

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМИ  
ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

**Академия Государственной противопожарной службы МЧС России**

*На правах рукописи*



**Комаревцев Никита Васильевич**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ТОКСИЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ПУТЯХ ЭВАКУАЦИИ,  
ПРИ ПОЖАРЕ**

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность  
(технические науки)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Пузач Сергей Викторович

Москва – 2026

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ТОКСИКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ .....	14
1.1 Особенности токсикологической обстановки при пожарах .....	14
1.2 Токсикологическая характеристика воздействия газовой среды при пожаре на человека во время его эвакуации.....	22
1.3 Учет токсичных газов, выделяющихся при пожаре, нормативными документами Российской Федерации .....	34
1.4 Моделирование и прогнозирование распространения опасных факторов пожара в зданиях.....	40
1.5 Выводы по первой главе.....	52
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ТЕРМОРАЗЛОЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	54
2.1 Нормативный метод экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов .....	54
2.1.1 Экспериментально-расчетный метод определения показателя токсичности продуктов горения материалов.....	54
2.1.2 Биологический метод определения показателя токсичности продуктов горения материалов.....	60
2.2 Оценка применяемых в Российской Федерации ненормативных методов определения токсичности строительных материалов при пожаре .....	64
2.3 Характеристика методик токсикологической оценки строительных материалов при пожаре, используемых за рубежом .....	77
2.4 Модернизация и характеристика экспериментальных установок для оценки	

токсичности строительных материалов с использованием критерия токсикогенной опасности.....	89
2.4.1 Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении и ее модернизация .....	89
2.4.2 Установка для экспериментального определения линейной скорости распространения пламени твердых веществ и материалов .....	95
2.5 Выводы по второй главе.....	98
<b>ГЛАВА 3 РАНЖИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ТОКСИЧНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ НА ПУТЯХ ЭВАКУАЦИИ С ПОМОЩЬЮ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ .....</b>	<b>100</b>
3.1 Разработка и обоснование критерия токсикогенной опасности для оценки токсичности строительных материалов при пожаре с позиции обеспечения безопасной эвакуации .....	100
3.2 Экспериментально обоснованный сравнительный анализ нормативной методики и методики с использованием нового критерия токсикогенной опасности к определению токсичности продуктов горения строительных полимерных материалов .....	105
3.3 Экспериментальное определение времени блокирования путей эвакуации в зальном помещении при горении исследуемых строительных материалов с использованием нового критерия токсикогенной опасности.....	113
3.4 Ранжирование и оценка строительных материалов по уровню токсичности продуктов горения на основе полученных экспериментальных данных в контексте обеспечения безопасной эвакуации при пожаре.....	135
3.5 Экспериментально-аналитическая методика определения уровня токсичности строительных материалов, применяемых на путях эвакуации, при пожаре.....	140
3.6 Практические рекомендации по применению экспериментально-аналитического подхода к оценке токсичности строительных материалов.....	143
3.7 Выводы по третьей главе.....	148

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	150
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	167
АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	167

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

Необходимость учитывать токсикологическую обстановку при проектировании зданий, особенно при формировании объёмно-планировочных решений и организации путей эвакуации, подтверждается статистическими данными [1, 2]. По этим материалам основная доля смертельных исходов при пожарах связана именно с воздействием токсичных продуктов горения и составляет порядка 60-80 % от общего числа погибших. Так, в 2022 году от отравления токсичными газами зарегистрировано 3 977 летальных случаев [2].

При этом, хотя монооксид углерода традиционно рассматривают как основной токсикант, результаты исследований [3-19] показывают, что в ходе пожара формируется и ряд других опасных соединений, достигающих токсикологически значимых концентраций. Следовательно, расчёт времени блокирования путей эвакуации должен опираться не на один показатель, а учитывать совокупность основных токсичных продуктов горения.

Уровень токсичности строительных материалов при пожаре определяется в соответствии с методикой, изложенной в нормативном документе [20]. Несмотря на то, что данный документ был разработан в прошлом веке и основан на использовании биологических моделей с участием лабораторных животных, он до сих пор применяется в практике ввиду отсутствия официально утверждённой альтернативы. Вместе с тем, моральное и технологическое устаревание методики подчёркивает необходимость её пересмотра и адаптации к современным требованиям токсикологической оценки.

Действующие методики, как правило, базируются на биологических испытаниях, предусматривающих воздействие токсичных продуктов горения на живые организмы, преимущественно белых мышей. Такой подход вызывает обоснованные этические вопросы и обладает рядом методологических ограничений, связанных с индивидуальной вариабельностью физиологического состояния животных, что снижает точность и воспроизводимость получаемых

результатов.

В этой связи, акцентируется внимание на разработке методики, которая позволит проводить расчетное определение уровня токсичности строительных материалов при пожаре на основе комплексного анализа параметров горения, в том числе газификации. Такой подход не только исключит использование живых организмов в исследованиях, но и обеспечит более высокую степень стандартизации и воспроизводимости результатов, а также позволит более детально анализировать состав продуктов горения.

Кроме того, обеспечение пожарной безопасности объектов защиты тесно связано с математическим моделированием динамики опасных факторов пожара, которое включает в себя моделирование распространения токсичных газов.

Однако при моделировании распространения опасных факторов пожара математические модели не передают полной токсикологической картины, т.к. они учитывают только те токсичные газы ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCL}$ ) параметры образования которых известны, не учитывая других токсикантов, способных выделяться в токсикологически значимых концентрациях при горении строительных материалов. Ограниченность имеющихся экспериментальных баз данных, выражающаяся в отсутствии сведений об удельных коэффициентах генерации токсичных газов, затрудняет определение количественных характеристик их массового образования в процессе моделирования пожара.

В связи с этим разработка экспериментально-аналитической методики, позволяющей при оценке токсичности строительных материалов в условиях пожара получать экспериментальные данные об образовании различных токсикантов, необходимые для расчёта времени блокирования путей эвакуации, относится к числу приоритетных направлений современных научных и прикладных исследований.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

Существенный вклад в развитие научных представлений о токсикологической опасности продуктов горения, а также в развитие принципов и методов оценки уровня их опасности, внесли такие исследователи,

как: В.С. Иличкин [21, 22, 23], С.В. Пузач [3, 5, 24-33], П.П. Щеглов [19, 34-36], Д.В. Трушкин [37-41], М. М. Хиршлер [42, 43] и другие.

Существенное влияние на развитие современных научных взглядов на образование опасных факторов пожара, включая механизмы возникновения и распространения токсичных продуктов горения, оказали ведущие специалисты в данной области, среди которых следует отметить следующих исследователей: Ю.А. Кошмаров [44], В.М. Астапенко [45], И.С. Молчадский [46, 47], С.В. Пузач [3, 5], А.Н. Баратов [48], Т. Tanaka [49] и другие.

Несмотря на существенный вклад перечисленных авторов в разработку методов оценки токсичности продуктов горения строительных материалов, существующие методики не обеспечивают возможности комплексно определить их влияние на условия безопасной эвакуации людей в случае пожара.

Известные методы определения уровня токсичности строительных материалов при пожаре имеют ряд недостатков, таких как невысокая достоверность оценки уровня токсичности и низкая сходимость результатов ввиду индивидуальных особенностей организмов подопытных животных (белых мышей).

Вместе с тем, для многих современных строительных материалов, в том числе полимерных, отсутствуют удельные коэффициенты выделения опасных токсикантов. Имеющиеся методики не позволяют при определении группы токсичности формировать указанные параметры в базу данных, предназначенную для процесса моделирования образования и распространения токсичных газов.

В данном исследовании предлагается разработать экспериментально-аналитическую методику определения уровня токсичности строительных материалов при пожаре, которая позволит отказаться от использования животных при проведении экспериментов, будет ориентирована на обеспечение безопасной эвакуации людей при пожаре и даст возможность формировать базу данных пожарной нагрузки.

**Целью исследования** является разработка экспериментально-аналитической методики определения уровня токсичности строительных

материалов, применяемых на путях эвакуации, при пожаре.

Для достижения цели исследования необходимо решить **следующие поставленные задачи:**

– Проанализировать токсикологическую обстановку пожара, образование и распространение токсичных газов, характер и динамику отравления человека при вдыхании продуктов горения в замкнутых пространствах, а также рассмотреть литературные источники, отражающие проделанную работу в этом направлении;

– Рассмотреть существующие методики по определению уровня токсичности строительных материалов при пожаре;

– Разработать и научно обосновать новый критерий токсикогенной опасности, предназначенный для оценки уровня токсичности строительных материалов при пожаре с точки зрения выполнения условия безопасной эвакуации людей;

– Модернизировать экспериментальную установку с целью расширения спектра определяемых токсичных продуктов горения строительных материалов и провести на экспериментальной установке исследования уровня токсичности продуктов горения строительных материалов с использованием нового критерия токсикогенной опасности, при этом определить удельные коэффициенты образования высокотоксичных газов, необходимых для моделирования динамики их образования и распространения;

– Разработать систему ранжирования строительных материалов в зависимости от величины показателя токсичности продуктов горения, определённого с использованием нового критерия токсикогенной опасности;

– Разработать практические рекомендации по применению предложенной экспериментально-аналитической методики для оценки выполнения требований по обеспечению безопасной эвакуации людей из зданий в условиях пожара.

**Объектом исследования** является определение уровня токсичности

строительных материалов, применяемых на путях эвакуации объектов защиты.

**Предметом исследования** является экспериментально-аналитическая методика определения уровня токсичности строительных материалов, применяемых на путях эвакуации при пожаре.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- впервые введен и обоснован критерий токсикогенной опасности при определении уровня токсичности строительных материалов при пожаре, который в отличие от существующих методов, интегрирует в себя удельную скорость газификации горючего материала, удельный коэффициент образования токсичного газа и линейную скорость распространения пламени по поверхности твёрдого материала;
- в ходе исследований были получены новые экспериментальные данные об удельных коэффициентах образования, расширенного по сравнению с существующими базами данных перечня токсичных газов в маломасштабной экспериментальной установке, необходимых для расчёта времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения строительных материалов;
- предложена система ранжирования строительных материалов по уровню токсичности их продуктов горения на основе нового критерия токсикогенной опасности, которая позволяет оценить возможность использования вышеуказанных материалов в зданиях с точки зрения обеспечения выполнения условия безопасной эвакуации людей.

**Теоретическая значимость работы** заключается в:

- введение нового критерия токсикогенной опасности, способствующего углублению научного понимания процессов, связанных с токсичностью продуктов горения, с учетом реальных условий пожара в замкнутых помещениях;
- развитию и уточнению научных представлений о процессах формирования и распространения высокотоксичных газов в объёме защищаемых помещений и их влияния на продолжительность блокирования путей эвакуации.

**Практическая значимость работы** заключается в:

- пополнении и обновлении базы данных типовой пожарной нагрузки, используемой для расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре на объектах защиты;
- создание более точной, гуманной (отказ от использования животных в испытаниях) методики определения уровня токсичности продуктов горения строительных материалов при пожаре.
- модернизации установки, адаптированной для количественного определения широкого спектра токсичных продуктов горения, которая может применяться в лабораторных условиях для оценки уровня токсичности строительных материалов, используемых на путях эвакуации;
- получении в ходе экспериментов значений удельных коэффициентов образования CO, HCN, HCl и других газов, которые могут использоваться при численном моделировании пожара;
- предложении ранжирования строительных материалов по степени токсикогенной опасности, которое может быть использовано проектными и экспертными организациями при обосновании применения тех или иных материалов в эвакуационных коридорах, холлах и других помещениях, критичных с точки зрения обеспечения безопасности людей при пожаре.

**Методология и методы исследования.** Исследование базируется на совокупности научных подходов, сформированных в области изучения тепломассообменных процессов, моделирования развития опасных факторов пожара и анализа токсичности продуктов горения строительных материалов. В работе применён комплекс методов, включающий экспериментальные исследования термического разложения различных веществ и материалов, а также расчётное моделирование газодинамических и тепломассообменных явлений.

**Реализация работы** заключается в следующем:

- полученные в ходе исследования результаты были внедрены в учебный процесс Академии ГПС МЧС России и используются при подготовке лекционных

материалов, а также при организации практических и лабораторных занятий по дисциплине «Теплотехника и прогнозирование опасных факторов» в рамках темы «Основы дифференциального метода прогнозирования опасных факторов пожара»;

- проведении расчётов пожарных рисков на объектах, расположенных на территории Курской области, специалистами Испытательной пожарной лаборатории Главного управления МЧС России по Курской области, с использованием математического моделирования развития опасных факторов пожара для определения времени блокирования путей эвакуации;

- выполнении специалистами ООО «Инженерный центр «Безопасность» и ООО «ПроектИнвест» инженерных расчётов при оценке пожарных рисков и подготовке планировочных решений по обеспечению безопасной эвакуации людей на объектах капитального строительства;

- при выполнении НИР «Научное обоснование и формирование базы данных горючей нагрузки» (НИР «База данных») в рамках Плана НИОКР МЧС России на 2025 г. и плановый период 2026-2027 гг., при формировании и расширении базы данных горючей нагрузки на основе экспериментальных данных по пожарной опасности напольных покрытий.

Указанная реализация подтверждается материалами, отраженными в приложении А.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- анализ существующих методик оценки уровня токсичности продуктов горения строительных материалов при пожаре, токсикологической картины пожара, образования и распространения высокотоксичных газов;

- новый критерий токсикогенной опасности, предназначенный для оценки уровня токсичности продуктов горения строительных материалов с точки зрения выполнения условия безопасной эвакуации людей;

- модернизация экспериментальной установки и методики проведения экспериментов;

- результаты экспериментальных исследований токсичности продуктов

термического разложения образцов строительных материалов, используемых на путях эвакуации;

– система ранжирования строительных материалов на основе нового критерия токсикогенной опасности с целью оценки выполнения условия безопасной эвакуации людей при пожаре;

– практические рекомендации по применению экспериментально-аналитического подхода к оценке токсичности строительных материалов, применяемых на путях эвакуации.

**Степень достоверности полученных результатов** подтверждается использованием поверенных средств измерения в ходе экспериментальных исследований, применением проверенных методов обработки экспериментальных данных и апробированных математических подходов к анализу численных результатов. Сопоставление экспериментальных и теоретических данных показало их достаточное соответствие, обеспечивающее необходимую точность для инженерных расчётов.

**Личный вклад автора.** Основные результаты исследования, обладающие научной новизной и выносимые на защиту, получены автором в ходе самостоятельной работы. Ключевые положения диссертации отражены в публикациях, размещённых в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации.

**Апробация работы.** Основные научные результаты были представлены на следующих 9-ти конференциях: XXXIII Международной научно-практической конференции «Общенаучные проблемы инженерной подготовки кадров МЧС России» (Химки, Академия гражданской защиты МЧС России имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика, 2023), XI научно-практической конференции «Ройтмановские чтения», (Москва, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2023), III научно-практической конференции по программному обеспечению для решения задач пожарной безопасности «ПОЖСОФТ 2023», (Москва, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2023), XII научно-практической конференции

«Ройтмановские чтения», (Москва, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2024), XXXVI Международной научно-практической конференции, посвященной 375-й годовщине образования пожарной охраны России «Актуальные проблемы пожарной безопасности», (Москва, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2024), XXVI Международной научно-практической конференции «Современные проблемы обеспечения безопасности», (Екатеринбург, Уральский Институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2024), IV научно-практической конференции по программному обеспечению для решения задач пожарной безопасности «ПОЖСОФТ 2024», (Москва, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2024), XIII научно-практической конференции «Ройтмановские чтения» (Москва, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2025), XVII научно-практической конференции «Экологические проблемы XXI века» (Москва, Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2025).

**Публикации:** По теме работы автором опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (ВАК России).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 172 страницах машинописного текста, включает в себя 53 рисунка, 7 таблиц, список литературы из 119 наименований.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ТОКСИКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЧЕЛОВЕКА ВО ВРЕМЯ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ

## 1.1 Особенности токсикологической обстановки при пожарах

Во многих странах традиционные строительные материалы (древесина, стекло, хлопок) активно замещаются более доступными полимерными аналогами – полиуретаном, полиэтиленом, пенополистиролом. Это отражает стремление снизить затраты и повысить конкурентоспособность, что ведёт к масштабному внедрению синтетических материалов в строительство и отделку на фоне технологического прогресса.

Развитие научно-технического прогресса способствует постоянному появлению инновационных материалов, проиллюстрированных на рисунке 1.1. В XXI веке широко используются строительные материалы из металловсплавов, полиэтилена, полиуретана, полистирола и композитов, обеспечивающих высокую прочность и устойчивость к разрушению при сниженной массе [50].

Полимерные строительные материалы занимают приоритетные позиции в сфере архитектуры и дизайна благодаря совокупности эксплуатационных преимуществ – низкой плотности, высокой прочности, светозащитным свойствам и технологичности, что обуславливает их широкое применение в современных строительных решениях [51].



Рисунок 1.1 – Общий вид некоторых полимерных материалов

Технологическое развитие экономики существенно трансформировало токсикологическую картину пожара. Если ранее основную долю пожарной нагрузки составляли изделия из природных материалов – древесины, стекла, хлопка, льна и других, что подтверждается данными базы типовой пожарной нагрузки, разработанной в 1970-х годах [44], то в настоящее время преобладают полимерные материалы. Их термическое разложение сопровождается образованием широкого спектра продуктов горения, включая газы высокой токсичности, представляющие серьёзную угрозу для жизни и здоровья человека при пожаре.

Токсичные газы – это химические вещества и соединения, способные при ингаляционном или контактном воздействии нарушать жизненно важные функции организма, вызывая симптомокомплекс, характерный для острого или хронического отравления [52].

Согласно статистике, обобщенной Всероссийским ордена «Знак Почета» научно-исследовательским институтом противопожарной обороны, 60-85% людей погибают на пожарах вследствие воздействия токсичных продуктов горения [1, 2].

Термическое разрушение строительных материалов сопровождается выделением различных токсичных газообразных веществ, воздействующих на организм человека посредством разных биохимических механизмов.

Многообразие возникающих эффектов определяется совокупностью факторов и причин [6, 53, 54].

Прежде всего, существенную роль играет химическая природа газа: одни соединения, например угарный газ (CO), нарушают процесс переноса кислорода в организме, тогда как другие, такие как хлор (Cl<sub>2</sub>), вызывают химические повреждения тканей. Кроме того, физико-химические характеристики, включая растворимость и молекулярную массу, влияют на глубину проникновения токсикантов: лёгкие газы, например аммиак, преимущественно воздействуют на верхние дыхательные пути, а более тяжёлые, такие как сероводород, поражают нижние отделы дыхательной системы. Путь воздействия также критичен – ингаляция, абсорбция через кожу или слизистые приводят к различной токсикодинамике. Существенную роль играют доза и концентрация вещества, определяющие тяжесть поражения. Наконец, физиологическое состояние человека (возраст, наличие заболеваний, индивидуальная чувствительность) влияет на восприимчивость к токсикантам и выраженность последствий отравления.

В своей работе [34] П.П. Щеглов исследует образование газов при термоокислительном разложении полимерных строительных материалов, определяя на основе термических и газоаналитических испытаний состав продуктов горения, включая опасные токсичные соединения, а также анализируя факторы, влияющие на интенсивность их выделения; полученные результаты легли в основу последующих исследований и до сих пор используются при оценке пожарной опасности в зданиях.

В работе Астапенко [45] представлены основы термогазодинамики пожаров, включая моделирование движения газов и накопления токсичных продуктов горения в замкнутых помещениях, что важно для оценки угрозы на путях эвакуации.

В работе И.С. Молчадского [47] рассматриваются методические подходы к определению удельной интенсивности тепловыделения при горении материалов, что имеет значение для оценки скорости развития пожара, накопления токсичных продуктов и их последующего распространения по путям эвакуации.

Токсикологическая обстановка при пожаре характеризуется сложным и многофакторным составом. Наиболее значимыми токсикантами, согласно ряду исследований, являются угарный газ (CO), углекислый газ (CO<sub>2</sub>) и хлороводород (HCl), которые регулярно фиксируются как ключевые опасные продукты горения. Их токсичность официально признана и отражена в нормативно-правовых документах Российской Федерации [55].

В работах [3-16] и др. указывается на то, что при пожаре, в продуктах горения строительных материалов обнаружены различные токсиканты в токсикологически значимых концентрациях.

В исследовании [21] подчёркивается, что химический состав токсичных продуктов, образующихся при горении, определяется природой используемого строительного материала. При разложении пластмасс, синтетических волокон, древесины и лакокрасочных покрытий в условиях высокой температуры возникает разнообразный комплекс вредных веществ. Особенно опасны продукты неполного сгорания, возникающие при дефиците кислорода, включая угарный газ (CO) и различные непредельные углеводороды, обладающие выраженной токсичностью.

В исследовании [21] отмечается, что количество и химический состав образующихся токсичных веществ в значительной степени зависят от условий газификации, таких как температура среды, уровень теплового воздействия и содержание кислорода в зоне горения. Характерные для пожара высокие температуры интенсифицируют процессы термического разрушения органических материалов и способствуют формированию вторичных токсичных соединений. Существенное влияние также оказывают химические добавки и функциональные примеси (например, антипирены, пластификаторы, стабилизаторы), которые при термическом разрушении выделяют токсичные газы и усиливают общую опасность продуктов горения [56].

Дополнительную токсикологическую опасность при пожаре представляет взаимодействие различных материалов и продуктов их термического разложения. В условиях высоких температур и ограниченного доступа кислорода возможны вторичные химические реакции, приводящие к образованию новых токсикантов.

Так, при горении поливинилхлорида (ПВХ), содержащего хлор, выделяется хлороводород (HCl), который, реагируя с другими компонентами окружающей среды, способен формировать соединения с повышенной токсичностью [36].

Существенное влияние на состав продуктов горения оказывает стехиометрический режим процесса. При достаточном количестве кислорода происходит полное окисление органических веществ с образованием сравнительно безопасных соединений - углекислого газа (CO<sub>2</sub>) и воды. Напротив, кислородный дефицит, характерный для большинства реальных пожаров, приводит к неполному сгоранию, сопровождающемуся образованием угарного газа (CO), сажи и широкого спектра токсичных промежуточных продуктов [21].

Важным аспектом токсикологической картины пожара является эффект комбинированного воздействия токсичных газов как на организм человека, так и друг на друга. Многие продукты горения, образующиеся одновременно, способны вступать во взаимные химические реакции, изменяя как токсикокинетику воздействия, так и общий уровень опасности.

Так, при наличии достаточного количества кислорода угарный газ (CO) способен окисляться до углекислого газа (CO<sub>2</sub>), что приводит к снижению его токсического воздействия, тогда как оксиды азота (NO, NO<sub>2</sub>) образуются преимущественно в условиях высоких температур вследствие взаимодействия азота воздуха с кислородом. Наличие подобных химических превращений существенно усложняет прогнозирование токсического эффекта и требует учёта как усиливающих, так и ослабляющих взаимодействий между компонентами газовой среды [21]. Хлороводород (HCl), образующийся при термическом разложении хлорсодержащих полимеров, в частности поливинилхлорида (ПВХ), способен вступать в реакцию с водяным паром, в результате чего формируется соляная кислота (HCl в водной фазе). Такое соединение оказывает агрессивное коррозионное и раздражающее воздействие на открытые участки кожи, слизистые оболочки дыхательных путей и глаз, что существенно увеличивает тяжесть поражения человека при пожаре [57].

Диоксины и фураны, относящиеся к группе высокотоксичных

полихлорированных органических соединений, формируются в процессе пиролиза органических материалов при наличии хлорсодержащих компонентов. Одной из особенностей этих соединений является их способность адсорбироваться на частицах сажи и дыма, что значительно повышает риск ингаляционного поступления в организм и затрудняет их удаление из воздушной среды. Такие соединения обладают выраженным канцерогенным, мутагенным и иммунотоксическим действием, даже при низких концентрациях, что делает их крайне опасными при пожарах, особенно в закрытых пространствах [58].

Диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), образующийся при термическом разложении серосодержащих веществ, в условиях пожара может вступать в реакцию с водяным паром, приводя к образованию сернистой кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ). При наличии окислителей, в частности атмосферного кислорода, последняя способна окисляться до серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Эти процессы не только обуславливают явление «кислотных дождей» в атмосфере, но и усиливают токсическое и коррозионное воздействие на биологические ткани, особенно слизистые оболочки дыхательных путей и глаз, что существенно повышает риск поражения человека в условиях пожара [58].

В источнике [6] приведён перечень наиболее распространённых токсичных веществ, образующихся при пожарах, и указаны их основные источники: CO возникает при неполном сгорании органических материалов,  $\text{CO}_2$  - при их полном окислении, а HCN выделяется при горении азотсодержащих полимеров (например, полиуретана и нейлона) и некоторых волокон, включая искусственный шёлк и шерсть.

Диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ) может образовываться при горении нитросодержащих соединений. Кроме того, его появление отмечается при сгорании древесины, шерсти и хлопка.

Диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ) выделяется при сгорании серосодержащих углеводородов, включая топлива типа бензина, керосина и мазута.

Альдегиды способны образовываться при термическом разложении целлюлозосодержащих материалов, а также углеводородов.

Наконец, пиролиз галогенсодержащих полимеров (например, поливинилхлорида - ПВХ) сопровождается выбросами ряда особо опасных соединений, среди которых фосген, хлороводород (HCl) и фтороводород (HF).

Представленные сведения подтверждают высокую значимость понимания химической природы токсикантов, образующихся при пожаре, поскольку различие в составе исходных горючих веществ обуславливает разнообразие токсических профилей выделяющихся газов. Это, в свою очередь, оказывает непосредственное влияние на уровень токсикологической опасности, время наступления критических концентраций в воздушной среде и сроки блокирования путей эвакуации. Следовательно, учет химического состава строительных материалов и продуктов их термического разложения должен рассматриваться как важнейший фактор при моделировании развития пожара и разработке эффективных объемно-планировочных решений, обеспечивающих безопасность людей.

В работе [58] отмечается, что CO<sub>2</sub> и CO – универсальные продукты горения любых углеродсодержащих материалов.

Оксиды азота (NO<sub>x</sub>), относящиеся к продуктам неполного сгорания, формируются, в частности, при термическом разложении целлулоида и полиуретана. Цианистый водород (HCN), обладающий выраженной токсичностью, генерируется при горении древесины, целлюлозы, вискозы, шелка, кожи и широкого спектра полимерных материалов, включая лигнин. Акролеин и другие альдегиды образуются в результате пиролиза древесины и бумаги. Диоксид серы (SO<sub>2</sub>) и аммиак (NH<sub>3</sub>) выделяются при горении резины и азотсодержащих материалов, таких как меламин, нейлон и формальдегидные смолы. Бензол, признанный канцерогенным веществом, обнаруживается в дымовых выбросах при горении полистирола и мазута. Изоцианаты, известные своей острой токсичностью и способностью вызывать респираторные расстройства, являются продуктами горения пенополиуретанов и ряда синтетических пластиков. Перечисленные вещества в совокупности формируют токсикантный профиль пожара, определяющий характер поражения организма и критическое время эвакуации.

В работе [58] представлены предельно допустимые концентрации

высокотоксичных газов, образующихся при пожаре, с учетом времени экспозиции. Так, при воздействии 5-10 минут смертельными являются: аммиак –  $3,5 \text{ г/м}^3$ , СО –  $6,0 \text{ г/м}^3$ , HCN –  $0,2 \text{ г/м}^3$ , фосген –  $0,2 \text{ г/м}^3$ , хлор –  $0,7 \text{ г/м}^3$  и др. При увеличении времени до 30-60 минут допустимые значения значительно снижаются: для СО –  $0,4 \text{ г/м}^3$ , HCN –  $0,1 \text{ г/м}^3$ , фосгена –  $0,1 \text{ г/м}^3$ , хлора –  $0,07 \text{ г/м}^3$ . Эти данные необходимы для оценки времени безопасной эвакуации и определения степени токсической угрозы различных материалов.

В работе [5] представлены сведения о токсичных продуктах горения, их предельно допустимых концентрациях (ПДК) и характерных реакциях организма. Угарный газ (СО), образующийся в результате неполного сгорания органических веществ, приводит к кислородному голоданию тканей, вызывает головную боль, потерю сознания и при высоких концентрациях может стать причиной летального исхода (ПДК –  $3,0 \text{ мг/м}^3$ ). Диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), снижая содержание кислорода в воздухе, провоцирует учащённое дыхание и головную боль, при этом его предельно допустимая концентрация составляет  $9000 \text{ мг/м}^3$ . Цианистый водород (HCN) блокирует ферменты клеточного дыхания и быстро поражает центральную нервную систему (ПДК –  $0,3 \text{ мг/м}^3$ ). Оксиды азота (NO,  $\text{NO}_2$ ) вызывают бронхоспазм и отёк лёгких (ПДК –  $0,085 \text{ мг/м}^3$ ). Сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) и аммиак ( $\text{NH}_3$ ) оказывают раздражающее и нейротоксическое действие (ПДК – 10 и  $20 \text{ мг/м}^3$  соответственно). Формальдегид и акролеин воздействуют на дыхательные пути и кожу, обладая канцерогенным и раздражающим эффектом (ПДК –  $0,05$  и  $0,1 \text{ мг/м}^3$ ). Хлористый водород (HCl) и фтористый водород (HF), выделяющиеся при горении ПВХ и фторсодержащих материалов, вызывают сильное раздражение дыхательных путей (ПДК –  $5,0$  и  $0,5 \text{ мг/м}^3$ ). Представленные данные подчёркивают высокую токсичность продуктов горения и необходимость учёта их воздействия при пожарной оценке материалов.

Современное строительство всё чаще использует полимерные и синтетические материалы, что значительно изменяет токсикологическую обстановку при пожарах по сравнению с периодом, когда преобладали изделия из природных горючих веществ. При термическом разрушении современных

строительных материалов образуется разнообразный комплекс продуктов горения, в который входят как распространённые соединения – угарный и углекислый газы, так и особо опасные вещества, включая цианистый водород, оксиды азота, хлороводород, фтористый водород и диоксины. Степень их токсичности определяется химическим составом исходных материалов, условиями протекания горения (температурным режимом, доступом кислорода, наличием примесей), а также последующими реакциями между компонентами, способными приводить к формированию новых, ещё более вредных соединений. Воздействие токсикантов на организм человека определяется не только их химическими характеристиками, но и путём поступления, уровнем концентрации, временем экспозиции и индивидуальными физиологическими особенностями пострадавшего. Всё это подчеркивает необходимость обязательного учёта токсикологических характеристик строительных материалов при разработке проектных решений, направленных на обеспечение эффективной и безопасной эвакуации людей при пожаре.

Указанные знания необходимы на этапе определения наиболее опасных токсикантов при расчете уровня токсичности веществ и материалов при пожаре.

Таким образом, при пожаре может образовываться чрезвычайно токсичная среда, которая воздействует на человека во время его эвакуации.

## **1.2 Токсикологическая характеристика воздействия газовой среды при пожаре на человека во время его эвакуации**

Токсичность продуктов горения – это интегральная характеристика летучих химических соединений, которые возникают при термическом разложении и горении материалов как в режиме тления, так и при пламенном горении. Суть этой характеристики заключается в способности образующихся веществ оказывать вредное воздействие на организм человека [59].

Одним из наиболее опасных токсичных газов, образующихся в процессе

термического разложения материалов, является фосген ( $\text{COCl}_2$ ).

**Фосген** ( $\text{COCl}_2$ ) представляет собой один из наиболее опасных токсичных газов, образующихся в условиях пожара. Он выделяется при термическом разложении хлорсодержащих полимеров, таких как поливинилхлорид, а также в результате взаимодействия четырёххлористого углерода с пламенем или разогретыми металлическими поверхностями [48, 60]. Газ является бесцветным, с характерным запахом прелого сена или гнилых фруктов, обладает высокой плотностью (в 3,4 раза тяжелее воздуха) и склонностью к накоплению в приземных слоях воздуха, особенно в замкнутых помещениях [57, 61].

При взаимодействии с воздухом фосген частично гидролизуется с образованием хлороводорода, однако в условиях пожара это не препятствует его быстрому распространению. Газ плохо растворим в воде, но хорошо растворяется в органических растворителях [57]. При температуре выше  $200\text{ }^\circ\text{C}$  начинается его термическое разложение с образованием  $\text{CO}$  и  $\text{Cl}_2$ , а при  $800\text{ }^\circ\text{C}$  этот процесс становится полным [48]. В концентрации всего  $0,004\text{ мг/л}$  фосген уже определяется по запаху, однако он угнетает обонятельный нерв, и вскоре перестаёт ощущаться, что делает его особенно опасным [53].

Согласно [62], предельно допустимая концентрация фосгена в воздухе рабочей зоны составляет  $0,5\text{ мг/м}^3$ , тогда как концентрация, опасная для эвакуирующихся при пожаре при кратковременном воздействии, может составлять всего  $0,2 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$  [63]. При длительном воздействии критической считается концентрация  $0,005\text{ г/м}^3$ , превышение которой в 10 раз приводит к смертельным последствиям уже при экспозиции 30-60 минут [64].

Фосген – сильный ингаляционный токсикант, поражающий нижние дыхательные пути. При высокой температуре и влажности его действие усиливается [65].

Вдыхание фосгена может проходить бессимптомно, либо с минимальным раздражающим эффектом, однако спустя 4-6 часов развивается фаза токсического отёка лёгких с нарастающей одышкой, гипоксемией, влажными хрипами и цианозом. При экспозиции длительностью 5-15 минут возможно формирование

тяжёлого альвеолярного повреждения [66].

По данным Pauluhn J. [7], фосген активно реагирует с липидными компонентами сурфактанта и структурными белками альвеоло-капиллярной мембраны, нарушая барьерные функции и вызывая массивную трансудацию жидкости в альвеолы. Это приводит к выраженной гипоксии, вторичному ацидозу и угрозе летального исхода. Патофизиологические эффекты включают гемоконцентрацию, нарушение газообмена и каскад воспалительных реакций [6, 66]. Кроме того, он способен усиливать проницаемость сосудистой стенки, активировать тромбоциты и запускать системный воспалительный ответ.

Исторические данные о применении фосгена в качестве боевого отравляющего вещества во время Первой мировой войны [65], а также современные эксперименты по его выделению при горении полимерных материалов, таких как мягкие игрушки в ТРЦ [32], подтверждают его критическую опасность. В работе [32] показано, что уже на ранних стадиях пожара возможно формирование концентраций фосгена, превышающих безопасные уровни, что делает его одним из основных факторов блокирования путей эвакуации.

Таким образом, фосген – это высокотоксичный ингаляционный агент с «тихим» латентным действием, способный вызывать смертельное поражение дыхательной системы спустя часы после ингаляции. Его образование при пожарах в помещениях требует особого учёта при моделировании сценариев пожара и расчётах времени блокирования путей эвакуации. Фосген должен рассматриваться как один из приоритетных токсикантов при оценке пожарного риска.

**Синильная кислота (HCN)** – высокоопасный ингаляционный токсикант, образующийся при разложении азотсодержащих материалов (полиуретан, нейлон, шерсть), широко используемых в отделке и мебели [67, 68, 69].

HCN является бесцветной летучей жидкостью с характерным запахом миндаля. Он легко воспламеняется, образуя с воздухом взрывоопасные смеси в диапазоне 5,6-40 % по объёму. Его молекулярная масса составляет 27,03 г/моль, температура кипения – 25,6 °С, температура вспышки – 18 °С, плотность – 687,6 кг/м<sup>3</sup>. Он хорошо растворим в воде и органических растворителях, что

способствует его широкой диффузии в тканях организма [48, 65, 67].

Выделение HCN особенно интенсивно при высоких температурах и недостатке кислорода – условиях, типичных для пожаров в замкнутых пространствах. Согласно [68, 69], пиковые концентрации цианистого водорода фиксируются в первые 3-5 минут пожара, когда ещё продолжается эвакуация, и могут достигать летальных значений. HCN быстро распространяется с горячими дымовыми газами по верхним слоям воздуха, что делает его особенно опасным на путях эвакуации [70].

Механизм токсического действия HCN связан с блокадой фермента цитохромоксидазы, что приводит к резкому нарушению клеточного дыхания, тканевой гипоксии и стремительной потере сознания [70-72]. Даже при относительно низких концентрациях (50-100 ppm) наблюдаются тяжёлые симптомы: головокружение, судороги, остановка дыхания. Как подчёркивают Куценко С.А. [67] и Курляндский Б.А. [54], HCN вызывает быстрое развитие системных нарушений, включая угнетение дыхательного центра, нарушение сердечного ритма, кому и смерть – зачастую без выраженных предварительных симптомов. В сочетании с другими продуктами горения, такими как CO, циановодород усиливает общее гипоксическое поражение.

Согласно [63], разовая предельная концентрация HCN, опасная для эвакуирующихся при пожаре (при средней физической нагрузке), составляет  $0,2 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>. В условиях нарушенной вентиляции или отсутствия систем дымоудаления даже кратковременное пребывание в загрязнённой среде может оказаться фатальным.

Таким образом, HCN относится к числу приоритетных токсикантов, критически влияющих на безопасность эвакуации при пожарах. Его высокая летучесть, способность быстро распространяться и вызывать тяжёлое отравление за считанные минуты требуют обязательного учёта при моделировании токсической обстановки на пожаре.

**Сероводород (H<sub>2</sub>S)** относится к числу наиболее опасных токсичных газов, которые могут выделяться при горении серосодержащих материалов, включая

резину, битум, кабельные оболочки и некоторые синтетические полимеры [48, 57]. При недостатке кислорода – например, в режиме тления или в плотной задымлённости – его образование усиливается и способно приводить к высоким концентрациям, особенно критичным для замкнутых помещений.

Физико-химические характеристики сероводорода способствуют его накоплению в нижних и средних слоях воздуха: плотность газа немного превышает плотность воздуха, что особенно критично в плохо вентилируемых помещениях – лестничных клетках, коридорах, подвалах. Такие зоны становятся потенциальными «ловушками» при эвакуации людей [65]. Согласно СП 11.13130.2009 [63], проектировщики должны учитывать возможность образования подобных локальных токсичных зон при оценке пожарной безопасности зданий.

$H_2S$  оказывает острое токсическое воздействие на дыхательные пути. По данным Халикова А.А. [72, 73], уже при концентрации  $0,00028 \text{ кг/м}^3$  возможно развитие резких респираторных симптомов: жжение в носоглотке, кашель, головокружение, потеря сознания. При воздействии концентраций свыше  $700 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$  в течение 15-30 минут возможно тяжёлое отравление и угнетение дыхательного центра, сопровождающееся высоким риском летального исхода [73]. При этом газ опасен своей способностью подавлять обонятельные рецепторы – человек теряет возможность ощущать его запах после кратковременного контакта, что существенно снижает шанс на своевременное реагирование [66].

По информации Горбулина В.И. [73], обнаружение  $H_2S$  на пожаре осложняется его нестабильностью при высоких температурах и влажности, а также переменчивостью концентраций в зависимости от вентиляционного режима и состава горящих материалов. Каучуковые и резиновые изделия, используемые в конструкциях зданий и транспортных средств, при горении могут выделять  $H_2S$  в количествах, достаточных для блокирования путей эвакуации [74].

Таким образом, сероводород представляет собой быстро действующий, высокоопасный токсикант, способный формировать смертельно опасную среду в течение первых минут пожара. Его учёт в расчётах допустимого времени эвакуации и в сценариях моделирования пожара является необходимым условием

обеспечения безопасности в зданиях, содержащих серосодержащие материалы.

**Монооксид углерода (CO)** – один из наиболее опасных токсичных продуктов горения, образующийся при неполном сгорании органических и синтетических материалов [67]. Он не имеет цвета и запаха, не вызывает раздражения, что делает его особенно опасным при эвакуации. Основным механизмом поражения – блокировка транспорта кислорода из-за образования карбоксигемоглобина, вызывающая быстро развивающуюся гипоксию [75].

Газ обладает высокой диффузионной способностью и быстро распространяется по помещению, изначально накапливаясь в верхней части, но затем равномерно заполняя объём, включая лестницы и коридоры [76]. При концентрации 0,1-0,3 % по объёму возможна потеря сознания и смерть в течение нескольких минут. Особенно опасен CO в условиях высокой температуры и низкой вентиляции [77].

Согласно [78, 79], определение критических концентраций и удельного коэффициента образования CO позволяет уточнить сценарии распространения газа и момент блокирования путей эвакуации. Отделочные материалы на основе синтетики значительно повышают объёмы его выделения, что критично для объектов с массовым пребыванием людей.

Таким образом, CO является ключевым токсикантом, скрытое и быстрое действие которого требует обязательного учёта при моделировании пожара [75, 80].

**Диоксид углерода (CO<sub>2</sub>)** в условиях пожара выделяется в значительных объёмах и быстро распространяется по помещению вместе с дымом, заполняя коридоры, лестничные клетки и другие пути эвакуации, особенно при отсутствии вентиляции [5]. При концентрациях свыше 5-6 % CO<sub>2</sub> вызывает гипервентиляцию, головную боль, нарушение координации и усиленное дыхание других токсичных веществ. Более высокие уровни (6-10 %) могут привести к судорогам, потере сознания и остановке дыхания [67, 65].

Хотя CO<sub>2</sub> менее токсичен, чем CO или HCN, он оказывает выраженное физиологическое воздействие за счёт развития респираторного ацидоза и усиления

гипоксического эффекта других газов [42]. По данным [5], накопление  $\text{CO}_2$  снижает эффективность фильтрующих самоспасателей, дезориентирует пострадавших и критически влияет на допустимое время эвакуации.

Таким образом, диоксид углерода в условиях пожара выступает как активный патофизиологический фактор, усиливающий общее токсическое воздействие и ограничивающий возможности спасения.

**Хлороводород** ( $\text{HCl}$ ) выделяется при разложении ПВХ уже в начале пожара и может быстро распространяться конвекцией по коридорам и лестничным клеткам [81, 82].

Даже при низких концентрациях (0,01-0,02 % по объёму)  $\text{HCl}$  вызывает выраженное раздражение слизистых оболочек глаз и дыхательных путей: кашель, жжение, удушье и бронхоспазм. В условиях слабой вентиляции эти эффекты усиливаются, а при высоких концентрациях возможно развитие химических ожогов и некротических изменений с быстрым наступлением дыхательной недостаточности [57].

Высокая растворимость  $\text{HCl}$  в воде способствует его осаждению в верхних дыхательных путях, где он вызывает острые воспалительные реакции и усиливает проникновение других токсикантов за счёт раздражающего действия [67].

Таким образом,  $\text{HCl}$  представляет собой опасный газ с быстрым и агрессивным действием, существенно ограничивающий безопасное время эвакуации. Его учёт обязателен при выборе строительных материалов и проектировании систем противопожарной защиты.

**Фтороводород** ( $\text{HF}$ ) выделяется при термическом разрушении фторсодержащих полимерных материалов, включая тефлон и другие синтетические соединения, используемые в изоляционных слоях, покрытиях и кабельных линиях [83]. Наиболее интенсивное образование данного газа наблюдается при высоких температурах и ограниченном доступе кислорода, что характерно для пожаров в замкнутых помещениях [5].

$\text{HF}$  обладает выраженным токсическим, коррозионным и системным действием. При концентрациях 0,0005-0,001 % по объёму он вызывает раздражение

глаз, кожных покровов и дыхательных путей, а при более высоких дозах – тяжёлые ожоги и отёки лёгочной ткани [84]. Газ хорошо растворяется в воде, образуя фтористоводородную кислоту, усиливающую поражение при контакте с влажными слизистыми.

Согласно [6, 21], HF обладает высокой проникающей способностью и может вызывать системные нарушения: связываясь с кальцием и магнием, он провоцирует судороги, угнетение дыхания и сердечной деятельности. Пузач С.В. [5] подчёркивает быстрое накопление HF в помещении при пожаре, ограничивающее время эвакуации, а Аничков С.В. [65] указывает на невозможность длительного пребывания в заражённой зоне даже при использовании фильтрующих самоспасателей.

Таким образом, фтороводород представляет собой один из наиболее опасных продуктов горения, обладающий как местным, так и системным поражающим действием. Его присутствие на путях эвакуации требует обязательного учёта при применении фторполимерных материалов в конструкциях зданий и инженерных систем.

**Диоксид азота** ( $\text{NO}_2$ ) образуется при горении азотсодержащих полимеров и высокотемпературном окислении воздуха [6]. Газ легко распространяется с дымовыми потоками, накапливаясь в верхних слоях помещений и проникая на пути эвакуации. В условиях слабой вентиляции он может сохраняться в опасных концентрациях, особенно в замкнутых объёмах [75].

Даже при низких концентрациях (0,0025-0,005 % по объёму)  $\text{NO}_2$  вызывает раздражение слизистых, кашель и одышку, а при повышенных дозах – токсический отёк лёгких [64]. Как отмечает Иличкин В.С. [21], эффект воздействия может быть отсроченным, что усложняет диагностику и увеличивает риски при эвакуации. Согласно Щеглову П.П. [19] и Маркизовой Н.Ф. [6],  $\text{NO}_2$  обладает кумулятивным действием и в сочетании с другими токсикантами усиливает гипоксическое поражение и повреждение альвеолярной ткани.

Таким образом, диоксид азота представляет собой высокотоксичный компонент газовой среды пожара, ограничивающий допустимое время пребывания

в задымлённой зоне. Его учёт обязателен при моделировании динамики пожара, выборе отделочных материалов и применении средств индивидуальной защиты.

**Аммиак** ( $\text{NH}_3$ ) образуется при горении азотсодержащих полимеров, клеев и отделочных материалов в результате термического разложения соединений, содержащих аминогруппы [6]. Это летучий, легко распространяющийся газ с резким запахом, который обладает выраженным раздражающим действием на слизистые оболочки дыхательных путей, глаз и кожи.

Даже при незначительном содержании в воздухе (0,002-0,005 % по объёму) аммиак ( $\text{NH}_3$ ) вызывает раздражение слизистых оболочек, сопровождающееся кашлем, слезотечением и ощущением жжения в горле [64].

При повышении концентрации аммиака возможны бронхо- и ларингоспазм, а в тяжёлых случаях – отёк лёгких и угнетение дыхания [6]. Кратковременное вдыхание в замкнутом помещении может привести к смерти за ~30 минут [57].

Из-за меньшей плотности по сравнению с воздухом аммиак поднимается в верхние зоны помещения, распространяясь по лестничным клеткам и коридорам. В условиях слабой вентиляции он способен сохраняться в опасных концентрациях на путях эвакуации [5].

Таким образом, аммиак является опасным веществом, оказывающим выраженное токсическое воздействие при вдыхании и способным быстро вызывать дыхательную недостаточность, поэтому его выделение в условиях пожара необходимо учитывать при оценке токсической обстановки, подборе отделочных материалов и проектировании систем защиты и эвакуации.

**Акролеин** ( $\text{CH}_2=\text{CHCHO}$ ) – высокотоксичный альдегид, образующийся при горении древесины, целлюлозы, синтетических смол, пластмасс и жиров [5, 42, 69]. Газ выделяется уже в начальной фазе пожара и входит в состав видимого дыма, распространяясь с тёплыми потоками и концентрируясь в верхних слоях помещений, включая лестничные клетки и коридоры [6].

Согласно [85, 86], уже при концентрациях 0,0005-0,001 % по объёму акролеин вызывает слезотечение, резкое раздражение глаз, слизистых оболочек и дыхательных путей. При более высоком содержании возможно быстрое развитие

бронхоспазма, токсического отёка лёгких, паралича дыхания и утраты сознания. Как подчёркивается в [5], присутствие акролеина значительно снижает время, доступное для безопасной эвакуации, особенно при одновременном воздействии других токсикантов.

Следовательно, акролеин относится к числу наиболее опасных вторичных токсичных веществ, образующихся при пожаре, и характеризуется высокой летучестью и выраженным раздражающим воздействием. Учет его влияния является необходимым при определении времени блокирования эвакуационных путей, подборе средств индивидуальной защиты и разработке противопожарных систем.

**Ароматические углеводороды**, включая бензол, толуол, ксилол, стирол и другие представители аренов, образуются в процессе горения лакокрасочных покрытий, пластмасс и синтетических смол, особенно при термическом разложении полистирольных, полиэфирных и фенолформальдегидных материалов, широко применяемых в отделке помещений и интерьере [87]. Эти газы отличаются высокой летучестью, быстро распространяются с дымовыми потоками в верхних и средних слоях воздуха и при недостаточной вентиляции способны накапливаться на путях эвакуации [5].

Даже при низких концентрациях (0,001-0,005 % по объёму) они вызывают головокружение, тошноту, нарушение координации и слабость, что критично при эвакуации. Бензол при длительном воздействии обладает канцерогенными свойствами, а в острых случаях возможны поражения центральной нервной системы, дыхания, печени и системы кроветворения [86, 87].

Комбинированное воздействие аренов с другими токсикантами усиливает общее отравляющее действие и снижает время безопасного пребывания в зоне пожара [5]. Их летучесть и проникаемость через альвеолярно-капиллярный барьер способствуют быстрому системному воздействию даже при кратковременном вдыхании.

Таким образом, ароматические углеводороды являются важными компонентами токсической газовой среды пожара, ухудшающими условия

эвакуации. Их наличие требует строгого учёта при выборе отделочных материалов и моделировании сценариев пожара.

**Диоксид серы** ( $\text{SO}_2$ ) образуется при горении серосодержащих материалов – резины, герметиков, теплоизоляции и пластмасс [34]. В зоне активного горения газ выделяется в больших объёмах и быстро распространяется с горячими конвективными потоками, накапливаясь в нижних и средних слоях помещений, особенно при слабой вентиляции [59].

$\text{SO}_2$  обладает резким запахом и выраженным раздражающим действием. Уже при концентрациях 0,005-0,01 % по объёму он вызывает кашель, слезотечение, жжение в глазах и дыхательных путях; при более высоких дозах возможны ларингоспазм, удушье и отёк лёгких [59]. Хорошо растворяясь в воде,  $\text{SO}_2$  образует сернистую кислоту, усиливая местное повреждение слизистых оболочек.

Согласно [6], воздействие  $\text{SO}_2$  может усиливаться за счёт сенсibilизации тканей и кумулятивного эффекта, особенно в условиях ограниченного воздухообмена. Это резко снижает допустимое время эвакуации и требует строгого учёта при моделировании токсической обстановки, выборе отделочных материалов и СИЗ.

Таким образом, диоксид серы – один из ключевых раздражающих токсикантов пожара, ухудшающий условия эвакуации и способный вызывать острое дыхательное поражение даже при кратковременном воздействии.

**Уксусная кислота** ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) выделяется при термическом разложении органических соединений, содержащих ацетильные группы – целлюлозы, полиэфиров, смол и текстиля, широко применяемых в мебели и облицовке [59]. Газообразная форма уксусной кислоты обладает резким запахом, легко распространяется с дымовыми потоками и способна быстро заполнять замкнутые пространства, включая пути эвакуации [5].

Даже при низких концентрациях (0,01-0,02 % по объёму) пары кислоты вызывают раздражение глаз, носоглотки и верхних дыхательных путей, а при высоких – ожоги слизистых, бронхоспазм и развитие отёка лёгких [6,88]. В условиях слабой вентиляции уксусная кислота накапливается преимущественно в

нижних и средних слоях помещений, что критично для эвакуации через коридоры и лестничные клетки [6].

Согласно данным [67], уксусная кислота сочетает местное раздражающее действие с системным метаболическим эффектом и способна вызывать ацидоз и острую дыхательную недостаточность, поэтому Пузач С.В. [5] отмечает, что её присутствие может существенно влиять на расчёты времени блокирования путей эвакуации; следовательно, как летучий токсикант с выраженным раздражающим и удушающим действием она должна учитываться при выборе строительных и отделочных материалов и при моделировании токсической обстановки в замкнутых помещениях. Проведённый обзор литературы показывает, что спектр опасных газов при горении материалов чрезвычайно широк и не ограничивается традиционно учитываемыми CO, CO<sub>2</sub> и HCl: при термическом разложении синтетических и природных материалов могут образовываться фосген, циановодород, сероводород, оксид и диоксид углерода, хлороводород, фтороводород, диоксид азота, акролеин, аммиак, уксусная кислота и ароматические углеводороды, причём часть этих высокотоксичных соединений нередко не включается в расчёты пожарного риска.

Наибольшую угрозу для жизни представляют газы системного токсического действия – фосген, HCN, CO, акролеин и ароматические углеводороды, поскольку их воздействие способно быстро приводить к утрате сознания, угнетению дыхания и летальному исходу. Соединения с выраженным раздражающим эффектом (HCl, NH<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>COOH, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) прежде всего вызывают воспалительные реакции, отёки и формирование дыхательной недостаточности, из-за чего существенно сокращается время допустимого пребывания в задымлённой среде. Дополнительный риск создают вещества, усиливающие общую токсичность газовой смеси за счёт взаимодействия с другими компонентами (например, HF и CO<sub>2</sub>), а также пространственная стратификация: H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> и фосген склонны накапливаться в нижней зоне, тогда как HCN, NH<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> чаще концентрируются в верхних слоях вместе с дымом.

Полученные данные указывают на критическую роль состава строительных

материалов в формировании токсичной среды при пожаре. Это требует обязательного учёта конкретных токсикантов при оценке пожарной опасности, проведении токсикологических испытаний и разработке противопожарных мероприятий. На этапе отбора проб продуктов горения важно ориентироваться не только на СО и HCl, но и на широкий спектр других высокоопасных веществ, оказывающих как местное, так и системное воздействие на организм человека.

Таким образом, надёжная оценка токсичности строительных материалов невозможна без комплексного анализа всех потенциально опасных газов, способных выделяться в реальных условиях пожара. Это имеет принципиальное значение для обоснования времени эвакуации, выбора средств индивидуальной защиты и проектирования безопасных объемно-планировочных решений.

### **1.3 Учет токсичных газов, выделяющихся при пожаре, нормативными документами Российской Федерации**

Согласно законодательству в области обеспечения пожарной безопасности [89], к опасным факторам пожара относятся пламя и искры, тепловой поток, повышенная температура окружающей среды, повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения, пониженная концентрация кислорода, а также снижение видимости в условиях задымления.

По токсичности продукты горения разделяют на следующие группы: малоопасные (Т1); умеренноопасные (Т2); высокоопасные (Т3); чрезвычайно опасные (Т4). Деление на указанные группы осуществляется в соответствии с таблицей 1.1 [20] и представлено ниже:

Таблица 1.1 – Классификация материалов по величине показателя токсичности продуктов горения [20]

Класс опасности	Наименование категории материалов	Показатель токсичности $H_{CL50}$ , г/м <sup>3</sup>
Т1	Малоопасные	$H_{CL50}$ не менее 120

Продолжение таблицы 1.1

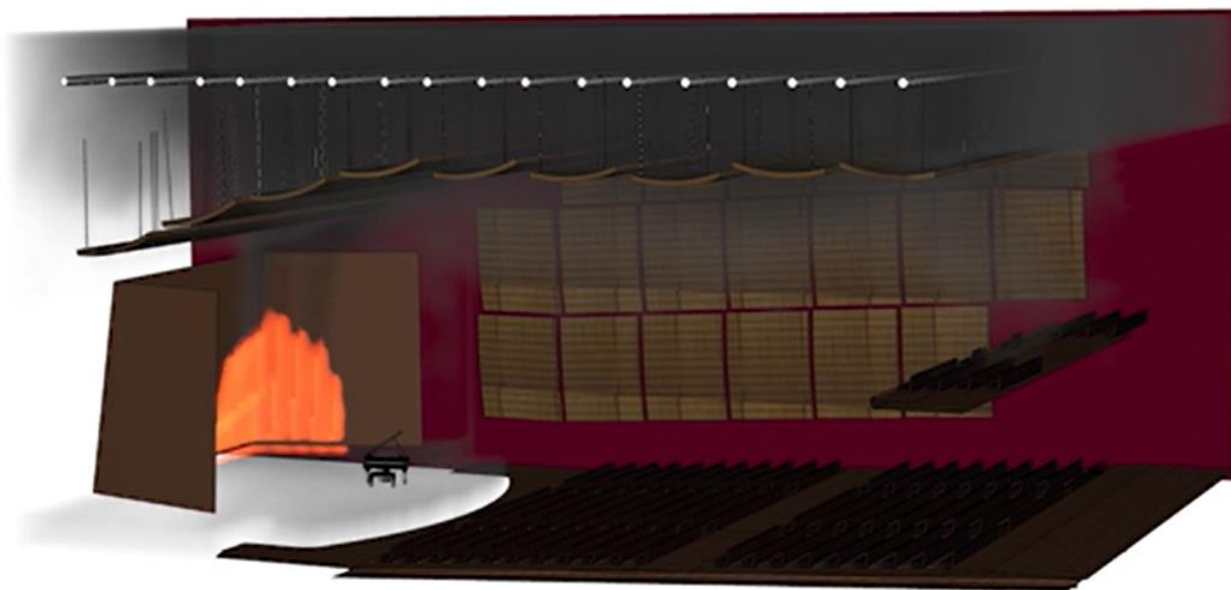
Класс опасности	Наименование категории материалов	Показатель токсичности $H_{CL50}$ , г/м <sup>3</sup>
T2	Умеренно опасные	$H_{CL50}$ от 40 до 120 включ.
T3	Высокоопасные	$H_{CL50}$ от 13 до 40 включ.
T4	Чрезвычайно опасные	$H_{CL50}$ не более 13 включ.

В соответствии с [90] определен список нормативных документов, выполняя требования которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований, установленных в нормативно-правовом акте [89]. В указанном списке приведены 146 нормативно-правовых документов в области обеспечения пожарной безопасности пожарной безопасности.

Документы [55, 91] задают порядок расчёта времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара для объектов разных классов, включая производственные и складские здания, и устанавливают предельные концентрации токсичных газов:  $CO_2$  – 0,11 кг/м<sup>3</sup>,  $CO$  –  $1,16 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>,  $HCl$  –  $23 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>.

Документы [55, 91] задают порядок расчёта времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара для объектов разных классов, включая производственные и складские здания, и устанавливают предельные концентрации токсичных газов:  $CO_2$  – 0,11 кг/м<sup>3</sup>,  $CO$  –  $1,16 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>,  $HCl$  –  $23 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>.

Расчёт времени, когда опасные факторы пожара делают эвакуационные пути заблокированными, выполняют с опорой на прогноз их развития во времени. Для решения этой задачи используют численные методы моделирования, в том числе программные комплексы вроде Fire Dynamics Simulator (FDS); пример соответствующего расчёта приведён на рисунке 1.2. Несмотря на высокий уровень проработки таких моделей, в них, как правило, учитываются лишь три токсичных компонента –  $CO_2$ ,  $CO$  и  $HCl$ , тогда как образование и перенос других высокотоксичных продуктов горения остаются вне расчётной схемы.



85.0

Рисунок 1.2 – Моделирование пожара в помещении зального типа

Неучёт ряда токсичных соединений в действующих методиках [55, 91] связан с отсутствием достаточной экспериментальной информации об их формировании и распространении в процессе горения строительных материалов. Кроме того, в имеющихся базах данных отсутствуют сведения об удельных коэффициентах образования токсикантов при пожаре, что не позволяет достоверно оценивать объёмы их массового выделения. Недоучёт других токсичных продуктов горения существенно снижает качество оценки пожарных рисков и затрудняет обоснование эффективных мер противопожарной защиты. При этом удельные коэффициенты образования токсичных веществ служат количественными показателями, характеризующими выход вредных соединений при горении либо термическом разложении строительных материалов. Их применение позволяет оценить массу образующихся токсикантов в замкнутом пространстве пожара, определить их концентрацию в воздухе, спрогнозировать время достижения опасных и смертельных уровней и, тем самым, проанализировать степень воздействия на людей и окружающую среду. Эти данные критически важны при выборе строительных и отделочных материалов, проектировании, а также при расчете пожарного риска, где сопоставляется расчетное время эвакуации и время блокирования путей эвакуации.

В соответствии с [63] установлены исходные данные для методики определения временного интервала, спустя который произойдёт блокирование пути эвакуации людей при пожаре. В качестве исходных параметров рассматриваются наиболее распространённые токсичные продукты горения и их предельно допустимые концентрации, при превышении которых пребывание людей в загазованной среде становится опасным. К ним относятся: окись углерода  $X_{CO} = 0,00116 \text{ кг/м}^3$ , двуокись углерода  $X_{CO_2} = 0,11 \text{ кг/м}^3$ , хлористый водород  $X_{HCL} = 0,023 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ , цианистый водород  $X_{HCN} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ , фосген  $X_{COCL_2} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ , окислы азота  $X_{NO_2} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ , сероводород  $X_{H_2S} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ . Также учитывается предельная концентрация кислорода, при понижении которой наступает угроза гипоксии –  $X_{O_2} = 0,226 \text{ кг/м}^3$ .

В [63] приведены предельные концентрации для кратковременного воздействия. Токсиканты без экспериментальных данных допускается не учитывать.

В документе [20] описана методика экспериментального определения токсичности продуктов горения полимерных материалов и выделен перечень наиболее распространённых опасных токсикантов, включая CO, HCN, HCl, оксиды азота ( $N_xO_y$ ), акролеин ( $CH_2CHCHO$ ), HF, HBr,  $SO_2$ , формальдегид ( $CH_2O$ ) и другие соединения; также подчёркивается, что токсический эффект газовой фазы может усиливаться при повышенном содержании  $CO_2$  и одновременном снижении концентрации  $O_2$  [20].

В работе [55] описана методика оценки уровня пожарной безопасности людей, предусматривающая установление предельно допустимых концентраций токсичных газов в помещении, а именно: диоксида углерода –  $0,11 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , оксида углерода –  $1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$  и хлороводорода –  $23 \cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Источник [92] определяет монооксид углерода как высокотоксичный газ, от которого необходимо предусматривать все меры безопасности.

Анализ 146 нормативных документов по пожарной безопасности, приведённых в [90], показывает, что сведения о токсичных продуктах горения

содержатся лишь в пяти из них. При этом представленная в нормативно-правовой базе информация не в полной мере отражает реальные условия пожара, при которых из строительных материалов выделяется значительно более широкий спектр токсичных соединений.

Документы [93, 94] устанавливают, что для объектов с круглосуточным пребыванием людей (за исключением отдельных категорий) руководители организаций должны организовать непрерывное дежурство персонала и обеспечить каждого дежурного средствами индивидуальной защиты органов дыхания и зрения от продуктов горения. При выборе фильтрующих устройств в первую очередь ориентируются на основную пожарную нагрузку здания, поэтому сведения о том, какие токсичные вещества и в каких количествах выделяются при горении и термическом разложении материалов, являются обязательной основой для корректного подбора средств фильтрации. Кроме того, в [93] регламентируются испытания СИЗОД и СИЗЗ от опасных продуктов горения, а в таблицах 2-4 приведены нормативные значения для фильтров различных марок (А, В, Е, К, АХ), а также специализированных типов NOPЗ и HgPЗ.

Согласно табличным данным, фильтры марки В предназначены для защиты от хлора, сероводорода и цианистого водорода, а фильтры Е – от диоксида серы. Установленные параметры охватывают массовые концентрации веществ в диапазоне от 0,7 до 30 мг/дм<sup>3</sup> при объемной доле 0,1-1,0%. Например, фильтр В1 обеспечивает защиту от H<sub>2</sub>S при концентрации 1,4 мг/дм<sup>3</sup> в течение не менее 40 минут, а фильтр Е1 – от SO<sub>2</sub> при концентрации 2,7 мг/дм<sup>3</sup> в течение 20 минут. Для аммиака применяются фильтры марки К, которые обеспечивают защиту при массовой концентрации до 7,0 мг/дм<sup>3</sup> и временем действия до 60 минут (КЗ).

Комбинированные фильтры NOPЗ и HgPЗ рассчитаны на токсичные вещества особого класса опасности, такие как монооксид и диоксид азота, а также пары ртути. Так, фильтр HgPЗ обеспечивает защиту от паров ртути при крайне низких концентрациях (0,0001% или 1 мг/м<sup>3</sup>) в течение не менее 13±1 минуты. Данные фильтры являются критически важными при эвакуации из зон с высоким содержанием специфических токсикантов, образующихся, например, при горении

электрооборудования или химических веществ.

Таким образом, таблицы, приведённые в [93], подтверждают, что действующие нормативные документы чётко регламентируют допустимые параметры токсичных веществ в воздушной среде и устанавливают требуемые характеристики фильтров для обеспечения минимального времени безопасного пребывания в задымлённой или заражённой атмосфере. Эти данные следует учитывать при разработке планов эвакуации, выборе систем индивидуальной защиты и формировании требований к строительным материалам с точки зрения токсичности их продуктов горения.

Рассматривая нормативно-правовые акты Российской Федерации, учитывающие токсичные вещества не с точки зрения пожарной безопасности, а с точки зрения предъявления требований к их производству, использованию, транспортировке, хранению и утилизации, можно выделить ряд наиболее значимых с юридической стороны законодательных актов.

Нормативный документ [95] определяет требования по защите здоровья населения от воздействия вредных химических веществ, включая токсичные соединения, и устанавливает санитарно-гигиенические нормы, задающие предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязнителей в воздухе, воде и почве. В числе основных категорий токсикантов выделяются органические вещества (бензол, толуол, ксилол, формальдегид), неорганические соединения (аммиак, хлор, сероводород), а также опасные газы и пары, например угарный газ, диоксид серы, диоксид азота и озон.

Нормативный акт [96] направлен на защиту экосистем от воздействия токсичных химических веществ. Закон регулирует управление опасными отходами, их утилизацию и обезвреживание, а также предусматривает меры по предотвращению экологического ущерба. Актуальность таких положений подтверждается результатами научных исследований, проведённых Л.К. Исаевой [97, 98], в которых обоснована прямая зависимость между масштабами пожаров, характером выделяемых токсичных продуктов горения и уровнем загрязнения окружающей среды, включая почвы, атмосферу и водные объекты.

К регулируемым газам относятся угарный газ (CO), диоксид серы (SO<sub>2</sub>), оксиды азота (NO<sub>x</sub>), озон (O<sub>3</sub>), формальдегид (CH<sub>2</sub>O), аммиак (NH<sub>3</sub>), хлор (Cl<sub>2</sub>) и сероводород (H<sub>2</sub>S). Эти газы контролируются через нормативы выбросов и мониторинг качества воздуха.

В результате проведенного анализа было установлено, что в нормативно-правовой базе Российской Федерации учитываются немногочисленные токсичные вещества способные к образованию при пожаре. Однако абсолютное большинство токсикантов не входит в поле зрения Российских нормативно-правовых документов и актов. Такое отсутствие объясняется недостаточностью данных в сборниках и справочниках, формирующих базы данных по образованию токсичных веществ при пожаре. Новая расчетно-аналитическая методика определения показателя токсичности строительных материалов при пожаре позволит при определении указанного показателя расширять базу данных содержащую информацию относительно удельных коэффициентов образования токсичных веществ. Такой подход позволит расширить знания в области образования токсичных веществ при пожаре, что в свою очередь даст основание на внесение дополнений в нормативно-правовые акты России, в части учета токсичных веществ.

В нормативных документах приведён перечень наиболее опасных токсикантов, образующихся при пожаре. Однако исходные данные, необходимые для моделирования их распространения по путям эвакуации, имеются лишь для трёх газов – CO, CO<sub>2</sub> и HCl. В связи с этим актуальной задачей является проведение экспериментальных исследований, направленных на изучение образования и динамики распространения других высокотоксичных газов.

#### **1.4 Моделирование и прогнозирование распространения опасных факторов пожара в зданиях**

Экспериментальная оценка токсичности продуктов горения строительных

материалов необходима для последующего расчёта времени, в течение которого токсичные газы могут заблокировать пути эвакуации, поскольку этот расчёт выполняют на основе моделей развития пожара.

При моделировании пожара используют интегральные, зонные и полевые (CFD) подходы: интегральные модели применяют для первичной, приближённой оценки параметров на ранних этапах анализа, зонные схемы разделяют помещение на несколько объёмов и рассчитывают в каждом из них средние значения температуры, концентраций токсичных газов и других характеристик, а полевые CFD-модели основаны на численном решении уравнений переноса и позволяют с высокой точностью воспроизводить распространение огня, тепла, дыма и токсичных продуктов горения в трёхмерной геометрии с учётом вентиляции, преград и свойств материалов.

В интегральном описании пожар трактуется как нестационарный процесс, развивающийся в пределах единого контрольного объёма помещения. Динамику состояния среды получают из балансовых соотношений по массе, энергии и импульсу: газовая смесь может входить и выходить через проёмы, а также постоянно обменивается теплом и веществом с окружающими её границами – ограждающими конструкциями и наружным воздухом. Чтобы связать расчётные величины в единый набор параметров и сохранить инженерную применимость модели, обычно вводят предположение о локальном термодинамическом равновесии.

Сама среда в такой схеме описывается не точечными полями, а средними по объёму характеристиками: плотностью, парциальными плотностями компонентов, давлением и температурой, которые согласуются между собой через уравнение состояния. Далее полученные среднеобъёмные значения переводят в критерии для рабочей зоны и сравнивают с предельными уровнями, используя полуэмпирические зависимости, основанные на экспериментальных данных о стратификации температуры, распределении концентраций продуктов горения и оптической плотности дыма.

Среднеобъёмная плотность описывает, какое количество массы газовой

среды приходится на единицу объёма, тогда как среднеобъёмная парциальная плотность характеризует вклад отдельных компонентов и, по сути, отражает их концентрацию в смеси. Среднеобъёмное давление определяет воздействие газа на единицу площади ограждающих поверхностей, а среднеобъёмная температура задаёт тепловое состояние среды. Связь между этими величинами задаётся уравнением, выводимым из условия локального термодинамического равновесия: предполагается, что даже при наличии неравновесных явлений на макроуровне в малых объёмах система сохраняет равновесный характер, благодаря чему становится возможным корректно описывать реакцию газовой среды на внешние воздействия (например, на тепловой поток или изменение компонентного состава) и прогнозировать её состояние в ходе пожара.

Интегральная модель динамики опасных факторов пожара описана в [44], а её модифицированный вариант – в [99]. Ключевые отличия модификации:

- прогрев ограждающих конструкций рассчитывается по нестационарным двумерным уравнениям теплопроводности;
- распределение температуры по высоте помещения учитывается более детально.

Базовые уравнения модели включают:

- сохранение массы газовой среды (1.1);
- сохранение энергии (1.2);
- баланс массы кислорода (1.3);
- баланс массы  $i$ -го токсичного компонента (1.4) [44, 99].

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \Psi + G_a + \rho_a W_a - G_m - \rho_m W_m, \quad (1.1)$$

$$\frac{d}{d\tau} \left( \frac{P_m V}{K_m - 1} \right) = \Psi \eta Q_H^P + c_{pa} T_a (G_a + \rho_a W_a) - c_{pm} T_{mпр} (G_m + \rho_m W_m) - Q_s - Q_{пр}, \quad (1.2)$$

$$V \frac{d(X_{O_2 m} \rho_m)}{d\tau} = -\eta L_{O_2} \Psi + X_{O_2 a} (G_a + \rho_a W_a) - X_{O_2 m пр} (G_m + \rho_m W_m), \quad (1.3)$$

$$V \frac{d(X_{im} P_m)}{d\tau} = \eta L_i \Psi - X_{im пр} G_m, \quad (1.4)$$

где, согласно [44, 99]  $\tau$  (с) – время от начала пожара;

$\Psi$  (кг/с) – скорость (массовая) газификации горючего вещества;

$G_a, G_m$  (кг/с) – расходы (массовые) наружного воздуха и смеси продуктов горения и воздуха через проемы;

$W_a, W_m$  (м<sup>3</sup>/с) – расходы (объемные) противодымной и приточной вентиляции;

$V$  (м<sup>3</sup>) – объем рассматриваемого помещения;

$\rho_a$  (кг/м<sup>3</sup>) – плотность атмосферного воздуха;

$\rho_m$  (кг/м<sup>3</sup>) – плотность (среднеобъемная) смеси газов в помещении;

$p_m$  (Па) – давление (среднеобъемное) в помещении;

$k_m$  – показатель адиабаты смеси газов помещения;

$Q_{н^p}$  (Дж/кг) – рабочая низшая теплота сгорания пожарной нагрузки;

$\eta$  – полнота горения;  $Q_s$  (Вт) – тепловой (суммарный) поток, поступающий в стены, перекрытие и пол;

$Q_{пр}$  (Вт) – лучистый тепловой поток, проходящий через проемы наружу;

$T_{mnp} = a_T T_m$  (К) – температура (средняя) смеси газов, выходящих наружу через открытые проемы;

$a_T$  – коэффициент, показывающий отличие средней температуры выходящих наружу смеси газов от температуры (среднеобъемной) газовой смеси в помещении;

$T_a$  (К) – температура атмосферного воздуха;

$c_{ра}, c_{pm}$  (Дж/(кг·К)) – изобарные удельные теплоемкости воздуха и газовой смеси;

$L_{O_2}$  (кг/кг) – коэффициент потребления кислорода;

$X_{O_2m}$  – массовая (среднеобъемная) концентрация кислорода в помещении;

$X_{O_2a}$  – массовая (среднеобъемная) концентрация кислорода в атмосферном воздухе;

$X_{O_2mnp} = a_{O_2} X_{O_2m}$  – массовая (средняя) концентрация кислорода в смеси газов, выходящей наружу через открытые проемы;

$a_{O_2}$  – коэффициент, показывающий отличие концентрации (среднемассовой) кислорода в смеси выходящих наружу газов от ее среднеобъемной концентрации в газовой смеси помещения,

$X_{im}$  – среднеобъемная массовая концентрация  $i$ -го продукта горения;

$L_i$  – удельный коэффициент образования  $i$ -го токсичного газа;

$X_{imnp} = a_i X_{im}$  – средняя массовая концентрация  $i$ -го токсичного газа в газах,

выходящих через проемы;

$a_i$  – коэффициент, учитывающий отличие средней концентрации  $i$ -го токсичного газа в выходящих газах от его среднеобъемной концентрации в газовой среде помещения;

Величина тепловыделения рассчитывается на основе выражения (1.5) [99]:

$$Q_{\text{пож}} = \eta \psi_{\text{уд}} Q_H^P F_r, \quad (1.5)$$

где  $Q_{\text{пож}}$  (Вт) – мощность тепловыделения;

$\psi_{\text{уд}}$  (кг/(м<sup>2</sup>·с)) – удельная массовая скорость газификации горючего вещества;

$F_r$  (м<sup>2</sup>) – площадь поверхности горения горючего вещества.

Среднеобъемная плотность газовой среды в помещении рассчитывается как отношение общей массы газа, находящегося в данном пространстве, к объёму помещения в соответствии с выражением (1.6) [99]:

$$\rho_v = \frac{M}{V}, \quad (1.6)$$

где  $M$  – масса газа, заполняющего помещение, кг;

$V$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>. Нижний индекс  $m$  представляет собой первую букву в немецком слове *mittel* (средний). Следует отметить, что:

$$M = \int_V \rho dV, \quad (1.7)$$

Формально среднеобъемную плотность газовой среды можно определить как пространственное среднее от локальной плотности, вычисляемое по всему объёму помещения, то есть:

$$\rho_m = \frac{1}{V} \int_V \rho dV, \quad (1.8)$$

Газовая среда в помещении представляет собой смесь кислорода и продуктов горения, количественное соотношение которых изменяется по мере развития пожара. В интегральном методе для описания изменения массы  $i$ -го компонента во времени применяется специальный параметр – среднеобъемная парциальная плотность данного компонента.

Горение и газификация пожарной нагрузки протекают в условиях сложного взаимодействия физических и химических процессов, формируемых совокупностью внешних и внутренних факторов. Многообразие этих условий

существенно затрудняет их точное математическое описание и до настоящего времени не позволяет рассматривать задачу как полностью решённую. Используемые в практике расчётные модели строятся на ряде упрощающих предположений, которые неизбежно отклоняют расчёты от реальной картины пожара. В связи с этим для получения достоверных результатов требуется корректировка и индивидуальная настройка существующих моделей с учётом особенностей каждого конкретного объекта и сценария возгорания.

Согласно работам [44, 49, 99] *зонные математические модели* прогнозирования развития пожара широко применяются для оценки динамики опасных факторов пожара на начальной стадии возникновения возгорания в замкнутом пространстве. На начальной стадии пожара газовая среда в помещении характеризуется выраженной пространственной неоднородностью параметров. В этот период отдельные зоны существенно различаются по температурному режиму и химическому составу, поскольку процессы горения и теплообмена развиваются неравномерно и локально, формируя участки с резко отличающимися характеристиками воздушной среды.

В рассматриваемый временной промежуток объём помещения целесообразно условно представить как совокупность нескольких характерных зон, заметно различающихся по температурному режиму и составу газовой смеси. По мере развития пожара границы между ними перестают оставаться устойчивыми: они смещаются, меняют форму и постепенно теряют первоначальную выраженность. В итоге различия в параметрах газовой среды сглаживаются, а её исходная неоднородность со временем становится менее заметной.

В общем случае внутреннее пространство помещения допускает деление на любое количество отдельных зон. Это деление позволяет более точно моделировать и прогнозировать поведение пожара, учитывая динамику изменения параметров газовой среды в различных частях помещения. Такие модели являются важным инструментом для специалистов, занимающихся обеспечением пожарной безопасности и разработкой эффективных методов борьбы с огнём.

В работе [44] рассмотрены закономерности развития пожара во времени. Показано, что после возникновения очага возгорания начинается интенсивное образование газообразных продуктов сгорания, которые вследствие нагрева устремляются вверх. Над зоной горения формируется устойчивый восходящий поток, представляющий собой конвективную структуру, состоящую из раскалённых газов и взвешенных частиц. Движение данной струи обусловлено разностью плотностей между нагретой газовой смесью и окружающим воздухом, что обеспечивает её подъём и распространение в верхнюю часть помещения.

Когда конвективная струя достигает потолка помещения, она начинает распространяться в горизонтальном направлении, образуя предпотолочный слой задымленного нагретого газа. Этот слой, называемый предпотолочным слоем, содержит значительное количество продуктов горения, что приводит к его высокой температуре и плотности. Со временем толщина этого слоя увеличивается, что связано с продолжающимся процессом горения и накоплением горячих газов под потолком.

На основании теоретических представлений можно выделить три характерные зоны в пространстве помещения [46]. Первая зона, обозначаемая как зона I, представляет собой конвективную колонку над очагом возгорания. В этой зоне происходит интенсивный подъем горячих газов и частиц, что обуславливает ее высокую температуру и динамическое поведение.

Вторая зона, обозначаемая как зона II, охватывает нагретый задымленный предпотолочный слой. Эта зона характеризуется наличием большого количества продуктов горения, которые создают значительное задымление и высокую температуру под потолком помещения.

Третья зона, обозначаемая как зона III, включает область с холодным воздухом. Эта зона находится ниже зоны II и характеризуется относительно низкими температурами и меньшей концентрацией продуктов горения.

Данная трехзонная модель позволяет учитывать распределение температур, концентраций продуктов горения и других параметров в различных зонах помещения, что является важным для прогнозирования поведения пожара и

разработки эффективных мер пожарной безопасности. Схематическое изображение данной модели представлено на рисунке 1.3 [99], что наглядно демонстрирует распределение зон и их взаимодействие в процессе развития пожара [99].

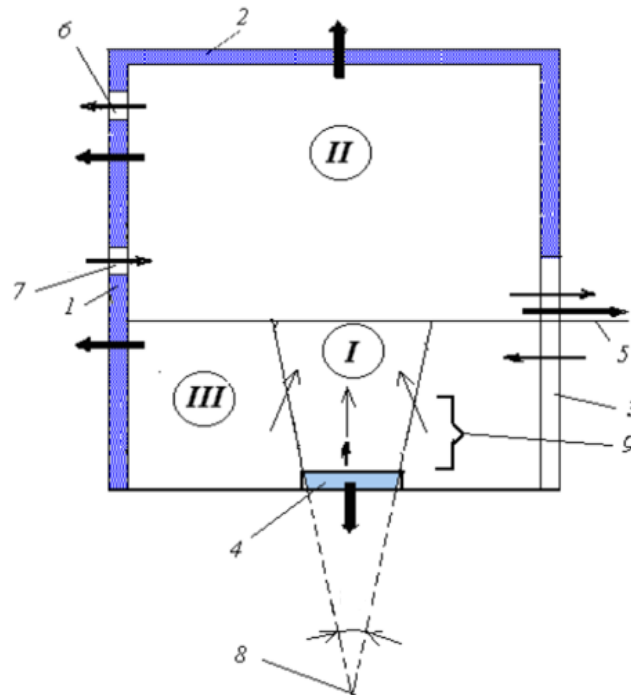


Рисунок 1.3 – Схема зонной модели прогнозирования развития пожара (трехзонная модель): 1 – ограждения помещения; 2 – перекрытие; 3 – открытый проем; 4 – очаг пожара; 5 – нейтральная плоскость (плоскость равных давлений); 6 – противодымная вентиляция; 7 – система подпора воздуха; 8 – точечный «фиктивный» источник теплоты; 9 – высота пламенной зоны; I – зона конвективной колонки; II – зона нагретого задымленного припотолочного слоя; III – зона холодного воздуха [99]

Схема зонной модели, применяемой для прогнозирования изменения опасных факторов пожара во времени, представлена на рисунке 1.4 [99]:

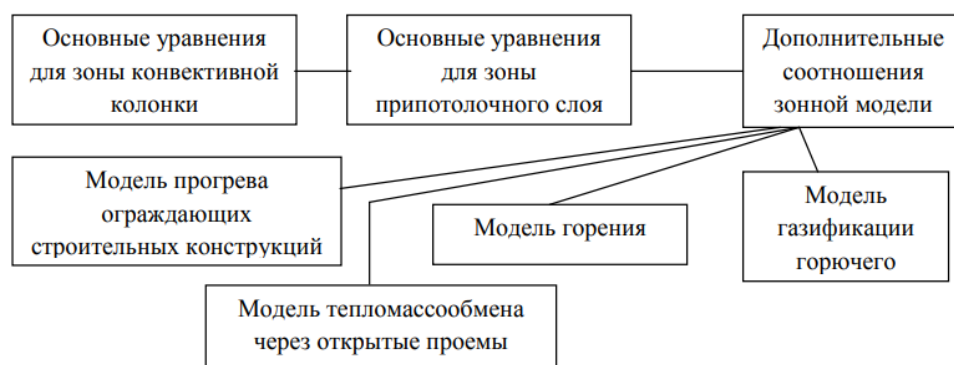


Рисунок 1.4 – Структура зонной математической модели

Чтобы упростить описание термогазодинамики пожара и снизить вычислительную трудоёмкость расчётов, в модели вводится ряд допущений. В частности, считается, что припотолочный слой в любой момент времени равномерно прогрет и задымлён и остаётся параллельным перекрытию. Кроме того, раздел между этим слоем и зоной холодного воздуха принимается резким и бесконечно тонким, так что параметры газовой среды на границе меняются скачкообразно.

При математическом описании процессов в конвективной колонке и припотолочном слое ключевую роль играет система уравнений, с помощью которой получают набор параметров, характеризующих состояние и развитие газовой среды. На основе фундаментальных соотношений можно определить массовый расход и температуру в различных сечениях восходящего потока, оценить содержание продуктов полного и неполного сгорания, а также рассчитать давление и плотность газовой смеси. Такая постановка позволяет прогнозировать изменение опасных факторов пожара во времени, анализировать их влияние на термогазодинамический режим помещения и использовать результаты для обоснования мер по локализации и тушению возгорания, снижая риск его дальнейшего распространения.

Для упрощения расчётов и снижения вычислительных затрат в модели принимают следующие допущения:

- вклад мелкодисперсных частиц дыма и огнетушащих веществ в балансы массы и энергии считают пренебрежимо малым по сравнению с газовой фазой;

- тепло– и массообмен между зоной холодного воздуха и припотолочным слоем принимают отсутствующим;
- газовую среду описывают как смесь идеальных газов (при атмосферном давлении основные компоненты близки к идеальному поведению);
- теплофизические свойства смеси (изобарная теплоёмкость, газовая постоянная, показатель адиабаты) приравнивают к параметрам сухого воздуха, поскольку различия с продуктами горения в типичном температурном диапазоне невелики;
- расположение пожарной нагрузки считают практически не влияющим на обмен через проёмы и теплопередачу к ограждающим конструкциям.

Однако даже при таких упрощениях система уравнений остаётся недоопределённой, поскольку число неизвестных превышает количество уравнений, поэтому для её замыкания привлекают эмпирические и параметрические корреляции, связывающие термодинамические и кинетические характеристики (скорость турбулентного переноса, температурные и концентрационные градиенты, коэффициенты диффузии и теплообмена), что обеспечивает возможность получения корректного решения и адекватного описания процессов в конвективной колонке и припотолочном слое при развитии пожара.

*Полевой метод* считается наиболее универсальным из всех детерминистических подходов, применяемых для расчёта динамики опасных факторов пожара.

Полевые (дифференциальные) модели применяют для наиболее детального описания пожара: они рассчитывают поля температуры и скоростей, а также распределения продуктов горения и дыма по объёму помещения на основе решения трёхмерных нестационарных уравнений сохранения массы, импульса и энергии, что обеспечивает высокую точность прогноза опасных факторов [44, 99, 72].

Вместе с тем такая постановка вычислительно крайне трудоёмка: замкнутая система уравнений, описывающая эволюцию газовой среды в каждой точке объёма, громоздка и требует значительных ресурсов, поэтому на практике расчёты

выполняют с использованием специализированных численных алгоритмов и высокопроизводительных вычислительных средств, а реализация полевых моделей чаще всего осуществляется в программных комплексах FDS [100], PHOENICS [101] и SOFIE [102].

Сведения, полученные при оценке токсичности продуктов горения строительных материалов, используются как исходные параметры и включаются в подмодель газификации пожарной нагрузки (см. рисунок 1.5). На основе численного решения в выбранный момент развития пожара рассчитываются пространственно-временные поля температуры и скоростей, а также распределения концентраций кислорода, азота и газообразных продуктов газификации и горения. Структура полевой модели в целом показана на рисунке 1.5, где отражены ключевые элементы расчётной схемы и их взаимосвязи, определяющие моделирование динамики опасных факторов пожара в рассматриваемом объёме.

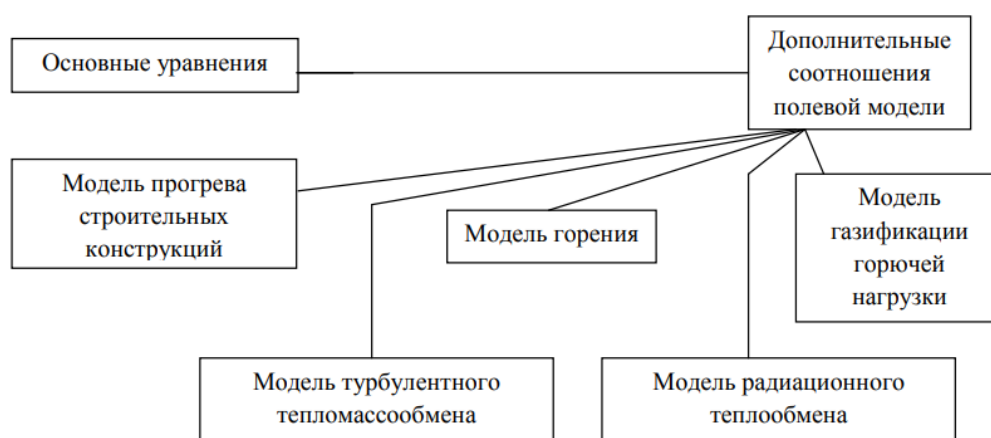


Рисунок 1.5 – Структура полевой модели

Для корректного решения системы уравнений полевой модели требуется задать условия однозначности, включающие начальные и граничные параметры, которые обеспечивают уникальность и достоверность получаемого решения в рамках процессов теплообмена и развития опасных факторов пожара.

Чтобы задать полевую модель и корректно воспроизвести сценарий пожара, требуется сформировать набор исходных геометрических и физических данных. В геометрической части задают габариты помещения (длину, ширину и высоту),

координаты поверхностей всех объектов внутри объёма, контуры оконных и дверных проёмов, а также границы открытых участков горючих материалов, вовлечённых в горение. Дополнительно фиксируют расположение элементов системы дымоудаления и точек выхода средств пожаротушения, чтобы в расчёте корректно описывались перенос продуктов сгорания и подача огнетушащих веществ.

Физический блок задаёт свойства газовой смеси и конструкций, а также основные параметры пожарной нагрузки (горение, газификация, расход  $O_2$ , дымообразование).

При этом полевые (дифференциальные) модели имеют ряд принципиальных ограничений: их применение требует решения замкнутой системы уравнений в частных производных с большим числом параметров, сложными граничными условиями и взаимосвязанными процессами, что делает расчёты вычислительно тяжёлыми и практически возможными лишь при использовании численных методов и специализированного программного обеспечения; дополнительно усложняет задачу высокая трудоёмкость разработки таких программных средств, поскольку необходимо реализовать сложные алгоритмы, обрабатывать большой массив входных данных и обеспечивать устойчивость и точность вычислений при моделировании тепломассообмена и динамики пожара в трёхмерной постановке; наконец, ограниченные ресурсы современных ЭВМ нередко вынуждают снижать плотность расчётной сетки, из-за чего падает пространственное разрешение в зоне горения и пристеночных областях и, как следствие, сужаются возможности детального анализа локальных термогазодинамических процессов.

Проанализировав математические модели прогнозирования распространения опасных факторов пожара, можно сделать вывод, что все они базируются на экспериментальных данных, которые необходимо постоянно обновлять ввиду обновления линейки строительных материалов, используемых на путях эвакуации.

## 1.5 Выводы по первой главе

Современная токсикологическая обстановка при пожарах характеризуется высокой степенью опасности вследствие широкого применения полимерных и синтетических строительных материалов, при термическом разложении которых образуются десятки высокотоксичных газов. Многие из них – фосген, циановодород, акролеин, оксиды азота, фтороводород и др. – не учитываются в действующих методиках расчёта времени блокирования путей эвакуации из-за отсутствия достоверных исходных данных.

В результате анализа, проведённого в первой главе, установлено следующее:

- нормативные документы и программные средства расчёта пожарных рисков учитывают ограниченный набор токсикантов (СО, СО<sub>2</sub>, НСl), что не позволяет объективно оценить токсичность среды при пожаре;

- имеющиеся экспериментальные методики основаны преимущественно на биологических испытаниях, не ориентированы на оценку времени блокирования путей эвакуации и не позволяют учитывать ключевые параметры динамики пожара;

- кроме того, серьёзным ограничением является дефицит сведений об удельных коэффициентах образования большинства высокотоксичных газов, вследствие чего снижается достоверность расчётов времени блокирования эвакуационных путей.

На основании изложенного сформулирована цель исследования: разработка экспериментально-аналитической методики определения уровня токсичности строительных материалов, применяемых на путях эвакуации, при пожаре.

В связи с этим, во второй и третьей главах предполагается решить следующие задачи:

- Рассмотреть существующие методики по определению уровня токсичности строительных материалов при пожаре;

- Разработать и научно обосновать новый критерий токсикогенной

опасности, предназначенный для оценки уровня токсичности строительных материалов при пожаре с точки зрения выполнения условия безопасной эвакуации людей;

– Модернизировать экспериментальную установку с целью расширения спектра определяемых токсичных продуктов горения строительных материалов и провести на экспериментальной установке исследования уровня токсичности продуктов горения строительных материалов с использованием нового критерия токсикогенной опасности, при этом определить удельные коэффициенты образования высокотоксичных газов, необходимые для моделирования динамики их образования и распространения;

– Разработать систему ранжирования строительных материалов в зависимости от величины показателя токсичности продуктов горения, определённого с использованием нового критерия токсикогенной опасности;

– Разработать практические рекомендации по применению предложенной экспериментально-аналитической методики для оценки выполнения условия безопасной эвакуации людей из зданий.

## **ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ПРОДУКТОВ ТЕРМОРАЗЛОЖЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### **2.1 Нормативный метод экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов**

#### **2.1.1 Экспериментально-расчетный метод определения показателя токсичности продуктов горения материалов**

До введения редакции № 2 от 13.08.2024 ГОСТ 12.1.044-2018 [20] в России основным способом оценки токсичности продуктов горения строительных материалов применялся экспериментально-аналитический подход.

В его основе лежали газоаналитические измерения концентраций приоритетных компонентов, таких как CO, CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, с последующим расчётом интегрального показателя токсичности. Данный показатель определялся на основе сопоставления полученных экспериментальных данных с величинами смертельных концентраций CL<sub>50</sub>, что позволяло оценить потенциальную опасность продуктов горения для человека.

Согласно источнику выше, показатель токсичности продуктов горения – это отношение количества материала к единице объема замкнутого пространства, в котором образующиеся при горении материала газообразные продукты вызывают гибель 50% подопытных животных.

Сущность экспериментально-расчетного метода определения показателя токсичности продуктов горения материала заключается в проведении специализированных испытаний, в ходе которых происходит термическое разложение и горение образца. В процессе испытаний происходит измерение концентраций углекислого газа и токсичных газообразных продуктов, которые

образуются вследствие взаимодействия материалов с тепловым потоком и ограниченным количеством кислорода. На основе этих данных, с учётом химических и физических характеристик выделяющихся газов и степени кислородного дефицита, производится расчет показателя токсичности, отражающего потенциальную опасность воздействующих факторов при реальных пожарах.

Полученное расчетным путем значение показателя токсичности верифицируется с помощью контрольного эксперимента, в котором используются лабораторные животные.

Исследования проводятся на установке для определения показателя токсичности, которая отражена на рисунке 2.1.

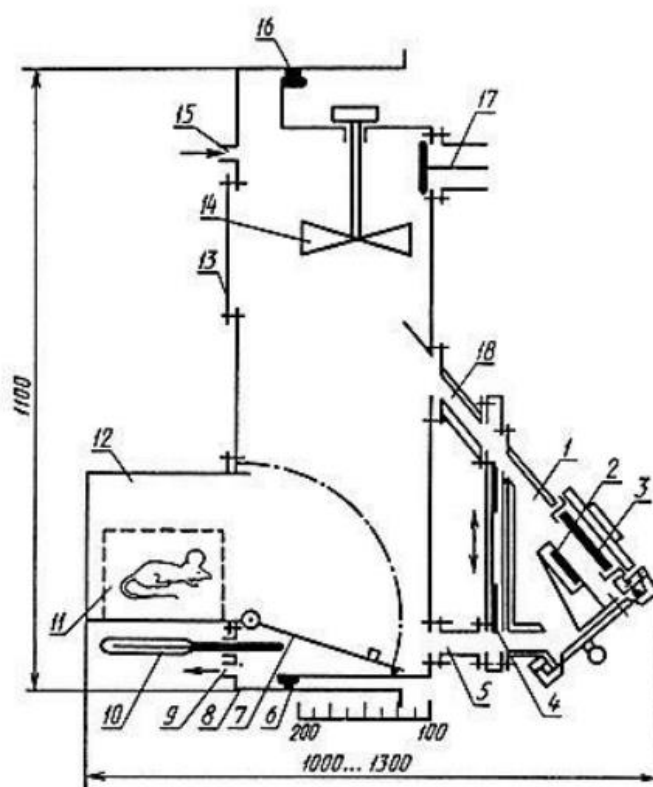


Рисунок 2.1 – Установка для определения показателя токсичности

1 – камера сгорания; 2 – держатель образца; 3 – электронагревательный излучатель; 4 – заслонки; 5, 18 – переходные рукава; 6 – стационарная секция экспозиционной камеры; 7 – дверца предкамеры; 8 – подвижная секция экспозиционной камеры; 9, 15 – штуцеры; 10 – термометр; 11 – клетка для подопытных животных; 12 – предкамера; 13 – предохранительная мембрана; 14 – вентилятор; 16 – резиновая прокладка; 17 – клапан продувки.

Камера сгорания вместимостью  $3 \cdot 10 \text{ м}^3$ , связанная с экспозиционной камерой посредством переходных рукавов, выполнена из листовой нержавеющей стали высокого качества толщиной  $(2,0 \pm 0,1) \text{ мм}$ , что гарантирует её прочность и устойчивость к термическим нагрузкам. Для предотвращения теплопотерь и минимизации воздействия на внешнюю среду внутренняя поверхность камеры тщательно изолирована асбоцементными плитами толщиной 20 мм, которые обладают высокой термостойкостью и низкой теплопроводностью. В камере сгорания предусмотрен экранированный электронагревательный излучатель с размерами 120x120 мм, который обеспечивает равномерное распределение теплового потока по поверхности образца. Держатель образца размером 120x120x25 мм предназначен для фиксации исследуемого материала в строго заданном положении, что позволяет обеспечить точное воспроизведение условий эксперимента и стабильность результатов при термическом воздействии.

На боковой стенке камеры сгорания установлено окно из кварцевого стекла, которое предназначено для визуального контроля за состоянием образца во время проведения испытаний.

Алгоритм проведения опыта состоит из нескольких этапов:

- Выбор режима разложения, который представляет наибольшую опасность для исследуемого материала. Это может быть режим тления, интенсивного горения или фаза переходного процесса горения, в зависимости от характеристик материала и условий, при которых наблюдается максимальное выделение токсичных веществ;
- Установление продолжительности процесса, необходимой для полного термического разложения образца, включая фазу активного выделения летучих продуктов и достижение состояния, при котором дальнейшее разложение материала прекращается;
- Составление перечня токсичных веществ, подлежащих мониторингу, с учетом их потенциального выделения в процессе разложения материала, концентрации которых необходимо измерять для точной оценки токсичности продуктов термического разложения;
- Проведение эксперимента в заданном режиме разложения для получения

детальных данных, включая количественное определение концентраций каждого токсичного компонента, содержащегося в продуктах горения.

– Расчет показателя токсичности, при этом предполагается принцип аддитивности, согласно которому общий токсический эффект определяется суммой индивидуальных вкладов каждого компонента, выделяющегося в продуктах горения;

– Верификация расчетного значения показателя токсичности посредством контрольного эксперимента, включающего экспозицию лабораторных животных;

– Интерпретация результатов.

В случае, когда полученное расчетное значение показателя токсичности  $H_{CL50}$  подтверждается контрольным экспериментом с подопытными животными, определяют группу токсичности по таблице 2.1 [20].

Таблица 2.1 – Классификация материалов по величине показателя токсичности продуктов горения

Класс опасности	Наименование категории материалов	Показатель токсичности $H_{CL50}$ , г/м <sup>3</sup>
T1	Малоопасные	$H_{CL50}$ не менее 120
T2	Умеренноопасные	$H_{CL50}$ от 40 до 120 включ.
T3	Высокоопасные	$H_{CL50}$ от 13 до 40 включ.
T4	Чрезвычайно опасные	$H_{CL50}$ не более 13 включ.

В случае, когда расчетное значение показателя токсичности  $H_{CL50}$  не подтверждается контрольным биологическим методом, показатель токсичности принимается по биологическому методу.

В ходе экспериментов проводится идентификация присутствия в продуктах горения дополнительных токсичных газов, помимо оксида углерода, которые могут выделяться в процессе разложения. Их возникновение предсказывается на основе анализа химического состава материала и потенциальных реакций, происходящих при термическом воздействии. Такой подход позволяет выявить полный спектр опасных соединений, образующихся в условиях горения, и точно оценить токсикологический профиль выделяемых летучих продуктов.

В ходе основных испытаний устанавливаются значения средних

концентраций для каждого из исследуемых газов ( $C_i$ ). Этот процесс включает непрерывный мониторинг и анализ концентраций токсичных компонентов в газовой смеси, что позволяет получить усредненные показатели, характеризующие уровень токсичности продуктов горения при заданных условиях эксперимента. Отбор проб газовой смеси из экспозиционной камеры проводится в ходе испытания либо в непрерывном режиме на протяжении 30 минут, либо, при ограничениях оборудования, дискретно с временными интервалами, не превышающими 5 минут.

При каждом установленном значении плотности теплового потока требуется провести минимум три испытания, при которых результаты должны демонстрировать удельный выход оксида углерода (мг/г материала), отличающийся не более чем на 15%. Это обеспечивает достаточную воспроизводимость и точность получаемых данных, позволяя учесть возможные вариации в процессе разложения материала.

Величины ( $C_i$ ) рассчитываются путём интегрирования зарегистрированной зависимости «концентрация-время»  $C_i(\tau)$  на всём временном интервале эксперимента. Полученный интегральный показатель, характеризующий суммарное воздействие токсичных веществ за время испытаний, затем нормируется на общую продолжительность опыта ( $\tau_{\text{исп}}$ ), что позволяет определить среднее значение концентрации исследуемых газов за весь период наблюдений [20].

$$C_i = \frac{\int_0^{\tau_{\text{исп}}} C_i(\tau) d\tau}{\tau_{\text{исп}}}, \quad (2.1)$$

В случае, если концентрация  $i$ -го токсиканта измерялась не непрерывно, а через промежутки времени  $\Delta\tau = \tau_{g+1} - \tau_g$ , то  $C_i$  рассчитывается по следующей формуле:

$$C_i = \frac{\sum_{g=1}^{N-1} [C_i(\tau_{g+1}) - C_i(\tau_g)] * [\tau_{g+1} - \tau_g]}{2 * \tau_{\text{исп}}}, \quad (2.2)$$

где  $C_i$  – среднеобъемная концентрация  $i$ -го газа в течение 30 мин;

$N$  – количество пробоотборов;

$\tau_g$  – время пробоотбора с момента начала термического воздействия на испытываемый образец,  $\tau_0=0$ ,  $\tau_N = \tau_{\text{исп}}$ .

На основании результатов газового анализа, собранных в процессе основных испытаний, проводится расчет совокупного индекса токсичности  $K_T$  [23]:

$$K_T = \frac{C_{CO}}{CL_{50CO}} + \frac{C_{CO_2}}{CL_{50CO_2}} + \frac{C_{HCN}}{CL_{50HCN}} + \dots + \frac{C_i}{CL_{50i}}, \quad (2.3)$$

где  $C_{CO}$ ,  $C_{CO_2}$ ,  $C_{HCN}$ ,  $C_i$  – средние концентрации газов ( $\text{мг/м}^3$ ), полученные при испытании;

$CL_{50CO}$ ,  $CL_{50CO_2}$ ,  $CL_{50HCN}$ ,  $CL_{50i}$  – средние смертельные концентрации газов ( $\text{мг/м}^3$ ) при изолированном 30-минутном воздействии, принятые равными следующим значениям: CO– 4600; CO<sub>2</sub>– 800000; HCN– 175; N<sub>x</sub>O<sub>y</sub>– 700; HCL– 3900; CH<sub>2</sub>CHCHO – 315.

В случае, если при проведении испытания концентрация кислорода в анализируемой среде снижается до 14% по объему или ниже, расчеты показателя токсичности выполняются с учетом вклада гипоксии в совокупный токсический эффект:

$$K_T = \frac{C_{CO}}{CL_{50CO}} + \frac{C_{CO_2}}{CL_{50CO_2}} + \frac{C_{HCN}}{CL_{50HCN}} + \dots + \frac{C_i}{CL_{50i}} + \frac{21 - [O_2]}{21 - 6.7}, \quad (2.4)$$

где  $[O_2]$  – минимальная величина концентрации O<sub>2</sub>, зарегистрированная при испытании, % об.

Показатель токсичности определяется с помощью следующей формулы:

$$H_{CL50} = \frac{m_0}{K_t * V_k}, \quad (2.5)$$

где  $m_0$  – масса образца до испытания, г;

$V_k$  – внутренний объем установки при испытании, м<sup>3</sup>.

В контрольном эксперименте испытывают образец материала, относительная масса которого ( $\text{г/м}^3$ ) соответствует заранее рассчитанному значению для воспроизведения необходимых условий. В ходе опыта создается режим испытания, точно соответствующий этому расчетному значению, и проводится 30-минутная экспозиция в токсической газовой среде с участием 10 белых мышей,

выполняющих функцию биологического контроля. Степень токсичности продуктов горения определяется на основе процента летальных исходов среди группы подопытных животных.

Однако с введением новой редакции ГОСТ 12.1.044-2018 данный подход был признан не соответствующим требованиям достоверности и объективности. Из стандарта исключены формулы расчёта интегральной токсичности на основе газоаналитических данных, а также перечни  $CL_{50}$  для отдельных веществ. В результате на сегодняшний день единственным регламентированным методом определения токсичности продуктов горения остаются биологические испытания на животных с определением показателя  $LC_{50}$ .

### **2.1.2 Биологический метод определения показателя токсичности продуктов горения материалов**

В 2024 году вступила в силу обновлённая редакция государственного стандарта ГОСТ 12.1.044-2018 «Система стандартов безопасности труда. Пожароопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения», согласно которой существенно изменён подход к оценке токсичности продуктов горения.

Действующая редакция ГОСТа, в отличие от предыдущей версии, исключила расчётную часть, где после газоаналитических измерений концентраций токсикантов допускалось вычисление интегрального показателя (индекса  $HCL_{50}$ ) и его последующая проверка на животных; в актуальной методике нормативно закреплён единственный вариант – биологические испытания.

Токсичность продуктов горения определяют по  $LC_{50}$  – концентрации, при которой за 30 минут гибнет 50 % мышей. Материал считают токсичным при  $LC_{50} \leq 15$  г/м<sup>3</sup>.  $LC_{50}$  получают при термическом разложении образца под заданным тепловым потоком с регистрацией выделившихся газов и оценкой летального эффекта, приведённого к массе сожжённого материала и объёму камеры.

При применении биологического метода для определения показателя токсичности отсутствует необходимость в детальном выявлении и количественном анализе всех присутствующих токсичных компонентов продуктов горения. Однако ключевым требованием для корректного проведения биологических экспериментов является непрерывный контроль и регистрация динамики концентраций таких критически важных газов, как оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), и кислород (O<sub>2</sub>). Эти параметры играют решающую роль в оценке общей токсичности среды, поскольку они непосредственно влияют на физиологическое состояние организма и позволяют обеспечить точную корреляцию между уровнем газовой токсичности и биологическим воздействием.

Для постоянного контроля газовой среды в экспозиционной камере применяют высокоточные газоанализаторы, позволяющие надёжно определять концентрации основных компонентов. Так, содержание монооксида углерода отслеживают промышленными автоматическими приборами с диапазоном 0-1 % и погрешностью не более  $\pm 5$  %. Диоксид углерода измеряют аналогичными средствами, но с расширенным диапазоном 0-10 %, что даёт возможность фиксировать его динамику во всём рабочем интервале при той же точности. Уровень кислорода контролируют отдельным анализатором, рассчитанным на 0-21 % при допустимой погрешности  $\pm 5$  %.

Алгоритм испытания биологическим методом разделен на несколько этапов. На предварительном этапе образцы каждого материала последовательно подвергаются воздействию тепловых потоков с разной плотностью, при этом в каждом последующем эксперименте температура воздействия повышается на 50°C. Такой подход позволяет постепенно увеличивать термическую нагрузку на материал, обеспечивая выявление критических температурных режимов, при которых происходит активное разложение или интенсивное выделение токсичных продуктов. В процессе испытаний устанавливается температура, при которой материал переходит в режим термоокислительного разложения (тления). Это значение определяется таким образом, чтобы оно было на 50°C ниже температуры, при которой начинается самопроизвольное воспламенение образца. Такой подход

позволяет точно задать условия для анализа тления и оценить выделение токсичных продуктов в условиях неполного горения. Испытуемые материалы исследуются в одном из двух режимов – термоокислительного разложения либо пламенного горения, выбор которых направлен на формирование условий, обеспечивающих образование наиболее опасных газовых смесей. При реализации режима пламенного горения поддерживается строго заданный температурный интервал 670-680 °С и плотность теплового потока на уровне 45 кВт/м<sup>2</sup>. Такие параметры усиливают процессы пиролиза и окислительного разрушения вещества, что способствует выделению предельно высоких концентраций токсичных компонентов.

Выбор оптимального режима испытаний осуществляется на основе максимального показателя смертности, зарегистрированного в сравниваемых группах подопытных животных.

Затравка животных проводится с использованием статического метода экспозиции. В каждом эксперименте задействуют не менее восьми белых мышей с массой тела в диапазоне от 18 до 25 г. Животные подвергаются воздействию газовой смеси на протяжении 30 минут.

Во время испытаний в установленном режиме определяются значения, характеризующие зависимость токсического воздействия продуктов горения от соотношения массы образца к объему экспозиционной камеры. Для получения результатов, отражающих токсические эффекты как ниже, так и выше 50% уровня летальности, регулируется объем экспозиционной камеры при постоянных размерах испытуемых образцов материала. При этом результаты, соответствующие летальности 0% или 100%, исключаются из расчетов, чтобы избежать искажений при определении средних показателей токсического эффекта.

Для определения показателя токсичности продуктов горения  $N_{CL50}$ , соответствующего уровню, при котором ожидается 50%-ная смертность подопытных животных, используется следующая математическая формула [20]:

$$N_{CL50} = \frac{m}{v}, \quad (2.6)$$

где  $m$  – масса образца до испытания, г,

$v$  – внутренний объем установки при испытании, м<sup>3</sup>.

В ходе эксперимента, связанного с экспозицией подопытных животных, требуется поддерживать содержание кислорода в объёме установки не ниже 14 % по объёму, поскольку соблюдение данного условия является принципиально важным для корректной оценки токсичности продуктов горения. Температурный режим внутри экспериментальной камеры должен оставаться стабильным и не превышать 30°C на протяжении всего испытания, с допустимыми кратковременными колебаниями до 35°C, чтобы избежать влияния повышенной температуры на физиологическое состояние подопытных животных и сохранить корректность результатов тестирования.

В случае, если масса образца с первоначальными размерами 40×40 мм не обеспечивает достижение летальных эффектов ниже или выше 50%, допускается изменение геометрических параметров образца. Для этого его размеры могут быть уменьшены или увеличены вплоть до 80×80 мм.

Животных, которые выжили после проведения экспериментальных испытаний, помещают в отдельные клетки, на каждой из которых указываются дата и номер соответствующего эксперимента для точной идентификации. Животным обеспечивается свободный доступ к воде и пище, при этом не предпринимаются специальные меры по их реабилитации или восстановлению. В течение последующего наблюдательного периода ведется тщательный мониторинг их состояния, с регистрацией всех случаев возможной гибели, которая может наступить спустя некоторое время после воздействия, что называется «отложенной смертностью».

При определении токсического эффекта учитывается не только гибель животных, наступившая в ходе самого эксперимента, но и летальные исходы, зафиксированные в постэкспозиционный период, который охватывает от 7 до 14 суток после завершения испытания.

По завершении времени экспозиции осуществляется открытие клапана продувки, а также дверей бокса и камеры сгорания для обеспечения доступа свежего воздуха. Установка тщательно вентилируется на протяжении не менее 10 минут, чтобы удалить оставшиеся токсичные газы и обеспечить безопасные условия для дальнейших экспериментов. В это время проводится детальная регистрация числа погибших и выживших животных, чтобы определить непосредственный токсический эффект воздействия. Параллельно выполняется измерение массы несгоревшего остатка образца, что необходимо для последующего расчета степени потери массы материала в результате термического разложения.

Рассмотрев два метода определения показателя токсичности строительных веществ и материалов утвержденных [20] и активно используемых по всей нашей стране, можно подвести итог и выделить основные недостатки рассмотренных методик. В первую очередь это то, что методики не ориентированы на безопасную эвакуацию людей из помещения и здания, они не учитывают линейную скорость распространения пламени по поверхности материала, удельную скорость газификации горючего материала и удельный коэффициент образования токсичного газа. Вторым недостатком методик стоит отметить использование негуманного метода использования живых организмов в проведении экспериментов, даже рассмотренный расчетный метод не исключает использования животных. Учитывая приведенное выше, можно сделать вывод, что разработка новой расчетной методики необходима.

## **2.2 Оценка применяемых в Российской Федерации ненормативных методов определения токсичности строительных материалов при пожаре**

Многие работы, в том числе [103], основными методиками определения уровня токсичности строительных материалов при пожаре рассматривают методы определенные в нормативно правовых документах нашей страны [20, 19].

Однако известны и другие методики, которые базируются на различных установках, рассмотренных в работе [79].

Наиболее совершенной установкой выделяется установка, рассмотренная в [104], которая позволяет определять удельный коэффициент образования токсичного газа, плотность токсичных газов и кислорода, удельную массовую скорость выгорания материала. Использование мышей и других подопытных животных в установке исключается.

Также выделяется установка для проверки огнезащитных свойств материалов на токсичность (пат. 23780 Республика Казахстан, МПК G01N25/24, G01N33/38, G01N25/00. Заявитель и патентообладатель Г. А. Аубакиров, А. Б. Досаева. № 2009/1413.1; заявл. 25.11.2009; опубл. 15.03.2011, бюл. № 3) предназначена для определения удельного коэффициента образования токсичных газов, что позволяет получить информацию о выделении опасных веществ при горении материалов. Однако, установка не предоставляет возможность измерять такие ключевые параметры, как плотность токсичных газов и концентрация кислорода, теплоту сгорания, линейную скорость распространения пламени по поверхности твёрдых материалов, а также удельную скорость выгорания. Кроме того, оценка токсичности в данной установке проводится с использованием подопытных животных.

Установка для исследования термической деструкции материалов (пат. 14083 Российская Федерация, МПК G01N 25/00 (2000.01). А. А. Трубицын; заявитель и патентообладатель Государственный Восточный научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности. № 99126328/20; заявл. 14.12.1999; опубл. 27.06.2000, бюл. № 18) разработана для проведения исследований термического разложения материалов с целью определения удельного коэффициента образования токсичных газов и удельной скорости выгорания. Эти параметры являются важными для оценки пожарной опасности материалов в условиях горения. Однако установка имеет ограничения, так как не позволяет оценивать концентрацию кислорода в продуктах горения, теплоту сгорания материалов и линейную скорость распространения пламени по твёрдой

поверхности. Размер образцов, применяемых в испытаниях, составляет  $20 \times 10 \times 10$  мм<sup>2</sup>, что ограничивает масштаб исследований. В данной установке не используется метод тестирования с применением подопытных животных, что исключает возможность непосредственной оценки токсичности продуктов горения в биологическом контексте.

Способ оценки токсичности продуктов горения материалов (пат. 2300098 Российская Федерация, МПК G01N 25/22(2006.01). А. А. Трубицын, Н. В. Трубицына, В. А. Уварова, Т. М. Грачева; заявитель и патентообладатель ООО «ВостЭКО». № 2005137275/28; заявл. 2005.11.30; опубл. 2007.05.27, бюл. № 30) разработан для определения таких ключевых параметров, как удельный коэффициент образования токсичных газов и удельная скорость выгорания материалов при их горении. Эти показатели позволяют оценить пожарную опасность материалов, особенно в части выделения токсичных продуктов горения.

Однако способ имеет ограничения: он не предоставляет возможности измерить плотность токсичных газов и концентрацию кислорода в продуктах горения, а также не позволяет оценить теплоту сгорания и линейную скорость распространения пламени по поверхности твёрдого материала. Отсутствие этих данных ограничивает полноту оценки пожароопасности. Данный метод не предусматривает использование подопытных животных.

В таблице 2.2 представлены результаты сравнительного анализа ключевых параметров, измеряемых при горении различных веществ и материалов в ряде экспериментальных установок [79].

Таблица 2.2 – Измеряемые параметры горения веществ и материалов в различных экспериментальных установках [79]

п/п	Название установки	Удельный коэффициент образования токсичного газа	Плотность токсичных газов и кислорода	Использование подопытных животных	Размеры образца	Размер камеры сгорания/ экспозиционной камеры	Теплота сгорания	Линейная скорость распространения пламени по поверхности твёрдого материала	Удельная скорость выгорания
1	Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении	+	+	–	0,12·0,12 м <sup>2</sup>	3·10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup> /0,5887 м <sup>3</sup>	–	–	+
2	Комплекс для исследования процессов терморазложения неметаллического материала	+	+	–	*	5·10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup> /*	–	–	+
3	Устройство для исследования воспламенения и горения полимерных материалов	+	+	–	*	*/*	–	–	–

Продолжение таблицы 2.2

п/п	Название установки	Удельный коэффициент образования токсичного газа	Плотность токсичных газов и кислорода	Использование подопытных животных	Размеры образца	Размер камеры сгорания/экспозиционной камеры	Теплота сгорания	Линейная скорость распространения пламени по поверхности твёрдого материала	Удельная скорость выгорания
4	Установка для проверки огнезащитных свойств материалов на токсичность	+	-	+	*	*/*	-	-	-
5	Установка для исследования термической деструкции материалов	+	-	-	20·10·10 мм <sup>3</sup>	*/*	-	-	+
6	Устройство комплексной оценки пожарной опасности материалов	+	+	+	*	*/*	-	-	+
7	Установка для определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов «ТПГ»	+	-	+	*	*/*	-	-	-
8	Способ оценки токсичности продуктов горения материалов	+	-	-	288 мм <sup>2</sup>	*/*	-	-	+

Анализ данных показывает, что ни одна из существующих установок не позволяет измерять такой важный параметр, как линейная скорость распространения пламени по поверхности твёрдого материала. Это ограничивает возможности детального исследования динамики горения. Кроме того, в ряде установок (№ 4, 5, 7, 8) не проводится измерение плотности токсичных газов и концентрации кислорода, что является важным показателем для оценки токсичности продуктов горения и их влияния на безопасность людей при пожаре.

В статье Д.В. Трушкина [40] обоснована необходимость учёта токсичности продуктов горения при выборе отделочных материалов для путей эвакуации. Представлены критерии допустимости материалов с учётом выделения опасных газов, подчёркнута важность включения этих показателей в строительные нормативы для обеспечения безопасности эвакуации.

В статье Д.В. Трушкина и А.Я. Корольченко [41] представлены рекомендации по проведению испытаний строительных материалов с целью определения токсичности продуктов их горения. Авторы описывают экспериментальные методики и параметры, подлежащие контролю, подчёркивая важность стандартизированных подходов для объективной оценки пожарной опасности материалов, особенно в контексте безопасности эвакуации.

В работе [105] описана методика, где сначала определяются основные поллютанты, образующиеся при горении отделочных материалов, и выясняется характер их токсического воздействия на человека. Далее рассчитываются удельные выходы каждого токсичного газа (мг газа на 1 г сгоревшего материала) и приводятся к эквиваленту наиболее опасного из них. Практически это реализуется суммированием удельных выходов с весовыми коэффициентами, учитывающими относительную токсичность веществ (например, по отношению к оксиду углерода как базовому показателю). Предлагается критерий: приведенная удельная токсичность до 40 мг/г соответствует малоопасному материалу, 40-120 мг/г – умеренно опасному, 120-360 мг/г – высокоопасному, свыше 360 мг/г – чрезвычайно опасному. Важное достоинство метода – возможность испытывать

твёрдые, порошкообразные и жидкие материалы и классифицировать их токсичность без проведения натуральных экспериментов на животных.

В работе [27] представлен теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении. Авторы предложили методику, учитывающую геометрию помещения, характеристики источника горения и параметры вентиляции, что позволяет с высокой точностью моделировать динамику накопления токсичных продуктов горения. Особое внимание уделено распространению газа по путям эвакуации, что делает разработку актуальной для оценки безопасности зданий и прогнозирования времени блокирования эвакуационных выходов.

В работах Пузача С.В. и соавторов рассматриваются различные аспекты оценки токсичности продуктов горения в условиях пожара внутри помещений. В статье [28] предложен интегральный показатель токсичности продуктов горения, учитывающий концентрации и токсикодинамические характеристики газообразных соединений, образующихся при пожаре.

В работе [29] уточняется методика определения токсичности при стабилизированном горении жидкостей, подчеркивается роль теплового режима и площади испарения на характер газовой выделения.

В [30] описаны установка и методика определения удельных коэффициентов образования токсикантов. Во всех трёх работах подчёркивается важность учёта динамики распространения токсичных газов в помещении и на путях эвакуации при расчёте времени блокирования.

В статье [106] представлены современные методы оценки пожарной опасности строительных материалов на полимерной основе, включая анализ токсичности продуктов горения. Особое внимание уделено переходу от биологического метода к экспериментально-расчётному подходу, основанному на измерении концентраций токсичных газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и др.) и их сравнении со справочными летальными значениями. Автор подчёркивает необходимость совершенствования методик испытаний ввиду ограниченной применимости стандартных методов к реальным условиям пожара.

В работе Пузача С.В., Болдрушкиева О.Б. и Сулейкина Е.В. [24] предложен подход к оценке токсичности продуктов горения, основанный на учёте совместного воздействия циановодорода и монооксида углерода, характеризующегося выраженным синергетическим эффектом. В рамках исследования была разработана физико-математическая модель, отражающая особенности лёгочной вентиляции человека в процессе эвакуации и изменения уровня кислорода в окружающей среде. Методика основана на экспериментальных данных, полученных с модернизированной установкой, и позволяет оценить время блокирования путей эвакуации по критерию токсичности, что повышает точность прогноза опасных условий при пожаре.

Статья [33] направлена на улучшение точности и воспроизводимости результатов при оценке токсичности продуктов горения. Авторы выявляют источники погрешностей и предлагают технические и методические меры для повышения достоверности, включая оптимизацию условий эксперимента и совершенствование газоаналитических методов.

В работе [82] подчёркивается, что при термическом разложении и горении полимеров формируются такие токсиканты, как угарный газ (CO), синильная кислота (HCN), хлористый водород (HCl), хлористый бензол, формальдегид, а также летучие органические соединения (например, акролеин, бензол, толуол).

Авторы подчёркивают, что традиционные методы определения токсичности продуктов горения, основанные на биологических испытаниях с лабораторными животными, не позволяют в полной мере отразить специфику воздействия продуктов разложения полимеров. Кроме того, эти методы являются трудоёмкими, слабо воспроизводимыми и вызывают этические нарекания. В связи с этим обосновывается необходимость перехода к экспериментально-расчётным и инструментальным методам, базирующимся на газоаналитическом определении состава дымовых смесей и последующей оценке их токсичности путём сопоставления с нормативными или предельно допустимыми концентрациями.

Особое внимание в работе уделяется влиянию условий горения на токсичность продуктов: температура, степень доступа кислорода, фазовое

состояние вещества, наличие добавок и антипиренов – все эти факторы существенно меняют как состав, так и удельную токсичность выделяющихся продуктов. Авторы обращают внимание на необходимость стандартизации условий испытаний и учёта динамики выделения токсикантов во времени.

Таким образом, в работе обоснована необходимость развития и внедрения более точных методов оценки токсической опасности на основе инструментального мониторинга газового состава продуктов горения и расчётных моделей оценки поражающего действия, что, по мнению авторов, позволит значительно повысить эффективность пожарной экспертизы полимерных материалов на стадии их проектирования, испытаний и применения.

Авторы статьи [107] предлагают количественный подход к оценке токсичности продуктов горения, основанный на анализе суммарного воздействия газов однонаправленного токсического действия, образующихся при термической деструкции материалов. Исследование проводилось на образцах шахтных материалов в режимах тления и горения с использованием установки «Термодес», разработанной в НЦ ВостНИИ.

Основу метода составляет расчет интегрального индекса токсичности, который определяется как сумма отношений фактических концентраций токсичных газов к их предельно допустимым концентрациям (ПДК) в воздухе рабочей зоны. При этом ключевым элементом анализа является приведение всех концентраций к эталонному веществу – угарному газу (СО), как наиболее часто встречающемуся и токсически значимому компоненту. Такой подход позволяет оценивать совокупное поражающее действие сложной газовой смеси с учётом реальной вентиляции и конфигурации пространства (в частности, параметров горных выработок).

Авторы приходят к выводу, что предложенный критерий может эффективно использоваться для комплексной оценки токсичности при пожарах, отмечая его универсальный характер и возможность применения на различных объектах, включая сферы, не связанные с горной промышленностью.

В работе [108] анализируются современные методы оценки токсичности

продуктов горения строительных материалов с учётом особенностей их химического состава, агрегатного состояния и условий термического воздействия. Авторы подчёркивают, что наряду с традиционными биологическими методами всё более актуальными становятся экспериментально-расчётные методы, позволяющие количественно оценивать совокупное токсическое воздействие продуктов горения без использования животных.

Особое внимание уделено необходимости оценки комплексного воздействия многокомпонентных газовых смесей, образующихся при горении материалов с полимерной основой. Предлагается использовать обобщённый показатель токсичности, рассчитываемый по сумме отношений концентраций ключевых токсикантов (СО, HCN, HCl и др.) к их предельно допустимым или летальным значениям. Такой подход позволяет сравнивать токсичность различных материалов и учитывать эффект суммации.

Авторы подчёркивают, что токсичность продуктов горения может существенно меняться в зависимости от режима горения (тление, пламя), наличия кислорода, температуры и примесей, что требует унификации условий испытаний. Также подчёркивается важность разработки отечественных методик, адаптированных к материалам, используемым в российском строительстве.

В источнике [22] изложены теоретические и методические основы экспериментально-расчётного метода определения токсичности продуктов горения, предложенного в качестве альтернативы классическому биологическому методу, основанному на экспозиции лабораторных животных. Автор подчёркивает необходимость реформирования существующего ГОСТ 12.1.044-89 с целью перехода к более универсальному, воспроизводимому и этически приемлемому подходу.

Метод основан на измерении концентраций ключевых токсикантов (СО, СО<sub>2</sub>, HCN, HCl, NO<sub>x</sub>, акролеин и др.) в замкнутом объёме в условиях контролируемого горения или тления образца. На основе полученных данных рассчитывается суммарный индекс токсичности  $K_t$ , учитывающий вклад каждого компонента относительно его среднесмертельной концентрации (CL<sub>50</sub>). Расчётный показатель

$HC_{L50}$  выражается как условное соотношение массы сгоревшего материала к объёму, вызывающее 50% летальных исходов.

Метод предусматривает контрольный эксперимент на животных только для верификации расчётного значения  $HC_{L50}$ , что позволяет значительно сократить использование биологических объектов. Также предлагается унификация режимов испытаний: тление ( $25 \text{ кВт/м}^2$ ) и горение с пламенем ( $40 \text{ кВт/м}^2$ ), что соответствует международным рекомендациям ISO. Применение газоанализаторов и методик интегральной обработки кривых «концентрация – время» обеспечивает высокую точность и сопоставимость результатов.

Статья содержит подробное описание экспериментальной установки, процедуры испытаний и алгоритма расчёта показателя токсичности. Отмечается, что предложенный подход позволяет учитывать суммарное поражающее действие многокомпонентных смесей, а также адаптировать метод к различным видам материалов, включая полимеры и отделочные покрытия.

В источнике [37] рассматривается метод экспериментально-расчётной оценки токсичности летучих продуктов горения строительных материалов, направленный на поэтапную замену биологического метода расчётной моделью. Основу подхода составляет регистрация временных зависимостей концентраций ключевых токсикантов ( $CO$ ,  $HCl$ ,  $HCN$  и др.) в замкнутом объёме установки при испытаниях.

Для каждого газа определяется средняя концентрация за время экспозиции, которая затем сопоставляется с соответствующим справочным значением средней смертельной концентрации ( $CL_{50}$ ) за этот же временной интервал. Это позволяет рассчитать показатель токсичности материала без участия животных. Автор подчёркивает необходимость непрерывного измерения концентраций токсикантов и точной математической обработки экспериментальных данных.

Отдельное внимание уделено сложности прогнозирования острых токсических пиков («токсических ударов») – кратковременных, но высоких превышений  $CL_{50}$ , которые могут быть фатальны, несмотря на то, что средняя концентрация токсиканта остаётся ниже порога. Кроме того, в статье отмечается

важность учёта динамики сорбции, конденсации и химического взаимодействия продуктов горения между собой и с кислородом воздуха, особенно для нестабильных токсикантов (например, HCN, HCl, акролеин).

В заключение автор делает вывод, что успешное применение экспериментально-расчётного метода требует не только разработки и использования адекватных моделей, но и совершенствования метрологических процедур, обеспечивающих точность и воспроизводимость результатов. Такой подход открывает возможность отказа от биологических испытаний и более объективной оценки токсической опасности в динамических условиях, приближенных к реальному пожару.

Авторы статьи [74] рассматривают подход к количественной оценке токсичности продуктов горения кабелей и строительных конструкций на основе соотношения между показателем токсичности ( $CL_{50}$ ) и массовой скоростью выгорания материала. Предлагается использовать именно это отношение в качестве ключевого критерия при нормировании токсической опасности кабельных изделий.

С учётом анализа параметров пожара (высота помещения, объём, режим горения, коэффициент безопасности) выведена формула для определения критической продолжительности пожара по условию достижения гранично допустимой концентрации токсичных газов. Также приводится обоснование показателя токсичности  $120 \text{ г/м}^3$  как нижнего предельного значения, необходимого для обеспечения безопасной эвакуации людей, особенно в помещениях с ограниченным объёмом и протяжённой прокладкой кабелей.

Авторы подчёркивают, что существующие стандарты в ряде случаев не нормируют токсичность кабелей, несмотря на их высокую пожарную нагрузку и способность к распространению токсичных продуктов горения на большие расстояния. Приводятся сравнительные данные массовой скорости выгорания кабелей и конструкционных материалов, согласно которым кабели могут выделять в 2,5 раза больше токсичных веществ.

В заключении обоснована необходимость разработки нормативов,

учитывающих не только групповые показатели токсичности (Т1-Т4), но и интегральный расчётный подход, включающий параметры горения, геометрию помещения и массу выгораемого материала. Это позволит более точно прогнозировать уровень опасности на стадии проектирования и эксплуатации объектов.

В работе [81] проведена комплексная оценка пожарной опасности и токсичности синтетических строительных материалов, применяемых в жилых помещениях. Объектами исследования стали широко используемые отделочные изделия: гипсокартон, стеклообои, обои на флизелиновой и бумажной основе, потолочные плиты, линолеум ПВХ, ковролин.

- Для анализа были использованы методы: испытания на горючесть и воспламеняемость (по ГОСТ 30244-94 и ГОСТ 30402-96);
- синхронный термический анализ (ТГ/ДСК);
- ИК-Фурье спектроскопия продуктов разложения.

Результаты показали, что реальные показатели горючести и воспламеняемости некоторых образцов (например, обоев и ПВХ-линолеума) существенно отличаются от данных, указанных в сертификатах, что указывает на ненадёжность сертификационной информации при выборе безопасных материалов.

На основе ИК-спектроскопии было установлено, что при термическом воздействии (даже при температурах порядка 140 °С) ряд образцов выделяет соединения хлора, обладающие высокой токсичностью. Особенно это характерно для линолеума на основе ПВХ и синтетических ковровых покрытий.

Авторы делают вывод о недопустимости применения материалов, отнесённых по совокупности характеристик к классам КМ4 и КМ5, в жилых зданиях. Работа подчёркивает необходимость сочетания традиционных испытаний с инструментальными методами контроля токсичности (термогравиметрия и ИК-спектроскопия) для обоснованной оценки пожарной опасности и риска выделения токсичных газов при пожаре.

Проведённый анализ показал, что в настоящее время существует широкий

спектр методик оценки токсичности продуктов горения строительных материалов, различающихся по подходам, технической реализации и степени детализации получаемых данных. Наиболее распространёнными остаются нормативные методы, основанные на биологических испытаниях, однако они сопровождаются рядом существенных ограничений: этическими, воспроизводимостными и применимыми лишь к ограниченному числу материалов.

Развитие экспериментально-расчётных и инструментальных подходов демонстрирует устойчивую тенденцию к переходу от биологических методов к моделям, основанным на газоанализе и расчётных алгоритмах. Наиболее прогрессивные методики позволяют учитывать суммарное поражающее действие многокомпонентных газовых смесей, определять удельные выходы токсикантов и сопоставлять их с нормативными значениями без участия животных. Однако в большинстве существующих установок отсутствует возможность комплексного учёта таких критически важных параметров, как линейная скорость распространения пламени, массовая скорость выгорания материала и концентрация кислорода.

Таким образом, современный этап развития требует дальнейшей унификации условий испытаний, внедрения методик, учитывающих динамику токсичности в процессе горения, и совершенствования аппаратурной базы для объективной и воспроизводимой оценки токсической опасности строительных материалов.

### **2.3 Характеристика методик токсикологической оценки строительных материалов при пожаре, используемых за рубежом**

В странах Европейского Союза строительные материалы (кроме напольных покрытий) классифицируются по следующим уровням пожарной опасности: A1, A2, B, C, D, E и F. Для напольных покрытий существуют отдельные классы: A1<sub>fl</sub>, A2<sub>fl</sub>, B<sub>fl</sub>, C<sub>fl</sub>, D<sub>fl</sub>, E<sub>fl</sub> и F<sub>fl</sub>. Наиболее высокие показатели пожарной безопасности демонстрируют классы A1 и A1<sub>fl</sub> соответственно.

За рубежом для классификации строительных материалов по степени пожарной опасности используется другая методология, которая значительно отличается от подходов, принятых в Российской Федерации.

Европейская классификация строительных материалов делит их на две основные группы в зависимости от особенностей поведения при пожаре: напольные покрытия и все остальные материалы, исключая напольные [38].

Российская классификация использует более детализированный подход, в рамках которого выделяются следующие типы строительных материалов: материалы для покрытия стен и потолков, напольные покрытия (включая ковровые), кровельные материалы, гидро- и пароизоляционные, а также теплоизоляционные материалы.

Несмотря на то, что в обеих системах классификации – европейской и российской – рассматриваются показатели воспламеняемости строительных материалов от различных источников зажигания и оценивается вероятность возникновения опасных факторов пожара (таких как повышение температуры, выделение дыма, токсичных газов и др.), методологические подходы к испытаниям и оценке имеют принципиальные различия.

В российской методологии для определения любой пожарно-технической характеристики строительного материала применяется отдельный испытательный метод, в котором при проведении тестов изменения других характеристик не учитываются. В каждом таком методе акцент делается на регистрации лишь предельных значений (максимальных или минимальных), а динамика изменения этих параметров в течение времени не принимается во внимание.

Европейская методика испытаний строительных материалов, исключая напольные покрытия, базируется на стандартизированном методе SBI (Single Burning Item) [109], который применяется для классификации всех типов материалов, за исключением классов A1 и E. В ходе испытаний по методу SBI оценивается несколько ключевых характеристик одновременно, включая показатели тепловыделения и дымообразования. В отличие от отечественного подхода, методика SBI не сводится к фиксации только предельных значений

параметров, а предусматривает анализ их изменения во времени. Учёт динамических характеристик, таких как FIGRA – скорость развития пожара и SMOGRA – интенсивность образования дыма, позволяет отслеживать темпы изменения показателей и формировать более полное представление о поведении материала в условиях горения.

Схожий подход к оценке нескольких пожарно-технических характеристик одновременно реализован и в основном европейском методе испытаний EN ISO 9239 - 1 [110], который применяется для напольных строительных материалов. В рамках этого метода оцениваются такие параметры, как критический тепловой поток, при котором прекращается распространение фронта пламени, а также способность материала к образованию дыма.

В рамках европейской методологии токсичность газов, выделяемых при горении строительных материалов, не включена в перечень оцениваемых показателей, и поэтому такие материалы не проходят классификацию по данному критерию. Это методологическое упущение объясняется, вероятно, текущими подходами к оценке пожарной опасности, где вопрос токсичности продуктов горения не рассматривается в качестве первоочередного. Таким образом, проблема анализа воздействия токсичных газов остаётся недостаточно проработанной в действующих европейских стандартах, что отражает сложившиеся взгляды на относительную значимость данного фактора в общей системе оценки пожарной безопасности [39].

Определение степени выделения токсичных продуктов при реальных пожарах на основе лабораторных данных и последующая классификация материалов по уровню токсичности сопряжены со значительными трудностями. Данные задачи осложняются из-за двух основных факторов, существенно влияющих на точность прогнозов и надежность оценки. Во-первых, вероятность отравления человека определяется не только концентрацией токсичных веществ, выделяемых при пожаре, но и временем его нахождения в опасной среде, то есть суммарной токсической дозой. Во-вторых, удельный выброс токсичных продуктов горения сильно зависит от таких факторов, как температура, внешний тепловой

поток и содержание кислорода в воздухе, поступающего в зону горения. Точный учет этих параметров в лабораторных условиях практически невозможен, что значительно осложняет прогнозирование [39].

Однако, помимо нормативных методов оценки строительных материалов по уровню токсичности при пожаре существуют и не нормативные методики.

Так, в статье [70] рассматривается токсичность продуктов разложения и горения полиуретановых пен, используемых в мягкой мебели. Автор указывает, что уже в начальной фазе пожара эти материалы выделяют угарный газ (CO) и синильную кислоту (HCN) в концентрациях, опасных для жизни. В ходе исследования 12 образцов пен была определена эмиссия токсичных газов и кратность превышения их предельно допустимых концентраций при температуре 450-750 °С. Установлено, что в ряде случаев уровень HCN превышает смертельный порог в 10-14 раз. Автор подчёркивает отсутствие требований к токсичности материалов интерьера в строительных нормах и предлагает использовать количественную оценку кратности превышения критических концентраций для повышения пожарной безопасности.

В статье [111] рассматриваются принципы количественной оценки токсичности продуктов горения, с учётом их значимости при оценке риска гибели людей на пожаре. Авторы подчёркивают, что несмотря на различия в химическом составе дыма от разных материалов, летальные последствия при пожарах преимущественно обусловлены вдыханием ограниченного набора токсичных газов, прежде всего угарного газа (CO), синильной кислоты (HCN) и, в меньшей степени, низкомолекулярных органических веществ (например, акролеина).

Статья обобщает экспериментальные данные о смертельных концентрациях этих газов при различных условиях и обосновывает необходимость их интегрального учёта через показатель  $LC_{50}$  (средняя смертельная концентрация при заданной экспозиции). Особое внимание уделено использованию модели FED (Fractional Effective Dose), основанной на суммировании вкладов отдельных токсикантов в общую смертельную дозу. Такая модель позволяет прогнозировать исходы в условиях реального пожара на основе состава дыма.

Авторы подчёркивают, что наиболее важным компонентом в токсикологической оценке продуктов горения остаётся СО, поскольку он практически всегда присутствует, обладает кумулятивным действием и влияет на транспорт кислорода в организме. Однако в случае наличия полимерных и синтетических материалов, например полиуретанов, весомый вклад в летальный эффект вносит также HCN.

Авторы работы [71, 111] представляют классификацию острой токсичности дыма, образующегося при термическом разложении химических материалов, используемых в строительной отрасли. Исследование направлено на систематизацию данных о токсичности продуктов горения различных строительных материалов, с целью улучшения оценки рисков для здоровья при пожарах.

В работе анализируются результаты лабораторных испытаний, в которых определялись значения  $LC_{50}$  (летальная концентрация для 50% испытуемых) для различных материалов. На основе полученных данных предлагается классификация материалов по степени токсичности их продуктов термического разложения. Эта классификация может служить основой для разработки нормативных требований и стандартов безопасности в строительстве.

Авторы подчёркивают важность учёта токсичности продуктов горения при выборе строительных материалов, особенно в контексте обеспечения безопасности людей в случае пожара. Работа способствует более глубокому пониманию рисков, связанных с использованием определённых химических веществ в строительстве, и подчёркивает необходимость интеграции токсикологических данных в процессы проектирования и регламентации строительных материалов.

В статье [112] рассматриваются актуальные вопросы, связанные с регулированием токсичности продуктов горения строительных материалов. Автор подчёркивает, что действующие методы оценки токсичности, основанные на лабораторных испытаниях небольших образцов, зачастую не отражают реальных условий пожара. Малые по масштабу тесты, по мнению автора, не способны воспроизвести сложную динамику тепловых и химических процессов, характерных

для полноразмерных сценариев пожара, в том числе взаимодействие материалов, вентиляционные условия и фазовую трансформацию токсикантов. Вместе с тем полномасштабные испытания, которые потенциально обеспечивают более достоверную оценку токсичности, крайне затратны и непрактичны для широкого использования в строительной отрасли.

Исходя из этого, автор предлагает альтернативный подход к регулированию: не оценивать непосредственно токсичность продуктов горения, а ограничивать характеристики тепловыделения, прежде всего скорость тепловыделения (Heat Release Rate), как косвенный, но показательный параметр пожарной опасности. Бабраускас аргументирует это тем, что между интенсивностью тепловыделения и объёмом образующихся токсичных газов существует корреляционная зависимость, что делает возможным непрямую оценку токсичности на основе энергетических характеристик материала.

Таким образом, статья акцентирует внимание на необходимости пересмотра традиционных нормативных подходов, в частности отказа от ориентированных на токсичность биологических и маломасштабных химических методов в пользу системной оценки пожароопасности материалов с использованием теплотехнических параметров. Подобная концепция, по мнению автора, способна повысить достоверность оценки риска для здоровья и обеспечить более практичное и воспроизводимое регулирование в строительной практике.

В работе М. М. Хиршлера [42] рассматриваются методы измерения токсичности дыма, направленные на улучшение пожарной безопасности. Автор подчеркивает, что токсичность дыма, образующегося при горении различных материалов, имеет схожую летальную эффективность, что позволяет использовать обобщенные показатели для оценки пожарной опасности.

Хиршлер акцентирует внимание на важности учета реальных условий пожара при проведении испытаний, включая температуру, вентиляцию и состав материалов. Он предлагает использовать методы, позволяющие моделировать условия, близкие к реальным пожарам, для получения более точных данных о токсичности дыма.

В статье также обсуждаются различные методики измерения токсичности, включая определение  $LC_{50}$  (летальная концентрация для 50% испытуемых) и использование моделей, учитывающих суммарное воздействие нескольких токсикантов. Автор подчеркивает необходимость стандартизации методов испытаний и разработки нормативов, основанных на объективных и воспроизводимых данных.

В статье В. Бабраускаса и соавторов [80] представлен комплексный анализ соответствия результатов маломасштабных лабораторных испытаний токсичности продуктов горения данным, полученным при полномасштабных пожарах. Цель исследования заключалась в оценке достоверности и применимости маломасштабных методов для прогнозирования реальных рисков, связанных с токсичностью продуктов горения строительных материалов.

Авторы провели серию сравнительных экспериментов, в которых использовались как маломасштабные тесты (например, испытания на определение  $LC_{50}$ ), так и полномасштабные модели пожаров в помещениях. Результаты показали, что хотя маломасштабные испытания могут предоставлять полезную информацию о токсичности отдельных материалов, они не всегда точно отражают поведение материалов в условиях реального пожара. Различия в температурных режимах, вентиляции, масштабах и взаимодействии материалов могут существенно влиять на состав и концентрацию токсичных продуктов горения.

Статья подчёркивает необходимость осторожного подхода при интерпретации результатов маломасштабных испытаний и их применении для оценки пожарной безопасности. Авторы рекомендуют использовать данные маломасштабных тестов в сочетании с другими методами оценки, включая моделирование и анализ полномасштабных сценариев, для более точного прогнозирования рисков, связанных с токсичностью продуктов горения.

Таким образом, работа Бабраускаса и соавторов вносит значительный вклад в понимание ограничений и возможностей маломасштабных методов оценки токсичности и подчёркивает важность комплексного подхода к обеспечению пожарной безопасности строительных материалов.

В статье [113] представлены результаты экспериментов по оценке острой токсичности дыма, образующегося при термическом разложении древесины, с использованием модели пожара на основе радиантной печи.

В ходе исследования использовалась радиантная печь для генерации дыма от образцов древесины, таких как дугласова пихта и южная жёлтая сосна. Собранные продукты горения подвергались анализу для определения их токсичности. Результаты показали, что дым, полученный при термическом разложении этих видов древесины, содержит токсичные компоненты, способные вызывать острые токсические эффекты.

Авторы подчёркивают, что использование радиантной печи в качестве модели пожара позволяет воспроизводить условия, близкие к реальным, и получать воспроизводимые результаты при оценке токсичности продуктов горения. Это делает данный метод полезным инструментом для сравнительной оценки токсичности различных материалов и разработки стратегий по снижению риска отравления дымом при пожарах.

Таким образом, данная работа вносит значительный вклад в методологию оценки острой токсичности дыма и подчёркивает важность использования реалистичных моделей пожара для получения достоверных данных, необходимых для обеспечения пожарной безопасности.

В статье М. М. Хиршлера [43] рассматриваются методы оценки токсичности дыма, образующегося при горении различных материалов, с целью повышения пожарной безопасности.

Автор подчёркивает, что результаты маломасштабных испытаний по определению токсичности дыма требуют осторожной интерпретации, поскольку они могут не отражать реальных условий пожара. В частности, такие тесты могут недооценивать влияние угарного газа (СО) в полномасштабных пожарах.

Хиршлер предлагает использовать данные о токсичности дыма в качестве одного из входных параметров при анализе пожарной опасности. Он отмечает, что для получения более точных оценок необходимо учитывать различные факторы, включая состав материалов, условия горения и вентиляции.

Статья подчёркивает необходимость комплексного подхода к оценке токсичности дыма и пожарной опасности, учитывающего как лабораторные данные, так и реальные условия пожара. Это создаёт предпосылки для разработки более действенных мер по повышению пожарной безопасности и сохранению здоровья людей.

В исследовании Вольфрам Беккер [114] рассматриваются перспективы использования данных о токсичности дыма в инженерных расчётах пожарной безопасности. Автор подчёркивает, что традиционные методы, ориентированные преимущественно на показатели воспламеняемости и тепловыделения, не позволяют в полной мере оценить риски, связанные с воздействием продуктов горения на человека.

В работе проводится анализ существующих подходов к измерению токсичности дыма, включая определение показателя  $LC_{50}$  и применение моделей, учитывающих совокупное влияние нескольких токсичных компонентов. Отмечается, что для повышения точности оценок необходимо учитывать комплекс факторов, таких как химический состав материалов, режимы горения и особенности вентиляции помещений.

Автор также обсуждает необходимость стандартизации методов испытаний и разработки нормативов, основанных на объективных и воспроизводимых данных. Он подчёркивает, что интеграция данных о токсичности дыма в инженерные расчёты пожарной безопасности позволит более точно оценивать риски для здоровья и разрабатывать эффективные меры по обеспечению пожарной безопасности зданий и сооружений.

Указанная статья вносит значительный вклад в развитие методов оценки пожарной опасности, подчёркивая важность учёта токсичности продуктов горения при проектировании и эксплуатации зданий.

В работе Т. Морикава и Э. Янаи [115] приведены результаты экспериментов по анализу токсичности продуктов горения пенопластовых строительных материалов, выполненных в условиях, максимально приближённых к реальным пожарам.

Авторы проводили испытания различных пенопластов, включая пенополиуретан, полиизоцианурат, фенольный и полистирольный пенопласты, в полумасштабной камере с различными условиями подачи воздуха. В ходе экспериментов измерялись концентрации основных токсичных газов, таких как угарный газ (CO), синильная кислота (HCN) и акролеин.

Результаты показали, что CO является основным токсикантом, образующимся при горении всех исследованных материалов. Однако пенопласты, содержащие азот, такие как пенополиуретан и полиизоцианурат, выделяют значительные количества HCN, что существенно увеличивает общую токсичность продуктов горения. Пенопласты на основе фенола и полистирола демонстрировали более низкие уровни HCN, что делает их менее токсичными в условиях пожара.

Авторы подчёркивают, что выбор строительных материалов должен учитывать не только их физико-механические свойства, но и токсичность продуктов горения. Использование материалов с высоким содержанием азота может привести к повышенному риску отравления при пожарах из-за образования HCN. Таким образом, результаты данного исследования имеют важное значение для разработки нормативных требований и стандартов, направленных на повышение пожарной безопасности зданий.

В статье [116] проведён критический анализ существующих утверждений о синергизме токсичности газов, образующихся при пожарах. Автор рассматривает гипотезу, согласно которой совместное воздействие таких газов, как угарный газ (CO) и синильная кислота (HCN), может приводить к усиленному токсическому эффекту по сравнению с их индивидуальным воздействием.

Автор анализирует данные различных исследований, включая эксперименты на животных, и приходит к выводу, что существующие доказательства синергизма недостаточно убедительны. Он подчёркивает, что многие исследования не учитывают важные факторы, такие как концентрации газов, условия экспозиции и физиологические различия между видами, что затрудняет интерпретацию результатов.

Автор также обращает внимание на необходимость стандартизации методов

оценки токсичности продуктов горения и призывает к проведению более тщательных и контролируемых исследований для определения реальных эффектов взаимодействия различных токсичных газов.

Таким образом, статья вносит значительный вклад в понимание сложности оценки токсичности продуктов горения и подчёркивает необходимость осторожного подхода при интерпретации данных о возможном синергизме токсичных газов, образующихся при пожарах.

В работе [117] представлены результаты исследования, направленного на разработку математической модели для оценки токсичности продуктов горения в условиях пожара. Авторы стремились создать инструмент, позволяющий прогнозировать токсическое воздействие различных газов, образующихся при горении, на человека, основываясь на количественных показателях.

Модель учитывает концентрации основных токсичных компонентов дыма, таких как угарный газ (CO), синильная кислота (HCN) и диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), а также их влияние на организм при вдыхании. Для валидации модели были проведены экспериментальные исследования, в которых измерялись уровни токсичности при различных сценариях горения. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало хорошее соответствие, что подтверждает применимость модели для оценки риска отравления дымом в реальных условиях пожара.

Авторы подчёркивают, что разработанная модель может служить полезным инструментом для инженеров и специалистов по пожарной безопасности при проектировании зданий и выборе строительных материалов, позволяя учитывать потенциальную токсичность продуктов горения и разрабатывать меры по снижению риска для здоровья людей.

Таким образом, данная работа вносит значительный вклад в область оценки токсичности продуктов горения, предлагая математический подход, который может быть интегрирован в системы обеспечения пожарной безопасности.

Проведённый анализ зарубежных методик оценки токсичности продуктов горения строительных материалов свидетельствует о существовании широкого

спектра научных и прикладных подходов, направленных на количественную и качественную оценку токсичности дыма в условиях пожара. Несмотря на то, что в большинстве международных стандартов, особенно европейской классификации строительных материалов, токсичность не включена в перечень обязательных критериев для сертификации, данное направление активно развивается в научных исследованиях.

Ключевыми тенденциями зарубежных работ являются: ориентация на измерение концентраций летальных газов (CO, HCN, NOx и др.), определение LC<sub>50</sub>, использование моделей и расчетов, применение методик термогравиметрического анализа, ИК-спектроскопии. Особое внимание уделяется полимерным и азотсодержащим материалам, продукты горения которых демонстрируют высокую степень токсичности уже на начальных стадиях пожара.

Зарубежные авторы акцентируют внимание на необходимости моделирования реалистичных условий пожара, использовании полномасштабных и полумасштабных установок, а также учёте таких факторов, как температура, вентиляция, кислородный режим и сорбция газов. В ряде работ предлагается отход от биологических методов в сторону экспериментально-расчётных и математических моделей, обладающих высокой воспроизводимостью и практической применимостью.

Несмотря на успехи, отмечаются и существенные методологические разногласия: в частности, отсутствие единых международных стандартов, направленных на прямую классификацию строительных материалов по токсичности продуктов их горения. Это свидетельствует о необходимости дальнейшей стандартизации подходов и расширения нормативной базы с учётом токсикологической компоненты пожарной опасности.

Таким образом, зарубежный опыт демонстрирует как значительный научный потенциал в области токсикологической оценки продуктов горения, так и пробелы в нормативном регулировании, что определяет перспективность адаптации и внедрения научно обоснованных методик в национальные стандарты пожарной безопасности.

## **2.4 Модернизация и характеристика экспериментальных установок для оценки токсичности строительных материалов с использованием критерия токсикогенной опасности**

Оценка токсичности декоративно-отделочных и облицовочных материалов, а также напольных покрытий на путях эвакуации и в зальных помещениях проводится с использованием установки, описанной в работе [31].

Для оценки токсичности строительных материалов по новой экспериментально-аналитической методике требуется проведение испытаний на двух установках. Первая из них была описана ранее, а вторая предназначена для экспериментального определения линейной скорости распространения пламени по твёрдым веществам и материалам [20].

Установка, представленная в работе [103], была усовершенствована с целью повышения точности исследований токсичности строительных материалов при пожаре. Подробное описание исходных и модернизированной установок приводится в дальнейшем изложении.

### **2.4.1 Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении и ее модернизация**

Установка [31] предназначена для оценки пожарной опасности конденсированных материалов.

Методика испытаний предусматривает четыре режима: пламенное горение при избытке кислорода и при его недостатке, а также тление при избыточном и ограниченном поступлении кислорода. В рамках данного исследования все режимы были реализованы последовательно, поскольку именно такое сравнение позволяет установить, при каком варианте формируется наиболее неблагоприятная картина с точки зрения выделения токсичных продуктов.

Запуск процесса обеспечивается направленным тепловым воздействием: внутри камеры сгорания расположен электронагревательный элемент, создающий заданный тепловой поток и выводящий образец в область термического разложения, что позволяет приблизить эксперимент к условиям реального пожара. Состав газовой среды в экспозиционной камере контролируется средствами газоаналитики, обеспечивающими количественное определение компонентов и их концентраций. Конструктивно установка включает теплоизолированную камеру сгорания, экспозиционную камеру, газоотборный зонд, нагревательный узел, устройство фиксации образца и лазерный модуль [3].

Камера сгорания оснащена нагревателем и держателем на весах. Параметры теплового потока контролирует датчик Гордона [78]. Компоновка модернизированной экспериментальной установки и камеры сгорания представлена на рисунке 2.2 [3,118].

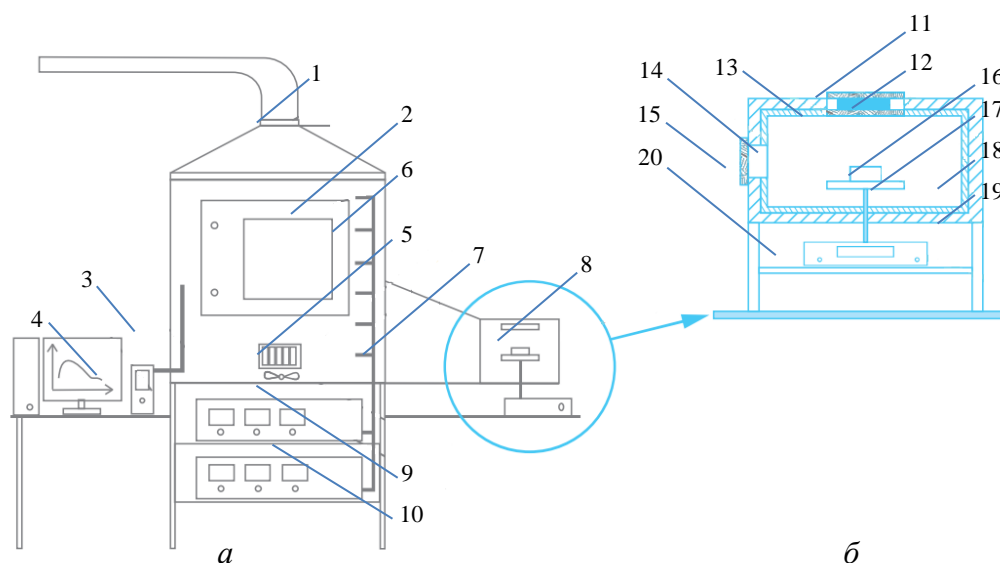


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки (а) и камеры сгорания (б):

1 – газотводящий патрубок с задвижкой; 2 – экспозиционная камера; 3 – трубка отбора газов для анализа; 4 – газоанализатор многоканальный; 5 – шибберные отверстия; 6 – набор термопар для фиксирования температуры в различных точках экспозиционной камеры; 7 – переходной рукав; 8 – камера сгорания; 9 – вентилятор экспозиционной камеры; 10 – электронный блок термопар; 11 – рубашка охлаждения излучателя; 12 – электронагревательный излучатель; 13 – окно излучателя; 14 – рабочий объем камеры; 15 – окно камеры; 16 – исследуемый образец; 17 – чашка весов; 18 – тепловая защита камеры; 19 – корпус камеры; 20 – электронные весы

Экспозиционная камера объёмом 0,5887 м<sup>3</sup> оборудована 27 бронированными термопарами для непрерывного температурного контроля.

Датчики рассчитаны на работу в диапазоне –40...1100 °С и обеспечивают точность порядка ±1 °С. Образец закрепляют на держателе, связанном с электронными весами с погрешностью ±1 мг, установленными на подвижном столе [3, 78].

Измерительный контур экспозиционной камеры был модернизирован за счёт установки дополнительного газоаналитического оборудования, что расширило возможности контроля газовой среды. До внесения изменений мониторинг выполнялся прецизионными газоанализаторами Dräger: концентрация СО<sub>2</sub> определялась в диапазоне 0-1 % (об.) при погрешности ±10 %, СО – в пределах 0-5 % (об.) с той же точностью, а содержание HCN и О<sub>2</sub> измерялось в интервале 0-21 % (об.) при допустимой погрешности ±10 %.

После модернизации системы контроля газовой среды в её состав были включены два дополнительных газоанализатора – «Эколаб» и «ГАНГ4РБ». Внешний вид и конструктивные особенности данных приборов представлены на рисунках 2.3 и 2.4.

Газоанализатор «Эколаб» включает зонд пробоотбора, модуль размещения (хранения) датчиков и пробоотборное устройство. Он предназначен для определения концентраций ряда компонентов, в том числе хлороводорода в диапазоне 0,02-250 мг/м<sup>3</sup>, оксида азота – 2,5-250 мг/м<sup>3</sup>, кислорода – 10-30 %, а также синильной кислоты в пределах 0,15-112 мг/м<sup>3</sup>.

ГАНГ-4РБ состоит из устройства пробоподготовки УП 1/1 (для охлаждения и осушения пробы), разбавителя газовых потоков РС-2 для разбавления газовых проб в соотношении (1:10/1:100), зонда высокотемпературного ЗВ-335-500°, фильтра и позволяет определять такие газы как: аммиак с диапазоном работы от 10 до 7080 мг/м<sup>3</sup>, серы диоксид с диапазоном работы от 0,01 до 500 мг/м<sup>3</sup>, фосген с диапазоном работы от 0,25 до 10 мг/м<sup>3</sup>, акролеин с диапазоном работы от 0,1 до 4 мг/м<sup>3</sup>, угарный газ с диапазоном работы от 10 до 400 мг/м<sup>3</sup>, азота диоксид с диапазоном работы от 1 до 40 мг/м<sup>3</sup>, углерода диоксид с диапазоном работы от 4500

до 180 000 мг/м<sup>3</sup>. При этом допустимая погрешность составляет ±10%.

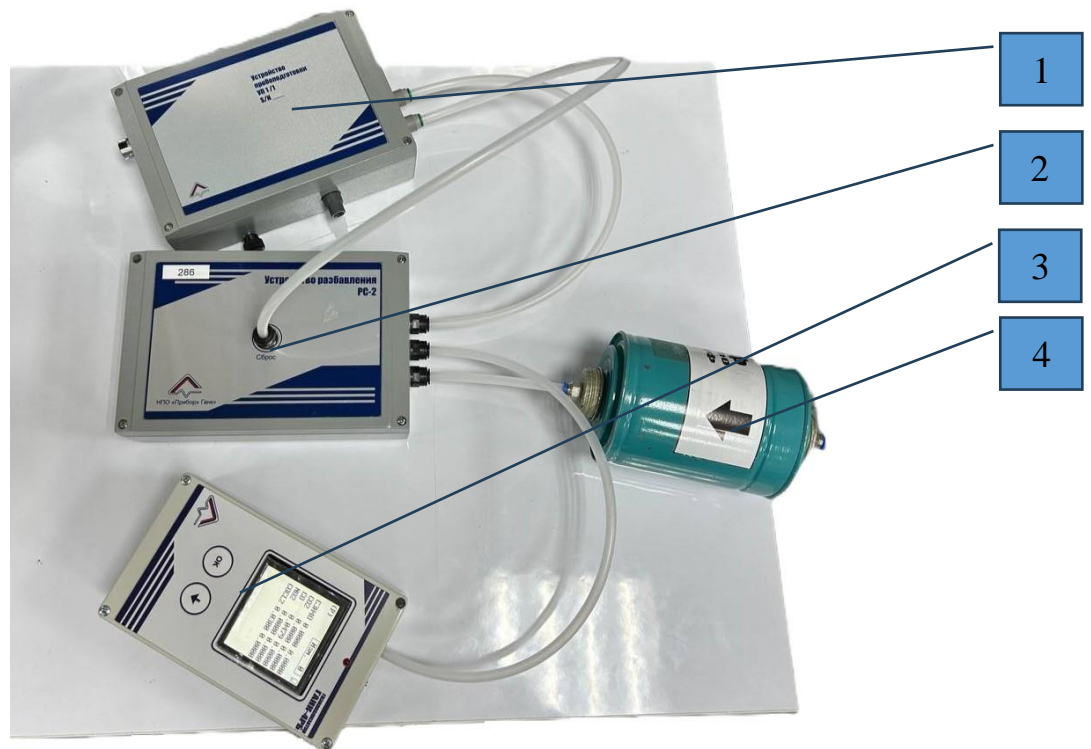


Рисунок 2.3 – Общий вид газааналитического оборудования марки ГАНГ-4РБ  
 1 – устройства пробоподготовки УП 1/1, 2– разбавитель газовых потоков РС-2, 3–  
 газаанализатор ГАНГ 4РБ, 4 – фильтр сорбционный ФС-1



Рисунок 2.4 – Общий вид газааналитического оборудования марки ЭКОЛАБ  
 1 – Пробоотборное устройство ПР-37, 2 – Газоанализатор ЭКОЛАБ ПЛЮС

На рисунке 2.5 представлен общий вид модернизированной экспериментальной установки.



Рисунок 2.5 – Общий вид экспериментальной установки

1 – экспозиционная камера, 2 – Система ЭКОЛАБ ПЛЮС, 3 – персональный компьютер,  
4 – Dräger, 5 – Система ГАНГ-4РБ

На рисунке 2.6 представлена схема системы параллельного отбора проб газовой среды.

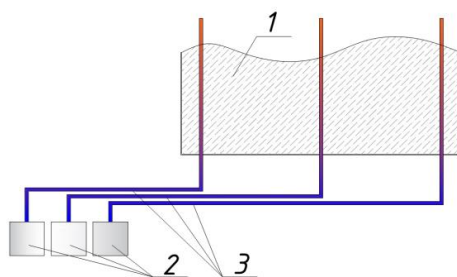


Рисунок 2.6 – Схема системы параллельного отбора проб газовой среды

1 – объем экспозиционной камеры; 2 – трубки зонда отбора; 3 – фильтра грубой и тонкой  
очистки

Образцы 10×10 см предварительно кондиционируют 12 часов при  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , затем установку выводят на  $766 ^\circ\text{C}$  и тепловой поток  $60 \text{ кВт/м}^2$ , после чего в камеру сгорания помещают заранее взвешенный образец и герметизируют её [3]. Модернизация газоконтроля позволила уточнять состав выделяющихся газов и выделять наиболее опасные компоненты; далее образец фиксируют в держателе и подвергают тепловому воздействию  $60 \text{ кВт/м}^2$  (схема – рисунок 2.7) [79].

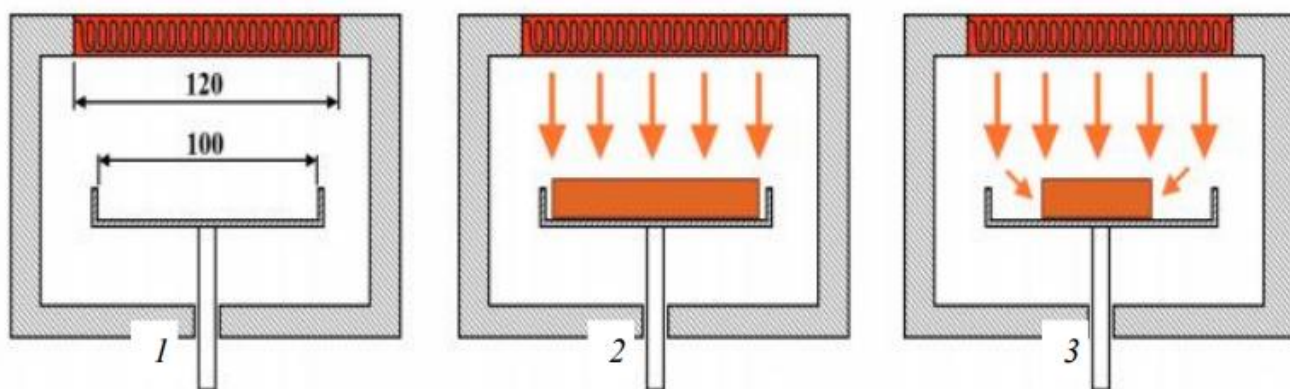


Рисунок 2.7 – Схема расположения исследуемых образцов: 1 – соотношение размеров держателя образца и нагревательного элемента; 2 – обогрев образца размером  $100 \times 100 \text{ мм}$ ; 3 – обогрев образца размером  $50 \times 50 \text{ мм}$

В ходе эксперимента регистрируют несколько групп параметров, необходимых для последующего анализа результатов [3, 79].

Во-первых, с интервалом 3-10 секунд фиксируют изменение массы образца на протяжении всего опыта. Эти данные позволяют описать кинетику разложения и выгорания материала.

Во-вторых, контролируют температурное поле в объёме экспозиционной камеры, чтобы отслеживать тепловой режим и его устойчивость в ходе испытаний.

В-третьих, измеряют концентрации газообразных компонентов продуктов горения, что даёт возможность определить состав выделяющихся токсичных веществ и динамику их накопления.

На основе экспериментальных данных, полученных в условиях условной герметичности, удельные коэффициенты образования газа рассчитывают по зависимости (2.7). Такой подход позволяет количественно оценить выход токсичных компонентов при термическом разложении материала и, следовательно,

судить о потенциальной опасности их накопления в ограниченном объеме [3,118].

$$L_n = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_n}{d\tau}, \quad (2.7)$$

где  $\Psi$  – массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с;

$V$  – внутренний объем установки, м<sup>3</sup>;

$\rho_n$  – среднеобъемная плотность n-го газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  – время, с.

Удельные коэффициенты образования регистрировали каждую секунду, что позволило проследить их динамику по стадиям разложения. Интенсивность выгорания оценивали по удельной массовой скорости, рассчитанной по кривой «масса-время» отдельно для разных этапов процесса. Используемая зависимость имеет вид:

$$\Psi = \frac{\Delta m}{\Delta \tau F_{\text{экс}}}, \quad (2.8)$$

где  $\Delta m$  – количество сгоревшего материала, кг;

$\Delta \tau$  – промежуток времени, с;

$F_{\text{экс}}$  – экспонируемая площадь образца, м<sup>2</sup>.

#### **2.4.2 Установка для экспериментального определения линейной скорости распространения пламени твердых веществ и материалов**

Линейная скорость распространения пламени является важным показателем пожарной опасности твердых веществ и материалов. Данный показатель позволяет оценить способность материала к распространению огня по его поверхности. Метод экспериментального определения линейной скорости распространения пламени разработан для стандартизированного измерения этого параметра, что обеспечивает достоверность и воспроизводимость результатов.

Целью данного метода является определение времени, за которое фронт пламени распространяется на фиксированное расстояние по поверхности образца материала, подвергнутого воздействию открытого огня в контролируемых

лабораторных условиях.

Методика предполагает кратковременное воздействие на образец открытым пламенем в течение установленного интервала, после чего фиксируют характер распространения горения и определяют время, за которое фронт пламени проходит заданный участок. По результатам измерений вычисляют линейную скорость распространения пламени.

Для проведения испытаний необходимо следующее оборудование: испытательная камера с вытяжной системой, обеспечивающая стабильные условия окружающей среды и удаление продуктов горения; держатель для образца, позволяющий фиксировать образец в горизонтальном положении; горелка с регулируемым пламенем, обеспечивающая стабильное воздействие огня на образец; секундомер с точностью измерения не менее 0,1 секунды; линейка или другой измерительный инструмент с минимальной погрешностью; образцы материала, подготовленные согласно требованиям стандарта [20]. Размеры образца: длина – 120 см, ширина – 25 см. Образцы должны быть выдержаны перед испытанием при температуре и относительной влажности в течение не менее 24 часов.

Образец материала закрепляется в держателе таким образом, чтобы его поверхность была горизонтальной. Камеру для испытаний проветривают и обеспечивают стабильные условия окружающей среды. Горелка устанавливается так, чтобы ее пламя касалось одного из концов образца на длину не менее 20 мм. Перед началом испытания проверяется стабильность работы горелки и величина пламени.

Горелку включают и в течение 30 секунд подают пламя на один из торцов образца. Затем источник огня убирают и фиксируют момент, с которого начинается самостоятельное распространение пламени по материалу. Во время испытания дополнительно поддерживается тепловое воздействие потоком мощностью 8 кВт. Далее измеряют время прохождения фронтом пламени заданного расстояния от точки первоначального воздействия. Для каждого материала испытание выполняют пять раз. Исследования проводились на установке, показанной на

рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Общий вид экспериментальной установки по определению линейной скорости распространения пламени по поверхности твердого горючего материала

Линейная скорость распространения пламени рассчитывается по формуле (2.9):

$$V = \frac{L}{t}, \quad (2.9)$$

где  $L$  – длина пройденного пламенем пути, мм;

$t$  – время, за которое пламя прошло это расстояние, сек; линейная скорость распространения пламени, мм/с.

Далее определяют среднее арифметическое значение для пяти испытаний образца.

Метод экспериментального определения линейной скорости распространения пламени позволяет количественно оценить пожарную опасность твердых материалов. Для повышения точности результатов рекомендуется строго соблюдать условия проведения испытаний, а также использовать материалы, подготовленные в соответствии с требованиями стандарта [20].

Таким образом в ходе проделанной работы была решена задача по модернизации экспериментальной установки для провести на ней исследования уровня токсичности продуктов горения строительных материалов по предложенной новой экспериментально-теоретической методике с определением удельных коэффициентов образования высокотоксичных газов, необходимых для моделирования динамики их образования и распространения;

## 2.5 Выводы по второй главе

1. В результате проведенного анализа методов определения уровня токсичности продуктов горения строительных материалов был проведен обзор существующих методов, включая нормативные и ненормативные подходы. Установлено, что большинство существующих методик основано на биологических испытаниях с использованием животных, что вызывает вопросы этического характера и ограничивает воспроизводимость результатов.

2. Для реализации предложенного в данной работе метода была модернизирована экспериментальная установка, что позволило повысить точность получения данных о составе продуктов горения и пополнить базу данных по удельным коэффициентам образования токсичных веществ. Учёт таких показателей, как линейная скорость распространения пламени и удельные коэффициенты газификации, позволяет повысить точность расчёта времени, в течение которого пути эвакуации могут быть заблокированы при пожаре.

3. Разработанная экспериментальная методика характеризуется высокой воспроизводимостью и чётко регламентированной процедурой, благодаря чему её

можно применять к широкому перечню строительных материалов, повышая обоснованность оценок и, как следствие, уровень пожарной безопасности зданий и сооружений.

4. На основе модернизации установки необходимо разработать экспериментально-расчетный метод исследования токсичности продуктов горения строительных материалов, устраняющий существенные недостатки существующих методов.

С этой целью нужно разработать и научно обосновать новый критерий токсикогенной опасности, предназначенный для оценки уровня токсичности строительных материалов при пожаре с точки зрения выполнения условия безопасной эвакуации людей.

### **ГЛАВА 3 РАНЖИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ТОКСИЧНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ НА ПУТЯХ ЭВАКУАЦИИ С ПОМОЩЬЮ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ**

#### **3.1 Разработка и обоснование критерия токсикогенной опасности для оценки токсичности строительных материалов при пожаре с позиции обеспечения безопасной эвакуации**

Для оценки токсичности веществ и материалов применяются разнообразные экспериментальные подходы, однако их результаты не могут быть применимы для прогнозирования времени, в течение которого пути эвакуации могут быть заблокированы токсичными газами. Это связано с тем, что стандартные методы ограничены в учёте всех факторов, влияющих на процесс образования и распространения токсичных продуктов горения. Основные ограничения существующих методов:

- Оценка уровня токсичности, как правило, осуществляется на животных, где степень токсичности определяется по времени, необходимому для достижения 50% летальности. Однако в условиях реальной эвакуации людей такие показатели неприемлемы и любые случаи гибели человека должны быть полностью исключены;
- Газовая среда внутри экспозиционной камеры формируется в процессе полного сгорания исследуемого образца, что позволяет создать модель, учитывающую условия, при которых все выделяемые токсичные продукты поступают в закрытое пространство. Однако на реальном пожаре поступление токсикантов в помещение определяется не только коэффициентами образования токсичных газов, но и комплексом динамических факторов, включая удельную скорость выгорания материала, которая характеризует интенсивность термического разложения, а также линейную скорость распространения пламени

по поверхности твёрдого горючего вещества, влияющую на скорость роста площади горения. Эти параметры оказывают существенное влияние на концентрации токсичных веществ и динамику их накопления в помещении, что необходимо учитывать при прогнозировании опасности для людей при пожаре;

- Удельные коэффициенты образования токсичных газов устанавливаются в ходе испытаний лишь для ограниченного числа токсичных веществ.

Для того чтобы результаты экспериментов могли быть использованы при оценке безопасной эвакуации людей при пожаре, в данной работе введен и обоснован критерий токсикогенной опасности веществ и материалов. Этот критерий учитывает не только концентрации токсичных продуктов горения, но и другие динамические параметры, обеспечивая адекватную оценку времени, необходимого для безопасной эвакуации, и минимизации риска воздействия опасных веществ на людей.

В данной работе рассматривается время, в течение которого эвакуационные пути могут быть заблокированы токсичными газами в условно герметичном помещении. В этом случае, это время не будет зависеть от количества и размеров открытых проёмов, поскольку герметичность помещения исключает их влияние.

Уравнение, описывающее закон сохранения массы токсичного газа, представлено следующим образом [44]:

$$V \frac{d\rho}{d\tau} = \eta\Psi L, \quad (3.1)$$

где  $V$  – объём помещения, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – среднеобъёмная парциальная плотность токсичного газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  – время, с;

$\eta$  – коэффициент полноты сгорания;

$\Psi$  – скорость газификации горючего материала, кг/с;

$L$  – удельный коэффициент образования токсичного газа.

Скорость газификации твёрдого горючего материала при круговом распространении пламени по его поверхности определяется значением [44]:

$$\Psi = \pi w^2 \tau^2 \Psi_0, \quad (3.2)$$

где  $w$  – линейная скорость распространения пламени по поверхности твёрдого материала, м/с;

$\Psi_0$  – удельная скорость газификации горючего материала, кг/(с·м<sup>2</sup>).

Интегрирование уравнения (3.1) с учётом зависимости (3.2) позволяет сформулировать точную зависимость времени, за которое эвакуационные пути будут заблокированы токсичными газами:

$$\tau_{\text{бл}} = \left( \frac{3\rho_{\text{кр}} V}{\pi w^2 \Psi_0 L} \right)^{1/3}, \quad (3.3)$$

где  $\tau_{\text{бл}}$  – время блокирования путей эвакуации токсичным газом, с;

$\rho_{\text{кр}}$  – критическая парциальная плотность токсичного газа, кг/м<sup>3</sup>.

В формуле (3.3) время блокирования путей эвакуации определяется не на основе парциальной плотности токсичного газа на высоте рабочей зоны, а с использованием среднеобъемной плотности газа по всему объему помещения. Такой подход обеспечивает более универсальное применение результатов, поскольку исключает зависимость от высоты помещения, позволяя проводить расчеты для различных пространств без необходимости корректировки на параметр высоты.

Введем критерий токсикогенной опасности для рассматриваемого токсичного газа в следующей форме:

$$K_{\text{то}} = \frac{\tau^*}{\tau_{\text{бл}}} = \tau^* \left( \frac{\pi w^2 \Psi_0 L}{3\rho_{\text{кр}} V} \right)^{1/3}, \quad (3.4)$$

где  $K_{\text{то}}$  – критерий токсикогенной опасности токсичного газа;

$\tau^*$  – характерное время эвакуации, с.

При  $\tau^* = \tau_{\text{бл}}$ :  $K_{\text{то}} = 1$ .

Предложенный критерий дает возможность интегрировать основные параметры процесса газификации горючего вещества или материала, выявленные в ходе испытаний, которые непосредственно влияют на время блокирования путей эвакуации токсичными газами. Этот критерий учитывает скорость газификации,

интенсивность выделения токсичных продуктов и их распределение в пространстве, что позволяет более точно предсказать момент, когда концентрация токсичных веществ достигнет уровня, критического для безопасной эвакуации.

Проведем анализ имеющейся базы данных типовой пожарной нагрузки [44]. Для более детального анализа определим зависимость времени блокирования путей эвакуации токсичным газом, используя формулу (3.3), от величины удельного коэффициента образования токсичных продуктов на примере монооксида углерода. Полученные данные представлены на рисунке 3.1.

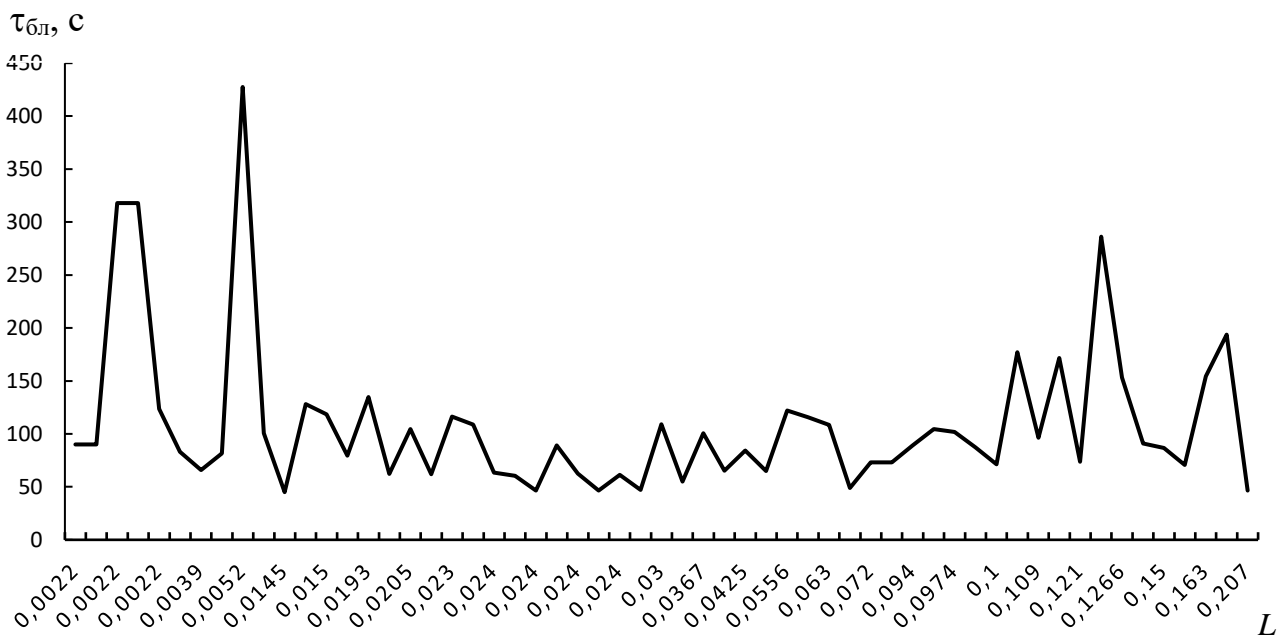


Рисунок 3.1 – Зависимость времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода от удельного коэффициента образования СО

На основе представленного графика можно заключить, что при возрастании удельного коэффициента образования СО время блокировки путей эвакуации демонстрирует неоднозначную динамику – оно может как сокращаться, так и увеличиваться.

Например, максимальное время блокирования путей эвакуации было зарегистрировано для пожарной нагрузки типа «склад хлопка в тюках», где время блокировки ( $\tau_{бл}$ ) составило 427,5 секунд при удельном коэффициенте образования токсичных газов ( $L$ ) равном 0,0052. Для нагрузки «здание III-IV степени огнестойкости; мебель и бытовые изделия» коэффициент  $L$  оказался в 2,36 раза

ниже и составил 0,0022, при этом время блокировки путей эвакуации уменьшилось до 90,1 секунд, что меньше в 4,74 раза. Это указывает на то, что несмотря на меньшее значение удельного коэффициента образования токсичных газов ( $L$ ), вторая пожарная нагрузка является более опасной для эвакуации, поскольку концентрация токсичных газов накапливается быстрее, создавая угрозу в более короткие сроки.

Тем не менее, в рамках стандартных испытаний первая нагрузка считалась бы более опасной, поскольку токсичность определялась только по удельному коэффициенту образования СО. Стандартный подход не учитывает другие факторы, влияющие на скорость накопления токсичных газов и их распределение в помещении. Поэтому, если ориентироваться лишь на коэффициент образования СО, можно неправильно оценить реальную опасность для эвакуации, упуская из виду другие критические аспекты.

Пожарная нагрузка «телефонный кабель ТПВ; ПВХ+полиэтилен» демонстрирует высокий удельный коэффициент образования СО ( $L = 0,124$ ), что связано с повышенной токсичностью выделяемых газов, а время блокирования путей эвакуации ( $\tau_{\text{бл}}$ ) составляет 286,3 секунды, указывая на значительную продолжительность опасного периода. В то же время, у нагрузки «сырье для легкой промышленности; лен разрыхленный» коэффициент образования СО ( $L = 0,0039$ ) в 31,8 раза ниже, а время блокирования ( $\tau_{\text{бл}} = 83,2$  секунды) меньше в 3,2 раза. Это означает, что, хотя по удельному коэффициенту образования СО первая нагрузка кажется более опасной, в реальных условиях эвакуации она может не представлять столь критичную угрозу. Стандартные испытания, ориентированные только на показатель  $L$ , могли бы переоценить опасность первой нагрузки, тогда как вторая, несмотря на более низкий коэффициент, может создать более серьезные препятствия для своевременной эвакуации, так как токсичные газы концентрируются быстрее и блокируют пути эвакуации раньше.

Таким образом, стандартные методы испытаний не позволяют в полной мере оценить реальную токсичность вещества или материала в контексте безопасной эвакуации людей. Эти испытания, как правило, ориентированы на удельные

коэффициенты образования токсичных газов, такие как СО, и не учитывают критические факторы, влияющие на динамику накопления токсичных продуктов в условиях реального пожара. В результате такая оценка может не отразить фактическую угрозу для людей в процессе эвакуации, что делает её недостаточной для прогнозирования безопасных временных рамок выхода из зоны поражения ОФП.

В это же время новый подход определения уровня токсичности веществ и материалов при пожаре позволяет не только оценивать результаты экспериментов, но и использовать их для детализированной градации токсичности веществ и материалов с точки зрения обеспечения безопасной эвакуации людей. Этот метод учитывает линейную скорость распространения пламени по поверхности твёрдого материала, удельную скорость газификации горючего материала и удельный коэффициент образования токсичного газа, что даёт возможность более точно прогнозировать потенциальные риски и разрабатывать эффективные мероприятия для минимизации угрозы жизни и здоровья в условиях пожара.

### **3.2 Экспериментально обоснованный сравнительный анализ нормативной методики и методики с использованием нового критерия токсикогенной опасности к определению токсичности продуктов горения строительных полимерных материалов**

Цель данного исследования заключается в сравнительном анализе нового метода, сочетающего экспериментальные и аналитические подходы для оценки токсичности продуктов горения строительных материалов и стандартного метода испытаний [20]. В качестве примера для анализа был выбран монооксид углерода, что позволяет провести детальное сравнение предложенного подхода с традиционными нормативными методами определения токсичности.

Рассмотрим оценочный анализ токсичности продуктов горения для следующих материалов: «Шерсть + нейлон», «Линолеум», «Бумажно-слоистый

пластик» и «Кабельная оболочка из ПВХ».

Для материалов «Шерсть + нейлон» и «Линолеум» уровень токсичности пожарных нагрузок будет оценен с использованием нового экспериментально-аналитического метода. В то же время токсичность материалов «Бумажно-слоистый пластик» и «ПВХ оболочка кабеля» будет определяться с помощью нормативного биологического метода. После проведения оценок сравним результаты, полученные двумя различными подходами.

Для оценки токсичности материалов «Шерсть + нейлон» и «Линолеум» по новому методу использовались исходные данные, полученные на экспериментальной установке (рассмотрена в параграфе 2.4.1). Однако такой параметр как скорость распространения пламени по поверхности материала, который входит в критерий токсикогенной опасности, не может быть определен на данной установке. Данный коэффициент для каждого рассматриваемого материала был взят из литературных источников [44].

Каждая пожарная нагрузка подвергалась трём испытаниям. Образцы материалов в начальном состоянии и после эксперимента показаны на рисунках 3.2 и 3.3.

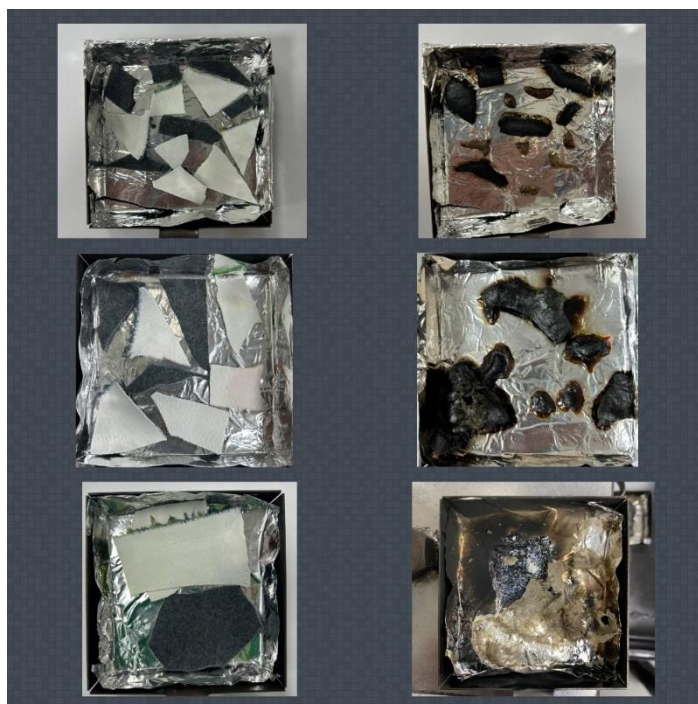


Рисунок 3.2 – Образцы пожарной нагрузки «Шерсть+нейлон» до (слева) и после (справа) испытаний

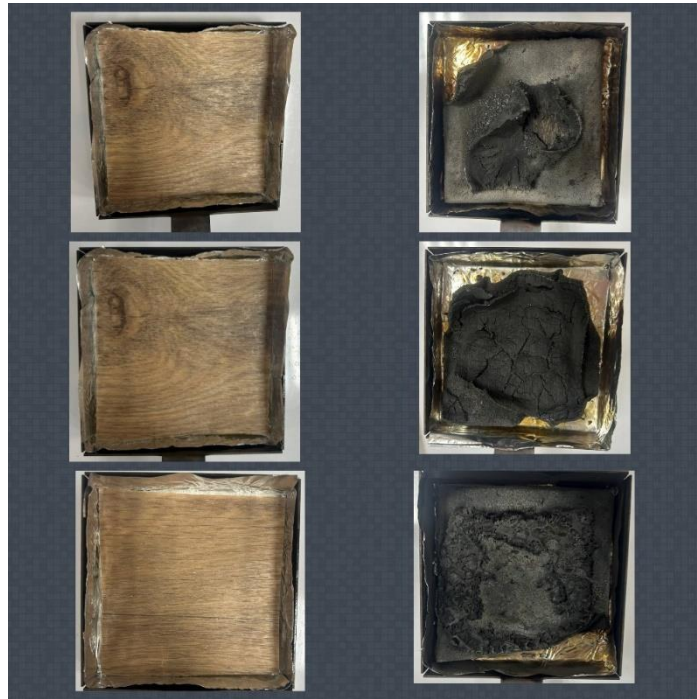


Рисунок 3.3 – Образцы пожарной нагрузки «Линолеум» до (слева) и после (справа) испытаний

В процессе проведения экспериментов были зарегистрированы зависимости от времени, показывающие изменения удельной массовой скорости выгорания, среднеобъемной парциальной плотности и удельного коэффициента образования монооксида углерода с момента начала испытания.

На рисунке 3.4 представлена зависимость среднеобъемной парциальной плотности монооксида углерода от времени для материала «Шерсть + нейлон», а для материала «Линолеум» аналогичная зависимость показана на рисунке 3.5.

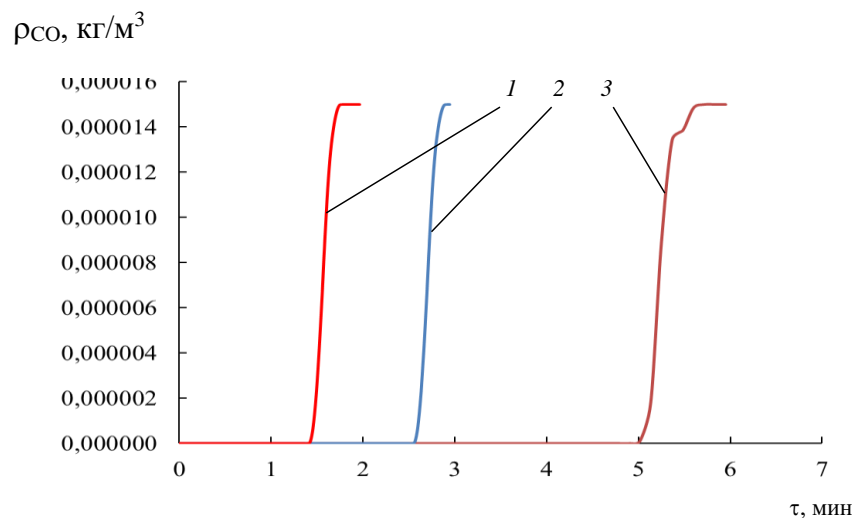


Рисунок 3.4 – Зависимость от времени парциальной плотности монооксида углерода при горении пожарной нагрузки «Шерсть+нейлон». Цифры – номера экспериментов

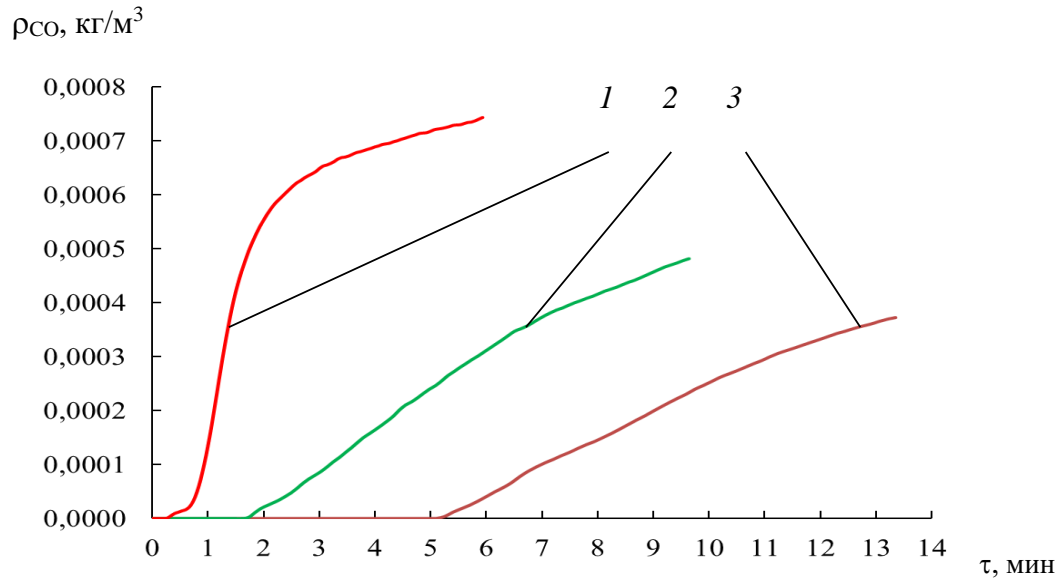


Рисунок 3.5 – Зависимость от времени парциальной плотности монооксида углерода при горении пожарной нагрузки «Линолеум». Цифры – номера экспериментов

Токсичность материалов «Бумажно-слоистый пластик» и «ПВХ оболочка кабеля» также была оценена с помощью биологического метода. Полученные результаты отображены на рисунках 3.6 и 3.7.

Дата: 24.01.2023			ФАКТ. НОРМ. ОЦЕНКА		
Темп-ра, °C		21 ± 3	соотв.	Атм. давл., кПа	89 - 105 соотв.
Влажность, %		45 - 75	соотв.	Напряжение, В	210 - 235 соотв.
				Частота, Гц	49,9 - 50,1 соотв.

Результаты испытаний:				
t, мин	CO	CO2	O2	T
0	0	0	20,92	18
1	0	0,13	20,25	18
2	0	0,23	20,77	19
3	0	0,52	20,70	19
4	0,01	0,80	20,50	19
5	0,03	0,77	20,26	19
6	0,06	1,16	19,87	19
7	0,10	1,61	19,33	19
8	0,14	1,97	18,90	20
9	0,17	2,28	18,71	20
10	0,21	2,82	17,89	20
11	0,24	3,16	17,47	20
12	0,28	3,68	16,90	20
13	0,31	4,16	16,42	21
14	0,34	4,59	15,93	21
15	0,36	4,90	15,61	21
16	0,37	5,18	15,32	21
17	0,37	5,18	15,32	21
18	0,37	5,22	15,28	21
19	0,37	5,25	15,24	21
20	0,37	5,22	15,20	21
21	0,37	5,24	15,17	21
22	0,37	5,31	15,15	21
23	0,37	5,32	15,13	21
24	0,37	5,34	15,10	21
25	0,37	5,36	15,07	21
26	0,37	5,38	15,05	21
27	0,37	5,38	15,02	21
28	0,37	5,38	15,02	21
29	0,38	5,37	15,01	21
30	0,38	5,38	14,98	21

Режим терморазложения	горение ТЛЕН ИС
Напряжение на нагревателе, В	
Тепловой поток, кВт/м.кв.	65 кВт/м²
Время прогрева нагревателя, с	130
Время разложения образца, мин	15
Продолжительность экспозиции, мин	30
Объем замкнутого исп. пр-ва, м.куб.	нетка "10" 119
Максимальные значения:	
CO	
CO2	
Выход CO	
Масса начальная мН:	20,008
Масса конечная мК:	9,003
Клетка с лабораторными животными:	

Рисунок 3.6 – Результаты испытания пожарной нагрузки «ПВХ оболочка кабеля» нормативным биологическим методом

Дата: 20.12.2023			ФАКТ.    НОРМ.    ОЦЕНКА		
Темп-ра, °С					
Влажность, %					

Атм. давл., кПа			
Напряжение, В			
Частота, Гц			

Результаты испытаний:				
t, мин	CO	CO2	O2	T
0	0	0	20,96	23
1	0	0,11	20,94	24
2	0	0,16	20,92	24
3	0	0,21	20,90	24
4	0,02	0,23	20,91	24
5	0,03	0,26	20,93	25
6	0,05	0,29	20,90	25
7	0,07	0,33	20,87	25
8	0,10	0,38	20,80	25
9	0,13	0,42	20,72	25
10	0,16	0,47	20,65	25
11	0,20	0,52	20,56	25
12	0,24	0,58	20,46	25
13	0,27	0,63	20,33	26
14	0,31	0,69	20,29	26
15	0,36	0,78	20,14	26
16	0,37	0,79	20,11	26
17	0,39	0,82	20,06	26
18	0,40	0,85	20,01	26
19	0,40	0,84	20,00	27
20	0,39	0,83	19,98	27
21	0,39	0,84	19,93	27
22	0,39	0,84	19,95	27
23	0,39	0,84	19,94	27
24	0,39	0,84	19,93	27
25	0,38	0,83	19,91	27
26	0,38	0,83	19,91	27
27	0,38	0,83	19,89	27
28	0,38	0,83	19,88	27
29	0,38	0,83	19,86	27
30	0,38	0,82	19,85	27

Режим терморазложения	Горение
Напряжение на нагревателе, В	11,7
Тепловой поток, кВт/м.кв.	52,5
Время разложения образца, мин	12,5 (беззольно)
Продолжительность экспозиции, мин	30
Объем замкнутого исп. пр-ва, м.куб.	0,113
Максимальные значения:	
CO	0,40
CO2	0,85
Выход CO (прт)	
Масса начальная мН:	0,337
Масса конечная мК:	0,522
Клетка с лабораторными животными:	7455 /ка1

Рисунок 3.7 – Результаты испытания пожарной нагрузки «Бумажно-слоистый пластик» нормативным биологическим методом.

В рамках исследования по биологическому методу измерялась концентрация монооксида углерода. На основе этих данных были рассчитаны удельные массовые коэффициенты выделения токсичного газа при горении пожарной нагрузки.

В ходе исследования по биологическому методу были измерены значения концентрации монооксида углерода, что позволило рассчитать удельные массовые коэффициенты образования токсичных газов при горении. Для материала «Бумажно-слоистый пластик» коэффициент составил  $L = 0,24$ , а для материала «ПВХ оболочка кабеля» -  $L = 0,027$ .

Удельная массовая скорость выгорания при горении разных видов пожарной нагрузки составила: для «Бумажно-слоистого пластика» –  $\Psi_0 = 0,0015$  кг/(м<sup>2</sup>·с), а для «ПВХ оболочки кабеля» –  $\Psi_0 = 0,00763$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Для проведения анализа уровня токсичности продуктов термического разложения горючих веществ выбирается закрытое помещение с объемом  $V=108$  м<sup>3</sup>, где размещены исследуемые материалы.

Расчетное время эвакуации из помещения данного объема составляет  $\tau^*=60$ с в соответствии с Приказом МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности».

В качестве ключевого токсичного компонента продуктов горения рассматривается монооксид углерода (СО), критическая парциальная плотность которого составляет  $\rho_{кр}=0,00116$  кг/м<sup>3</sup>. Данный параметр установлен в нормативных правовых актах, в частности в «Своде правил СП 11.13130.2009 «Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения»» (утвержден приказом МЧС России от 25 марта 2009 г. № 181).

Анализ экспериментальных данных показал, что времена блокирования путей эвакуации из-за накопления монооксида углерода и значения коэффициента токсикогенной опасности в соответствии с новым экспериментально-теоретическим методом имеют следующие значения:

- для нагрузки «Шерсть + нейлон» время блокирования составляет:  $\tau_{бл}=39,7$ с, а коэффициент токсикогенной опасности  $K_{то}=1,511$ ;
- для нагрузки «Линолеум» эти показатели равны  $\tau_{бл}=129,6$  с,  $K_{то}=0,463$  соответственно.

Полученные результаты демонстрируют существенное различие в степени токсикогенной опасности различных материалов при горении, что подчеркивает важность рационального выбора отделочных строительных материалов для обеспечения пожарной безопасности.

Таким образом, материал «Шерсть + нейлон» обладает более высоким значением критерия токсикогенной опасности, что указывает на его большую опасность с точки зрения воздействия монооксида углерода на человека в процессе эвакуации по сравнению с пожарной нагрузкой, представленной материалом «Линолеум».

Материалы «Бумажно-слоистый пластик» и «ПВХ оболочка кабеля» в

результате испытаний биологическим методом были отнесены к группам токсичности Т3 и Т1 соответственно. Таким образом, пожарная нагрузка «Бумажно-слоистый пластик» является более опасной по критерию токсичности, чем «ПВХ оболочка кабеля». Этот вывод также подтверждается значением удельного коэффициента образования монооксида углерода, который для «Бумажно-слоистого пластика» превышает аналогичный показатель для «ПВХ оболочки кабеля» в 8,89 раза.

В соответствии с новым экспериментально-аналитическим методом определения токсичности, времена блокирования путей эвакуации и значения критерия токсикогенной опасности для данных пожарных нагрузок, рассчитанные по формулам (3.3) и (3.4), составили:

- для материала «Бумажно-слоистый пластик» время блокирования путей эвакуации составило  $\tau_{\text{бл}}=274,9$  с, а критерий токсикогенной опасности  $K_{\text{то}}=0,218$ ;
- для материала «ПВХ оболочка кабеля»  $\tau_{\text{бл}}=227,3$  с;  $K_{\text{то}}=0,264$ .

Таким образом, материал «Бумажно-слоистый пластик» демонстрирует противоречивые результаты оценки токсикологической опасности: он является токсикологически более опасным, чем «ПВХ оболочка кабеля», в соответствии с нормативным биологическим методом, однако токсикологически менее опасным, чем «ПВХ оболочка кабеля», согласно новому экспериментально-теоретическому методу.

Полученные результаты оценки уровня токсичности продуктов горения исследуемых веществ и материалов систематизированы в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты оценки уровня токсичности продуктов горения

Исследуемый материал	Группа токсичности	Удельная скорость газификации горючего материала, $\Psi_0$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	Удельный коэффициент образования СО, $L$	Время блокирования путей эвакуации по СО, $\tau_{\text{бл}}$ , с	Критерий токсикогенной опасности, $K_{\text{то}}$
Бумажно-слоистый пластик	Т3	0,0015	0,24	274,9	0,218

Продолжение таблицы 3.1

Исследуемый материал	Группа токсичности	Удельная скорость газификации горючего материала, $\Psi_o$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	Удельный коэффициент образования СО, L	Время блокирования путей эвакуации по СО, $\tau_{6л}$ , с	Критерий токсикогенной опасности, $K_{то}$
ПВХ оболочка кабеля	T1	0,00763	0,027	227,3	0,264
Шерсть + нейлон	–	0,013	0,021	39,7	1,511
Линолеум	–	0,0073	0,034	129,6	0,463

Из рассмотренных пожарных нагрузок материал «Шерсть + нейлон» является наиболее опасным с точки зрения блокирования путей эвакуации из-за накопления монооксида углерода. Это объясняется его минимальным временем блокирования путей эвакуации и, соответственно, максимальным значением критерия токсикогенной опасности. При этом удельный коэффициент образования монооксида углерода для данного материала оказывается самым низким среди исследуемых.

В соответствии с предложенным новым методом, пожарная нагрузка «Шерсть + нейлон» должна быть отнесена к категории наиболее опасных с точки зрения блокирования путей эвакуации по монооксиду углерода, тогда как материал «Бумажно-слоистый пластик» – к категории наиболее безопасных. При этом удельный коэффициент образования монооксида углерода для нагрузки «Шерсть + нейлон» оказывается в 11,4 раза ниже, чем для нагрузки «Бумажно-слоистый пластик».

Сравнительный анализ предложенного нового экспериментально-аналитического подхода и нормативных методов определения токсичности показал, что классификация продуктов горения на группы токсичности, приведенная в таблице 2 [20], не отражает реальный уровень токсикологической опасности строительных материалов с точки зрения обеспечения безопасности эвакуации людей при пожаре.

Предложенный новый экспериментально-аналитический подход учитывает время эвакуации людей при пожаре и включает более широкий спектр

пожароопасных характеристик горючих строительных материалов, таких как линейная скорость распространения пламени по поверхности твердого материала, удельная скорость газификации, критическая парциальная плотность токсичного газа и удельный коэффициент его образования. Это обеспечивает возможность проведения научно обоснованной классификации веществ и материалов по уровню токсичности продуктов их горения, что значительно превосходит по точности и информативности традиционные нормативные методы.

### **3.3 Экспериментальное определение времени блокирования путей эвакуации в зальном помещении при горении исследуемых строительных материалов с использованием нового критерия токсикогенной опасности**

Оценка токсичности продуктов горения строительных материалов критически важна для пожарной безопасности, так как синтетические и полимерные материалы при пожаре выделяют вещества, затрудняющие эвакуацию людей. Поэтому осуществляется их обязательный контроль.

Использование строительных материалов в зальных помещениях и на путях эвакуации строго регулируется федеральным законодательством Российской Федерации. В частности, таблицы 27, 28 и 29 Федерального закона от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» устанавливают требования к их применению.

Для проведения оценочного анализа уровня токсичности продуктов горения строительных материалов, используемых на путях эвакуации, нами были проведены экспериментальные исследования с применением специализированной установки, обеспечивающей высокоточную измеримость токсичности продуктов горения и других ключевых характеристик. Устройство, описанное в патенте Российской Федерации на полезную модель № 174688 (Пузач С.В., Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г., «Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении», заявка

№2017113747, приоритет 20.04.2017, регистрация 26.10.2017), позволило провести комплексное исследование строительных материалов при реальных условиях термического воздействия.

Для достижения поставленной цели по определению времени блокирования путей эвакуации, были выполнены следующие научно-исследовательские задачи:

- Получение экспериментальных данных о парциальных плотностях токсичных газов, таких как акролеин, монооксид углерода, фосген, хлороводород, оксид азота, циановодород и кислород, а также о массовой скорости выгорания исследуемых материалов при их термическом разложении в маломасштабной экспериментальной установке;
- Определение линейной скорости распространения пламени по поверхности исследуемых строительных материалов;
- Расчет значений нового критерия токсикогенной опасности, интегрирующего параметры токсичности и пожароопасности материалов;

Исследуемыми материалами были «Ковер из синтетических нитей» и «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове», которые были выбраны для анализа их токсичности продуктов горения в контексте применения на путях эвакуации.

Для проведения исследований материалы были подготовлены в виде стандартных образцов размером 100×100 мм. Масса каждого образца определялась с использованием высокоточных электронных весов с погрешностью  $\pm 0,1$  г, что обеспечивало необходимую точность в измерениях и надежность получаемых экспериментальных данных.

Для исключения воздействия влажности на точность эксперимента, перед испытаниями образцы материалов «Ковер из синтетических нитей» и «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» были предварительно осушены. Процесс осушения проводился в условиях с контролируемой температурой и влажностью в течение 24 часов. Этот шаг обеспечил стабилизацию физических и химических свойств материалов, исключив возможные искажения данных, вызванные влагообменом. Таким образом, все материалы были приведены

к одинаковым исходным условиям перед проведением испытаний.

В ходе эксперимента образцы помещались в центральную часть камеры сгорания, где воздействие высокотемпературного потока, создаваемого электронагревательным излучателем мощностью 35 кВт, инициировало процесс горения. Продукты сгорания направлялись в экспозиционную камеру, оснащенную передовыми многоканальными газоанализаторами моделей «Эколаб», «Dräger X-AM 8000» и «ГАНГ-4РБ», что позволило осуществлять точный и непрерывный контроль концентраций различных токсичных газов, образующихся в процессе термического разложения материалов.

В ходе экспериментов осуществлялся контроль и регистрация основных параметров, таких как удельная массовая скорость выгорания ( $\Psi_0$ ) и концентрации различных токсичных газов, включая акролеин ( $C_3H_4O$ ), монооксид углерода (CO), фосген ( $COCl_2$ ), хлороводород (HCl), оксид азота (NO), диоксид азота ( $NO_2$ ), кислород ( $O_2$ ) и циановодород (HCN). Все данные о концентрациях газов фиксировались в реальном времени, что обеспечивало точный мониторинг химического состава продуктов горения и позволяло оперативно оценивать их потенциальную угрозу. Это позволило построить графики зависимости парциальной плотности каждого из газов от времени, отражая полное представление о динамике их образования и накопления в ходе горения.

Для повышения точности и надежности полученных данных, каждое испытание для каждого исследуемого материала проводилось пять раз на каждом газоанализаторе. Это позволило минимизировать погрешности и получить репрезентативные результаты, обеспечивающие высокую достоверность анализа.

Для вычисления удельной массовой скорости выгорания ( $\Psi_0$ ) использовались данные о начальной и остаточной массе образцов. Этот параметр позволяет оценить скорость горения материала, поскольку более интенсивное сгорание приводит к большему выделению токсичных газов за короткий промежуток времени. Исходный вес образца фиксировался перед началом эксперимента, а остаточный вес – в ходе горения, что позволяло точно определить скорость термического разложения материала.

После завершения эксперимента все полученные данные обрабатывались для вычисления средних значений ключевых параметров. Эти усредненные показатели служили базой для дальнейших расчетов, таких как удельная массовая скорость выгорания и коэффициенты выделения токсичных газов. На их основе проводилась комплексная оценка токсичности материалов, что позволило более точно определить их опасность при горении.

Кроме того, для указанных материалов была проведена оценка линейной скорости распространения пламени по поверхности твердого горючего материала в соответствии с требованиями «ГОСТ 12.1.044-2018. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» (введен в действие с 01.05.2019), разработанным Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии.

Образцы материалов «Ковер из синтетических нитей» и «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» размером 250×1200 мм устанавливаются на платформу, где скорость распространения пламени фиксируется с помощью оптических датчиков или видеокамеры, отслеживающей начало и конец его движения по поверхности.

Линейная скорость распространения пламени ( $w$ , м/с) рассчитывается по следующей формуле:

$$w = \frac{l}{\tau}, \quad (3.5)$$

где  $l$  – длина участка поверхности, по которому распространяется пламя, м;

$\tau$  – время, за которое пламя достигло конца этого участка, с.

Исследования показали, что в процессе горения строительных материалов выделяется комплекс токсичных веществ. Среди основных компонентов выделяемой газовой смеси выявлены оксид углерода, цианистый водород, хлороводород, фосген, акролеин, а также оксид азота, обладающие высокой степенью токсичности и представляющие значительную угрозу жизни и здоровью человека.

Результаты проведенных экспериментальных исследований для материалов «Ковер из синтетических нитей» и «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» систематизированы и приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения исследуемых параметров для исследуемых строительных материалов

Определяемые параметры	Исследуемый материал	
	Ковер из синтетических нитей	Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове
Удельная массовая скорость выгорания: $\Psi_0$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с);	0,015	0,0064
Линейная скорость распространения пламени: $w$ , м/мин.	0,0035	0,02
Удельный коэффициент образования акролеина: $L_1$ , кг/кг;	$25 \cdot 10^{-4}$	$41 \cdot 10^{-4}$
Удельный коэффициент образования монооксида углерода: $L_2$ , кг/кг;	$13 \cdot 10^{-3}$	$27,4 \cdot 10^{-3}$
Удельный коэффициент образования фосгена: $L_3$ , кг/кг;	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Удельный коэффициент образования хлороводорода: $L_4$ , кг/кг;	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$1,92 \cdot 10^{-2}$
Удельный коэффициент образования оксида азота: $L_5$ , кг/кг;	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Удельный коэффициент потребления кислорода: $L_6$ , кг/кг;	-1,25	-1,205
Удельный коэффициент образования циановодорода: $L_7$ , кг/кг;	$2 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$
Удельный коэффициент образования диоксида углерода: $L_8$ , кг/кг;	1,82	1,69

По каждой из рассматриваемых пожарных нагрузок выполнено по пять независимых измерений с использованием соответствующих газоанализаторов. Внешний вид исследуемых образцов до начала и после завершения испытаний представлен на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Образцы пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей» (а) и «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» (б) до и после испытаний

Динамика изменения парциальной плотности исследуемых токсичных компонентов газовой среды и коэффициента образования токсичного газа в зависимости от времени горения пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей» наглядно отражена на графиках, приведенных ниже (рисунки 3.9-3.22).

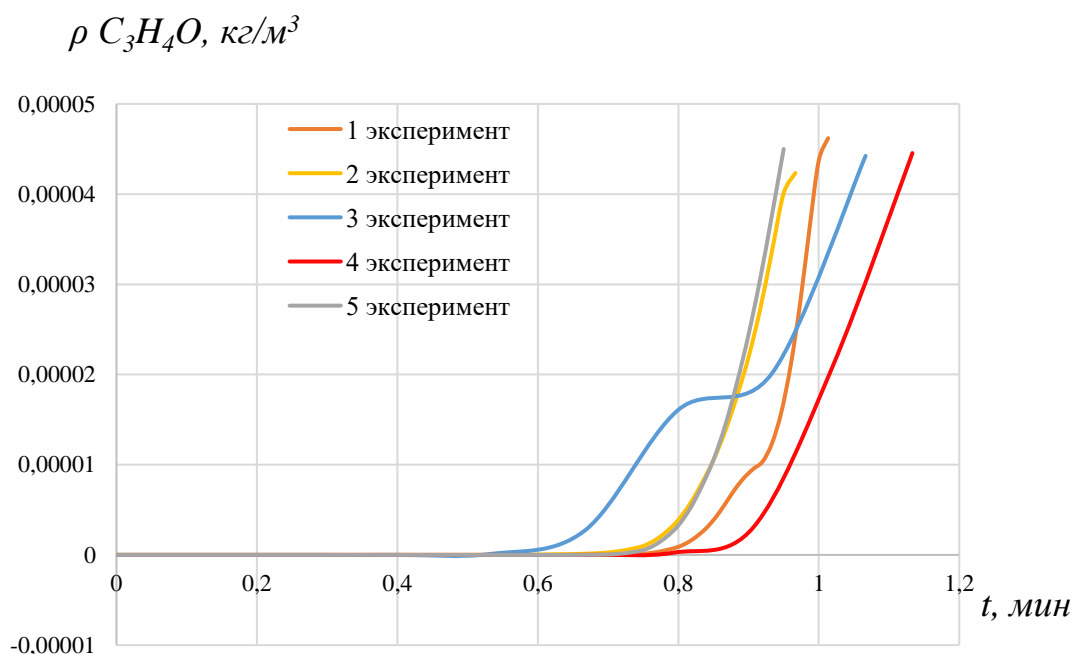


Рисунок 3.9 – Зависимость от времени парциальной плотности акролеина при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

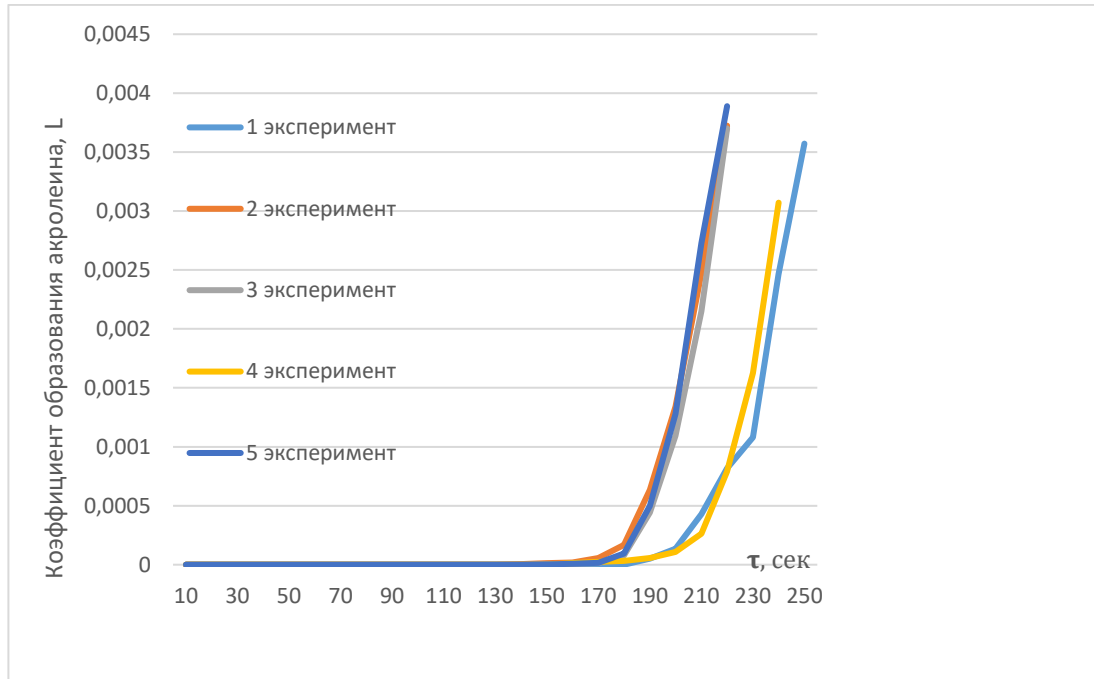


Рисунок 3.10 – Зависимость от времени коэффициента образования акролеина при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

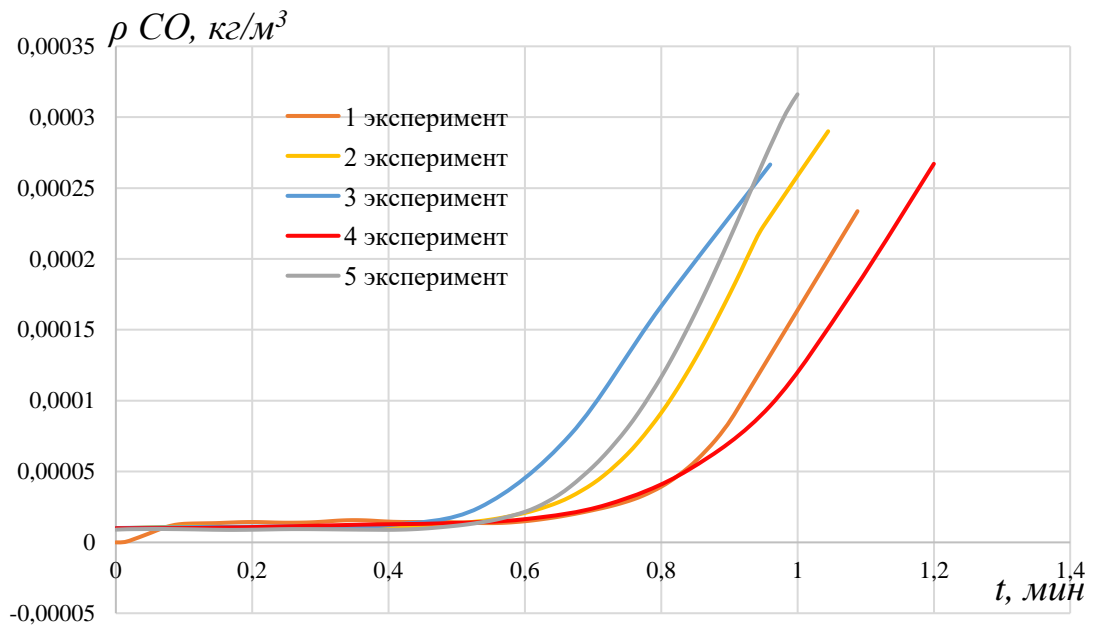


Рисунок 3.11 – Зависимость от времени парциальной плотности монооксида углерода при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

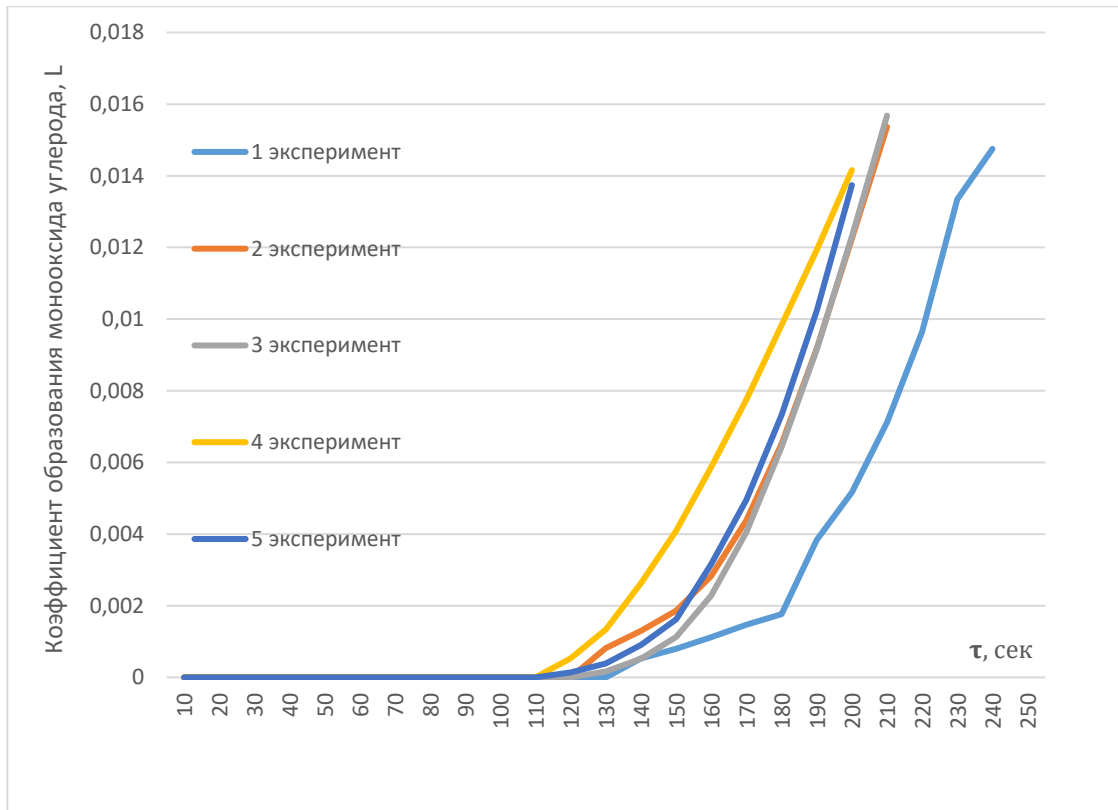


Рисунок 3.12 – Зависимость от времени коэффициента образования монооксида углерода при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

$\rho_{HCL}$ , кг/м<sup>3</sup>

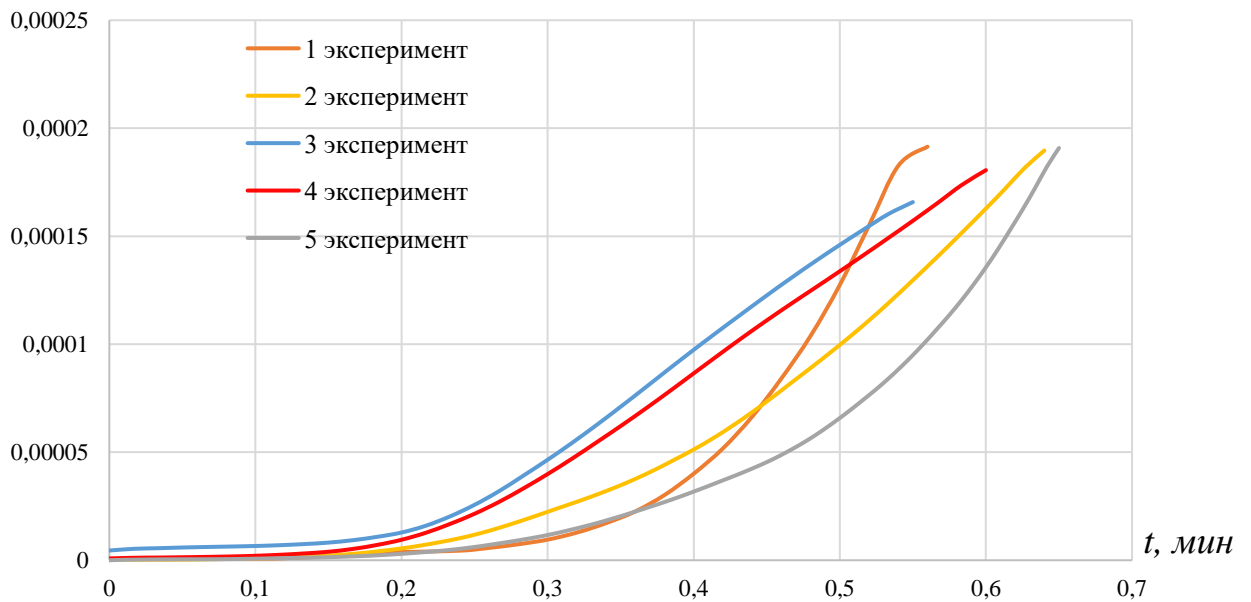


Рисунок 3.13 – Зависимость от времени парциальной плотности хлороводорода при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

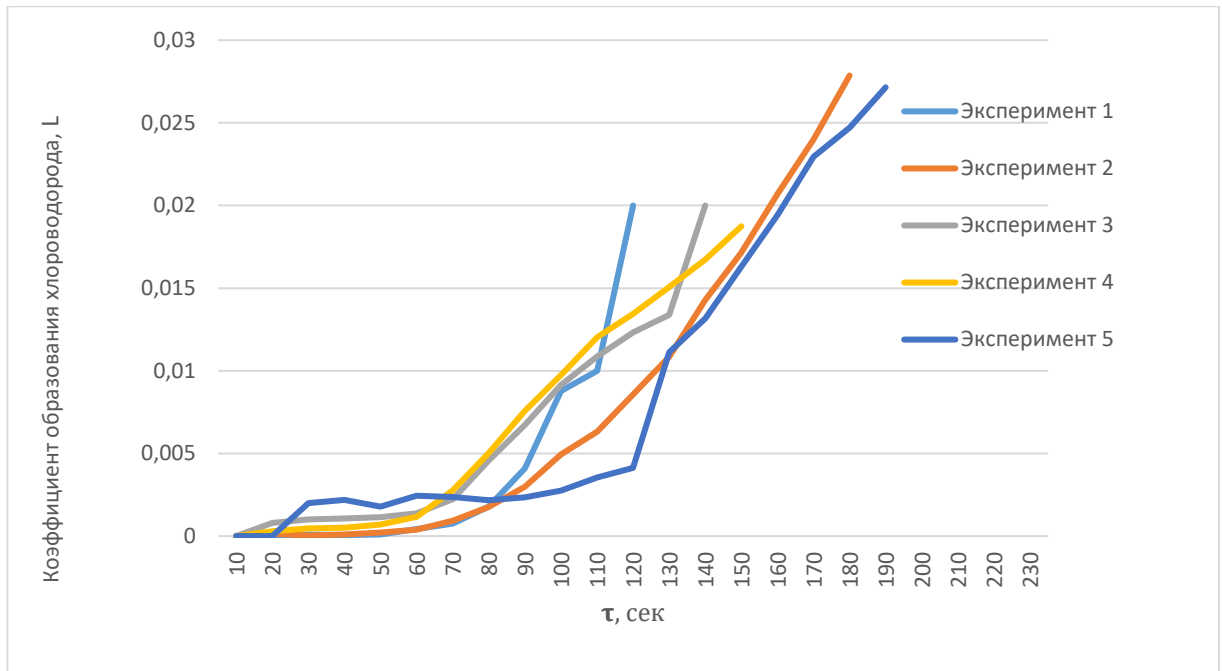


Рисунок 3.14 – Зависимость от времени коэффициента образования хлороводорода при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

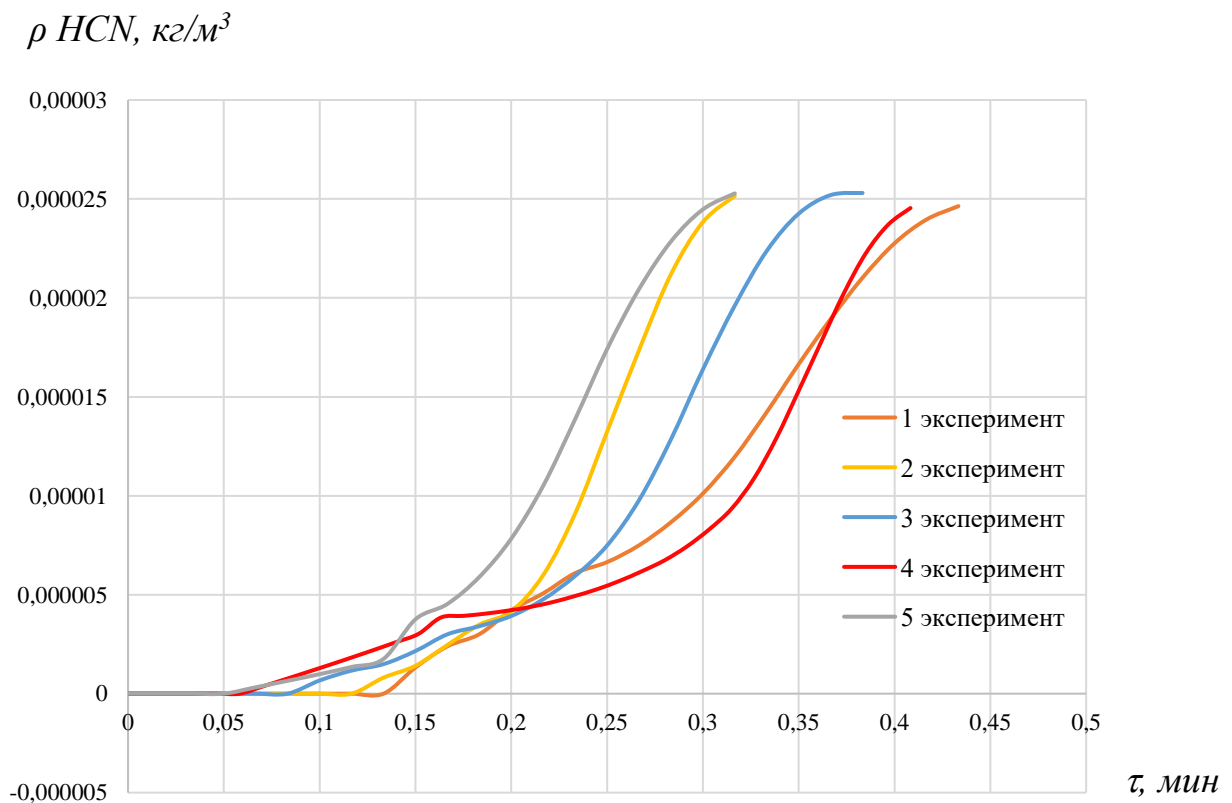


Рисунок 3.15 – Зависимость от времени парциальной плотности циановодорода при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

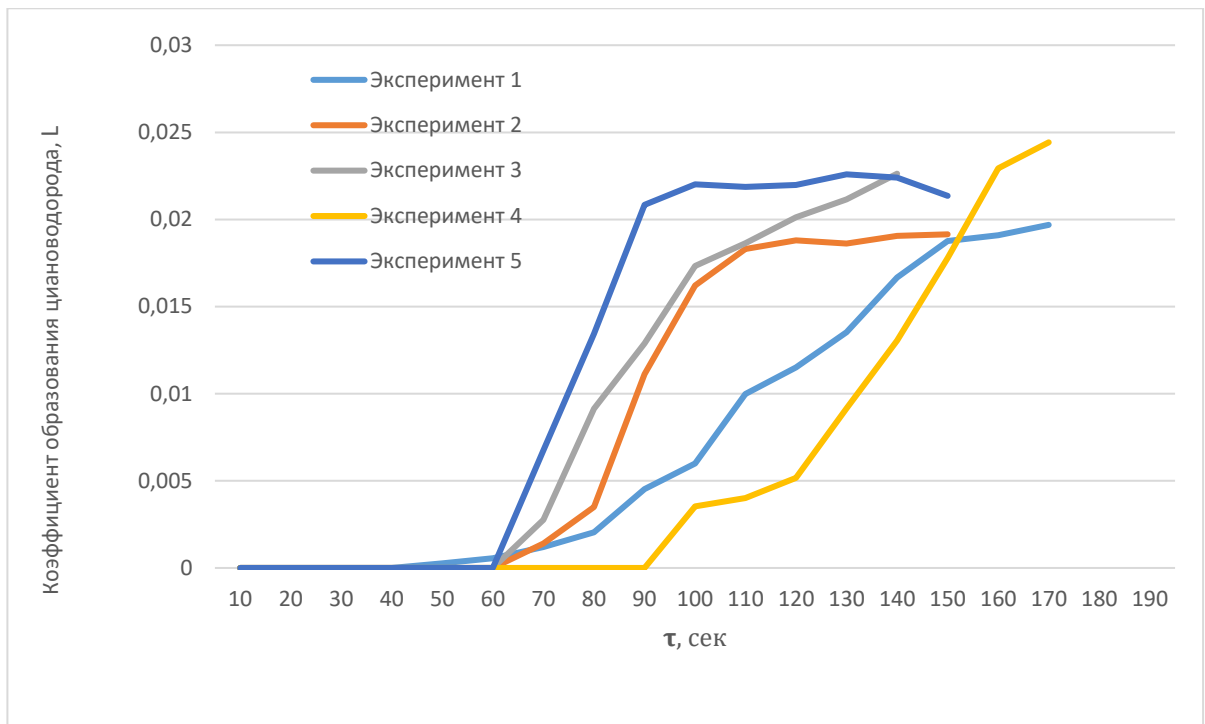


Рисунок 3.16 – Зависимость от времени коэффициента образования циановодорода при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

$\rho_{NO}$ , кг/м<sup>3</sup>

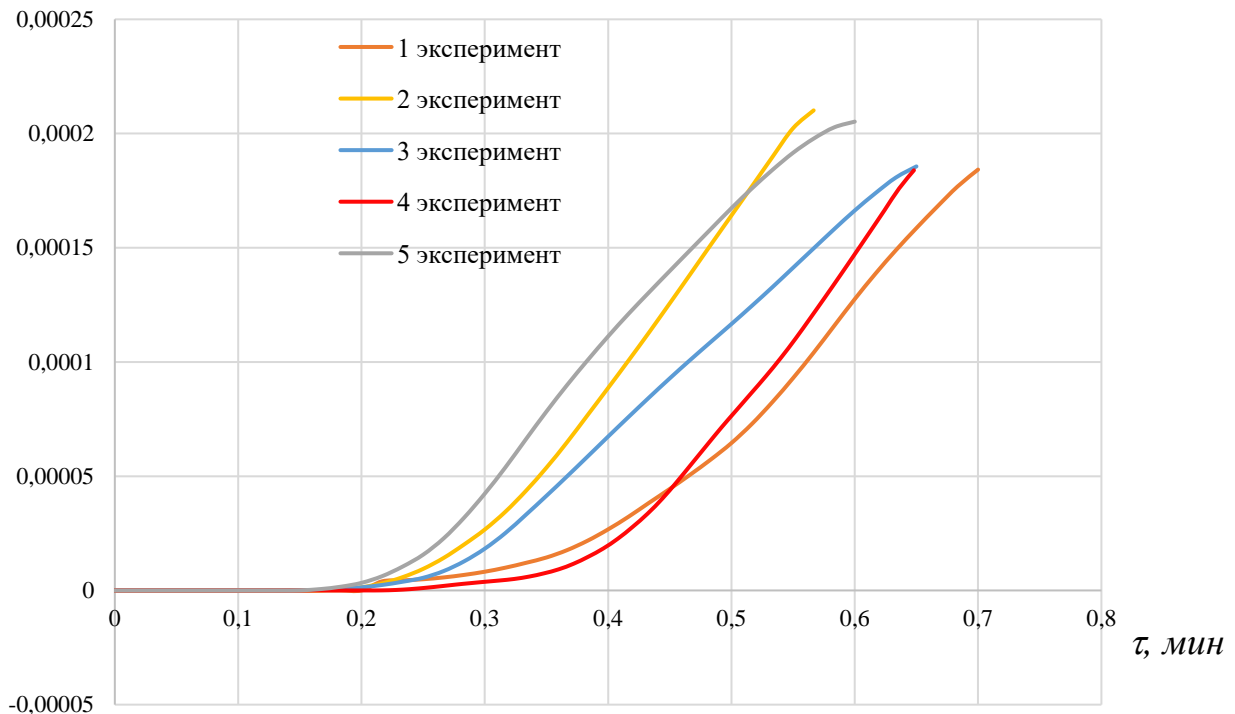


Рисунок 3.17 – Зависимость от времени парциальной плотности оксида азота при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

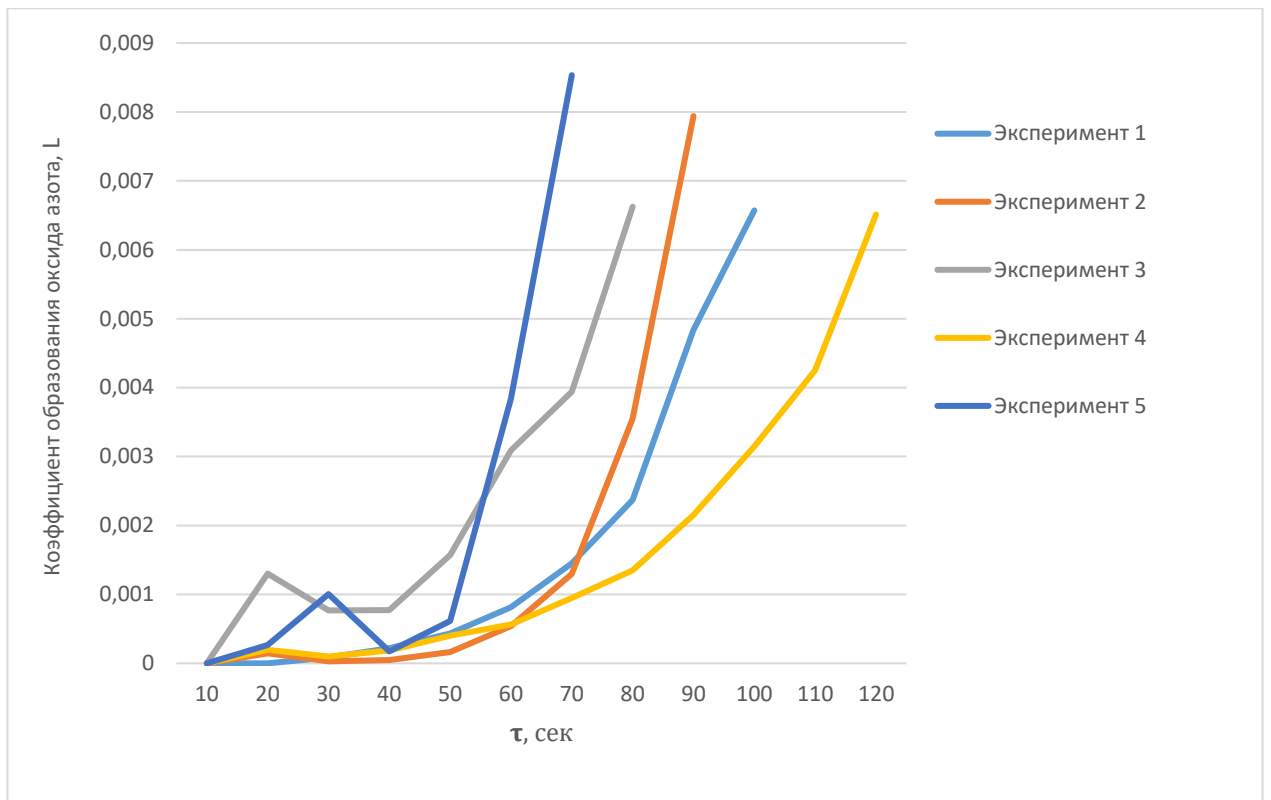


Рисунок 3.18 – Зависимость от времени коэффициента образования оксида азота при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

$\rho_{COCL_2}, \text{кг/м}^3$

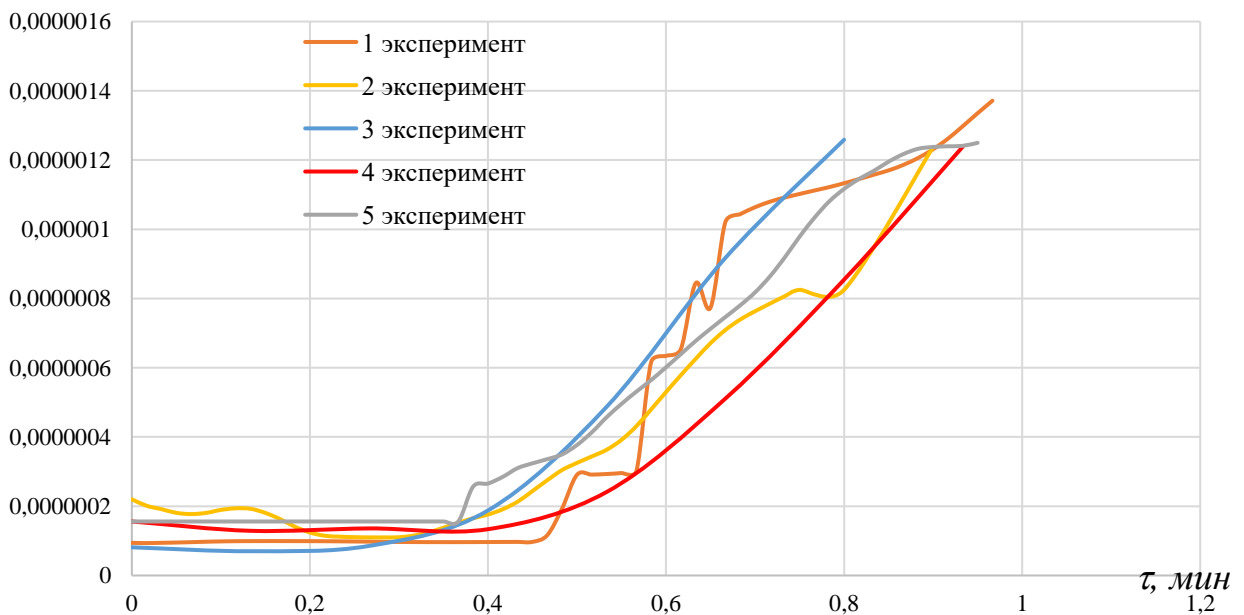


Рисунок 3.19 – Зависимость от времени парциальной плотности фосгена при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

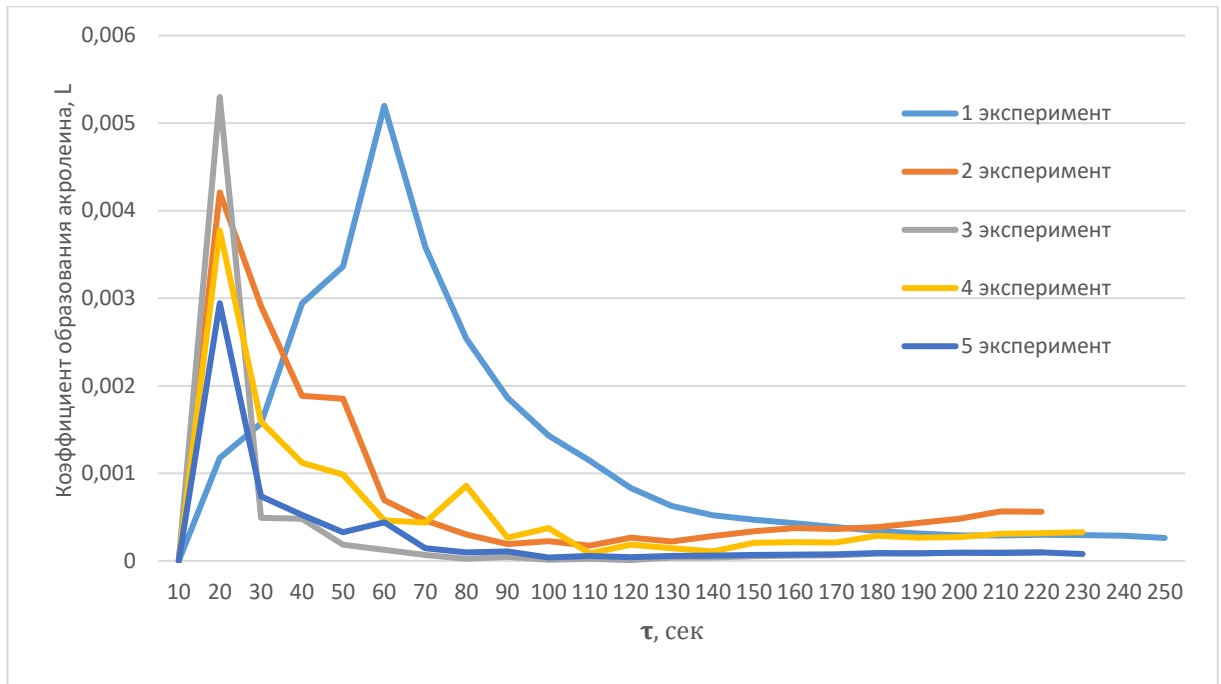


Рисунок 3.20 – Зависимость от времени коэффициента образования фосгена при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

$\rho_{O_2}$ , кг/м<sup>3</sup>

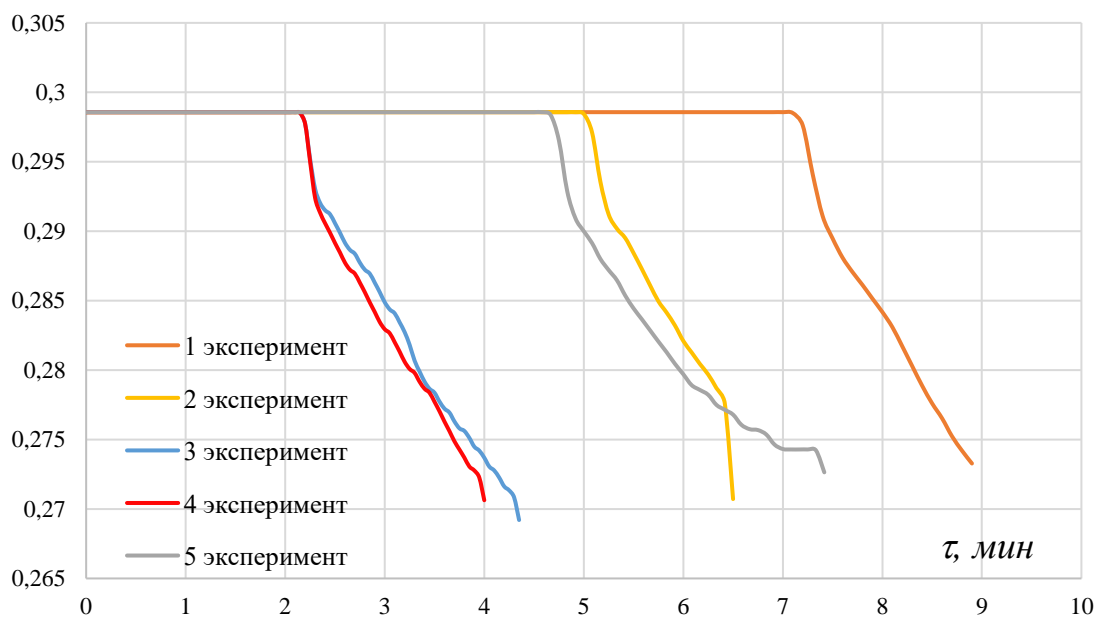


Рисунок 3.21 – Зависимость от времени парциальной плотности кислорода при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

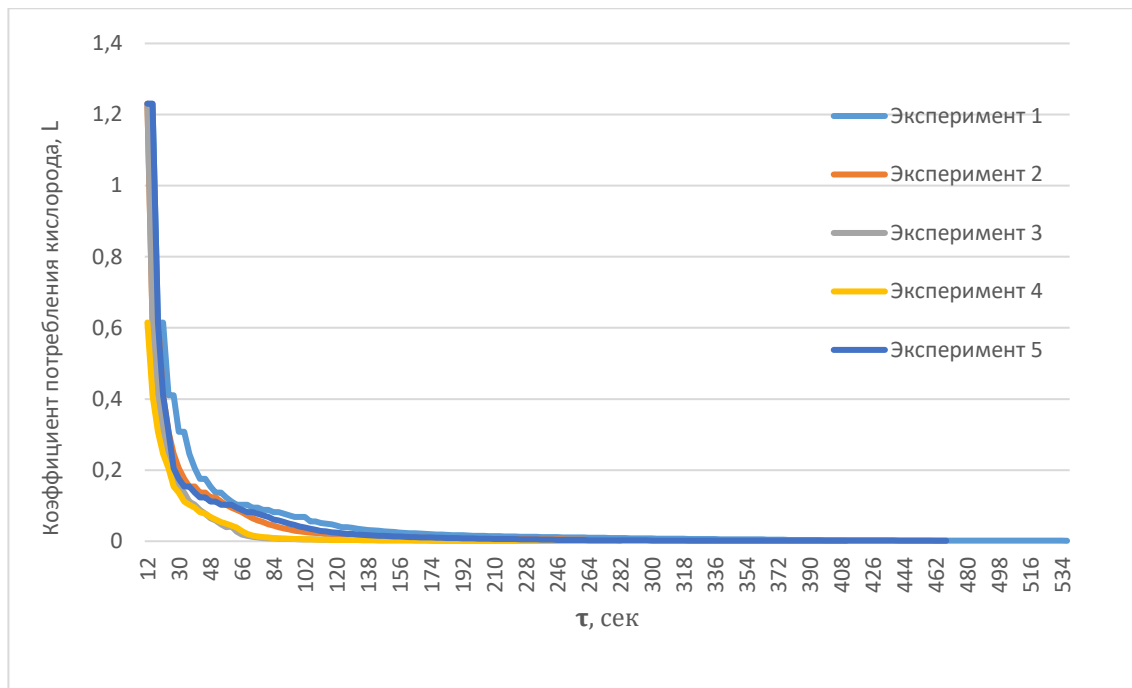


Рисунок 3.22 – Зависимость от времени коэффициента потребления кислорода при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

Графическое представление временной динамики изменения парциальной плотности анализируемых токсичных газов при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» представлено на рисунках 3.23–3.36.

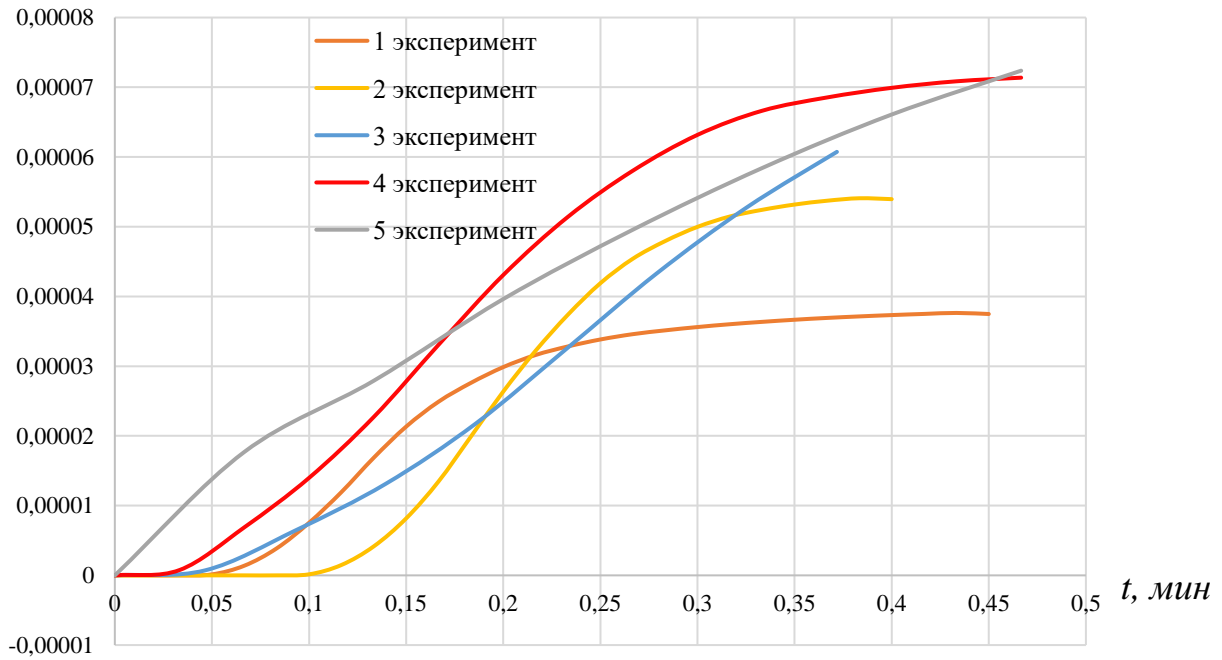
$\rho_{NO}, \text{кг/м}^3$ 


Рисунок 3.23 – Зависимость от времени парциальной плотности оксида азота при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

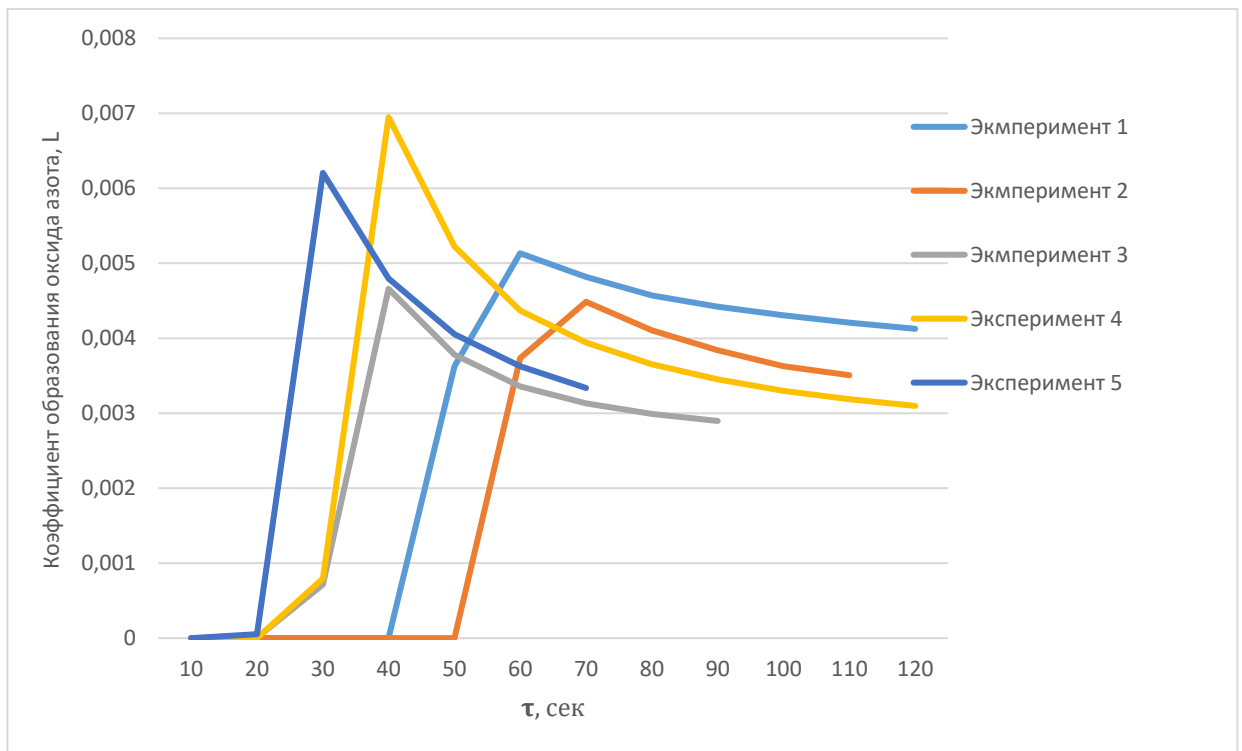


Рисунок 3.24 – Зависимость от времени коэффициента образования оксида азота при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

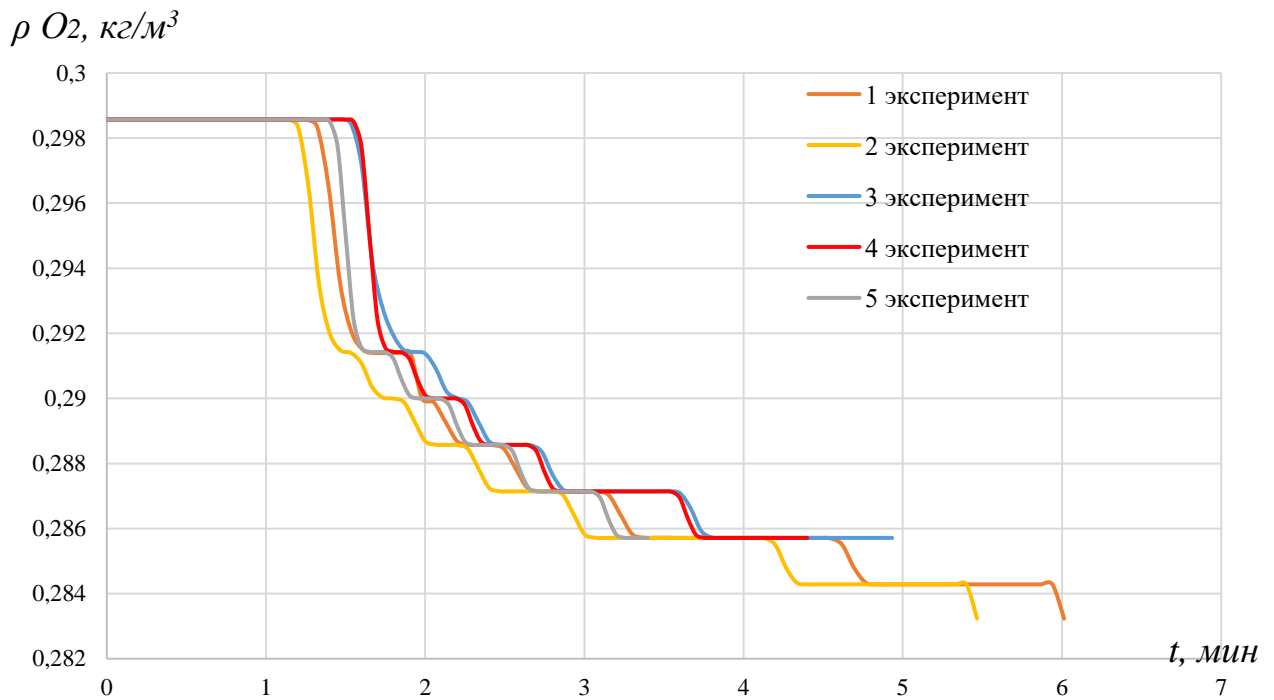


Рисунок 3.25 – Зависимость от времени парциальной плотности кислорода при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

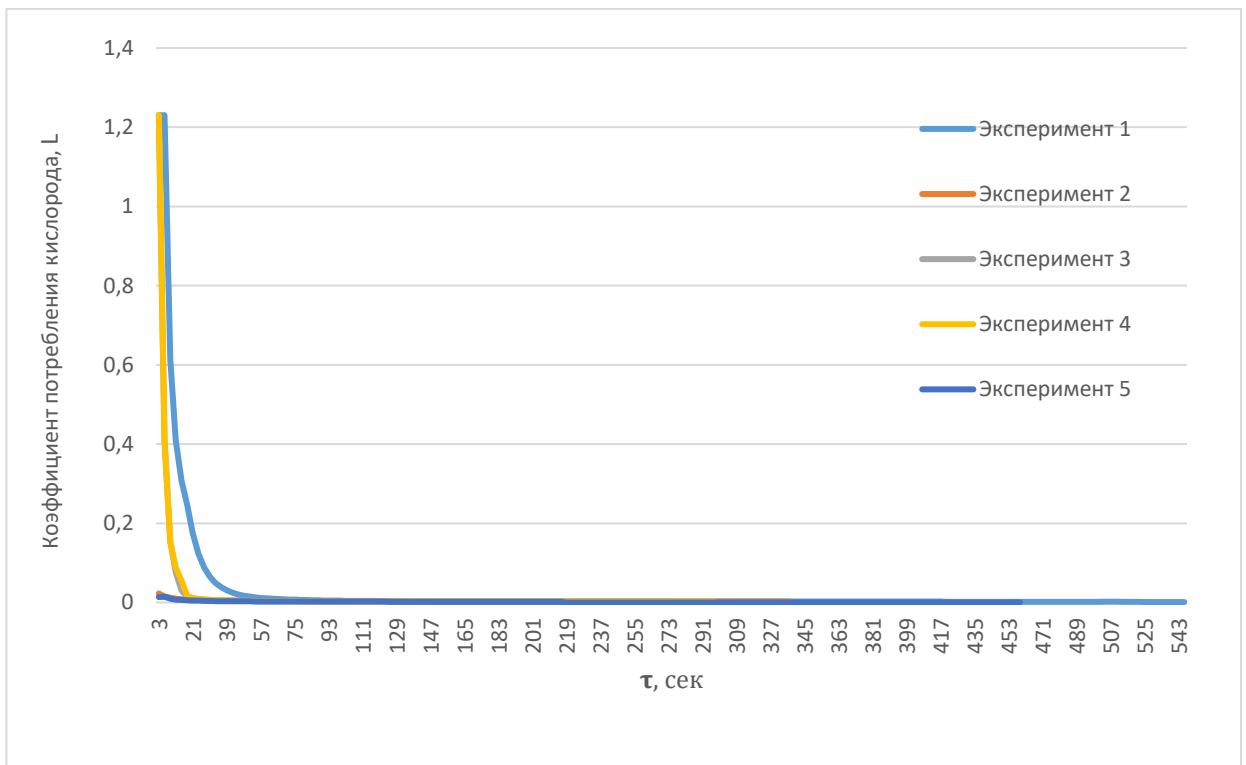


Рисунок 3.26 – Зависимость коэффициента потребления кислорода от времени при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

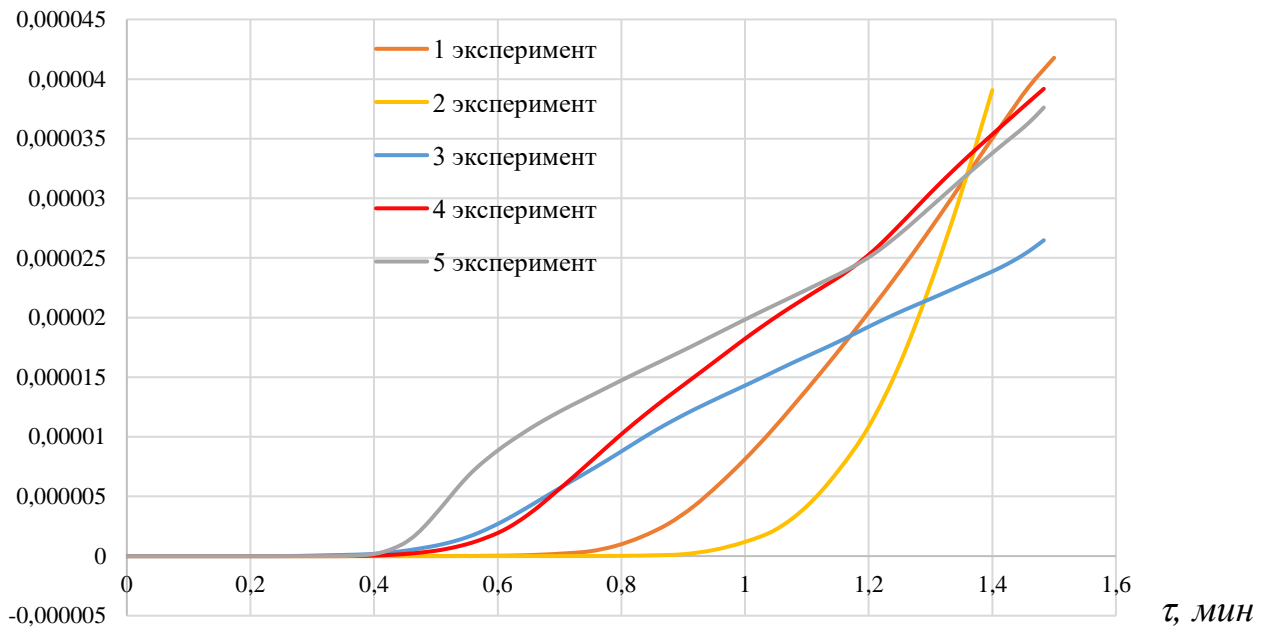
$\rho_{C_3H_4O}, \text{ кг/м}^3$ 


Рисунок 3.27 – Зависимость от времени парциальной плотности акролеина при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

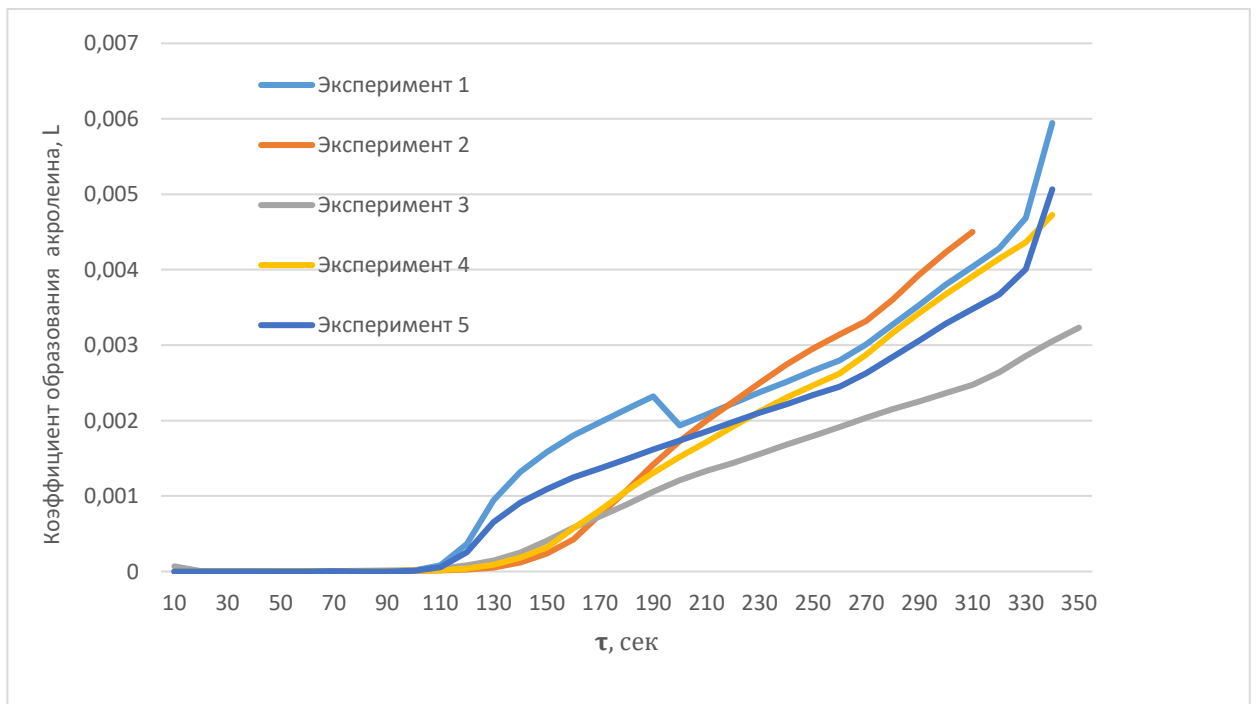


Рисунок 3.28 – Зависимость коэффициента образования акролеина от времени при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

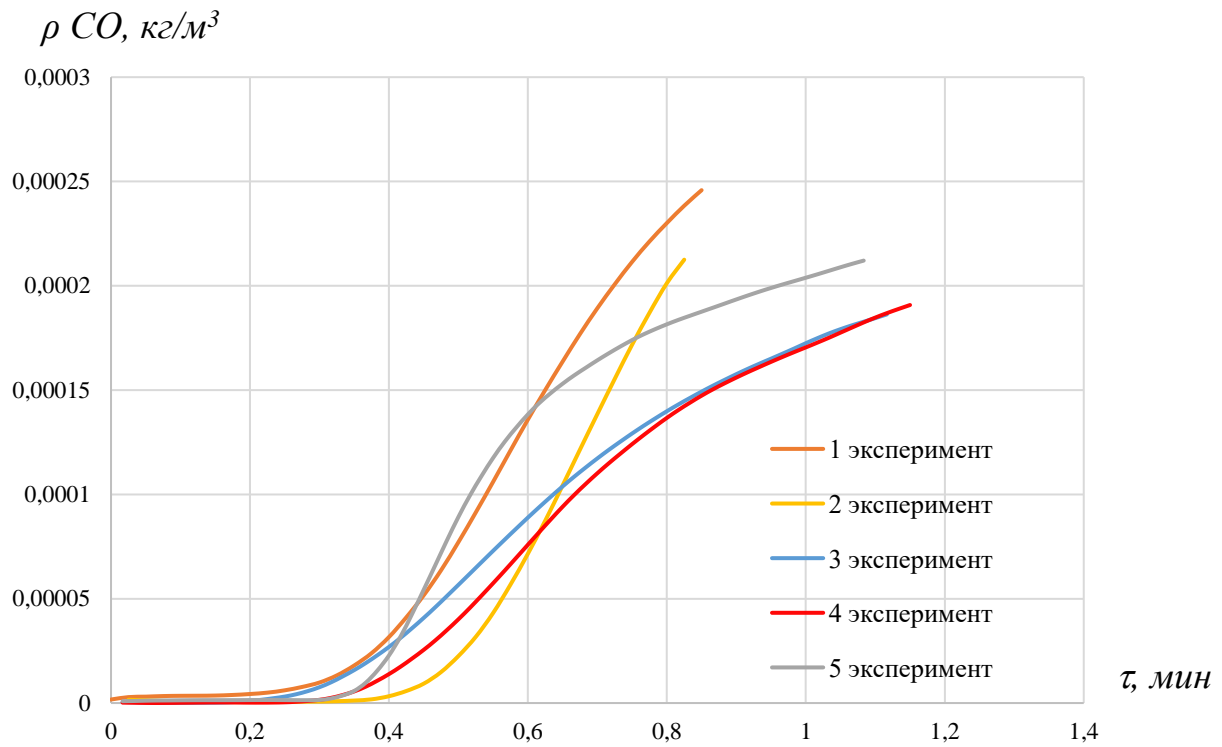


Рисунок 3.29 – Зависимость от времени парциальной плотности оксида углерода при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

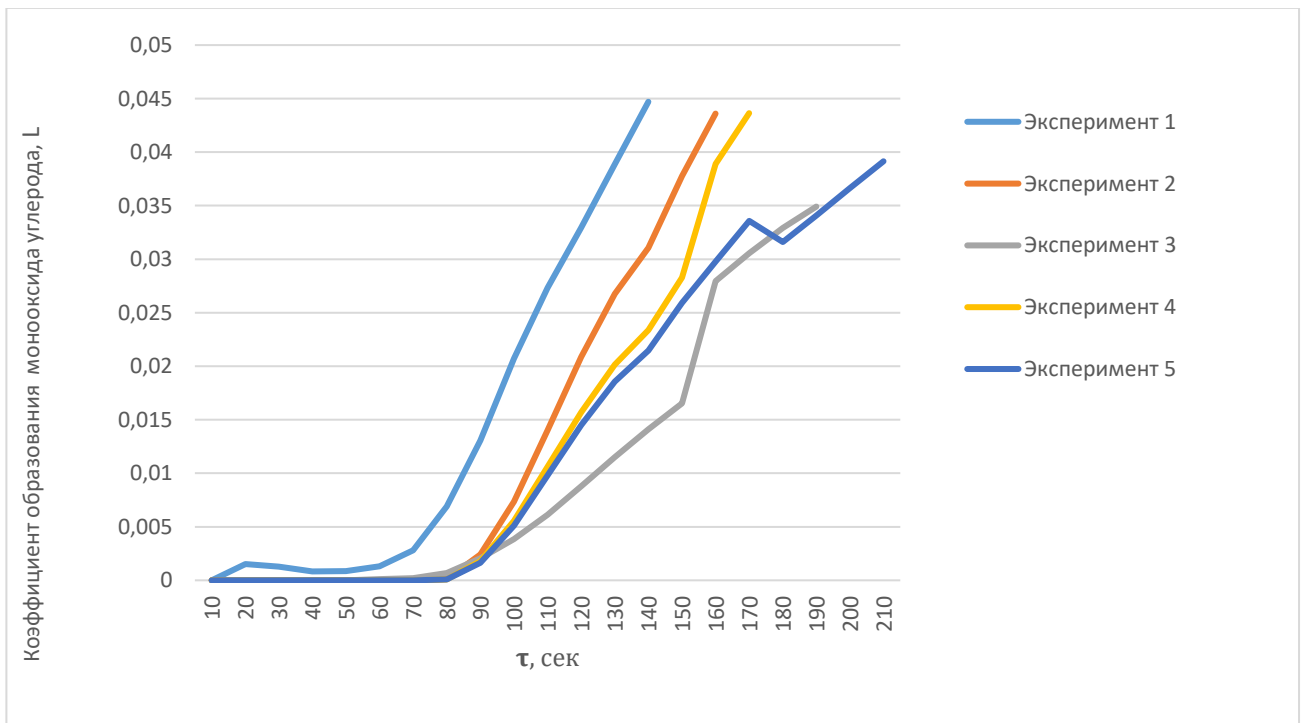


Рисунок 3.30 – Зависимость коэффициента образования монооксида углерода от времени при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

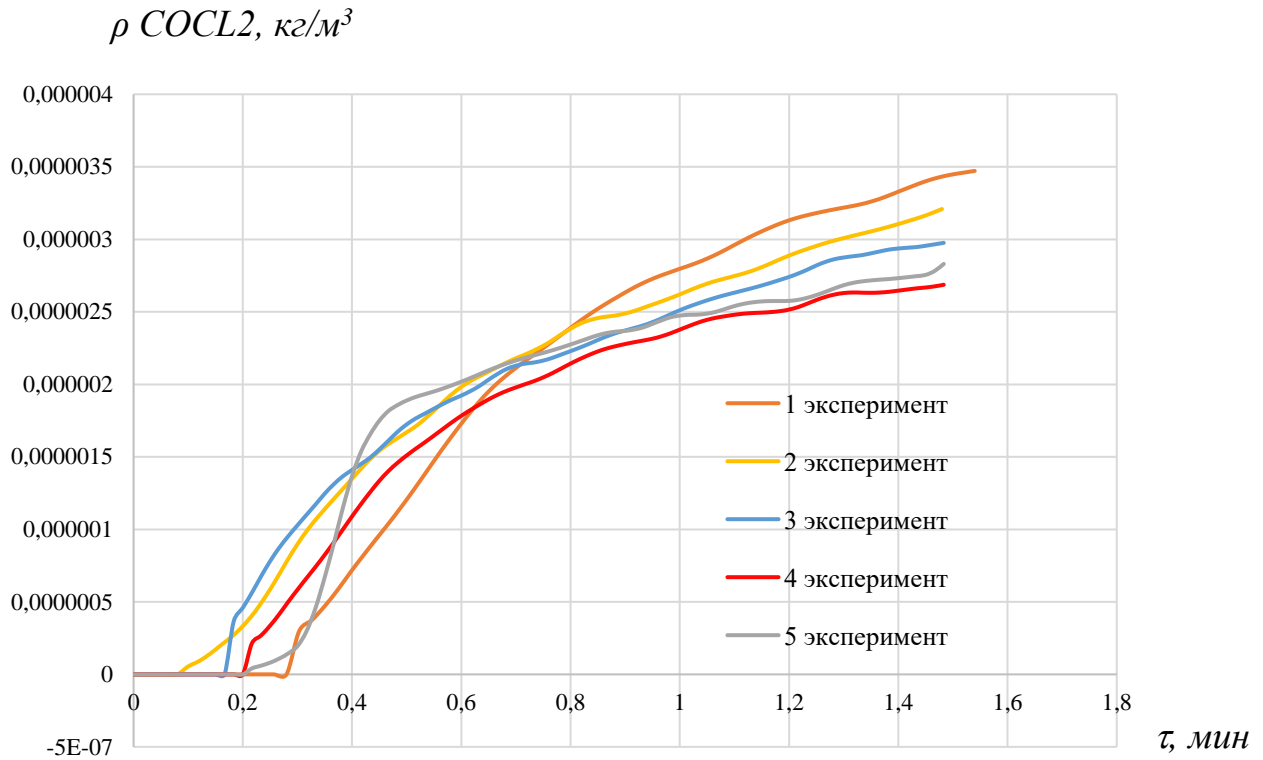


Рисунок 3.31 – Зависимость от времени парциальной плотности фосгена при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

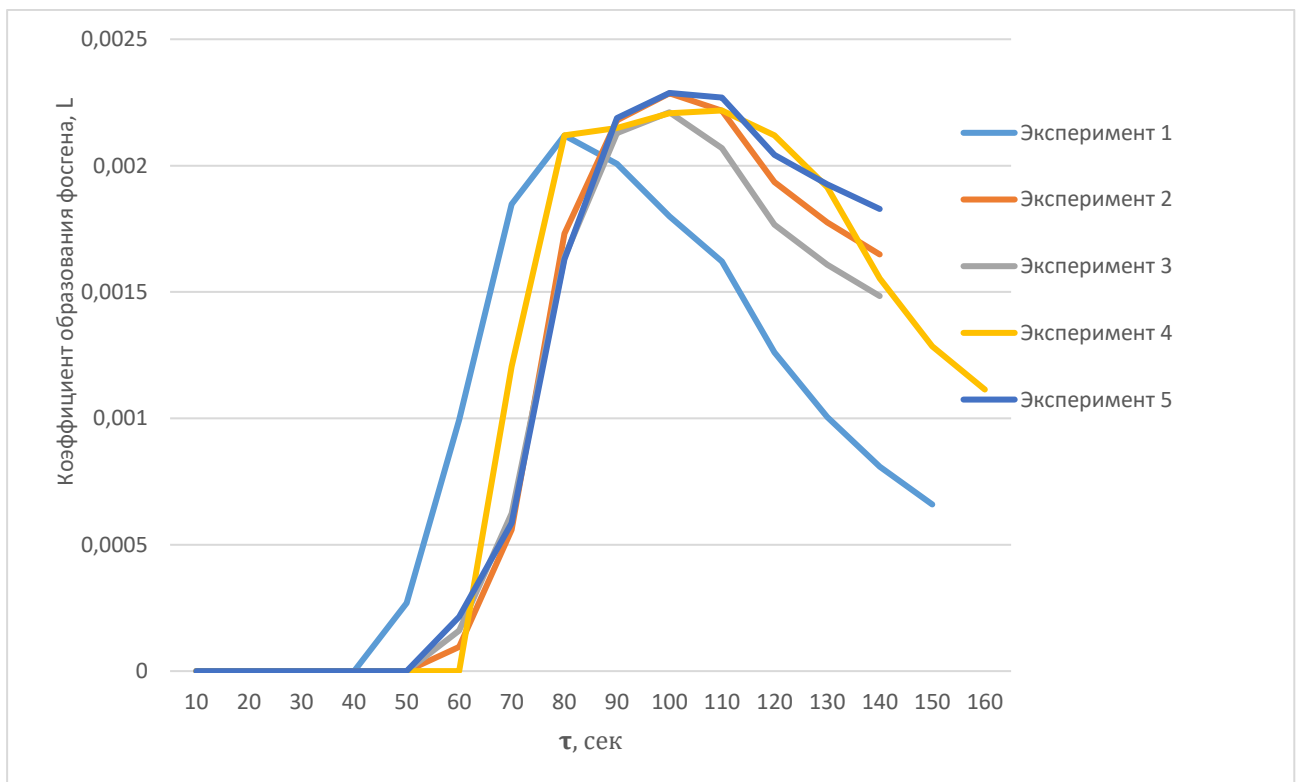


Рисунок 3.32 – Зависимость коэффициента образования фосгена от времени при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

$\rho_{HCL}$ , кг/м<sup>3</sup>

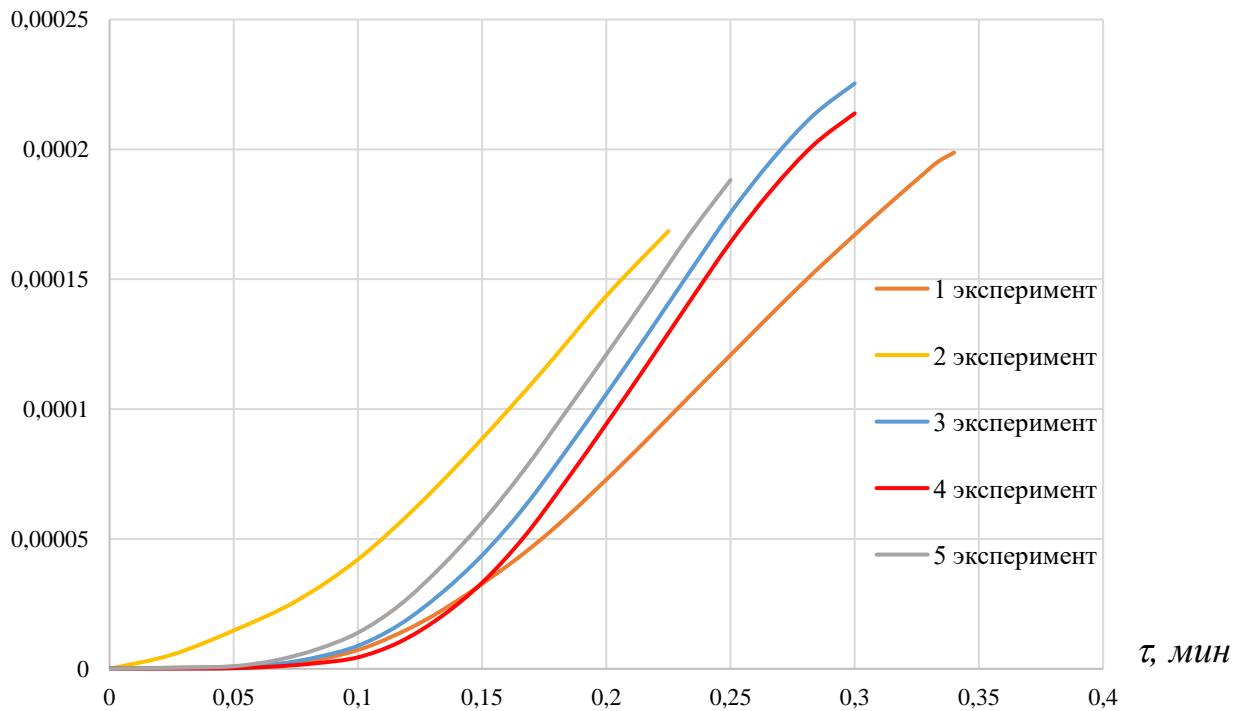


Рисунок 3.33 – Зависимость от времени парциальной плотности хлороводорода при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

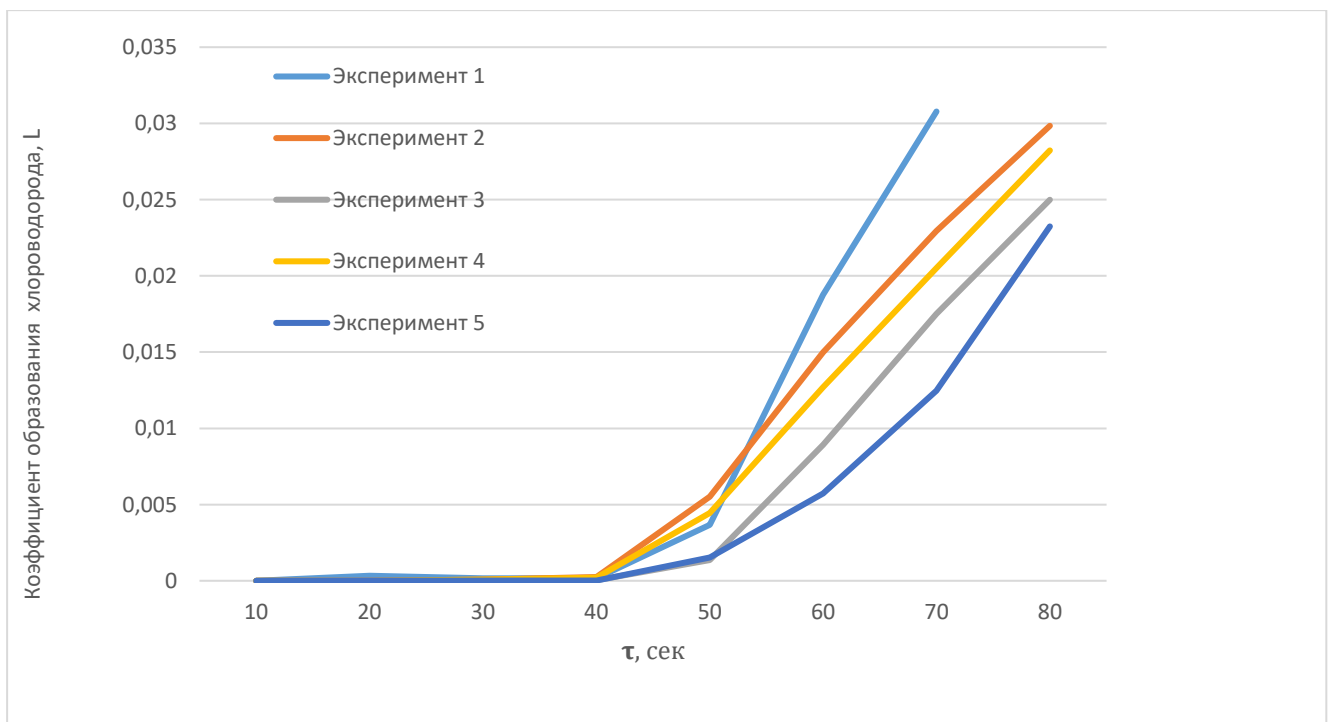


Рисунок 3.34 – Зависимость коэффициента образования хлороводорода от времени при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

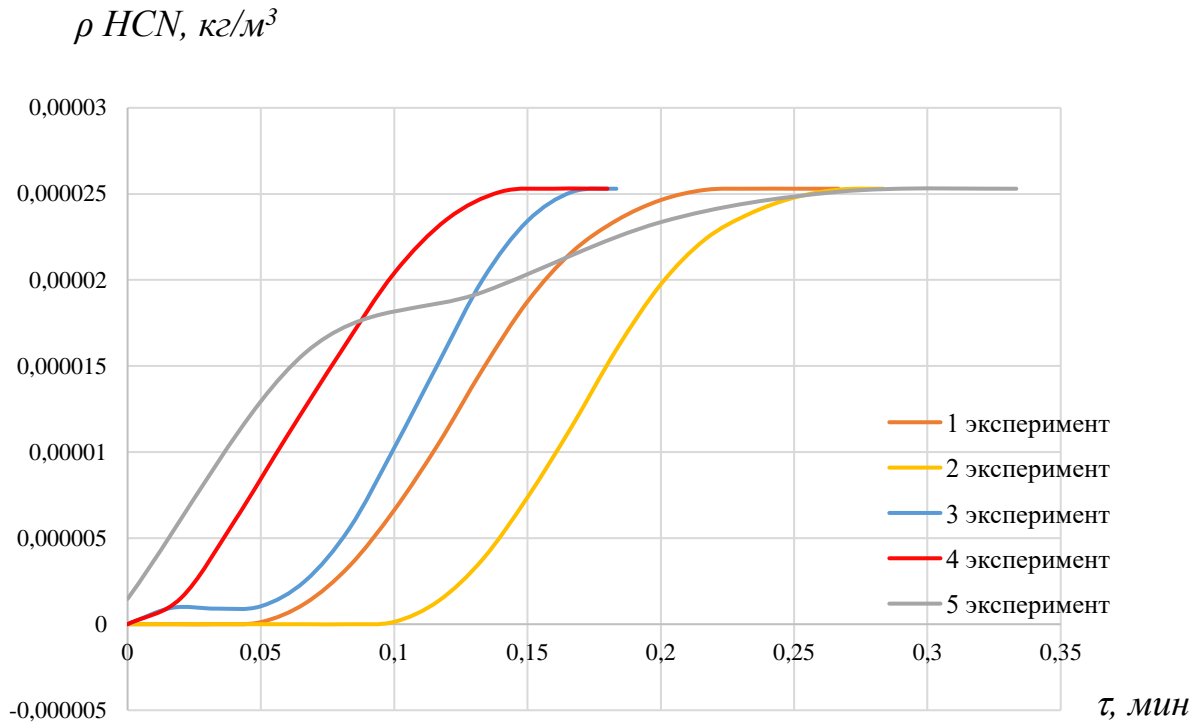


Рисунок 3.35 – Зависимость от времени парциальной плотности циановодорода при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

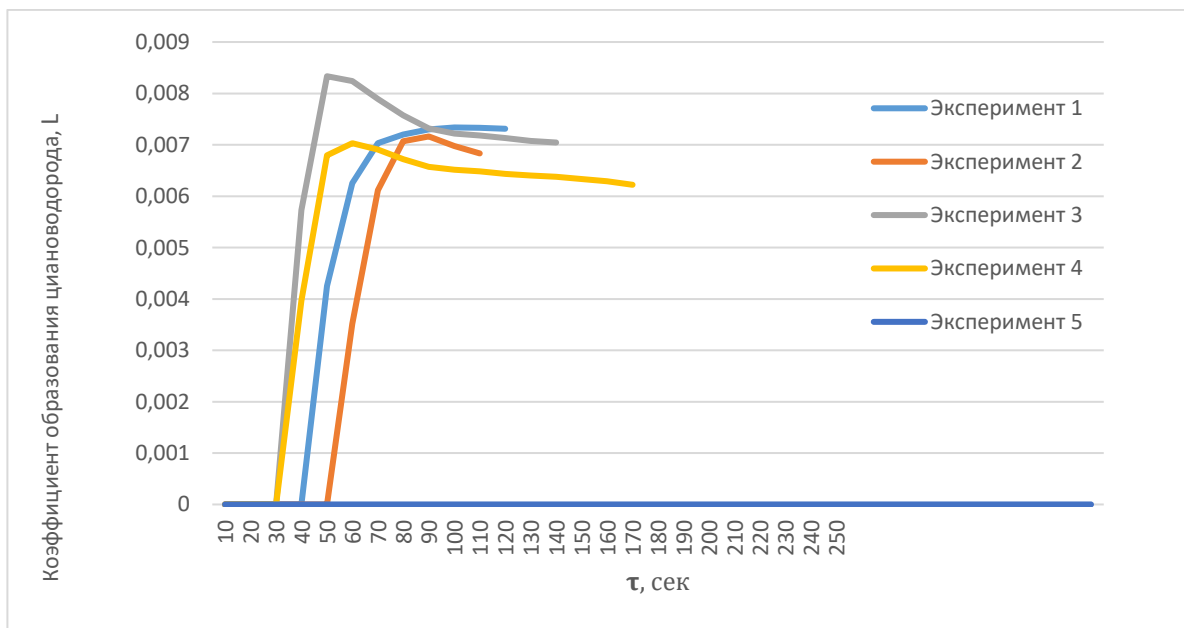


Рисунок 3.36 – Зависимость коэффициента образования циановодорода от времени при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

По каждой из изучаемых пожарных нагрузок было выполнено три эксперимента, направленных на определение линейной скорости распространения пламени по поверхности образцов твердых горючих материалов. Внешний вид

образцов до проведения и после завершения испытаний представлен на рисунке 3.37.



Рисунок 3.37 – Образцы пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей» (а) и «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» (б) до и после испытаний

После получения всех необходимых экспериментальных данных проведем расчет критерия токсикогенной опасности, используя формулу, предложенную в работе [104]:

$$K_{\text{то}} = \frac{\tau^*}{\tau_{\text{бл}}} = \tau^* \left( \frac{\pi w^2 \Psi_0 L}{3 \rho_{\text{кр}} V} \right)^{1/3}, \quad (3.6)$$

Анализ полученных экспериментальных данных выявил, что среди токсичных газов, образующихся при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей», наиболее значительную угрозу представляет циановодород. В соответствии с таблицей 3.3, именно для данного токсиканта зафиксировано минимальное время блокирования путей эвакуации, что указывает на его повышенную опасность относительно остальных исследуемых газообразных веществ.

Таблица 3.3 – Распределение времени блокирования путей эвакуации токсичными газами в зависимости от определяемых параметров для пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей»

Токсичный газ	Время блокирования путей эвакуации, с	Критическая парциальная плотность рассматриваемого токсичного газа при воздействии 3-5 мин, кг/м <sup>3</sup>	Удельная скорость газификации, кг/(с·м <sup>2</sup> )	Линейная скорость распространения пламени, м/с	Удельный коэффициент образования токсичного газа
C3H4O	463,90	0,0001	0,015	0,0035	0,0025
CO	606,14	0,00116	0,015	0,0035	0,013
COCL2	315,90	0,0000024	0,015	0,0035	0,00019
HCL	128,58	0,000023	0,015	0,0035	0,027
NO	396,63	0,001	0,015	0,0035	0,04
<b>HCN</b>	<b>107,66</b>	<b>0,00001</b>	<b>0,015</b>	<b>0,0035</b>	<b>0,02</b>

Анализ экспериментальных данных по пожарной нагрузке «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» позволил установить, что наиболее опасным токсикантом является хлороводород. В таблице 3.4 зафиксировано минимальное время блокирования путей эвакуации именно для данного вещества, что подтверждает его наибольшую токсикогенную опасность по сравнению с другими выделяющимися газами.

Таблица 3.4 – Распределение времени блокирования путей эвакуации токсичными газами в зависимости от определяемых параметров для пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове»

Токсичный газ	Время блокирования путей эвакуации, с	Критическая парциальная плотность рассматриваемого токсичного газа при воздействии 3-5 мин, кг/м <sup>3</sup>	Удельная скорость газификации, кг/(с·м <sup>2</sup> )	Линейная скорость распространения пламени, м/с	Удельный коэффициент образования токсичного газа
C3H4O	163,48	0,0001	0,0064	0,02	0,0041
CO	196,47	0,00116	0,0064	0,02	0,0274
COCL2	93,26	0,0000024	0,0064	0,02	0,00053
<b>HCL</b>	<b>59,87</b>	<b>0,000023</b>	<b>0,0064</b>	<b>0,02</b>	<b>0,0192</b>
NO	261,66	0,001	0,0064	0,02	0,01
HCN	74,69	0,00001	0,0064	0,02	0,0043

Расчётное минимальное время, за которое происходит блокирование путей эвакуации токсичными продуктами горения в зальном помещении с габаритами

10×12×4 м (объёмом 480 м<sup>3</sup>), для исследуемых материалов определено следующим образом:

- для пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей» величина  $\tau_{\text{бл}}$  составила 107 с;
- для пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» получено наименьшее значение  $\tau_{\text{бл}}$ , равное 59 с.

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили высокую токсичность продуктов горения строительных материалов, применяемых в зальных помещениях и на путях эвакуации. Установлено, что при термическом разложении «Ковра из синтетических нитей» наибольшую опасность представляет циановодород, минимальное расчетное время блокирования путей эвакуации составило 107 секунд. Для «Линолеума поливинилхлоридного на ингибированной подоснове» основным токсикантом признан хлороводород, а время блокирования путей эвакуации составило 59 секунд. Полученные значения критерия токсикогенной опасности позволяют количественно оценивать применимость материалов на путях эвакуации и использовать данный подход как элемент предварительной проверки проектных решений на соответствие требованиям пожарной безопасности. Система ранжирования строительных материалов по уровню токсичности будет рассмотрена далее, в параграфе 3.4.

### **3.4 Ранжирование и оценка строительных материалов по уровню токсичности продуктов горения на основе полученных экспериментальных данных в контексте обеспечения безопасной эвакуации при пожаре**

Предлагаемая система классификации строительных материалов основана на расчёте интегрального критерия токсикогенной опасности ( $K_{\text{то}}$ ), учитывающего основные параметры горения и степень влияния токсичных газов на условия безопасной эвакуации. Преимуществом такого подхода является упрощённый порядок оценки: материал допускается к применению в конкретном помещении,

если расчётное значение критерия  $K_{то}$  не превышает нормативный порог, равный единице.

Критерий токсикогенной опасности определяется согласно формуле, следующей из выражения (3.4):

$$K_{то} = \frac{1,1\tau^*}{0,9\tau_{бл}}, \quad (3.7)$$

Значения 0,9 и 1,1 представляют собой коэффициенты безопасности, введённые для обеспечения дополнительного запаса времени и дополнительной возможности безопасной эвакуации людей в условиях пожара.

Расчёт необходимого времени для эвакуации людей проводится в строгом соответствии с нормативными требованиями и утверждённой методикой [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. В то же время выбор строительных материалов для отделки путей эвакуации осуществляется на этапе разработки проектной документации, как при новом строительстве, так и при реконструкции объектов. На этих стадиях, в подавляющем большинстве случаев, проводится оценка пожарного риска, включающая в себя определение расчётного времени эвакуации, достаточного для безопасного выхода людей из здания в случае пожара. Полученные расчётные параметры становятся базисом для оценки соответствия принятых проектных решений действующим нормам пожарной безопасности, что существенно облегчает интеграцию новой системы классификации строительных материалов по уровню токсичности продуктов горения в уже действующие процедуры нормирования и проектирования.

Классификация строительных материалов по критерию токсикогенной опасности осуществляется следующим образом:

- Если показатель  $K_{то} \geq 1$ , применение материала запрещается, поскольку при пожаре концентрация токсичных газов достигает критического уровня раньше, чем завершится расчётная эвакуация людей, что делает использование такого материала опасным и недопустимым.
- Если показатель  $K_{то} < 1$ , материал допускается к применению, так как расчётное время эвакуации меньше времени блокирования путей эвакуации

токсичными продуктами горения, и люди успевают безопасно покинуть помещение до достижения опасных концентраций газов.

Выполним оценку допустимости применения исследованных строительных материалов в рассматриваемом ранее зальном помещении на основании рассчитанного критерия токсикогенной опасности К<sub>то</sub>.

Для этого выполним моделирование эвакуации для рассматриваемого зального помещения в программном комплексе Pathfinder. Принимаем рассматриваемое помещение класса функциональной пожарной опасности Ф2.2 – музеи, выставки, танцевальные залы и другие подобные учреждения в закрытых помещениях. Расчетное количество людей, находящихся в здании, согласно действующим строительным правилам, принимаем из расчета 1,35 м<sup>2</sup> площади зала на 1 человека. Процесс эвакуации проиллюстрирован ниже на рисунках 3.38-3.40.



Рисунок 3.38 – Процесс эвакуации на момент времени 8,5с.

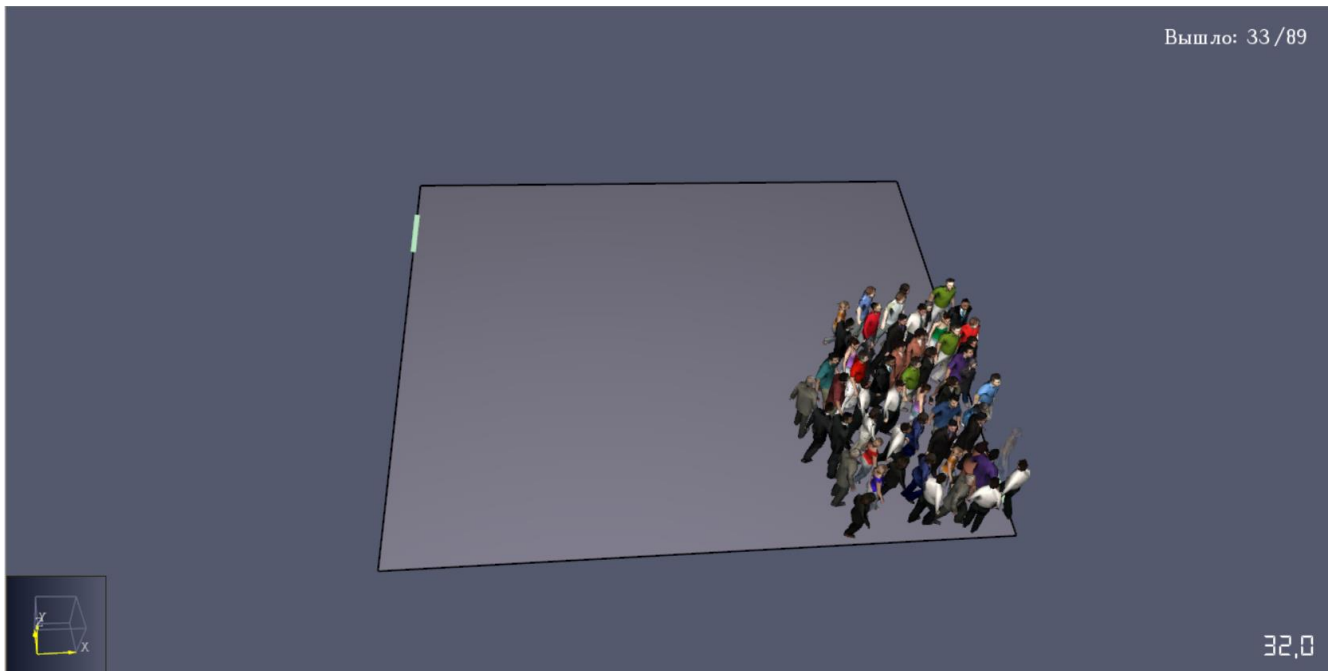


Рисунок 3.39 – Процесс эвакуации на момент времени 32с.

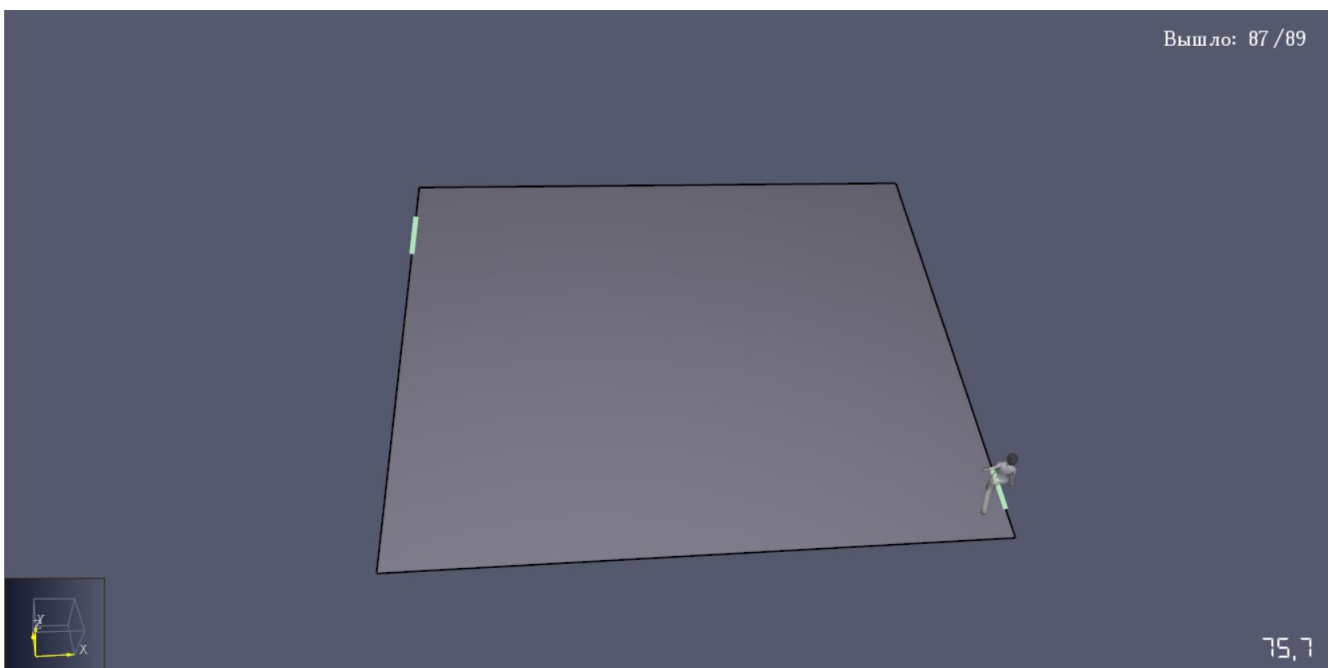


Рисунок 3.40 – Процесс эвакуации на момент времени 75,7с.

Время, затраченное на эвакуацию, составило 76 секунд.

Для пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей» полученное время блокирования путей эвакуации токсичными газами составляет  $\tau_{\text{бл}} = 107$  с (см. таблицу 2), а расчётное время эвакуации равно  $\tau^* = 76$  с. Согласно выполненному расчёту по формуле (3.7), критерий токсикогенной опасности  $K_{\text{то}}$  принимает значение 0,87, что меньше установленного порогового уровня (единицы). Таким

образом, указанный материал удовлетворяет требованиям пожарной безопасности и **может быть применён** в рассматриваемом зальном помещении.

Для материала «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» время блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения составляет  $\tau_{\text{бл}} = 59$  с, а расчётное время эвакуации –  $\tau^* = 76$  с. Расчёт по формуле (3.7) показал, что критерий токсикогенной опасности  $K_{\text{то}}$  равен 1,58, что превышает допустимое значение (единицу). Таким образом, данный материал не соответствует требованиям безопасности и его применение в исследуемом зальном помещении является **недопустимым**.

Следует отметить, что согласно действующей методике определения групп токсичности строительных материалов [20], материал «Ковер из синтетических нитей» отнесён к группе токсичности «Т3», а «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» – к группе «Т2». В соответствии с таблицей 29 Федерального закона от 22.07.2008 № 123-ФЗ, это означает, что применение «Ковра из синтетических нитей» в зальном помещении класса функциональной пожарной опасности Ф2.2 с вместимостью от 15 до 300 человек недопустимо, тогда как применение указанного линолеума допускается.

Однако при использовании предложенного в данной работе подхода, основанного на расчёте критерия токсикогенной опасности  $K_{\text{то}}$ , получается противоположный результат, демонстрирующий, что действующая методика не всегда отражает реальные риски токсического воздействия продуктов горения на безопасность людей при пожаре.

Предложенная система классификации строительных материалов, базирующаяся на расчётном критерии токсикогенной опасности  $K_{\text{то}}$ , позволяет чётко выделить две категории материалов: допустимые (при  $K_{\text{то}} < 1$ ) и недопустимые (при  $K_{\text{то}} \geq 1$ ). Такой подход существенно упрощает процедуру оценки токсичности продуктов горения материалов и делает её более объективной и прозрачной. Использование уже рассчитанного в рамках оценки пожарного риска времени эвакуации дополнительно облегчает интеграцию данной методики в действующие нормативные требования и процедуры проектирования новых и

реконструируемых зданий.

Предложенная методика обеспечивает повышение уровня пожарной безопасности зданий за счёт комплексного подхода к оценке токсичности строительных материалов. Включение в расчёт таких ключевых параметров, как удельная скорость газификации, линейная скорость распространения пламени и удельный коэффициент образования токсичных продуктов горения, позволяет объективно и полно оценить поведение материалов в условиях пожара, а также значительно снизить риски для жизни и здоровья людей при эвакуации из горящего здания.

Таким образом, предложенная система классификации строительных материалов по критерию токсикогенной опасности представляет собой научно обоснованный, эффективный и легко применимый на практике подход, который органично интегрируется в действующие процедуры оценки пожарной безопасности зданий. Внедрение данной методики способствует объективной оценке токсичности материалов, позволяет снизить пожарные риски и обеспечивает более высокий уровень защиты людей при возникновении пожара.

### **3.5 Экспериментально-аналитическая методика определения уровня токсичности строительных материалов, применяемых на путях эвакуации, при пожаре**

Методика определения уровня токсичности строительных материалов при пожаре основана на экспериментально-аналитическом подходе и предназначена для оценки токсикогенной опасности продуктов термического разложения и горения строительных материалов с точки зрения возможности блокирования путей эвакуации при пожаре. В основу методики положено определение удельных показателей газовыделения токсичных продуктов, параметров горения материала и последующий расчёт времени достижения критических концентраций токсикантов в объёме помещения, сопоставляемого с расчётным временем

эвакуации.

Экспериментальная часть методики реализуется с использованием установки термического разложения и горения материалов, включающей камеру сгорания, экспозиционную камеру, электронагревательный источник, систему взвешивания образца, систему регистрации температуры и газоаналитический комплекс. Экспозиционная камера представляет собой замкнутый объём, в котором обеспечивается равномерное перемешивание продуктов горения, что позволяет рассматривать концентрации токсичных веществ как среднеобъёмные. В процессе испытаний осуществляется непрерывная регистрация массы образца, температуры в объёме камеры сгорания и концентраций основных токсичных газообразных компонентов продуктов горения.

Для проведения испытаний из исследуемого строительного материала изготавливаются образцы установленного размера 10x10см, которые перед испытанием кондиционируются при нормальных климатических условиях в течение не менее 12 часов. Каждый материал испытывается не менее чем в трёх повторениях. Образец размещается в камере сгорания на держателе, соединённом с электронными весами, после чего на него воздействуют тепловым потоком, обеспечивающим режим термического разложения или пламенного горения, характерный для развитой стадии пожара. В ходе испытания регистрируется изменение массы образца во времени, что позволяет определить скорость его газификации.

Одновременно с этим производится отбор проб газообразных продуктов термического разложения и горения из экспозиционной камеры и их анализ с использованием газоаналитических приборов, обеспечивающих измерение концентраций основных токсичных компонентов, таких как оксид углерода, синильная кислота, хлороводород, фосген, акролеин, оксиды азота и другие вещества, характерные для горения полимерных и композиционных строительных материалов. Регистрация концентраций осуществляется с малым временным шагом, что даёт возможность определить временные зависимости накопления токсичных веществ в объёме камеры.

На основе экспериментальных данных о потере массы образца определяется удельная скорость газификации (выгорания) материала, отражающая интенсивность формирования продуктов горения. Для каждого токсичного компонента по зарегистрированным среднеобъёмным концентрациям и известному объёму экспозиционной камеры определяется удельный коэффициент образования токсичного газа, представляющий собой отношение массы образовавшегося токсиканта к массе выгоревшего материала. Определение указанных коэффициентов проводится по временным рядам экспериментальных данных, что позволяет учитывать нестационарный характер процесса горения и выделять наиболее опасные интервалы по токсичности.

Дополнительно для исследуемого материала определяется линейная скорость распространения пламени. Испытание проводится на отдельной установке, при которой образец подвергается воспламенению с одного края, а затем измеряется время прохождения фронта пламени по заданной длине образца. По результатам нескольких (не менее трех) повторных испытаний вычисляется среднее значение линейной скорости распространения пламени, используемое в дальнейшем при расчётах.

Расчётная часть методики направлена на определение времени блокирования путей эвакуации вследствие накопления токсичных продуктов горения. Для каждого выявленного токсичного газа задаётся его критическая среднеобъёмная концентрация, соответствующая смертельно опасному для человека воздействию при экспозиции, характерной для эвакуации при пожаре. С использованием экспериментально определённых значений удельной скорости газификации материала, удельных коэффициентов образования токсичных газов и линейной скорости распространения пламени рассчитывается время достижения критической концентрации каждого токсиканта в помещении. Расчёт выполняется с использованием модели накопления токсичных веществ в объёме, учитывающей развитие зоны горения и рост площади горячей поверхности материала.

Для исследуемого материала определяется минимальное время блокирования путей эвакуации, соответствующее наиболее опасному токсичному

компоненту, концентрация которого достигает критического уровня раньше остальных. Полученный показатель сравнивают с расчётным временем, необходимым для эвакуации людей из помещения. На этой основе вводят критерий токсикогенной опасности материала отношение времени блокирования путей эвакуации к времени эвакуации. Если значение критерия больше 1, материал считают неприемлемым для применения на путях эвакуации, поскольку токсически опасная среда возникает раньше завершения выхода людей. При значении меньше 1 материал признаётся допустимым по показателю токсичности продуктов горения.

Предложенная методика позволяет учитывать как химический состав продуктов горения, так и кинетику их образования, а также особенности горения конкретного строительного материала, что обеспечивает более обоснованную оценку его токсикогенной опасности при пожаре по сравнению с классификацией, основанной только на удельных показателях токсичности.

### **3.6 Практические рекомендации по применению экспериментально-аналитического подхода к оценке токсичности строительных материалов**

Как показали результаты предшествующих исследований, традиционные методы оценки токсичности строительных материалов, основанные преимущественно на биологических испытаниях, обладают ограниченной прогностической ценностью в контексте реального пожара. Такие подходы, как правило, не учитывают динамические параметры горения, которые напрямую определяют развитие критических концентраций токсикантов в воздухе. В частности, удельный коэффициент образования токсичного газа, скорость газификации материала, а также линейная скорость распространения пламени существенно влияют на темпы накопления опасных концентраций продуктов термического разложения. Игнорирование этих факторов может привести к недооценке времени, в течение которого пути эвакуации остаются

заблокированными. Следовательно, для достоверной оценки токсичности материалов в условиях реального пожара необходимы методики, интегрирующие временные, пространственные и химико-физические характеристики процесса горения, что позволит более точно оценить риск блокирования путей эвакуации и поражения людей токсичными газами.

Параллельно с разработкой и внедрением системы классификации строительных материалов по степени токсичности продуктов горения, необходимо уделить приоритетное внимание проектным решениям в части объемно-планировочной организации зданий. Современная научно-практическая повестка в области обеспечения пожарной безопасности требует комплексного подхода, в котором оценка токсичности материалов рассматривается не изолированно, а во взаимосвязи с архитектурно-пространственными характеристиками объекта.

Токсические свойства продуктов горения, в частности образование угарного газа, синильной кислоты и других токсикантов, а также скорость распространения фронта пламени, оказывают непосредственное влияние на времена эвакуации. Наличие суженных или недостаточно рассчитанных эвакуационных выходов, ограниченный объём воздушной среды, могут существенно сократить допустимое время нахождения людей в помещении.

В этой связи целесообразно на стадии проектирования учитывать не только конструктивные и эстетические характеристики применяемых материалов, но и их поведение в условиях пожара, с опорой на показатели удельной токсичности и тепловыделения. При этом объём помещения, соотношение между площадью и высотой, конфигурация путей эвакуации, а также количество и ширина выходов должны рассматриваться как неотъемлемые переменные в расчёте общей токсикогенной нагрузки и времени блокирования путей эвакуации.

В целях оценки возможности применения строительных материалов в местах, предназначенных для безопасной эвакуации людей при пожаре, в настоящем исследовании далее предлагается расчетная формула (3.10), выведенная на основе представленных ниже выражений (3.8) и (3.9). Данная формула позволяет формализовать зависимость между токсикоопасными свойствами

материалов и объемно-планировочными характеристиками объекта, учитывая ключевые параметры процесса горения, такие как скорость газификации, удельный коэффициент образования токсичного газа, а также линейную скорость распространения пламени.

Разработка подобного аналитического выражения обусловлена необходимостью интеграции материаловедческих и архитектурно-пространственных данных в единую расчетную модель, способную обеспечить обоснованное проектное решение. Формула предназначена для оценки предельно допустимого времени эвакуации в пространстве здания до его блокирования токсичными продуктами горения, что представляет собой критический критерий в контексте современной концепции риск-ориентированного подхода к обеспечению пожарной безопасности, нацеленного на опережающее планирование эвакуации.

После преобразований критерия токсикогенной опасности токсичного газа получены следующие выражения:

$$K_{\text{то}} = \frac{1.1\tau^*}{0.9\tau_{\text{бл}}} = \frac{1.1\tau^*}{0.9} \left( \frac{\pi\omega^2\psi_0 L}{3q_{\text{кр}}V} \right)^{\frac{1}{3}} = 1, \quad (3.8)$$

где  $K_{\text{то}}$  – критерий токсикогенной опасности токсичного газа;

$\tau^*$  – расчетное время эвакуации, с;

$\tau_{\text{бл}}$  – время блокирования путей эвакуации рассматриваемым токсичным газом, с;

$V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{кр}}$  – критическая парциальная плотность рассматриваемого токсичного газа, кг/м<sup>3</sup>;

$\Psi_0$  – удельная скорость газификации горючего материала, кг/(с·м<sup>2</sup>);

$L$  – удельный коэффициент образования токсичного газа;  $w$  – линейная скорость распространения пламени по поверхности твердого материала, м/с.

$$\frac{\tau^*}{V^{\frac{1}{3}}} \leq \frac{0.9}{1.1} 0.9 \left( \frac{3\rho_{\text{кр}}}{\pi\omega^2\psi_0 L} \right)^{\frac{1}{3}} = K', \quad (3.9)$$

$$\frac{\tau^*}{V^{\frac{1}{3}}} = K', \quad (3.10)$$

Выражение (3.10) представляет собой преобразованную форму базового уравнения, изложенного ранее в [79], в котором обе части уравнения приведены к одинаковой размерности, что обеспечивает корректность и сопоставимость их сравнения. Такая математическая формализация позволяет перейти от качественной оценки к строго количественному анализу, при котором критерий допустимости применения строительного материала на путях эвакуации устанавливается на основе сравнения расчетного значения времени эвакуации с временем блокирования путей эвакуации.

Приведение уравнения к единой размерности устраняет неоднозначности интерпретации и обеспечивает возможность его использования в инженерных расчетах, не требующих дополнительных преобразований или эмпирических поправок. Это позволяет интегрировать предложенный подход в процедуры проектирования.

Критериальное условие, заложенное в формулу (3.10), позволяет на количественном уровне оценить допустимость применения строительного материала в пределах путей эвакуации. В случае, если левая часть выражения, отражающая расчётное время эвакуации, оказывается меньше или равна правой части, характеризующей время блокирования путей эвакуации в результате достижения критической концентрации токсичных продуктов горения, – такой материал признаётся допустимым к применению. Это означает, что в условиях пожара эвакуация персонала или населения может быть завершена до того, как уровень газовой токсичности превысит пороговое значение, угрожающее жизни и здоровью людей.

Напротив, если расчётное время эвакуации превышает время блокирования (то есть правая часть уравнения оказывается меньше левой), материал следует исключить из проектных решений, касающихся путей эвакуации. В данной ситуации высокотоксичные продукты горения, образующиеся в результате термического разложения материала, достигают критической концентрации раньше, чем может быть завершён процесс эвакуации, тем самым создавая прямую угрозу для жизни находящихся в здании людей.

Преимущество предлагаемого метода для проектировщиков заключается, прежде всего, в его высокой прикладной значимости, структурной простоте и доступности к внедрению в рамках стандартных проектных процедур. Метод ориентирован на практическое применение в условиях ограниченного времени и ресурсного обеспечения, что особенно актуально на стадиях проектирования. Все переменные, задействованные в выражении (3.9), являются доступными и определяемыми в рамках существующих регламентов, не требуют проведения сложных моделирований или использования специализированного программного обеспечения.

Левая часть формулы, отражающая расчётное время эвакуации, формируется на основании параметров, которые уже в обязательном порядке учитываются при выполнении расчётов пожарного риска. Эти расчёты регламентированы нормативными документами и представляют собой интегральную часть современной проектной документации. Объём помещения, один из ключевых параметров модели, известен непосредственно из архитектурной модели здания, что исключает необходимость дополнительных замеров или пересчётов.

Правая часть выражения характеризует поведение строительного материала при воздействии высоких температур и зависит от таких величин, как удельная скорость газификации, коэффициент образования токсичного газа, линейная скорость распространения пламени. Эти значения могут быть определены либо в рамках экспериментальных лабораторных испытаний, либо получены из открытых источников: научных публикаций, технической литературы, нормативных документов или специализированных баз данных.

Таким образом, метод позволяет оперативно и аргументированно оценить целесообразность применения конкретного строительного материала в местах, критически важных с точки зрения эвакуации, без необходимости проведения биологических испытаний на животных. Благодаря своей модульной структуре, метод легко интегрируется в существующие процессы проектирования, расширяет инструментарий оценки пожарной опасности и способствует принятию обоснованных решений на ранних этапах жизненного цикла объекта. Это, в свою

очередь, напрямую повышает надёжность проектных решений и способствует формированию комплексного подхода к обеспечению пожарной безопасности, в котором учитываются как физико-химические свойства материалов, так и объёмно-планировочные решения зданий.

### 3.7 Выводы по третьей главе

1. В ходе исследования экспериментальную установку подвергли модернизации, благодаря чему удалось существенно расширить перечень контролируемых токсичных продуктов горения строительных материалов: помимо оксида углерода стали определяться и высокоопасные компоненты, включая фосген, хлороводород, цианистый водород, акролеин, оксиды азота (NO, NO<sub>2</sub>) и другие соединения.

2. Для последующего математического моделирования распространения токсичных газов в помещениях были получены исходные параметры - удельные коэффициенты их образования. Эти значения определены по итогам комплекса экспериментальных исследований, проведённых для строительных материалов в условиях пожара.

3. При термическом разложении распространённых строительных материалов образуется смесь высокотоксичных газов (CO, фосген, HCl, HCN, акролеин, NO), что необходимо учитывать при расчёте времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения.

4. На основании полученных данных и предложенного критерия токсикогенной опасности была разработана система ранжирования строительных материалов по степени токсичности продуктов их горения. Данная система позволяет классифицировать материалы в контексте допустимости их применения в зданиях с учётом безопасности эвакуации людей.

5. В качестве практического результата разработана экспериментально-аналитическая методика оценки соответствия строительных решений требованиям

безопасной эвакуации. Методика учитывает объём помещения, скорость распространения токсичных веществ и их удельное образование, а также включает граничные значения концентраций по каждому веществу.

6. Полученные результаты могут быть использованы в проектной и нормативной практике для предварительной оценки пожарной опасности строительных материалов с точки зрения токсичности продуктов горения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведённый анализ научных источников и нормативных документов показал, что существующие подходы к оценке токсичности строительных материалов при пожаре в основном основаны на использовании биологических методов (испытаниях на животных) и учитывают ограниченное количество токсикантов (СО, СО<sub>2</sub>, НСl). Это не позволяет полноценно оценивать реальную токсикологическую обстановку на путях эвакуации.

2. Установлено, что при термическом разложении ряда распространённых строительных материалов выделяются высокотоксичные вещества, способные в короткие сроки достигать опасных для жизни концентраций. Состав и количество выделяемых токсикантов зависят от химической природы материала, температуры воздействия, наличия кислорода и других факторов, что требует разработки метода оценки, учитывающего эти параметры.

3. Разработан и обоснован критерий токсикогенной опасности, позволяющий количественно оценивать способность строительного материала формировать смертельно опасную среду при пожаре. Критерий основан на трёх ключевых параметрах: удельной скорости газификации материала, коэффициентах образования токсичных продуктов и линейной скорости распространения пламени.

4. Проведена модернизация экспериментальной установки, позволяющей реализовать термическое воздействие на образцы строительных материалов в контролируемых условиях и проводить количественный анализ состава выделяющихся газов. На её базе выполнены испытания ряда типичных полимерных и композиционных материалов, в результате которых получены удельные коэффициенты образования основных токсикантов (СО, НСN, НСl, С<sub>3</sub>Н<sub>4</sub>О, СОСl<sub>2</sub>, NO), позволяющие проводить расчет по определению времени блокирования путей эвакуации вышеуказанными токсичными газами.

5. Разработаны практические рекомендации по определению времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения с использованием экспериментальных коэффициентов образования токсикантов и учётом объемно-

планировочных решений помещения. Рекомендации позволяют рассчитывать момент достижения критических значений концентраций для обеспечения возможности проектирования безопасных путей эвакуации.

6. Выполнено ранжирование строительных материалов по уровню токсикогенной опасности. Установлены классы допустимости их применения в зависимости от степени токсичности продуктов разложения. Это позволяет формировать обоснованные рекомендации по выбору безопасных материалов для использования в помещениях с массовым пребыванием людей и на путях эвакуации.

Результаты работы делают оценку токсичности строительных материалов при пожаре более обоснованной, повышают точность расчёта времени, когда токсичные факторы пожара начинают блокировать пути эвакуации, и создают основу для дальнейшего обновления нормативных и методических документов по пожарной безопасности зданий и сооружений.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гончаренко, В. С. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статистика пожаров и их последствий: статистический сборник / В. С. Гончаренко, Т. А. Чечетина, В. И. Сибирко [и др.]. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – 114 с. – EDN LVXFQJ.
2. Гончаренко, В. С. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: информационно-аналитический сборник / В. С. Гончаренко, Т. А. Чечетина, В. И. Сибирко [и др.]. – Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023. – 80 с. – EDN IKFNVG.
3. Пузач, С. В. Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении / С. В. Пузач, В. М. Доан, Т. Д. Нгуен, Е. В. Сулейкин, Р. Г. Акперов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – 130 с.
4. Жуков, Д. Д. Термическое разложение пенополистирола самозатухающего / Д. Д. Жуков, М. П. Красновских // Современные наукоёмкие технологии. – 2014. – № 4. – С. 101–107.
5. Пузач, С. В. Новые представления о расчёте необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах / С. В. Пузач, А. В. Смагин, О. С. Лебедченко, Е. С. Абакумов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 222 с.
6. Маркизова, Н. Ф. Токсичные компоненты пожаров / Н. Ф. Маркизова, Т. Н. Преображенская, В. А. Башарин, А. Н. Гребенюк. – Санкт-Петербург: Фолиант, 2008. – 208 с. – ISBN 978–5–93929–176–7. – EDN QLRLFT.
7. Pauluhn, J. Phosgene inhalation toxicity: update on mechanisms and mechanism-based treatment strategies / J. Pauluhn // Toxicology. – 2021. – Vol. 450. – Article 152682. – DOI: 10.1016/j.tox.2021.152682.
8. Pauluhn, J. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: comparison of models to disentangle the concentration × time conundrum of

lethality and incapacitation / J. Pauluhn // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. – 2016. – Vol. 80. – P. 173–182. – DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.017.

9. Anderson, R. A. Fire deaths in the Glasgow area: III the role of hydrogen cyanide / R. A. Anderson, W. A. Harland // *Sage Pub journals*. – 1982. – Vol. 22, Issue 1. – P. 35–40. – DOI: 10.1177/002580248202200106.

10. Lisa, M. S. Acute toxicity when concentration varies with time: a case study with carbon monoxide inhalation by rats / M. S. Lisa, R. D. Sommerville, M. R. Goodwin, A. J. Stephen, R. Channel // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. – 2016. – Vol. 80. – P. 102–115. – DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.014.

11. Anseeuw, K. Cyanide poisoning by fire smoke inhalation: a European expert consensus / K. Anseeuw, N. Delvau, G. Burillo-Putze, D. I. Fabio, G. Götz, P. Holmström // *European Journal of Emergency Medicine*. – 2013. – Vol. 20, Issue 1. – P. 2–9. – DOI: 10.1097/MEJ.0b013e328357170b.

12. Кетов, А. А. К вопросу пожарной опасности пенополистирола, самозатухающего в условиях окислительного пиролиза / А. А. Кетов, М. П. Красновских, Н. Г. Максимович // *Экология и промышленность России*. – 2013. – № 9. – С. 41–45. – EDN RADZQD.

13. Сурикова, Я. С. Гипоксия при ЧС и пожарах / Я. С. Сурикова, А. С. Яковлева // Тезисы 66-й Всероссийской межвузовской студенческой научной конференции с международным участием. – Тверь : ФГБОУ ВО Тверской ГМУ, 2021. – С. 267–268.

14. Тришкин, Д. В. Пульмонотоксичность продуктов горения синтетических полимеров / Д. В. Тришкин, С. В. Чепур, П. Г. Толкач [и др.] // *Сибирский научный медицинский журнал*. – 2018. – № 4. – С. 114–120.

15. Пузач, С. В. Оценка токсичности при пожаре нитроцеллюлозной киноплёнки при её хранении / С. В. Пузач, Я. Ю. Ващенко, Р. Г. Акперов, О. Б. Болдрушкиев // *Безопасность труда в промышленности*. – 2023. – № 2. – С. 55–61.

16. Сметанникова, А. П. Воздействие продуктов горения пластмасс на организм человека / А. П. Сметанникова // *Новая наука: от идеи к результату*. –

2016. – № 12–4. – С. 213–215.

17. Амоналиева, Н. Токсические продукты горения пластмасс и их воздействие на организм человека / Н. Амоналиева // Сборник трудов V-й Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием. – Воронеж: ФГБОУ ВО Тверской ГМУ Минздрава России, 2021. – С. 21–28.

18. Алексеев, А. А. Анализ организации оказания медицинской помощи обожжённым в чрезвычайной ситуации во время крупномасштабного пожара в ночном клубе «Хромая лошадь» (г. Пермь) / А. А. Алексеев, С. Г. Шаповалов // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2011. – № 4. – С. 9-14.

19. Щеглов, П. П. Токсичные продукты термического разложения и горения полимерных материалов при пожаре / П. П. Щеглов, А. Ф. Шароварников. – М.: ВИПТШ МВД России, 1992. – 80 с.

20. ГОСТ 12.1.044-2018. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – Введ. 2019-05-01. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2019. – 206 с.

21. Иличкин, В. С. Токсичность продуктов горения полимерных материалов. Принципы и методы определения / В. С. Иличкин. – М. : Химия, 1993. – 136 с.

22. Иличкин, В. С. Методические основы экспериментально-расчётного определения показателя токсичности продуктов горения полимеров / В. С. Иличкин // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. – 2004. – Т. 13, № 4. – С. 28–32.

23. Иличкин, В. С. Определение показателя токсичности продуктов горения материалов экспериментально-расчётным методом / В. С. Иличкин, Н. В. Смирнов, Ю. Н. Елисеев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – Т. 14, № 3. – С. 29 – 34. – EDN KPTXMZ.

24. Пузач, С. В. Новый подход к определению показателя токсичности при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода при пожаре

в помещении / С. В. Пузач, О. Б. Болдрушкиев, Е. В. Сулейкин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 2. – С. 39-46. – DOI 10.25257/FE.2021.2.39-46. – EDN DFMSNJ.

25. Пузач, С. В. Критические значения концентрации монооксида углерода при пожаре в помещении / С. В. Пузач, Т. Д. Нгуен // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2016. – Т. 1, № 1. – С. 181-183.

26. Пузач, С. В. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования монооксида углерода при пожаре в помещении / С. В. Пузач, Р. Г. Акперов // Пожаровзрывобезопасность = Fire and Explosion Safety. – 2016. – Т. 25, № 5. – С. 18-25. – DOI 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25.

27. Пузач, С. В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчёту распространения токсичных газов при пожаре в помещении / С. В. Пузач, Е. В. Сулейкин // Пожаровзрывобезопасность - 2016. – Т. 25, № 2. – С. 13-20. – DOI 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.

28. Пузач, С.В. К определению показателя токсичности продуктов горения веществ и материалов в помещении [Текст] / С.В. Пузач, В.Г. Пузач, М.В. Доан // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2011. – Т. 20. – № 4. – С. 4-13.

29. Пузач, С. В. К определению показателя токсичности при стабилизированном горении жидкости в помещении / С. В. Пузач, В. М. Доан // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, № 4. – С. 842-849. – EDN NVYSOT.

30. Пузач, С. В. Об экспериментальной оценке токсичности продуктов горения при пожаре в помещении [Текст] / С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин, Р.Г. Акперов, В.Г. Пузач // Технологии техносферной безопасности. – 2013. –Т. 50. – № 4. – 11 с.

31. Пузач, С. В. Новый подход к испытаниям веществ и материалов на токсичность при пожаре / С. В. Пузач, Н. В. Комаревцев, Н. В. Королева, Т. Г. Меркушкина // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 2. – С. 5-11. – DOI 10.25257/FE.2023.2.5-11. – EDN

## ХЕНРКА.

32. Пузач, С. В. Образование токсичных газов при горении мягких игрушек в многофункциональных торгово-развлекательных комплексах / С. В. Пузач, Д. В. Бачурин, Р. Г. Акперов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – Т. 32, № 1. – С. 41-50. – DOI 10.22227/0869-7493.2023.32.01.41-50. – EDN JUCUFG.

33. Пузач, С. В. Повышение достоверности экспериментальных методов определения показателя токсичности веществ и материалов / С. В. Пузач, Е. В. Сулейкин, Р. Г. Акперов, В. И. Дутов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 2. – С. 29-37. – EDN QJIDML.

34. Щеглов, П. П. Исследование состава газообразных продуктов термоокислительного разложения некоторых полимерных строительных материалов / П. П. Щеглов. – М. : МИСИ имени В. В. Куйбышева, 1967. – 124 с.

35. Щеглов, П. П. Продукты разложения и горения полимеров при пожаре / П. П. Щеглов. – М. : ВИПТШ МВД России, 1981. – 70 с.

36. Щеглов, П. П. Пожароопасность полимерных материалов / П. П. Щеглов, В. Л. Иванников. – М. : Стройиздат, 1992. – 106 с.

37. Трушкин, Д. В. Оценка пожарной опасности строительных материалов на основе анализа динамических характеристик II. Токсичность летучих продуктов горения, воспламеняемость и распространение пламени / Д. В. Трушкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – Т. 11, № 6. – С. 19-23.

38. Трушкин, Д. В. Проблемы классификации строительных материалов по пожарной опасности. Часть 1. Основные принципы классификации строительных материалов по пожарной опасности, принятые в России и странах Евросоюза / Д. В. Трушкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 12. – С. 25-31. – EDN PKNITТ.

39. Трушкин, Д. В. Проблемы классификации строительных материалов по пожарной опасности. Часть 2. Сравнительный анализ экспериментальных методов по оценке пожарной опасности строительных материалов, принятых в России и странах Евросоюза. Определение воспламеняемости, дымообразующей способности, способности к распространению пламени по поверхности и

токсичности продуктов сгорания строительных материалов / Д. В. Трушкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 6. – С. 31-37. – EDN SNVTOJ.

40. Трушкин, Д. В. Нормирование применения отделочных материалов на путях эвакуации / Д. В. Трушкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15, № 1. – С. 14-17. – EDN НТТТQF.

41. Трушкин, Д. В. Рекомендации по проведению испытаний строительных материалов на пожарную опасность II. Рекомендации к проведению испытаний по определению токсичности летучих продуктов горения строительных материалов / Д. В. Трушкин, А. Я. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – Т. 14, № 2. – С. 23-32. – EDN KPNSBR.

42. Hirschler, M. M. Smoke toxicity measurements made so that the results can be used for improved fire safety [Текст] / М. М. Hirschler // Journal of Fire Sciences. – 1991. – Vol. 9, № 4. – P. 330-347. – DOI 10.1177/073490419100900407.

43. Hirschler, M. M. Fire hazard and toxic potency of the smoke from burning materials [Текст] / М. М. Hirschler // Journal of Fire Sciences. – 1987. – Vol. 5, № 5. – P. 289-307. – DOI 10.1177/073490418700500501.

44. Кошмаров, Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Ю. А. Кошмаров. – М. : Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

45. Астапенко, В. М. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В. М. Астапенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский, А. Н. Шевляков. – М. : Стройиздат, 1988. – 447 с.

46. Молчадский, И. С. Пожар в помещении / И. С. Молчадский. – М. : ВНИИПО МЧС России, 2005. – 456 с.

47. Молчадский, И. С. Определение удельной интенсивности тепловыделения при горении веществ и материалов в условиях пожара / И. С. Молчадский. – М. : ВНИИПО, 1989. – 25 с.

48. Баратов, А. Н. Пожарная опасность строительных материалов / А. Н. Баратов, Р. А. Андрианов, А. Я. Корольченко. – М. : Стройиздат, 1988. – 380 с.

49. Tanaka, T. BRI 2002: Two layer zone smoke transport model. Chapter 1. Outline of the model / T. Tanaka, S. Yamada // Fire Science and Technology. – 2004. –

Vol. 23, № 1. – P. 1-44.

50. Современные материалы и дизайн / О. В. Маковецкая-Абрамова, С. А. Силла, С. В. Кириллов [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2018. – 92 с. – ISBN 978-5-7310-4326-7. – EDN VALYTI.

51. Темникова, Е. А. Современные отделочные материалы в дизайне интерьера / Е. А. Темникова // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и дизайн : сборник статей / Самарский государственный технический университет. – Самара : Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. – С. 368-371. – EDN ZBEDWJ.

52. Симоненко, В. Б. Острые отравления: неотложная помощь / В. Б. Симоненко, Г. П. Простакшин, С. Х. Сарманаев. – М. : Экономика и информатика, 2008. – 269 с.

53. Франке, З. Химия отравляющих веществ. Т. 1 / З. Франке ; пер. с нем. – М. : Химия, 1973. – 440 с.

54. Общая токсикология / Б. А. Курляндский, В. А. Филов, В. С. Безель [и др.] под ред. Б. А. Курляндского, В. А. Филова. – М. : Медицина, 2002. – 608 с. – ISBN 5-225-04609-6. – EDN UCPIXP.

55. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [Электронный ресурс] : приказ МЧС Российской Федерации от 14.11.2022 г. № 1140 // Гарант : информ.-правовое обеспечение. – Электрон. дан. – М., 2022. – Доступ из локальной сети библиотеки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 04.09.2024).

56. Мельдер, Е. В. Токсичность продуктов термоллиза и дымообразующая способность огнезащитных вспучивающихся покрытий для стальных конструкций / Е. В. Мельдер, С. В. Пузач, А. Б. Сивенков // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 3. – С. 15-24. – DOI 10.25257/FE.2023.3.15-24. – EDN EZWKMK.

57. Исаев, В. С. Аварийно химически опасные вещества / В. С. Исаев,

В. А. Владимиров // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2012. – Т. 2, № 1(2). – С. 618-655. – EDN OWFYOP.

58. Гаврилов, Л. А. Дымы – опасный и контролируемый фактор пожара / Л. А. Гаврилов, В. В. Гармышев, И. В. Черных. – Иркутск : Иркутский государственный университет, 2006. – 171 с.

59. Макаров, Л. К. Пожарная безопасность : энциклопедия / Л. К. Макаров. – М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. – 416 с. : ил.

60. Большая российская энциклопедия. Т. 33. – М. : Большая российская энциклопедия, 2017. – 799 с. – ISBN 978-5-85270-370-5. – EDN ZQYGML.

61. Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности : справочник / под ред. И. В. Рябова. – М. : Химия, 1970. – 336 с.

62. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны / Е. Л. Сеницина, Р. Ф. Афанасьева, Е. К. Прохорова [и др.]. – М. : Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия, 1988. – 95 с. – EDN WEDVTP.

63. СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения (с Изменением N 1) [Текст]. – Введ. 01.05.2009. – М. : Стандартинформ, 2009. – 37 с.

64. Измеров, Н. Ф. Параметры токсикометрии промышленных ядов при однократном воздействии / Н. Ф. Измеров, И. В. Саноцкий, Н. Н. Сидоров. – М. : Медицина, 1977. – 240 с.

65. Аничков, С. В. Медико-санитарные основы военно-химического дела [Текст] / С. В. Аничков, А. А. Лихачев, Б. И. Предтеченский ; Исполком Союза обществ Красного Креста и Красного Полумесяца СССР. – М. ; Л. : Гос. мед. изд-во, 1933. – 452 с.

66. Зверев, М. И. Токсический отек легких [Текст] / М. И. Зверев, М. Я. Анестиади. – Кишинев : Штиинца, 1981. – 108 с.

67. Куценко, С. А. Основы токсикологии [Текст] / С. А. Куценко. – М. : Фолиант, 2004. – С. 102-106.

68. Xiu, L. Recent studies on the decomposition and strategies of smoke and toxicity suppression for polyurethane based materials [Текст] / L. Xiu, H. Jianwei, G. Sabyasachi // Royal Society of Chemistry. – 2016. – Vol. 6. – P. 74742-74756. – DOI: 10.1039/c6ra14345h.

69. Morikawa, T. Smoke toxicity and its evaluation method / T. Morikawa // Journal of Fire Sciences. – 1984. – Vol. 2, № 2. – P. 142-152.

70. Dobrzyńska, R. The toxicity of products of thermal decomposition and combustion of polyurethane foams used in manufacturing of upholstered furniture [Текст] / R. Dobrzyńska // Bezpieczenstwo i Technika Pozarnicza. – 2012. – Vol. 28, № 4. – P. 53-58. – EDN TFQWHP.

71. Czerczak, S. Toxicity classification of thermal degradation products of chemical materials used in construction [Текст] / S. Czerczak, J. Stetkiewicz // Journal of Fire Sciences. – 1996. – Vol. 14, № 5. – P. 367-378. – DOI 10.1177/073490419601400505.

72. Судебно-медицинская экспертиза при отравлениях : учеб. пособие [Текст] / сост. А. А. Халиков, Ю. А. Большаков, Р. Б. Чернова, А. Р. Назмиева. – Уфа : ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, 2018. – 91 с.

73. Горбулин, В. И. Проблемы специалистов пожарной лаборатории при обнаружении неорганических веществ в виде аммиака и сероводорода с помощью газоанализатора с индикаторными трубками на месте пожара, пути и способы их решения [Текст] / В. И. Горбулин, А. А. Кичигин, Д. С. Лелюк // Пожарная и аварийная безопасность : сб. матер. XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году культуры безопасности, Иваново, 29-30 нояб. 2018 г. Ч. 1. – Иваново : Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 69-72. – EDN SZKUOK.

74. Шафран, Л. М. Нормирование требований по токсичной опасности продуктов горения кабельной продукции [Текст] / Л. М. Шафран, И. О. Харченко, Р. И. Кравченко [и др.] // Актуальные проблемы транспортной медицины. – 2007. – № 1(7). – С. 57-66. – EDN RYCQFP.

75. Кошмаров, Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении [Текст] / Ю. А. Кошмаров, С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, Нгуен Тхань Хай. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. – 148 с.

76. Пузач, С. В. О достоверности применения эмпирических формул расчета массового расхода системы дымоудаления при пожаре в атриуме / С. В. Пузач, Т. Х. Нгуен // Пожаровзрывобезопасность = Fire and Explosion Safety. – 2009. – Т. 18, № 9. – С. 35-43.

77. Российская энциклопедия по охране труда : [в 3 т.] / Министерство здравоохранения и социального развития Российской Федерации ; [авт.-сост. И. А. Воробьев и др.] ; отв. ред. А. Л. Сафонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва НЦ ЭНАС, 2006. – ISBN 5-93196-704-4.

78. Сулейкин, Е. В. Определение показателей токсичности и удельного коэффициента выделения газообразных продуктов горения веществ и материалов [Текст] / Е. В. Сулейкин, Р. Г. Акперов, В. Г. Пузач // Проблемы техносферной безопасности – 2014 : материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 213-215.

79. Пузач, С. В. Новый подход к испытаниям веществ и материалов на токсичность при пожаре [Текст] / С. В. Пузач, Н. В. Комаревцев, Н. В. Королева, Т. Г. Меркушкина // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 2. – С. 5-11. – DOI 10.25257/FE.2023.2.5-11. – EDN XENRKA.

80. Babrauskas, V., Harris, R. H., Braun, E., Levin, B. C., Paabo, M., Gann, R. G. Large-scale validation of bench-scale fire toxicity tests [Текст] / V. Babrauskas, R. H. Harris, E. Braun, B. C. Levin, M. Paabo, R. G. Gann // Journal of Fire Sciences. – 1991. – Vol. 9, № 2. – P. 125-148. – DOI 10.1177/073490419100900203.

81. Перова, А. Н. Оценка пожарной опасности и токсичности современных строительных материалов [Текст] / А. Н. Перова, Е. Б. Аносова, Е. С. Подшивалкина, Л. В. Илларионова // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 31, № 13(194). – С. 71-73. – EDN ZUGDZZ.

82. Соколик, Г. А. Оценка токсической опасности продуктов горения полимерных материалов и материалов, содержащих полимеры [Текст] / Г. А. Соколик, С. Л. Лейнова, С. Ф. Свирщевский // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию создания первого в Респ. Беларусь науч. подразделения в обл. предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и пожаров, Минск, 1 нояб. 2016 г. : в 2 ч. Ч. 1. – Минск : Колорград, 2016. – С. 56-68. – EDN XSSUBT.

83. Данишевский, С. Л. Токсикология высокомолекулярных соединений и химического сырья, используемого для их синтеза / С. Л. Данишевский, Е. Н. Комарова // Токсикология высокомолекулярных соединений и химического сырья, используемого для их синтеза : материалы науч. конф. – М. : Химия, 1996. – С. 119-132.

84. Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей: в 3 т. / под ред. Н. В. Лазарева, Е. Н. Левиной. – 7-е изд. – Л.: Химия, 1977.

85. Treitman, R. D. [и др.] Air contaminants encountered by firefighters [Текст] // American Industrial Hygiene Association Journal. – 1980. – Vol. 41, № 11. – P. 796 – 802.

86. Монахов, В. Т. Показатели пожарной опасности веществ и материалов. Анализ и предсказание. Газы и жидкости / В. Т. Монахов. – Москва : [б. и.], 2007. – 246 с. : ил., табл. – ISBN 5-901140-54-0.

87. Вредные вещества в окружающей среде. Элементы I-IV групп периодической системы и их неорганические соединения: Справ.-энц. изд. / Под ред. В.А. Филова. – СПб.: НПО «Профессионал», 2005.– 462 с.

88. Болдырева, О. Н. Вредные химические вещества в производственной среде : учебное пособие / О. Н. Болдырева, А. В. Звягинцева ; ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет». – Воронеж : Воронежский государственный технический университет, 2009. – 173 с.

89. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [Электронный ресурс] //

Гарант.ру : информационно-правовой портал. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения: 03.06.2024).

90. Приказ Росстандарта от 13 февраля 2023 г. № 318 «Об утверждении перечня документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [Электронный ресурс] // Гарант : информационно-правовое обеспечение. – Электрон. дан. – М., 2023. – Доступ из локальной сети библиотеки Академии ГПС МЧС России (дата обращения: 01.09.2024).

91. Приказ МЧС России от 26 июня 2024 г. № 533 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [Электронный ресурс] // Гарант : информ.-правовое обеспечение. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/409515151/> – Дата обращения: 27.05.2024. (дата обращения: 18.09.2024).

92. ГОСТ Р 59638-2021. Системы пожарной сигнализации. Руководство по проектированию, монтажу, техническому обслуживанию и ремонту. Методы испытаний на работоспособность [Текст]. – Введ. 15.09.2021. – М. : Росстандарт, 2021. – 24 с.

93. ГОСТ 12.4.235-2019. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Фильтры противогазовые и комбинированные. Общие технические требования. Методы испытаний. Маркировка [Текст]. – Введ. 01.09.2020. – М. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2019. – 26 с.

94. Постановление Правительства Российской Федерации от 16.09.2020 № 1479 «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации» [Электронный ресурс] // Гарант.ру : информационно-правовой портал. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/74680206/> (дата обращения: 04.09.2024).

95. Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [Электронный ресурс] // Гарант.ру:

информационно-правовой портал. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/12115118/> (дата обращения: 20.06.2024).

96. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [Электронный ресурс] // Гарант.ру : информационно-правовой портал. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/12125350/> (дата обращения: 20.06.2024).

97. Исаева, Л. К. Пожары и окружающая среда [Текст] / Л. К. Исаева. – М., 2001. – 147 с.

98. Исаева, Л. К. Экологические последствия пожаров [Текст] / Л. К. Исаева. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1990. – 107 с.

99. Пузач, С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности [Текст] / С. В. Пузач. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

100. McGrattan, K. Fire Dynamic Simulator (version 5) [Текст] : User's Guide / К. McGrattan, В. Klein, S. Hostikka, J. Floyd. – NIST Special Publication 1019-5. – Gaithersburg, MD : National Institute of Standards and Technology, 2007. – 206 p.

101. Spalding, D. B. Older and newer approaches to the numerical modelling of turbulent combustion [Текст] // 3rd International Conference on Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines. – London : IMoChE, 1996. – P. 25-37.

102. Welch, S., Rubini, P. SOFIE: Simulation of Fires in Enclosures [Текст] : User Guide. – United Kingdom : Cranfield University, 1996. – 340 p.

103. Акперов, Р. Г. Анализ современных методов определения токсичности веществ и материалов [Текст] / Р. Г. Акперов, Е. В. Лендель // Проблемы техносферной безопасности : материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. – 2014. – № 3. – С. 234-235. – EDN WDEMKV.

104. Пузач, С. В. Сравнительный анализ нового экспериментально-теоретического подхода и нормативных методов определения токсичности продуктов горения полимерных материалов [Текст] / С. В. Пузач, Н. В. Комаревцев, Р. Г. Акперов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение,

ликвидация. – 2024. – № 4. – С. 36-45. – DOI 10.25257/FE.2024.4.36-45. – EDN NOLVOT.

105. Бердочников, Р. С. Методы оценки токсичности продуктов горения строительных материалов [Текст] / Р. С. Бердочников, М. Г. Цховребов, А. Р. Лысов // Концепт : научно-методический электронный журнал. – 2016. – № Т2. – С. 271-275. – EDN VSDLXD.

106. Затхеев, А. С. Методы оценки пожарной опасности строительных материалов на полимерной основе [Текст] / А. С. Затхеев // Мирская наука. – 2024. – № 3(84). – С. 48-54. – EDN NYNOVZ.

107. Уварова, В. А. Критерии оценки токсичности продуктов горения веществ и материалов, используемых в угольных шахтах [Текст] / В. А. Уварова, Т. М. Грачева // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 78-83. – EDN PDTTТJ.

108. Чернушевич, Е. В. Горения строительных материалов [Текст] / Е. В. Чернушевич, П. В. Ширинкин // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2020. – № 1(16). – С. 22-28. – DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.16.1.004. – EDN ZWQBFQ.

109. EN 13823:2010. Reaction to fire tests for building products. Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item [Текст]. – Brussels : European Committee for Standardization, 2010. – 47 p.

110. EN ISO 9239-1:2010. Reaction to fire tests for floorings. Part 1: Determination of the burning behavior using a radiant heat source [Текст]. – Geneva : International Organization for Standardization, 2010. – 25 p.

111. Lestari, F. An alternative method for fire smoke toxicity assessment using human lung cells [Текст] / F. Lestari, A. R. Green, G. Chattopadhyay, A. J. Hayes // Fire Safety Journal. – 2006. – Vol. 28. – Iss. 8. – P. 605-615.

112. Babrauskas, V. Combustion toxicity regulations for construction products [Текст] / V. Babrauskas // Journal of Fire Sciences. – 2019. – Vol. 38. – № 1. – P. 96-100. – DOI 10.1177/0734904119880472.

113. Alexeeff, G. Y., Packham, S. C. Use of a radiant furnace fire model to evaluate acute toxicity of smoke [Текст] / G. Y. Alexeeff, S. C. Packham // Journal of Fire Sciences. – 1984. – Vol. 2. – № 4. – P. 306-323. – DOI 10.1177/073490418400200405.

114. Becker, W. Smoke toxicity: application to fire safety engineering [Текст] / W. Becker // Journal of Fire Sciences. – 1996. – Vol. 14. – № 5. – P. 333-341. – DOI 10.1177/073490419601400501.

115. Morikawa, T. Toxic gases and smoke evolution from foam plastic building materials burning in fire environments [Текст] / T. Morikawa, E. Yanai // Journal of Fire Sciences. – 1989. – Vol. 7. – № 2. – P. 131-141. – DOI 10.1177/073490418900700204.

116. Tsuchiya, Y. On the unproved synergism of the inhalation toxicity of fire gas [Текст] / Y. Tsuchiya // Journal of Fire Sciences. – 1986. – Vol. 4. – № 5. – P. 346-354. – DOI 10.1177/073490418600400504.

117. Tsuchiya, Y. Numerical analysis of fire gas toxicity: Mathematical predictions and experimental results [Текст] / Y. Tsuchiya, I. Nakaya // Journal of Fire Sciences. – 1986. – Vol. 4. – № 2. – P. 126-134. – DOI 10.1177/073490418600400206.

118. Пузач, С. В. Ранжирование горючих веществ и материалов по времени блокирования путей эвакуации токсичными газами [Текст] / С. В. Пузач, Н. В. Комаревцев // Современные проблемы обеспечения безопасности : сборник материалов XXVI Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 24-25 апреля 2024 года. – Екатеринбург : Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2024. – С. 72-77. – EDN DWYLCH.

119. Холщевников, В. В. Обзор компьютерных программ моделирования эвакуации зданий и сооружений / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин, Н. Н. Галушка // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – Т. 11, № 5. – С. 40-49. – EDN UYWXIR.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**МЧС РОССИИ****ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«СУДЕБНО – ЭКСПЕРТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ФЕДЕРАЛЬНОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ  
СЛУЖБЫ «ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ПОЖАРНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ»  
ПО КУРСКОЙ ОБЛАСТИ»**

ул. 50 лет Октября, д. 116-б, г. Курск, 305040, тел / факс 57-14-32/57-11-01

**АКТ  
внедрения результатов**

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы, Комаревцева Никиты Васильевича выполненной в Академии ГПС МЧС России на тему: «Экспериментально-аналитическая методика определения уровня токсичности строительных материалов, применяемых на путях эвакуации при пожаре», применяются при расчете значения пожарного риска для математического моделирования развития опасных факторов пожара, с целью определения времени блокирования путей эвакуации в зданиях и сооружениях.

В ходе внедрения были использованы экспериментально определённые автором коэффициенты удельной массовой скорости выгорания, значения линейной скорости распространения пламени, удельные коэффициенты образования токсичных продуктов горения (включая акролеин, монооксид углерода, фосген, хлороводород, оксид азота, циановодород) полученные в условиях термического разложения строительных материалов в маломасштабной экспериментальной установке.

Вышеуказанные параметры позволяют количественно оценивать массовое выделение токсикантов при пожаре и могут использоваться в расчетах как исходные данные для моделирования динамики опасных факторов пожара, что повышает точность и объективность прогнозирования времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения.

Временно исполняющий обязанности начальника  
ФГБУ СЭУ ФПС ИПЛ по Курской области

« 23 » 14.09.2025 2025 г.



М.П.

*А.А. Черенов*  
А.А. Черенов

## Общество с ограниченной ответственностью

## «Инженерный центр «Безопасность»

115114, г. Москва, ул. Летниковская, дом 4, строение 5, помещение 6;  
 ИНН/КПП 7717768952/770501001;  
 тел. 8-495-374-73-23;  
 E-mail: info@safect.ru

АКТ  
 внедрения результатов

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы Комаревцева Никиты Васильевича, выполненной в Академии ГПС МЧС России по теме: «Экспериментально-аналитическая методика определения уровня токсичности строительных материалов, применяемых на путях эвакуации при пожаре», были использованы при выполнении расчетов пожарного риска в рамках математического моделирования развития опасных факторов пожара.

В ходе внедрения были использованы экспериментально определённые автором:

- коэффициенты удельной массовой скорости выгорания;
- значения линейной скорости распространения пламени;
- удельные коэффициенты образования токсичных продуктов горения включая акролеин, монооксид углерода, фосген, хлороводород, оксиды азота, цианистый водород, полученные в условиях термического разложения строительных материалов в маломасштабной экспериментальной установке.

Указанные данные использованы для определения времени блокирования путей эвакуации при проектировании объекта: «Жилой дом с инженерными сетями и благоустройством территории (со сносом жилых зданий по адресам: Зелёный проспект, д.89, к.1, д.93 и д.95) по адресу: г. Москва, внутригородское муниципальное образование Ивановское, Зелёный проспект, земельный участок 93 (Восточный административный округ)».

Генеральный директор

24.07.2025г.



А.О. Шиночкина

**Общество с ограниченной ответственностью  
«ПроектИнвест»**

ИНН/КПП: 9723075639/772601001, 117570, г.Москва, вн.тер.г.муниципальный округ Чертаново Центральное,  
ул.Красного Маяка, д.15 к.5 кв.142, khisamutdinovrt@mail.ru, 8-916-106-64-47,  
СРО-П-180-06022013

**АКТ  
внедрения результатов**

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы, Комаревцева Никиты Васильевича выполненной в Академии ГПС МЧС России на тему: «Экспериментально-аналитическая методика определения уровня токсичности строительных материалов, применяемых на путях эвакуации при пожаре», были использованы при расчете значения пожарного риска для математического моделирования развития опасных факторов пожара, с целью определения времени блокирования путей эвакуации в ходе проектирования объекта: «Жилой дом с инженерными сетями и благоустройством территории (со сносом многоквартирного жилого дома по адресу: ул. Полярная д. 17, корп.1) по адресу: г. Москва, ул. Полярная, з/у 17/1 (ул. Полярная, вл. 17, корп.1) (Северо-Восточный административный округ)».

В ходе внедрения были использованы экспериментально определённые автором коэффициенты удельной массовой скорости выгорания, значения линейной скорости распространения пламени, удельные коэффициенты образования токсичных продуктов горения (включая акролеин, монооксид углерода, фосген, хлороводород, оксид азота, циановодород) полученные в условиях термического разложения строительных материалов в маломасштабной экспериментальной установке.

Вышеуказанные параметры позволяют количественно оценивать массовое выделение токсикантов при пожаре и могут использоваться в расчетах как исходные данные для моделирования динамики опасных факторов пожара, что повышает точность прогнозирования времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения.

Генеральный директор

*16.07.2025г.*



Хисамутдинов Р.Т.



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии  
ГПС МЧС России по учебной работе  
полковник внутренней службы

В.С. Шнышко

2025 г.

**АКТ**

внедрения результатов диссертации на тему «Экспериментально-аналитическая методика определения уровня токсичности строительных материалов, применяемых на путях эвакуации, при пожаре» адъюнкта факультета подготовки научно-педагогических кадров Академии ГПС МЧС России старшего лейтенанта внутренней службы Комаревцева Никиты Васильевича в учебный процесс Академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе заведующего кафедрой инженерной теплофизики и гидравлики, д.т.н. профессора, Пузача Сергея Викторовича; заместителя начальника кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, полковника внутренней службы Болдырева Евгения Николаевича; доцента кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, д.т.н. Лебедченко Ольги Сергеевны, подтверждает, что результаты диссертации Комаревцева Никиты Васильевича по научной специальности 2.10.1. «Пожарная безопасность» внедрены в учебный процесс кафедры инженерной теплофизики и гидравлики для проведения лекционных и практических занятий, а также лабораторных работ по дисциплине «Теплотехника и прогнозирование опасных факторов» для обучающихся по направлению подготовки 20.03.01. «Техносферная безопасность» профиль «Пожарная безопасность» по теме «Основы дифференциального метода прогнозирования опасных факторов пожара».

Заведующий кафедрой  
инженерной теплофизики и гидравлики  
доктор технических наук, профессор

С.В. Пузач

Заместитель начальника кафедры  
инженерной теплофизики и гидравлики  
полковник внутренней службы

Е.Н. Болдырев

Доцент кафедры  
инженерной теплофизики и гидравлики  
доктор технических наук, доцент

О.С. Лебедченко



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии  
ГПС МЧС России по научной работе  
доктор технических наук, профессор

М.В. Алешков

2026 г.

внедрения результатов диссертационной работы на соискание степени кандидата технических наук научного сотрудника научно-исследовательского отдела учебно-научного комплекса пожарной и аварийно-спасательной техники Академии ГПС МЧС России, старшего лейтенанта внутренней службы Комаревцева Никиты Васильевича

Комиссия в составе: начальника отдела организации научных исследований и научной информации, к.т.н., полковника внутренней службы Храмцова Сергея Петровича (председатель), профессора кафедры процессов горения, к.т.н., Комракова Петра Владимировича, доцента кафедры пожарной безопасности объектов в строительстве учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, к.т.н., Калмыкова Сергея Петровича, подтверждает, что результаты диссертационного исследования Комаревцева Никиты Васильевича были использованы при выполнении I этапа научно-исследовательской работы «Научное обоснование и формирование базы данных горючей нагрузки» (НИР «База данных», пункт 3.4 раздела I Плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области гражданской обороны, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, обеспечения пожарной безопасности, преодоления последствий радиационных аварий и катастроф на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов, утвержденного приказом МЧС России от 17 июля 2024 г. № 592, с изменениями от 11 июня 2025 г. № 497 и от 25 августа 2025 г. № 736).

Комаревцевым Н.В. были получены экспериментальные данные по показателям пожарной опасности напольных покрытий, что позволило расширить существующую базу данных горючей нагрузки.

**Председатель комиссии:**

Начальник ЦОНИИНИ

к.т.н., доцент

полковник внутренней службы


 Храмцов С.П.
**Члены комиссии:**

Профессор кафедры процессов горения

к.т.н., доцент


 Комраков П.В.

Доцент кафедры ПБС УНКПБОЗ

к.т.н., доцент

полковник внутренней службы


 Калмыков С.П.