разложения (а) древесины, ДВП и (б) всех исследовавшихся материалов при температуре газовой среды 973 К

Термическое разложение материалов характеризовалось образованием углеводородов в составе продуктов сгорания. Наибольшие пики поглощения зарегистрированы (рис. 4а) на длинах волн, соответствующих CO_2 (650 и 2350 см^{-1}) и CO ($2050\text{--}2250\text{ см}^{-1}$). На рис. 4 видно, что выход углекислого газа в 6–10 раз выше, чем выход угарного газа. С учетом линейной зависимости между концентрацией продуктов термического разложения и поглощением такое соотношение между CO и CO_2 свидетельствует о полном термическом разложении материала. Максимальные значения поглощения CO и CO_2 зарегистрированы при термическом разложении рулонных штор, древесины и линолеума (рис. 4б). Данный результат обусловлен довольно высоким содержанием углерода в этих материалах по сравнению с остальными. Минимальные значения пиков поглощения CO получены при термическом разложении линолеума на тканевой основе и древесноволокнистых плит. При термическом разложении древесины и температуре газовой среды 973 К в процессе анализа FTIR- спектров выделено наличие сигналов, исходящих от CO_2 ($600\text{--}800\text{ см}^{-1}$; $2250\text{--}2400\text{ см}^{-1}$), C_2H_4 ($850\text{--}1050\text{ см}^{-1}$), C_2H_2 ($1200\text{--}1400\text{ см}^{-1}$). Экстремумы в волновых числах $1400\text{--}1800\text{ см}^{-1}$ и $3550\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ свидетельствовали о выходе объемной и связанной воды. Выход CO происходил в диапазоне волновых чисел $2050\text{--}2250\text{ см}^{-1}$, а метана – в диапазоне $2850\text{--}3200\text{ см}^{-1}$. На рис. 4б видно, что пики поглощения CO_2 и CO для ДВП несколько выше, чем для ДСП. Это обусловлено более высоким общим содержанием целлюлозы и гемицеллюлозы в ДВП (70,3% целлюлозы и гемицеллюлозы по сравнению с 69,12% для ДСП). Древесина содержит чуть больше гемицеллюлозы, чем ДСП и ДВП. Разложение гемицеллюлозы приводит к увеличению пиков поглощения углекислого газа при термическом разложении древесины (рис. 4б). Пики поглощения и их интенсивность для таких материалов, как древесина и ДСП имеют идентичный характер, что обусловлено общей органической природой данных материалов. Также видно, что линолеум на тканевой основе по сравнению с древесиной и остальными исследовавшимися материалами имеет наименьшую интенсивность выделения зарегистрированных компонентов газовой смеси. Это обусловлено тлением данного материала без существенного дымообразования. При термическом разложении тканевых штор помимо образования метана и этилена происходил также выход ацетилена с характерной полосой поглощения при длине волны 3250 см^{-1}

(рис. 4б). Полученные результаты указывают на возможность достоверной и оперативной классификации газов, образующихся при термическом разложении исследованных материалов, с использованием FTIR-измерений.

Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье позволила также зарегистрировать длительности выделения газов с большой временной разрешающей способностью. Результаты соответствующей выборки для древесины и линолеума представлены на рис. 5. Такой анализ особенно важен при оценке основных характеристик пожара и эвакуации людей, так как позволяет определить интервалы времени выхода определенных веществ. При наличии такой информации становится возможным проектирование безопасных путей и расчет временных интервалов для эвакуации людей из помещений и зданий в целом. На рис. 5 показано, что определяющий объем газа, образующийся при термическом разложении исследованных материалов, выделяется с 12 с по 108 с. Установлено, что для древесины в интервале времени 1–12 с регистрировался выход паров воды. Также в этом интервале времени начинал выделяться CO_2 . К моменту времени 22–24 с концентрации всех основных (CO_2 , CO , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4) соединений достигали максимальных значений, после чего к моменту времени 300 с снижались. При термическом разложении линолеума выделение органических и неорганических соединений начиналось лишь к 180 с.

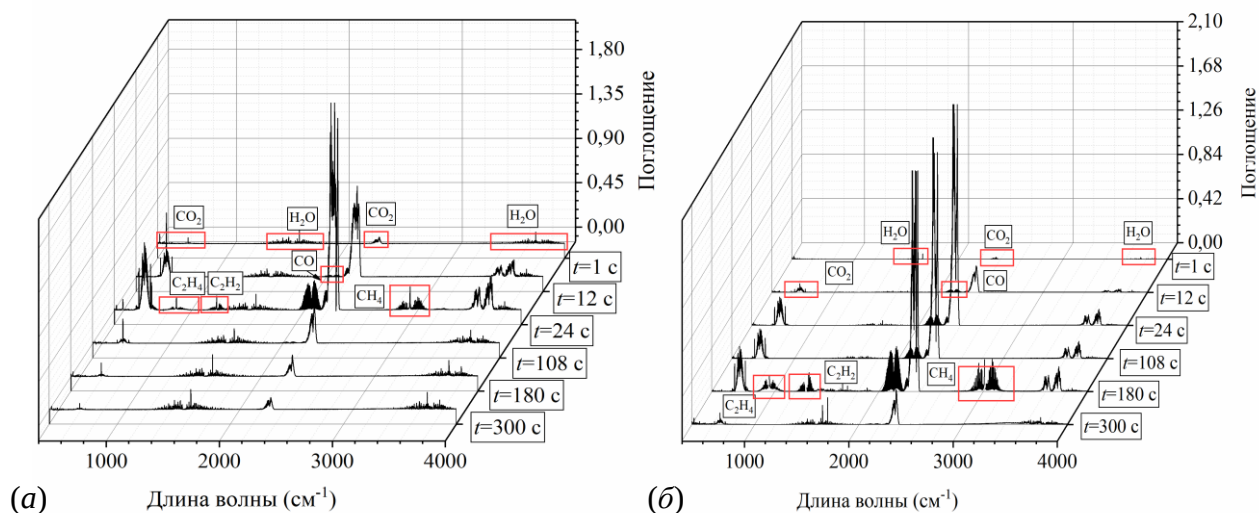


Рисунок 5 – FTIR-спектры летучих компонентов термического разложения горючих материалов при температуре газовой среды 973 К: а – древесина; б – линолеум

В § 3.3 представлены результаты экспериментальных и численных исследований процесса термического разложения типичных строительных и отделочных материалов. Изучено влияние высоты расположения сенсора газоанализатора, геометрических размеров помещения и причины возгорания на процессы распространения продуктов термического разложения в изолированном объеме. Для оценки адекватности разработанной модели проведены экспериментальные исследования. Эксперименты проведены с использованием стенда, представленного на рис. 6. Экспериментальный стенд выполнен в виде изолированного от внешней среды бокса (размеры $1,5 \times 1 \times 1,25$ м) с системой вентиляции, регистрирующими устройствами (системой газоанализа, тепловыми и дымовыми пожарными извещателями, извещателями пламени), компьютера для сбора и записи информации. В нижней части боковой стенки корпуса стенда расположен вход

приточной вентиляции, а в его верхней части – канал вытяжной вентиляции. Модельные очаги размещались в центральной части стенда, а газоанализатор в верхней части вблизи канала вытяжной вентиляции.

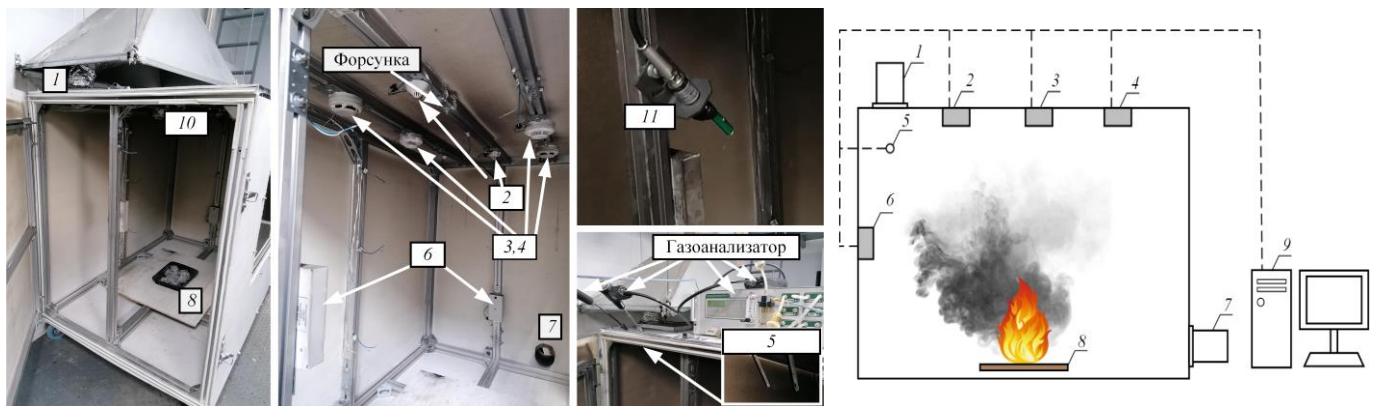


Рисунок 6 – Внешний вид и схема экспериментального стенда: 1 – выход системы вентиляции; 2 – тепловой пожарный извещатель; 3 – дымовой беспроводной пожарный извещатель; 4 – дымовой проводной пожарный извещатель; 5 – место размещения зонда газоанализатора; 6 – пожарный извещатель пламени; 7 – вход системы вентиляции; 8 – модельный очаг пожара; 10 – видеокамера; 11 – пирометр

Извещатели пламени (угол обзора 120° ; время срабатывания 4,5 с) размещались на стене экспериментального стенда на высоте около 1 м. Дымовые (время срабатывания не более 9 с) и тепловые (время срабатывания около 100 с при повышении температуры со скоростью 30 К/мин, порог срабатывания по температуре 327–338 К) пожарные извещатели размещались в верхней части экспериментального стенда (на потолке). Инициирование горения осуществлялось равномерно по всей площади поверхности материала с использованием газовой горелки. Для определения концентраций газов в экспериментальном боксе использовалась газоаналитическая система, состоящая из пяти стационарных промышленных газоанализаторов типа Сенсон-СВ-5023. Высота установки газоаналитических сенсоров над модельным очагом в экспериментах варьировалась в диапазоне 0,5–1 м. Сенсон-СВ-5023 является стационарным одноканальным прибором, обеспечивающим непрерывное измерение концентрации газов. Сенсоры газоанализаторов располагались в верхней полости стенда около вытяжной вентиляции. В процессе горения и тушения модельных очагов регистрировалась динамика изменения концентрации следующих газов – CO , CO_2 , O_2 , H_2 , CH_4 . Данные сохранялись на ПК, после чего выполнялась их обработка и последующий анализ.

Для вычислений использовалось программное обеспечение COMSOL Multiphysics. Геометрия области решения задачи тепломассопереноса в системе «очаг возгорания–газовая среда» приведена на рис. 7. Начальная температура в области решения принималась равной 300 К. Температура источника нагрева 1100 К. Начальная температура горючего материала 300 К. Концентрация окислителя в начальный момент времени принималась равной массовому содержанию кислорода в воздухе. При достижении температуры начала термического разложения горючего материала начинается процесс образования газообразных продуктов. Скорость этого процесса экспоненциально зависит от температуры. Газообразные продукты термического разложения распространяются в результате диффузии и конвекции по объёму расчётной области. В малой окрестности материала образуется газовая смесь, горение которой начинается

при критических значениях температуры и концентрации горючего. Задача решается в осесимметричной постановке.

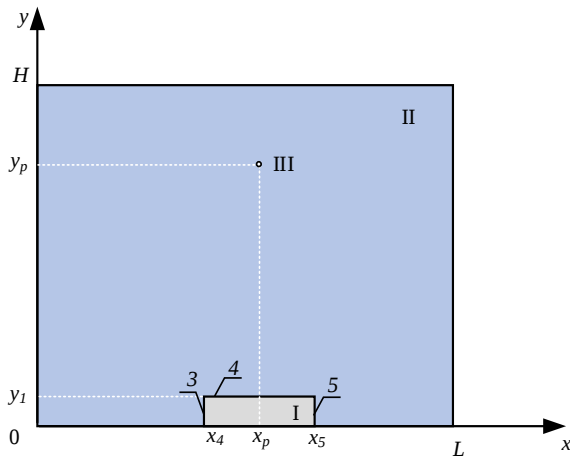


Рисунок 7 – Геометрия области решения: I – модельный очаг класса «А»; II – газовая среда; III – зона регистрации продуктов термического разложения ($x=x_p$, $y=y_p$); 3,4,5 – граница контакта горючего материала с газовой средой. x , y – координаты декартовой системы, м; H , L – высота и ширина расчетной области, м. Глубина расчетной области 1 м

Учитывается прогрев воздуха, окружающего источник нагрева, за счет теплопроводности и конвекции, а также процессы окисления в газовой фазе. Термическое разложение материала представляет комплекс превращений с формированием газообразных продуктов и твердого остатка. Выделяют три термически разлагающихся компонента: целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин. Как следствие, скорости термического разложения рассчитываются с учетом термического разложения этих трех компонентов:

$$W_1 = \varphi_{1c}\rho_{1c}k_{1c}\exp\left(-\frac{E_{a1c}}{RT_1}\right) + \varphi_{1h}\rho_{1h}k_{1h}\exp\left(-\frac{E_{a1h}}{RT_1}\right) + \varphi_{1l}\rho_{1l}k_{1l}\exp\left(-\frac{E_{a1l}}{RT_1}\right),$$

Уравнения термического разложения в слое материала имели вид:

$$\frac{d\varphi_{1c}}{dt} = (\varphi_{1c}^0 - \varphi_{1c})k_{1c}\exp\left(-\frac{E_{a1c}}{RT_1}\right); \quad \frac{d\varphi_{1h}}{dt} = (\varphi_{1h}^0 - \varphi_{1h})k_{1h}\exp\left(-\frac{E_{a1h}}{RT_1}\right); \quad \frac{d\varphi_{1l}}{dt} = (\varphi_{1l}^0 - \varphi_{1l})k_{1l}\exp\left(-\frac{E_{a1l}}{RT_1}\right).$$

W_1 – скорость термического разложения, кг/(м³с); k_{1c} , k_{1h} , k_{1l} – предэкспоненциальный множитель реакции разложения целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, соответственно, с⁻¹; E_{a1c} , E_{a1h} , E_{a1l} – энергия активации реакции разложения целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, соответственно, Дж/моль; T_1 – температура горючего материала, К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); ρ_1 – плотность горючего материала, кг/м³; φ_{1c} , φ_{1h} , φ_{1l} – относительная доля целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина в горючем материале, соответственно.

При постановке задачи приняты допущения: теплофизические характеристики материала не зависят от температуры; движение водяных паров по слою горючего материала не учитываются; среда состоит из газовой (газовоздушной) и твердой фаз; газовая среда представляет смесь воздуха и продуктов сгорания; используется двумерная постановка задачи; на начальной стадии возникновения термического разложения материалов поля температур, скоростей и концентраций газообразных продуктов термического разложения зависят только от t , x и y . Перечисленные допущения не накладывают существенных ограничений на общность постановки задачи и будут проанализированы при дальнейшем развитии модели. На рис. 8 приведены результаты экспериментов и численного расчета в замкнутом объеме. Установлены значения времени задержки срабатывания используемых пожарных извещателей: пламени (t_1), тепловых (t_2), дымовых проводных (t_3) и беспроводных (t_4). На основе результатов экспериментов установлено, что наиболее эффективным является размещение пожарных извещателей пламени непосредственно над очагом горения, а дымовых пожарных извещателей – в

углах на потолке, так как время обнаружения возгорания в таком случае снижается в пределах 20 % по сравнению с их размещением на боковой стенке стенда.

Результаты экспериментальных исследований показали, что с использованием системы газоанализа развивающийся процесс инициирования возгорания можно обнаруживать за 162 с (удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системам обнаружения возгораний). Идентификация возгорания по другим признакам пожара (повышение температуры, появление дыма) происходит не ранее 173 с (для тепловых пожарных извещателей), 178 с (для дымовых проводных пожарных извещателей), 208 с (для дымовых беспроводных пожарных извещателей). Экспериментально установлено, что пожарные извещатели пламени обладают минимальной инерционностью и позволяют обнаружить

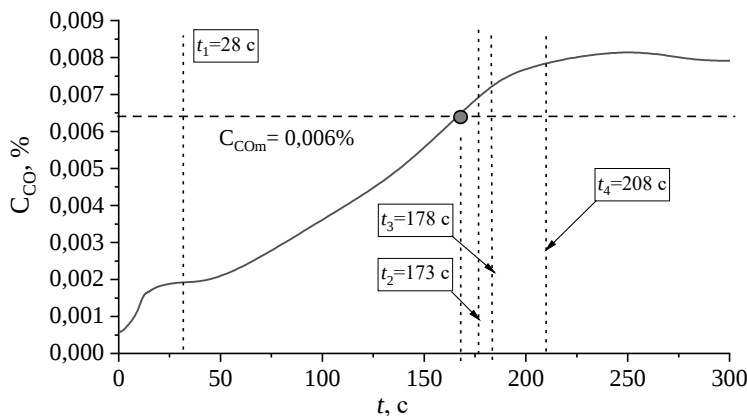


Рисунок 8 – Концентрация CO, образующегося при термическом разложении древесины в изолированном пространстве

возгорание менее чем за 30 с. Однако с использованием данного типа извещателя не представляется возможным оценить интенсивность процесса термического разложения горючего материала. Проведенные расчеты позволили установить связь между высотой расположения сенсора газоанализатора и диапазонами изменений концентраций газо-

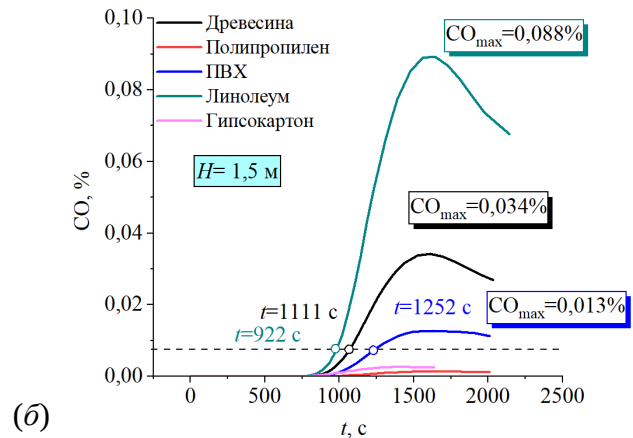
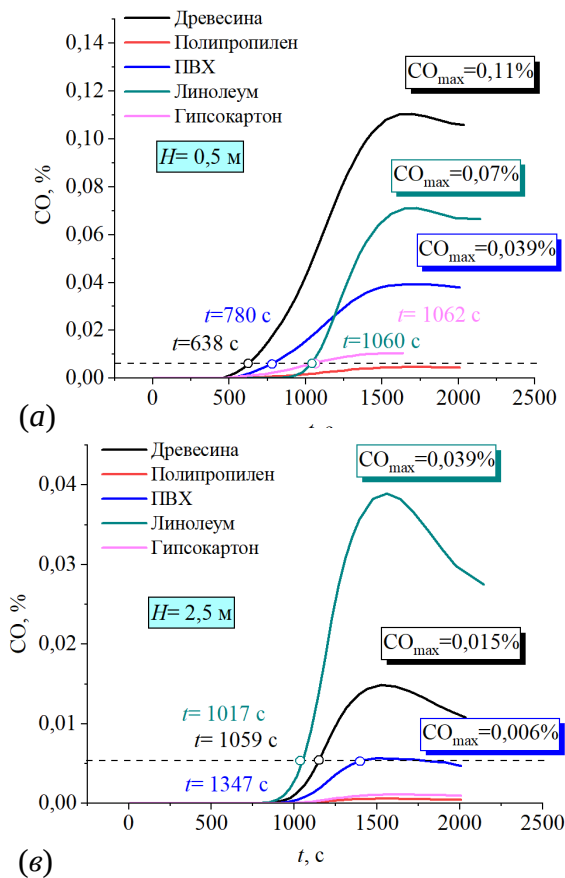
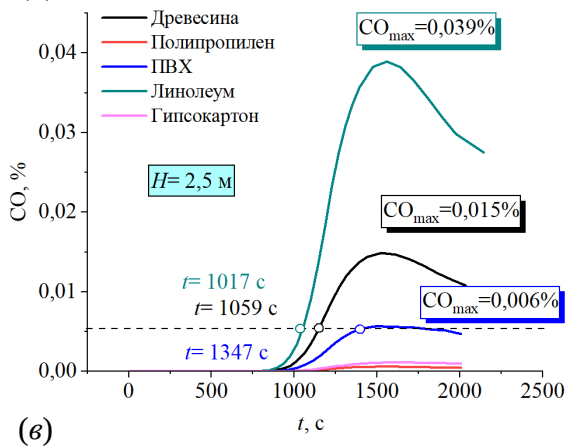


Рисунок 9 – Тренды концентраций CO, образующихся при термическом разложении строительных и отделочных материалов на высоте 0,5 м (а); 1,5 м (б); 2,5 м (в). Реализация схемы нарушения правил эксплуатации нагревательного оборудования (температура металлической поверхности 823 К)



образных продуктов термического разложения (рис. 9). Установлено, что при размещении сенсора газоаналитического оборудования на высоте более 1,5 м концентраций оксида углерода в области регистрации не превышают пороговых значений ($CO=0,006\%$, на рис. 9 обозначено пунктирной горизонтальной линией). По результатам численных исследований сформулированы рекомендации по использованию в помещениях с высокими

потолками специализированных аспирационных извещателей, позволяющих идентифицировать газообразные продукты термического разложения на удалении от места возгорания, или размещении сенсоров газоанализатора непосредственного над потенциально горючим материалом на высоте не более 0,5 м от напольного покрытия.

Целесообразно отметить, что идентификация термического разложения материала предполагает дальнейшую своевременную локализацию очага возгорания с целью предотвращения распространения пламени и препятствию объёмному развитию пожара. Для повышения эффективности данного процесса необходим обоснованный выбор параметров процесса распыла огнетушащей жидкости. Особенности движения газопарокапельных потоков используемой для подавления горения огнетушащей жидкости существенно изменяются по мере приближения к фронту горения. В § 3.4 представлены результаты экспериментальных исследований процесса локализации термического разложения и горения материалов. Исследован газовый состав продуктов термического разложения и горения материалов при подаче в очаг возгорания огнетушащей жидкости. Оценена сравнительная эффективность воздействия группой огнетушащих составов на очаги с горючими материалами с учетом расхода, времени и загрязнения воздуха. В качестве исследуемого материала выбраны древесина и отходы ее переработки (листья, хвоя, ветки). Масса навески материала в экспериментах составляла 30 г. В качестве тушащей жидкости использовались вода и вода со специализированными добавками: эмульсия пенообразователя 5 мас.%, суспензия бентонита 5 мас.%, раствор бишофита 10 мас.%

Для проведения исследований в верхней части экспериментального бокса, представленного на рис. 6, на расстоянии 1 м от модельного очага пожара размещалась форсунка ФМТ-100, на которую под давлением 200 кПа по гибкому трубопроводу осуществлялась подача огнетушащей жидкости. Изучалось две схемы подачи жидкости в очаг возгорания: непрерывный распыл и импульсная подача. По

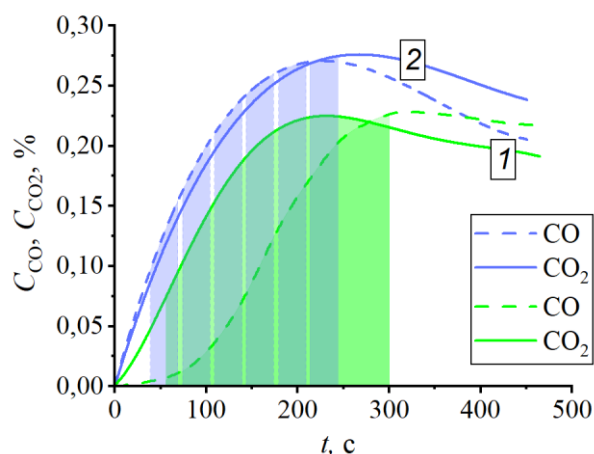


Рисунок 10 – Тренды CO_2 и CO , зарегистрированные при импульсном и непрерывном тушении очагов из древесины: 1 – непрерывная подача воды; 2 – импульсный распыл

результатам экспериментов определялись концентрации компонентов CO , CO_2 , O_2 , CH_4 , H_2 в полости экспериментального стенда, длительности тушения очагов горения огнетушащим составом t_e , удельная плотность орошения очага. На рис. 10 приведены тренды изменения концентраций CO и CO_2 , образующихся при непрерывном и импульсном тушении модельных очагов из древесины водой. Рост концентраций CO соответствует времени воздействия на очаг возгорания распыленным потоком воды. Пик концентраций оксида и диоксида углерода достигается в момент времени 249 с. При подаче жидкости через форсуночные устройства в реакционную область в течении 30 с происходит смешивание распыленного потока воды с движущимися горячими газами. Это приводит к интенсивному испарению капель и образованию водяного пара. Приостановка подачи импульса распыла на 3 секунды приводит к тому, что неиспарившиеся капли поглощают тепловую энергию из зоны горения в процессе испарения. Происходит снижение интенсивности горе-

ния. Таким образом капли, которые не испарились в течении импульса подачи жидкости, испаряются в интервал времени между импульсами, ослабляя пламенное горение в каждом цикле. Установлено, что при импульсном распыле выход оксида и диоксида углерода несколько больше (25–32%), чем в случае непрерывного распыла. Однако расход воды на тушение для импульсного распыла в 1,4 раз меньше. На рис. 11а,б приведены тренды изменения концентраций CO и CO_2 , образующихся при взаимодействии различных огнетушащих составов с горящими материалами.

По результатам экспериментов установлено, что существенный вклад в диапазоны изменения концентраций газообразных продуктов горения оказывает компонентный состав огнетушащей жидкости. В частности, установлены (рис. 11) существенные отличия концентраций газов при распылении растворов, суспензий и эмульсий.

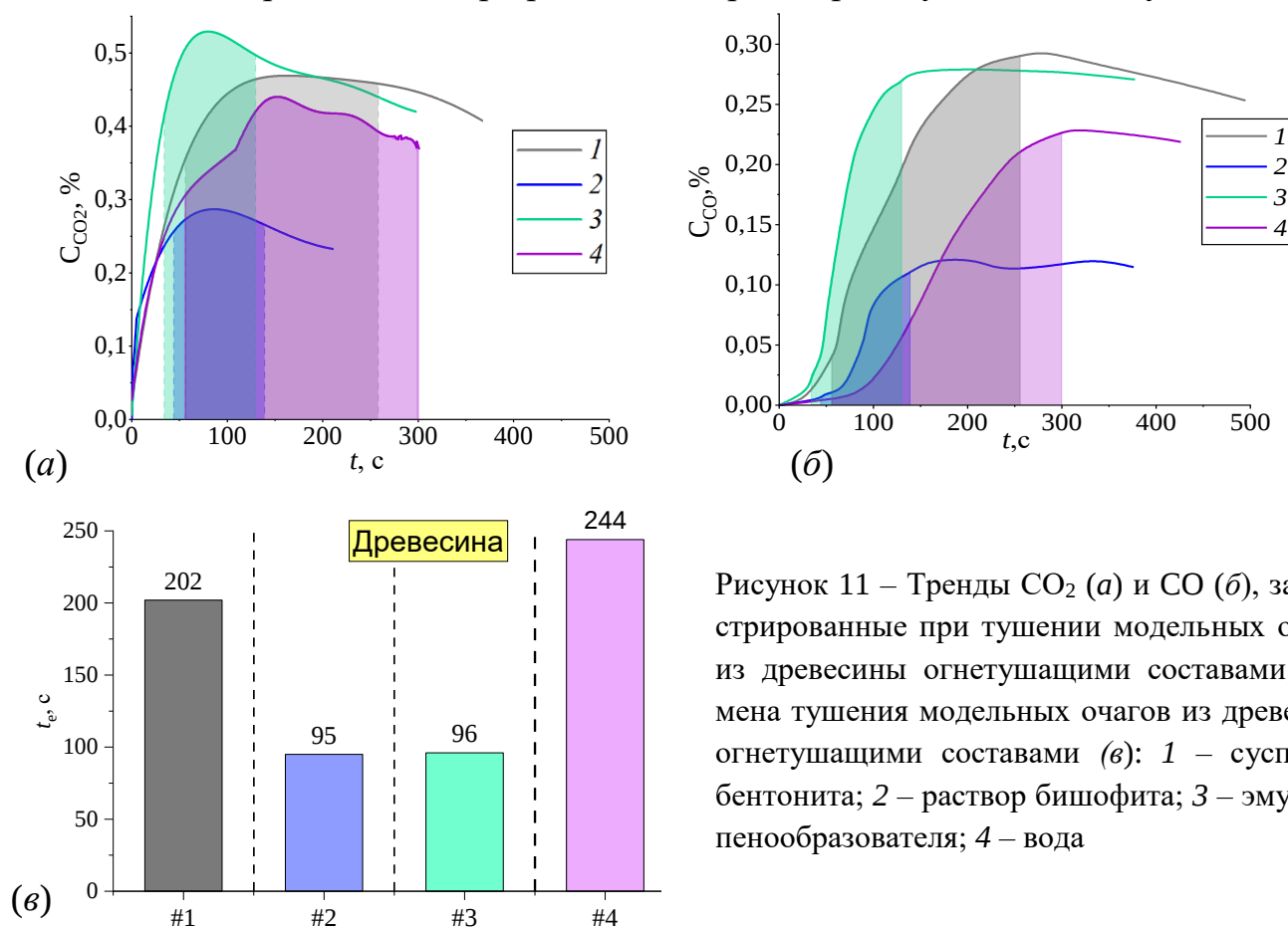


Рисунок 11 – Тренды CO_2 (а) и CO (б), зарегистрированные при тушении модельных очагов из древесины огнетушащими составами; времена тушения модельных очагов из древесины огнетушащими составами (в): 1 – суспензия бентонита; 2 – раствор бишофита; 3 – эмульсия пенообразователя; 4 – вода

Например, максимальные значения концентраций CO и CO_2 зарегистрированы при тушении модельных очагов из древесины суспензией бентонита и эмульсией пенообразователя. Наименьшие значения характерны процессу тушения древесины раствором бишофита. Это можно объяснить спецификой взаимодействия огнетушащих составов со слоем материала. Суспензия бентонита при попадании на поверхность горячего материала остается на его поверхности, практически не проникая в глубинные слои. Таким образом внутри каркаса продолжается процесс термического разложения, концентрации CO при этом продолжают расти. При подаче эмульсии пенообразователя в очаг возгорания, наоборот, происходит ее растекание по поверхности материала и проникновение в слой навески вследствие меньшего поверхностного натяжения данного состава. За счет этого свободная поверхность древесины практически полностью покрыта эмульсией пенообразователя. Таким образом, выход большей доли газообразных продуктов сгорания происходит в начальный момент времени. На рис. 11в показано,

что наименьшее время тушения соответствует раствору бишофита (#2) и эмульсии пенообразователя (#3) и составляет менее 100 с. Несмотря на меньшую плотность орошения данные составы по сравнению с водой (#4) и суспензией бентонита (#1) тушат очаг возгорания на 61% эффективнее (основываясь на временах тушения). По результатам экспериментов установлены значения относительных коэффициентов эффективности огнетушащих составов при локализации и подавлении горения материалов с учетом затраченных времен, расходов и загрязнения воздуха. При установлении приоритета экологическим показателям самый низкий показатель эффективности установлен для суспензии бентонита. Если приоритет установлен по расходу огнетушащего состава, максимальный коэффициент эффективности соответствует раствору бишофита и эмульсии пенообразователя, минимальный – для воды. Для воды и раствора бишофита существенной разницы при присвоении максимальных весовых коэффициентов категориям экологических и экономических показателей не установлено. При построении систем с обратной связью важно контролировать изменение во времени температуры в зоне контроля и концентраций CO , CO_2 , O_2 . При обобщении результатов исследований установлено, что при распылении воды или другого огнетушащего состава в зону возгорания концентрации CO и CO_2 скачкообразно изменяются в течение всего времени распыления. Результаты экспериментов показали, что для эффективной локализации возгорания целесообразно с минимальной длительностью распыла покрыть площадь поверхности материала и выдержать паузу по стабилизации концентраций CO , CO_2 , O_2 (достичь близких к 0 %/с). При дальнейшем росте концентрации горючих газов необходимо продолжать подачу огнетушащей жидкости. Если концентрации CO , CO_2 , O_2 не меняются или снижаются, возгорание можно считать локализованным.

В § 3.5 сформулированы практические рекомендации по использованию результатов исследований. Разработана группа технических решений в области пожарной безопасности: (1) способ обнаружения возгорания в помещении и адаптивной локализации пожара; (2) способ адаптивного тушения пожара в помещении; (3) способ обеспечения видимости в задымленной среде, вызванной пожаром в помещении. Для осуществления способа обнаружения возгорания в помещении и адаптивной локализации пожара (1) предлагается использовать систему, приведенную на рис. 12. Способ заключается в постоянном мониторинге воздуха с помощью пожарных извещателей, определении по пришедшему сигналу места возгорания и включении на срабатывание оросителей, находящихся непосредственно над зоной возгорания. Адаптивную локализацию пожара обеспечивают посредством использования определенных в предварительных экспериментах для каждого материала значений плотности орошения. Осуществление способа адаптивного тушения пожара в помещении (2) обосновано результатами экспериментальных исследований, полученных с использованием модельных очагов пожара класса А размерами до 300 см². Для проведения исследований использован экспериментальный бокс, представленный на рис. 6. Определены эффективные типы сенсоров, их комбинации, а также факторы, позволяющие достоверно на ранней стадии зарождения очага пожара идентифицировать тип пиролизующегося материала. Способ заключается в том, что пожарными извещателями осуществляют мониторинг защищаемого помещения на предмет появления дыма, пламени, образования токсичных газообразных продуктов, повышения температуры. При этом с использованием тепловизионной камеры, размещенной на потолке в углу помещения, контролируют температуру поверхности всех потенциально горючих материа-

лов, находящихся в помещении. Камеру видеонаблюдения используют для регистрации изменения во времени нормализованной интенсивности изображения очага пожара. Процесс подачи воды в очаг возгорания активируют при срабатывании пожарных извещателей, а приостанавливают, когда температура поверхности очага пожара не превышает 473 К, а нормализованная интенсивность изображения очага пожара (древесины) не превышает 0,4 при скорости её снижения не более $0,01 \text{ с}^{-1}$.

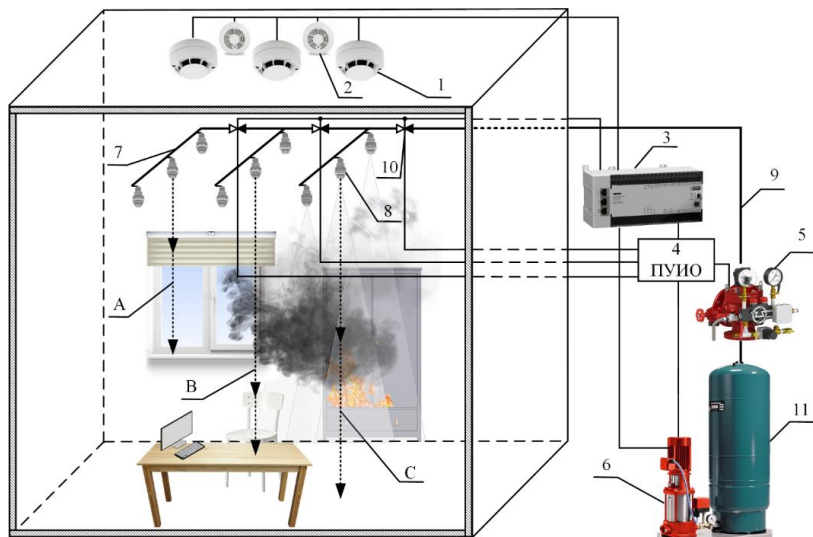


Рисунок 12 – Схема системы для осуществления способа обнаружения возгорания в помещении и адаптивной локализации пожара: 1 – пожарные извещатели тепловые; 2 – пожарные извещатели газовые; 3 – устройство управления; 4 – прибор управления исполнительными органами; 5 – узел исполнительных органов; 6 – насосная установка; 7 – ряд форсуночных устройств; 8 – форсуночное устройство; 9 – трубопровод с водой; 10 – задвижка на трубопроводе с водой; 11 – бак с водой

Способ обеспечения видимости в задымленной среде (3) заключается в использовании на путях эвакуации людей источников освещения, обеспечивающих максимально возможную видимость, а также осаждении дыма потоком распыленной жидкости через оросители, расположенные вдоль пути эвакуации людей. Выбор источника освещения проведен путем экспериментального определения коэффициента пропускания дыма на каждой длине волны излучения, как отношение конечной мощности светового потока к начальной (значения варьировали в диапазоне 600–1700 мкВт). Основные преимущества применения предложенных технических решений состоят в возможности повышения эффективности тушения очага возгорания, снижения расхода огне-тушащего состава, предотвращении заливания последним зон контролируемого помещения, не охваченных огнем, оптимизации одновременной реализации подавления возгораний и эвакуации людей, предотвращении распространения продуктов термического разложения и горения по зданиям и сооружениям.

В **заключении** представлены основные выводы по результатам исследований, а также сформулированы соответствующие рекомендации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Размеры частиц материалов оказывают существенное влияние на скорость потери массы и образование летучих соединений в диапазоне температур 523–823 К. Различия размеров частиц и плотности материала обуславливают неодинаковую кинетику термодеструкции. По результатам экспериментальных исследований установлено, что плотность образца оказывает более существенное влияние на термокинетические характеристики, чем размеры частиц материала в ограниченном диапазоне.

2. Изучен состав продуктов термического разложения строительных и отделочных материалов при варьировании температуры газовой среды, массы и типа материала, а также его огнезащитной обработки. Результаты экспериментов обосновывают возможность обнаружения пожара и идентификации очага горения по изменению химического

состава воздуха, так как для каждого из материалов зарегистрирована отличительная особенность газового состава продуктов термического разложения.

3. Установлены отличия концентраций газов при термическом разложении и горении материалов при температурах, типичных для пожаров в зданиях и сооружениях. Обоснована возможность идентификации материала по скорости изменения во времени оксида углерода, являющегося основным токсичным газом. Показано, что значения СО при горении древесины и рулонных штор на 32–55 % выше по сравнению с остальными материалами.

4. С использованием инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье показано, что наибольший выход СО и СО₂ происходит при термическом разложении древесины и линолеума. Зарегистрированы длительности выхода продуктов термического разложения строительных и отделочных материалов. Пиковые значения поглощения органических и неорганических соединений, образующихся в процессе термического разложения линолеума, достигаются лишь на 180 секунде, в то время как для остальных материалов пик приходится на 24 с. Отличительной особенностью термического разложения древесины и линолеума являлось то, что выход продуктов термического разложения прекращался по истечении 300 с, в то время как для остальных материалов к данному интервалу времени выход продуктов горения еще сохранялся.

5. По результатам численного моделирования установлены характеристики процессов тепломассопереноса и термического разложения горючих материалов при варьировании ключевых параметров в диапазонах, характерных для помещений различного назначения. Установлены численные значения концентраций продуктов термического разложения и горения материалов на разном удалении относительно потенциального очага возгорания. Установлены зависимости времени задержки срабатывания газоаналитической системы по выставленным пороговым значениям от расстояния между сенсором и материалом. Проведенные расчеты позволили установить связь между размерами помещений и очага возгорания и диапазонами концентраций газообразных продуктов термического разложения строительных и отделочных материалов.

6. Выделены существенные отличия состава продуктов термического разложения и горения материалов при подаче в очаг возгорания растворов, суспензий и эмульсий. Показано, что выход СО и СО₂ при тушении древесины суспензией бентонита на 73 % больше, чем при тушении водой. Наименьший выход газообразных продуктов термического разложения материалов зарегистрирован при тушении очага возгорания из древесины раствором бишофита. В этом случае выход оксида и диоксида углерода на 63 % меньше, чем при использовании воды. Установлено, что при тушении эмульсией пенообразователя можно сократить выход СО и СО₂ на 28 % по сравнению с тушением очага возгорания водой.

7. Установленные значения относительных коэффициентов эффективности огнетушащих составов при локализации и подавлении горения материалов с учетом затраченных времен, расходов, антропогенных выбросов и предложенный математический аппарат по экстраполяции полученных данных важно использовать при обосновании целесообразности применения различных добавок к воде при локализации пожаров.

8. Разработаны рекомендации по использованию полученных результатов в виде группы технических решений в области пожарной безопасности. Запатентованы: способ обнаружения возгорания в помещении и адаптивной локализации пожара; способ адаптивного тушения пожара в помещении; способ обеспечения видимости в задымленной среде, вызванной пожаром в помещении.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus или Web of Science

1. Zhdanova A.O. Thermophysical and Thermokinetic Characteristics of Forest Combustible Materials / A.O. Zhdanova, **S.S. Kropotova**, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92. – №. 5. – P. 1355–1363.
2. Kuznetsov G.V. Influence of forest fuel structure on thermophysical characteristics / G.V. Kuznetsov, **S.S. Kropotova**, A.G. Islamova, D.S. Romanov // Powder Technology. – 2020. – Vol. 366. – P. 832–839.
3. Kuznetsov G.V. The influence of particle size and density of pelleted samples of forest fuel on thermokinetic characteristics of pyrolysis and oxidation / G.V. Kuznetsov, **S.S. Kropotova**, A.G. Islamova, S.Y. Lyrshchikov // Thermal Science. – 2021. – Vol. 25 – № 6, Part B. – P. 1–12.
4. **Kropotova S.S.** Identifying products of pyrolysis and combustion of materials at incipient stages of fires / S.S. Kropotova, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Fire Safety Journal. – 2022. – Vol. 132, 103643. – P. 1–22.
5. Kuznetsov G.V. Influence of the component composition of extinguishing fluids on the droplet distribution in an aerosol cloud / G.V. Kuznetsov, **S.S. Kropotova**, I.S. Voytkov, P.A. Strizhak // Powder Technology. – 2022. – Vol. 395. – P. 838–849.
6. **Kropotova S.S.** Composition of the Gas-Air Mixture in the Containment and Suppression of Forest Fires with Promising Extinguishing Agents / S.S. Kropotova, V.V. Dorokhov, S.A. Sviridenko, P.A. Strizhak // Forests. – 2023. – Vol. 14, 786.
7. Kuznetsov G.V. The thermal decomposition and combustion of building and finishing materials / G.V. Kuznetsov, **S.S. Kropotova**, N.P. Kopylov, V.I. Novikova, E.Yu. Sushkina, P.A. Strizhak, V.V. Yashin // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2023. – Vol. 173, 106070.

В рецензируемом российском научном издании

1. **Кропотова С.С.** Оценка эффективности ранней идентификации возгораний материалов по результатам регистрации газообразных продуктов термического разложения / С.С. Кропотова, Г.В. Кузнецов, В.В. Дорохов // Пожарная безопасность. – 2022. – № 3. – С. 17–28.

Патенты РФ

1. **Кропотова С.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Способ обнаружения возгорания в помещении и адаптивной локализации пожара // Патент на изобретение 2776291 С1, 18.07.2022.
2. **Кропотова С.С., Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Способ адаптивного тушения пожара в помещении // Патент на изобретение, 2785318 С1, 06.12.2022.
3. **Кропотова С.С., Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.** Способ обеспечения видимости в задымленной среде, вызванной пожаром в помещении // Патент на изобретение, 2788773 С1, 24.01.2023.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Кропотова С.С. Расчет характеристик процесса образования газообразных продуктов пиролиза / С.С. Кропотова, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Программа для ЭВМ № 202268329, 05.12.2022.
2. Кропотова С.С. Расчет диффузии газообразных продуктов термического разложения горючего материала / С.С. Кропотова, Д.В. Антонов, П.А. Стрижак // Программа для ЭВМ № 2022684580, 15.12.2022.