

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)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» на кафедре инженерной теплофизики и гидравлики

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

Официальные оппоненты: **Барбин Николай Михайлович**  
доктор технических наук, доцент,  
Уральский институт ГПС МЧС России,  
научно-исследовательское отделение учебно-  
научного комплекса пожаротушения и  
проведения аварийно-спасательных работ,  
ведущий научный сотрудник  
**Гравит Марина Викторовна**  
кандидат технических наук, доцент,  
Санкт-Петербургский политехнический  
Университет Петра Великого, высшая школа  
промышленно-гражданского и дорожного  
строительства Инженерно-строительного  
института, доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России»

Защита состоится «23» июня 2026 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте: <https://academygps.ru/upload/iblock/62d/1nzyuwkf7oxfi8c8lkjjxj1a8fwkuqfk/Диссертация%20Комаревцева%20Н.В..pdf>

Автореферат разослан «15» апреля 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Соковнин Артем Игоревич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Отравление токсичными продуктами горения является одной из основных причин гибели людей при пожарах, составляя, по статистическим данным, до 60-80% всех летальных исходов. В 2022 г. от воздействия токсичных газов на пожаре погибло 3 977 человек, что подчёркивает необходимость учёта токсикологической обстановки при проектировании зданий, включая отделочные строительные материалы, применяемые на путях эвакуации.

Традиционно в качестве базового токсиканта рассматривается монооксид углерода, однако исследования показывают, что при пожаре в токсикологически значимых концентрациях образуется широкий спектр опасных веществ. В соответствии с требованиями Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», в таблицах 27 и 28 установлены обязательные нормативы по показателю токсичности для строительных материалов, применяемых на путях эвакуации. Это определяет необходимость проведения объективной оценки токсичности строительных материалов в условиях пожара.

Действующие методики оценки токсичности строительных материалов основаны на биологических испытаниях с использованием лабораторных животных, и морально, а также технологически устарели. Они не позволяют в полной мере оценить влияние комплекса токсикантов на условия безопасной эвакуации людей.

Существующие экспериментальные базы данных ограничены сведениями по небольшому числу токсичных газов (CO, CO<sub>2</sub>, HCl), что не учитывает потенциально опасные соединения, выделяющиеся при горении современных полимерных материалов. Отсутствие удельных коэффициентов образования ряда токсикантов препятствует их применению в математическом моделировании динамики опасных факторов пожара и расчёте времени блокирования путей эвакуации.

В этой связи разработка экспериментально-аналитической методики, позволяющей определять уровень токсичности строительных материалов при пожаре без использования животных, получать экспериментальные данные по образованию широкого спектра токсикантов и интегрировать их в расчёт времени блокирования путей эвакуации, является **актуальной научной и практической задачей**, имеющей важное значение для совершенствования нормативной базы и повышения уровня пожарной безопасности объектов защиты.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в формирование научных представлений о токсикологической опасности продуктов

горения строительных материалов, а также в развитие принципов и методов оценки их опасности внесли отечественные и зарубежные исследователи. Среди российских учёных следует отметить В.С. Иличкина, одного из ведущих специалистов по исследованию токсичности продуктов горения и разработке методик её определения, труды которого легли в основу требований ГОСТ 12.1.044-89; С.В. Пузача, изучавшего процессы термического разложения материалов и влияние их состава на выделение опасных газов; П.П. Щеглова, автора работ по изучению закономерностей образования токсичных продуктов горения и разложения полимеров; Д.В. Трушкина, автора работ, посвящённых оценке токсичности продуктов горения строительных материалов, сравнительному анализу методов испытаний, а также вопросам нормирования применения отделочных материалов на путях эвакуации; Ю.А. Кошмарова, внёсшего вклад в развитие теории опасных факторов пожара; и А.Н. Баратова, автора фундаментальных трудов по пожарной опасности веществ и материалов. Среди зарубежных учёных выделяются М.М. Hirschler, эксперт по токсикологии продуктов горения и международным стандартам их испытаний, и Т. Такака, специалист по математическому моделированию опасных факторов пожара.

В ряде исследований изучены процессы образования и распространения токсичных газов при горении различных материалов, разработаны методы их количественного определения и предложены подходы к прогнозированию динамики опасных факторов пожара.

Однако существующие методики, основанные преимущественно на биологических испытаниях с использованием лабораторных животных, имеют ограничения по воспроизводимости, масштабируемости и учёту всего спектра токсикантов. В настоящее время в мире отсутствуют научно обоснованные методики, позволяющие одновременно оценивать уровень токсичности строительных материалов в условиях пожара и формировать базу данных удельных коэффициентов образования широкого спектра токсичных газов. Наличие такой методики, базирующейся на критерии интегрирующим в себя параметры пожара, позволит включать полученные данные в инженерные расчёты времени блокирования путей эвакуации и повысить достоверность прогноза развития опасных факторов пожара.

**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 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;

Развитии и уточнении 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;

Создании 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.

**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.

**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).

**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.

**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.

**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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность и научно-практическая значимость темы диссертационной работы, представлен объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна работы, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных экспериментальных и численных данных, апробация работы и ее краткое содержание.

**В первой главе диссертации** «Анализ опасности токсикологического воздействия продуктов горения строительных материалов на человека во время эвакуации при пожаре» рассмотрены теоретические основы исследования токсикологической опасности строительных материалов при пожаре, а также нормативно-правовая база, регламентирующая требования к показателям токсичности. Проведён анализ действующих стандартов и законодательных актов, в том числе положений Федерального закона № 123-ФЗ, таблиц 27 и 28, определяющих предельно допустимые уровни выделения токсичных газов, и ГОСТ 12.1.044-2018, в основе которого лежат труды отечественных исследователей.

Рассмотрены фундаментальные представления о механизмах термического разложения органических и полимерных материалов, закономерностях образования и накопления токсикантов в помещении, а также влиянии газовой среды помещения на безопасность эвакуации людей при пожаре. Проанализированы научные исследования, посвящённые изучению кинетики выделения опасных газов, их взаимодействия между собой и с элементами внутренней отделки, особенностям распространения в ограниченных объёмах.

По результатам анализа обоснована необходимость разработки методического подхода, позволяющего учитывать широкий спектр токсичных газов при определении уровня токсичности строительных материалов и интегрировать полученные данные в инженерные расчёты времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара, а также сделаны следующие выводы:

Нормативные документы и программные средства расчёта пожарных рисков учитывают ограниченный набор токсикантов (СО, СО<sub>2</sub>, HCl), 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;

Отсутствуют данные по удельным коэффициентам образования большинства высокотоксичных газов, что делает расчет времени блокирования

путей эвакуации недостаточно объективным.

**Во второй главе** диссертации «Экспериментальные методы определения токсичности продуктов терморазложения строительных материалов» проведён развернутый анализ существующих методов определения токсичности продуктов горения строительных материалов, охватывающий как нормативные, так и ненормативные подходы, а также зарубежный опыт в данной области.

Вначале рассмотрены нормативные методы, закреплённые в действующих государственных стандартах и регламентах, включая ГОСТ 12.1.044-2018. Детально проанализированы используемые в них показатели, перечень учитываемых газообразных токсикантов, условия проведения испытаний, принципы отбора проб и расчёта интегрального показателя токсичности. Показано, что нормативные процедуры ориентированы в первую очередь на

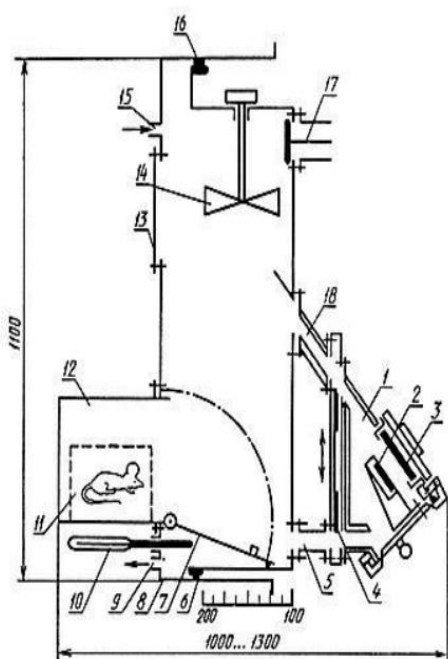


Рисунок 1 – Установка для определения показателя токсичности

- 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; 15 – клапан 16 – резиновая прокладка; 17 – клапан продувки.

ограниченный набор веществ ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ), и базируются исключительно на биологических испытаниях с использованием лабораторных мышей, проводимых на установке типа УТЖ, предназначенной для определения времени наступления гибели животных в герметичной камере с продуктами горения (рисунок 1). что не обеспечивает достаточной сходимости и повторяемости результатов в оценке токсикологической опасности, возникающей в реальных условиях пожара, где присутствует широкий спектр газов, включая цианистый водород, оксиды азота и другие соединения.

Проведённый анализ ненормативных методов показал, что в настоящее время существует широкий спектр подходов к оценке токсичности продуктов горения строительных материалов, различающихся как по принципам измерений, так и по технической реализации и степени детализации результатов.

Развитие экспериментально-расчётных и

инструментальных методов демонстрирует устойчивую тенденцию к переходу от биологических моделей к аналитическим подходам, использующим газоанализ и расчётные алгоритмы.

Наиболее прогрессивные методики позволяют учитывать совокупное поражающее действие многокомпонентных газовых смесей, определять удельные коэффициенты токсикантов и сопоставлять их с нормативными показателями без применения животных.

Вместе с тем установлено, что большинство существующих установок не предусматривает комплексного учёта таких параметров, как линейная скорость распространения пламени, массовая скорость выгорания образца и концентрация кислорода в газовой среде, что снижает точность и воспроизводимость оценки.

Анализ зарубежных методик оценки токсичности продуктов горения строительных материалов показал наличие широкого спектра научных и прикладных подходов, направленных на количественное и качественное определение токсичности дымовых газов в условиях пожара. Несмотря на то, что в большинстве международных стандартов, включая европейские классификации строительных материалов, токсичность не входит в перечень обязательных критериев для сертификации, данное направление активно развивается в рамках фундаментальных и прикладных исследований.

Ключевыми тенденциями зарубежных работ являются ориентация на измерение концентраций приоритетных летальных газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{NO}_x$  и др.), определение показателей  $\text{LC}_{50}$ , использование расчётных моделей, а также применение инструментальных методик - термогравиметрического анализа, инфракрасной спектроскопии и других высокоточных методов газоанализа. Особое внимание уделяется полимерным и азотсодержащим материалам, продукты горения которых проявляют высокую токсичность уже на начальных стадиях пожара.

Существенным направлением зарубежных исследований является моделирование реалистичных сценариев пожара с использованием полномасштабных и полумасштабных установок, а также учёт влияния температуры, вентиляции, кислородного режима, влажности и процессов сорбции газов на результаты испытаний. В ряде работ подчёркивается необходимость отказа от биологических методов в пользу экспериментально-расчётных и математических моделей, обеспечивающих высокую воспроизводимость и пригодность результатов для интеграции в инженерные расчёты.

В то же время выявлены методологические разногласия и отсутствие унифицированных международных стандартов, предусматривающих прямую классификацию строительных материалов по токсичности продуктов их горения. Это подтверждает актуальность задач стандартизации и расширения нормативной

базы с обязательным учётом токсикологической составляющей пожарной опасности.

Завершающая часть главы описывает проведённую модернизацию экспериментальной установки для определения удельных коэффициентов образования токсичных газов. Внесённые изменения включают усовершенствование системы отбора и транспортировки газовых проб, установку дополнительных сенсоров, обеспечивающих регистрацию широкого спектра токсичных продуктов горения, в том числе газов, ранее не поддававшихся фиксации на исходной конфигурации установки. На рисунке 2 представлена схема модернизированной экспериментальной установки.



Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной установки:

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

Система контроля газовой смеси в экспозиционной камере была модернизирована за счёт интеграции дополнительного газоаналитического оборудования в систему измерения. Ранее контроль осуществлялся с использованием газоанализаторов фирмы *Dräger*, обеспечивавших измерение оксида углерода (0-1% об.), монооксида углерода (0-5% об.), циановодорода (0-21% об.) и кислорода (0-21% об.) с допустимой погрешностью  $\pm 10\%$ .

В результате модернизации в состав системы введены два дополнительных газоанализатора - Эколаб (рисунок 3) и ГАНГ-4РБ (рисунок 4). Газоанализатор Эколаб позволяет определять хлороводород ( $0,02-250 \text{ мг/м}^3$ ), оксид азота ( $2,5-250 \text{ мг/м}^3$ ), кислород ( $10-30\%$ ), синильную кислоту ( $0,15-112 \text{ мг/м}^3$ ). Газоанализатор ГАНГ-4РБ обеспечивает определение диоксида серы ( $0,01-500 \text{ мг/м}^3$ ), фосгена ( $0,25-10 \text{ мг/м}^3$ ), акролеина ( $0,1-4 \text{ мг/м}^3$ ), угарного газа ( $10-400 \text{ мг/м}^3$ ), диоксида азота ( $1-40 \text{ мг/м}^3$ ) и диоксида углерода ( $4500-180\ 000 \text{ мг/м}^3$ ) с погрешностью  $\pm 10\%$ .

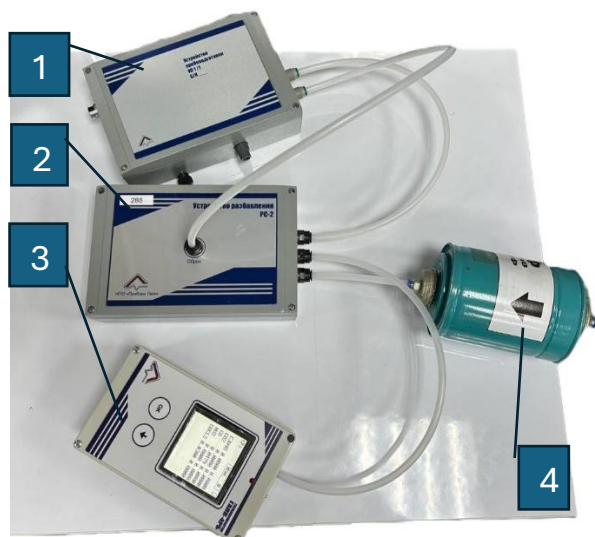


Рисунок 3 – Общий вид газоаналитического оборудования марки ГАНГ-4РБ:

1 – устройства пробоподготовки УП 1/1; 2 – разбавитель газовых потоков РС-2; 3 – газоанализатор ГАНГ 4РБ; 4 – фильтр сорбционный ФС-1.

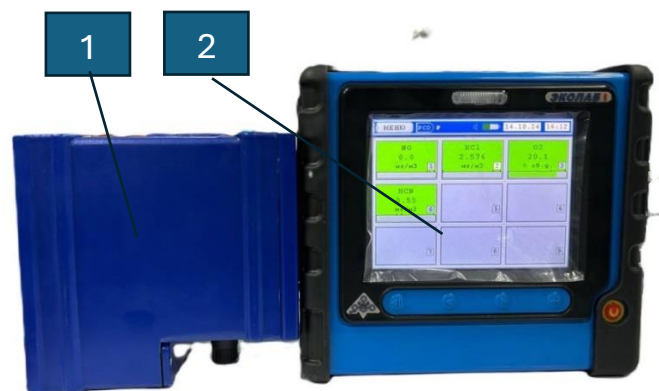


Рисунок 4 – Общий вид газоаналитического оборудования марки ЭКОЛАБ: 1 – Пробоотборное устройство ПР-37; 2 – Газоанализатор ЭКОЛАБ ПЛЮС.

Основные выводы по второй главе диссертации:

Проведён обзор существующих методов определения уровня токсичности продуктов горения строительных материалов, включая нормативные и ненормативные подходы, с выявлением их сильных и слабых сторон.

Установлено, что большинство используемых методик основано на биологических испытаниях с применением лабораторных животных, что вызывает этические вопросы и снижает воспроизводимость получаемых данных.

Проведена модернизация экспериментальной установки, позволяющая устранить существенные недостатки существующих методов, повысить точность измерений состава продуктов горения и расширить аналитические возможности.

На основе модернизации установки необходимо разработать экспериментально-расчетный метод исследования токсичности продуктов горения строительных материалов.

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.

**В третьей главе** диссертации «Ранжирование строительных материалов по токсичности для оценки возможности их применения на путях эвакуации с помощью расчета времени блокирования путей эвакуации» введён критерий токсикогенной опасности строительных материалов, позволяющий количественно оценивать их влияние на формирование токсической нагрузки в условиях пожара. Уникальность разработанного критерия заключается в том, что он учитывает дополнительные параметры, не охватываемые действующими нормативными методиками, включая удельные коэффициенты образования токсичных газов, линейную скорость распространения пламени и удельные коэффициенты газификации. Это обеспечивает более полное и достоверное отражение реальной токсической опасности материалов.

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

$$V \frac{d\rho}{d\tau} = \eta\Psi L, \quad (1)$$

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:

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

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 (1) с учётом зависимости (2) позволяет сформулировать точную зависимость времени, за которое эвакуационные пути будут заблокированы токсичными газами:

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

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) 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.

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

$$K_{\text{то}} = \frac{\tau^*}{\tau_{\text{бл}}} = \tau^* \left( \frac{\pi w^2 \Psi_o L}{3\rho_{\text{кр}} V} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

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

$\tau^*$  - расчётное время эвакуации, с.

Проведён анализ имеющейся базы данных типовой пожарной нагрузки через призму нового критерия токсикогенной опасности. Для детального исследования была определена зависимость времени блокирования путей эвакуации токсичным газом от величины удельного коэффициента образования токсичных продуктов горения. Расчёты выполнены с использованием формулы (3), при этом в качестве примера выбран монооксид углерода как газ, данные по которому в базе данных представлены для каждой пожарной нагрузки.

По графику (рисунок 5) установлено, что при увеличении удельного коэффициента образования монооксида углерода время блокирования путей эвакуации изменяется неоднозначно: оно может как уменьшаться, так и увеличиваться в зависимости от характеристик пожарной нагрузки (линейной скорости распространения пламени и коэффициентов газификации).

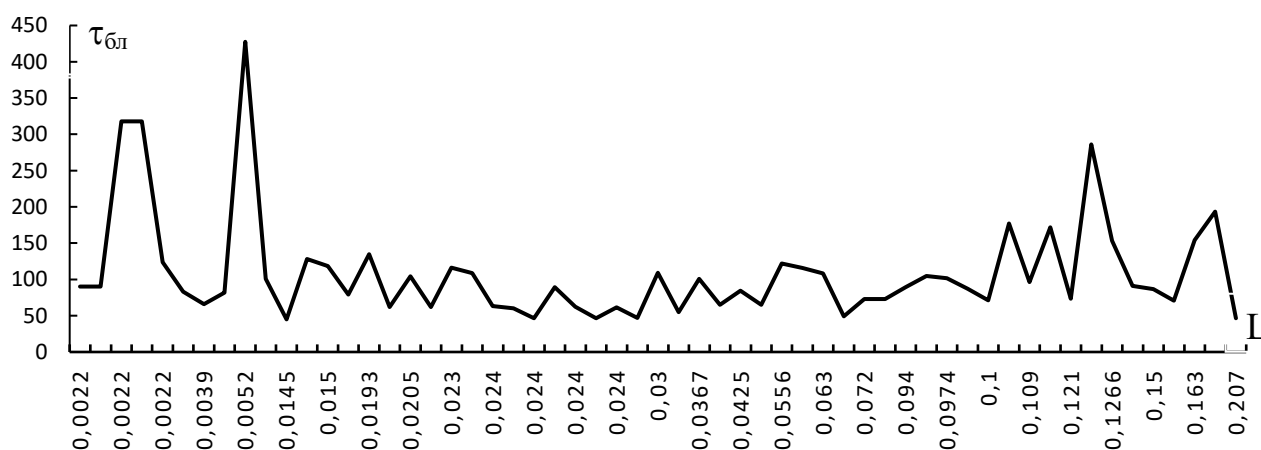


Рисунок 5 – Зависимость времени блокирования путей эвакуации ( $\tau_{\text{бл}}$ ) монооксидом углерода от удельного коэффициента образования CO ( $L$ )

После этого для пожарных нагрузок «Шерсть + нейлон» и «Линолеум» проведены экспериментальные исследования по нормативной методике (по три эксперимента для каждой нагрузки) и выполнен сравнительный анализ

полученных данных с результатами, рассчитанными по предложенному критерию токсикогенной опасности (рисунок 6, 7). Анализ базы данных пожарной нагрузки экспериментально подтверждён. Сделан вывод, что стандартные методы испытаний не позволяют адекватно оценить реальную токсичность материалов при пожаре, поскольку ориентированы лишь на удельные коэффициенты образования отдельных газов и не учитывают динамику их накопления (результаты приведены в таблице 1).

Таблица 1 – Результаты оценки уровня токсичности продуктов горения.

Исследуемый материал	Группа токсичности	Удельная скорость газификации, $\Psi_0$ , кг/(с·м <sup>2</sup> )	Удельный коэффициент образования СО, $L$	Время блокирования путей эвакуации по СО, $\tau_{бл}$ , с	Критерий токсикогенной опасности, $K_{то}$
Бумажно-слоистый пластик	T3	0,0015	0,24	274,9	0,218
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

Новый подход учитывает скорость распространения пламени, газификации и образование токсичных газов, повышая точность прогнозирования времени блокирования путей эвакуации и безопасность людей.



Рисунок 6 - Образцы пожарной нагрузки «Шерсть+нейлон» и «Линолеум» до (слева) и после (справа) испытаний.

После этого на модернизированной установке (рисунок 2) и установке по определению линейной скорости распространения пламени были проведены экспериментальные исследования для пожарных нагрузок «Ковер из синтетических нитей» и «Линолеум

поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» (рисунки 7, 8).



Рисунок 7 - Образцы ковра и линолеума ПВХ до и после токсикологических испытаний.



Рисунок 8 - Ковер и линолеум ПВХ до/после испытаний на линейную скорость распространения пламени.

Результаты показали высокую токсичность продуктов горения материалов на путях эвакуации. Для ковра из синтетических нитей критичен циановодород, для линолеума ПВХ на ингибированной подоснове - хлороводород (таблицы 2, 3).

Таблица 2 – Распределение времени блокирования путей эвакуации токсичными газами в зависимости от параметров для ковра из синтетических нитей.

Токсичный газ	Время блокирования путей эвакуации, с	Критическая плотность 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
HCN	107,66	0,00001	0,015	0,0035	0,02

Таблица 3 – Распределение времени блокирования путей эвакуации токсичными газами в зависимости от параметров для линолеума ПВХ на ингибированной подоснове.

Токсичный газ	Время блокирования путей эвакуации, с	Критическая плотность 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
HCL	59,87	0,000023	0,0064	0,02	0,0192
NO	261,66	0,001	0,0064	0,02	0,01
HCN	74,69	0,00001	0,0064	0,02	0,0043

Динамика изменения парциальной плотности токсичных компонентов и коэффициента их образования при горении ковра и линолеума ПВХ представлена на рисунках 9, 10:

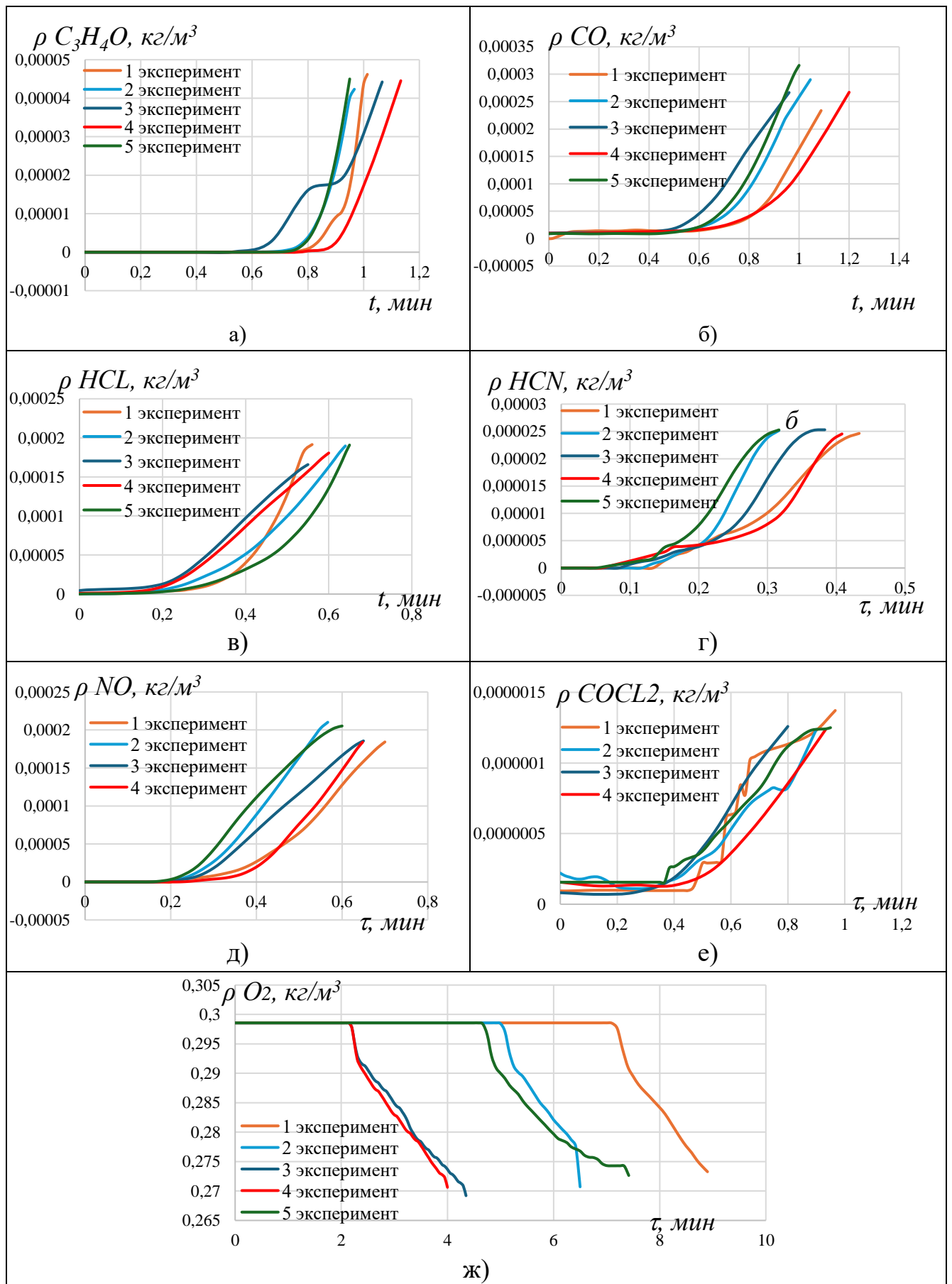


Рисунок 9 – Зависимость от времени при горении пожарной нагрузки «Ковер из синтетических нитей» парциальной плотности: а – акролеина; б – монооксида углерода; в – хлороводорода; г – циановодорода; д – оксида азота; е – фосгена; ж – кислорода.

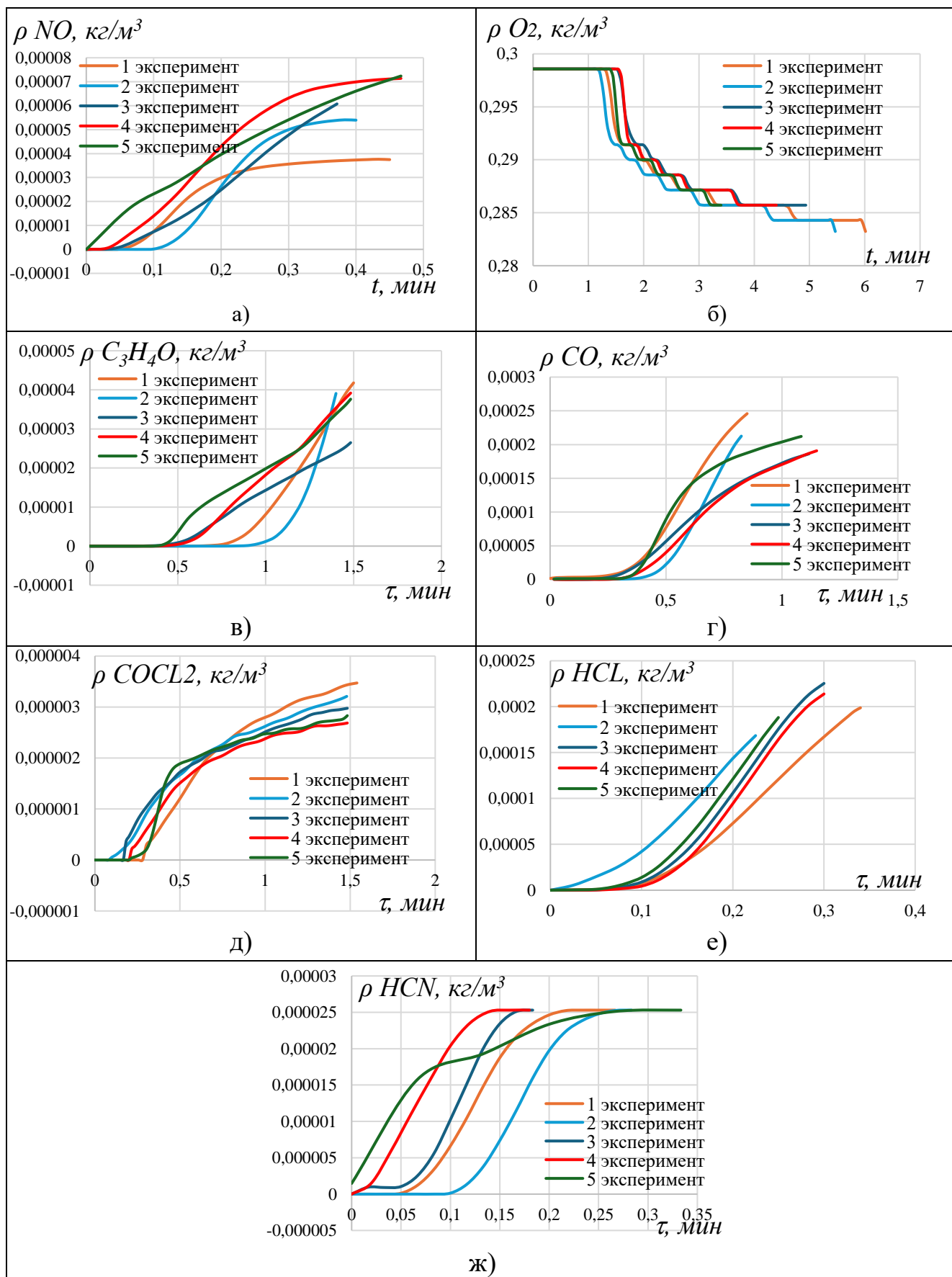


Рисунок 10 – Зависимость от времени при горении пожарной нагрузки «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» удельных коэффициентов образования: а – оксида азота; б – кислорода; в – акролеина; г – монооксида углерода; д – фосгена; е – хлороводорода; ж – циановодорода.

Предложена система классификации строительных материалов на основе расчёта интегрального критерия токсикогенной опасности ( $K_{то}$ ), учитывающего параметры горения и влияние токсичных газов на условия эвакуации. Материал допускается к применению, если  $K_{то} < 1$ , и запрещается при  $K_{то} \geq 1$ .

Система достаточно легко интегрируется в действующие нормы, т.к. выбор строительных материалов для отделки путей эвакуации проводится на этапе проектирования новых и реконструируемых объектов, для которых в подавляющем большинстве случаев выполняется оценка пожарного риска, содержащая расчётное время эвакуации, интегрируемое в предложенную систему ранжирования строительных материалов.

Для исследуемых материалов (ковёр из синтетических нитей и линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове) была выполнена оценка допустимости применения в зальном помещении.

Для этого выполнено моделирование эвакуации для рассматриваемого зального помещения в программном комплексе Pathfinder. Рассмотрено помещение класса Ф2.2 (музеи, выставки, танцевальные залы) с расчётной плотностью 1 человек на 1,35 м<sup>2</sup> площади. Процесс эвакуации проиллюстрирован рисунками 11-12.

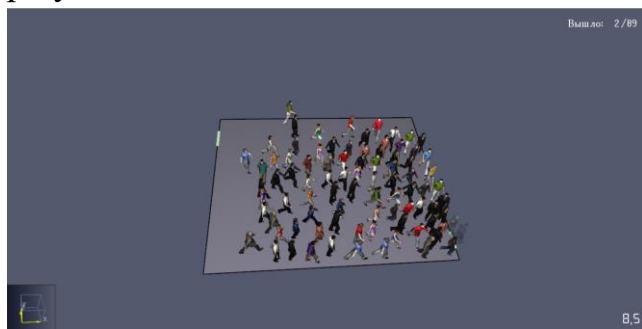


Рисунок 11 – Процесс эвакуации на момент времени 8,5с.

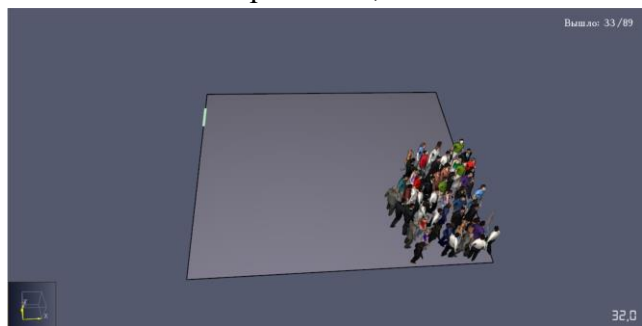


Рисунок 12 – Процесс эвакуации на момент времени 32с.

Время эвакуации составило 76 секунд. Для «Ковра из синтетических нитей» время блокирования путей эвакуации  $\tau_{бл} = 107$  с, расчётное время эвакуации  $\tau^* = 76$  с,  $K_{то} = 0,87 < 1$ , материал допустим. Для «Линолеума поливинилхлоридного на ингибированной подоснове»  $\tau_{бл} = 59$  с,  $\tau^* = 76$  с,  $K_{то} = 1,58 > 1$ , материал недопустим.

Согласно действующей методике, «Ковёр из синтетических нитей» относится к группе токсичности Т3, а «Линолеум поливинилхлоридный на ингибированной подоснове» — к Т2. По таблице 29 Федерального закона №123-ФЗ применение ковра в зале класса Ф2.2

с вместимостью 15-300 человек запрещено, а линолеум допускается. При использовании предложенного подхода на основе критерия  $K_{то}$  получен обратный результат, показывающий, что действующая методика не всегда отражает реальные риски для безопасности людей при эвакуации на пожаре.

В качестве практических рекомендаций предложена система оценки применимости строительных материалов на путях эвакуации, которая позволяет оценить параметры объемно-планировочных решений в зависимости от скорости газификации и других факторов горения. Предложена расчётная формула (7), выведенная из выражений (5) и (6).

$$K_{\text{то}} = \frac{1.1\tau^*}{0.9\tau_{\text{бл}}} = \frac{1.1\tau^*}{0.9} \left( \frac{\pi\omega^2\psi_0 L}{3q_{\text{кр}}V} \right)^{\frac{1}{3}} = 1, \quad (5)$$

$$\frac{\tau^*}{V^{\frac{1}{3}}} \leq \frac{0.9}{1.1} 0.9 \left( \frac{3q_{\text{кр}}}{\pi\omega^2\psi_0 L} \right)^{\frac{1}{3}} = K', \quad (6)$$

$$\frac{\tau^*}{V^{\frac{1}{3}}} = K'. \quad (7)$$

В выражении (7) используется преобразованная форма основного уравнения (4), где обе стороны приведены к одной размерности для прямого сравнения. Если левая часть  $\leq$  правой, материал допускается к применению, так как эвакуация завершится до достижения критической концентрации токсичных газов. Если левая часть  $>$  правой, материал недопустим, так как токсичный газ блокирует эвакуационные пути раньше завершения эвакуации.

Метод удобен для проектирования, благодаря прикладной направленности и простоте использования. Параметры левой части выражения доступны на стадии проектирования: расчётное время эвакуации определяется при обязательной оценке пожарного риска, а объём помещения известен из объемно-планировочных решений. Правая часть зависит от свойств материала и определяется по экспериментальным данным или из открытых источников.

Таким образом, проектировщик может оценить возможность применения строительного материала на путях эвакуации в зависимости от объема помещения. Методика легко интегрируется в существующую практику проектирования, учитывает характеристики материалов и планировочные решения, повышая общую пожарную безопасность зданий.

## 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 ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ). 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 (CO, HCN, HCl, C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O, COCl<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.

**Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:**

1. Комаревцев, Н. 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 XENRKA.

2. Комаревцев, Н. В. Сравнительный анализ нового экспериментально-теоретического подхода и нормативных методов определения токсичности продуктов горения полимерных материалов / 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.

3. Комаревцев, Н. В. Система градации строительных материалов по токсичности продуктов горения для оценки условия выполнения безопасной эвакуации людей при пожаре / С. В. Пузач, Н. В. Комаревцев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2025. – № 2. – С. 16-25. – DOI 10.25257/FE.2025.2.16-25. – EDN NTYKSF.

**Остальные публикации по теме диссертационной работы:**

4. Комаревцев, Н. В. Новый подход к испытаниям на токсичность продуктов горения веществ и материалов при пожаре / Н. В. Комаревцев, С. В. Пузач // Общенаучные проблемы инженерной подготовки кадров МЧС России : Сборник трудов секции № 15 XXXIII Международной научно-практической конференции, Химки, 01 марта 2023 года. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России имени генерал-лейтенанта Михайлика Д.И., 2023. – С. 90-93. – EDN SBZKMA.

5. Комаревцев, Н. В. Определение уровня токсичности продуктов горения веществ и материалов при пожаре с точки зрения блокирования пути эвакуации / Пузач С. В., Комаревцев Н. В. // Ройтмановские чтения : Сборник материалов XI научно-практической конференции, Москва, 21 марта 2023 года / Под редакцией Самошина Д. А.. – Москва: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2023. – С. 43-46. – EDN VCFONP.

6. Комаревцев, Н. В. Экспериментальные методы определения параметров базы данных горючей нагрузки для моделирования пожара / Р. Г. Акперов, С. В. Пузач, О. Б. Болдрушкиев [и др.] // Пожсофт 2023 : Сборник докладов III научно-практической конференции по программному обеспечению для решения задач пожарной безопасности, Москва, 16-17 ноября 2023 года. – Москва: Автономная некоммерческая организация Научно-методический координационный центр разработки и применения программного обеспечения в области пожарной безопасности «ПожСофт», 2023. – С. 7-11. – EDN HBJRNZ.

7. Комаревцев, Н. В. Классификация горючих материалов по токсичности продуктов горения на основе моделирования динамики распространения опасных факторов пожара / С. В. Пузач, Н. В. Комаревцев, Р. Г. Акперов, О. Б. Болдрушкиев // Ройтмановские чтения : Сборник материалов XII научно-

практической конференции, Москва, 03 апреля 2024 года. – Москва: Академия государственной противопожарной службы, 2024. – С. 114-118. – EDN BWJOUV.

8. Комаревцев, Н. В. Методы определения параметров базы данных типовой горючей нагрузки, необходимой для моделирования пожара / Р. Г. Акперов, С. В. Пузач, О. Б. Болдрушкиев [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности: Материалы XXXVI Международной научно-практической конференции, посвященной 375-й годовщине образования пожарной охраны России, Москва, 31 мая 2024 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС РФ, 2024. – С. 681-687. – EDN RFYELG.

9. Комаревцев, Н. В. Ранжирование горючих веществ и материалов по времени блокирования путей эвакуации токсичными газами / Пузач С. В., Комаревцев Н. В. // Современные проблемы обеспечения безопасности : Сборник материалов XXVI Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 24-25 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2024. – С. 72-77. – EDN DWYLCN.

10. Комаревцев, Н. В. Новые подходы к определению пожароопасных свойств веществ и материалов для моделирования динамики опасных факторов пожара / С. В. Пузач, Р. Г. Акперов, [и др.] // Пожсофт 2024: Сборник докладов IV научно-практической конференции по программному обеспечению для решения задач пожарной безопасности, Москва, 14-15 ноября 2024 года. – Москва: ООО «Научно-методический центр «ПожСофт», 2024. – С. 42-47. – EDN GDKYRY.

11. Комаревцев, Н. В. Градация строительных материалов по токсичности продуктов горения для оценки безопасности эвакуации людей при пожаре в зданиях и сооружениях / Ройтмановские чтения: Сборник материалов XIII научно-практической конференции, Москва, 20 марта 2025 года. – Москва: Академия государственной противопожарной службы МЧС России, 2025. – С. 67-72. – EDN EBXJZW.

12. Комаревцев, Н. В. Интеграция нового критерия токсикогенной опасности в проектирование для обеспечения безопасных объемно-планировочных решений зданий / Экологические проблемы XXI века: Материалы XVII научно-практической конференции слушателей и молодых ученых, Москва, 29 мая 2025 года. – Москва: Академия государственной противопожарной службы, 2025. – С. 99-102. – EDN MFGHLS.

Подписано в печать 08.04.2026. Формат 60×84/1/16

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 515

Академия ГПС МЧС России. 129366 г. Москва, ул. Б. Галушкина,4