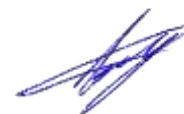


На правах рукописи



Мустафин Валихан Мухтарович

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ
ЭВАКУАЦИИ ПО ПОТЕРЕ ВИДИМОСТИ В ДЫМУ НА ОБЪЕКТАХ
ЭНЕРГЕТИКИ**

Специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность»
(технические науки, отрасль энергетика)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

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:

Таранцев Александр Алексеевич
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский
университет ГПС МЧС России,
кафедра организации пожаротушения и
проведения аварийно-спасательных
работ, профессор

Карпов Алексей Васильевич
кандидат технических наук,
ФГБУ ВНИИПО МЧС России, отдел
моделирования пожаров и
нестандартного проектирования,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится «28» июня 2022 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 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/c93/c935bc2ceb5632c17b422c0ad3f16039.pdf>

Автореферат разослан «27» апреля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.Б. Сивенков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Рост уровня потребления электроэнергии во всем мире способствует модернизации устаревших и увеличению количества новых объектов энергетики. Обеспечение пожарной безопасности на данных объектах является особо важной задачей, так как пожары на них могут нанести большой ущерб в тех сферах, где электроснабжение является неотъемлемой потребностью. Помимо этого, пожары на объектах энергетики являются угрозой для жизни и здоровья находящихся там людей. Особую опасность при пожаре на данных объектах представляет снижение видимости в дыму, так как данный опасный фактор пожара, как правило, достигает критических значений для человека раньше других. Потеря видимости в дыму является одной из причин получения механических травм и гибели людей на особо опасных участках объектов энергетики.

Существующие данные по дымообразующей способности веществ и материалов получены в маломасштабных установках, однако обоснования возможности их использования при математическом моделировании пожаров в полномасштабных реальных помещениях фактически нет. Кроме того, отсутствуют данные по вышеуказанному параметру для современных веществ и материалов, используемых на объектах энергетики.

Таким образом, разработка методики определения времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму, учитывающей масштабный фактор и свойства современных горючих веществ и материалов, в целях обеспечения безопасной эвакуации людей из производственных зданий на объектах энергетики, **является актуальной научной и практической задачей.**

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в понимание термогазодинамической картины пожара и обеспечение безопасной эвакуации людей из помещений внесли Ю.А. Кошмаров, Ю.А. Поляков, С.В. Пузач, В.И. Присадков, В.М. Есин, D.Drysdale, W. K. Chow, T. Tanaka, S. Yamada, K. Matsuyama, G.D. Lougheed и др.

В разработку научных основ теории образования и распространения продуктов горения, снижения видимости в дыму совместное их влияние на организм человека, методов испытаний и контроля пожароопасных свойств веществ и материалов внесли Ю.С. Зотов, С.В. Пузач, Л.К. Исаева, Н.В. Ландышев, Т.Г. Меркушкина, В.В. Гулак, Е.Н. Покровская, В.А. Ушков, Д.В. Трушкин, С.Л. Барботько и др.

Однако на данный момент эти задачи полностью не решены с теоретической и экспериментальной точек зрения из-за сложности процесса образования и распространения дыма, определения его оптических свойств при горении современных конденсированных веществ и материалов.

Научно-обоснованные методики определения исходных данных для моделирования времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму отсутствуют.

Таким образом, необходимы теоретические и экспериментальные исследования дымообразующей способности современных веществ и материалов, используемых на объектах энергетики.

Объектом исследования в диссертации является тепломассообменные процессы, протекающие при горении конденсированных веществ и материалов, применяемых на объектах энергетики.

Предметом исследования время блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики.

Целью исследования является разработка методики расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики на основе экспериментально-теоретического исследования дымообразующей способности современных веществ и материалов, используемых на объектах энергетики, а также величин оптической плотности дыма, образующихся при горении вышеуказанных веществ.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие основные задачи:

- провести анализ литературных источников по определению дымообразующей способности конденсированных веществ и материалов, по влиянию потере видимости в дыму на процесс эвакуации человека, по методам испытаний веществ и материалов на показатели пожарной опасности;

- разработать модификации интегральной и зонной математических моделей, использующие эмпирические зависимости оптической плотности дыма от температуры, для расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре на объектах энергетики с учетом масштабного фактора;

- модифицировать установку по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов и выполнить экспериментальные исследования параметров процесса дымообразования при горении современных веществ и материалов, используемых на объектах энергетики;

- разработать методику расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму с использованием модифицированных интегральных и зонных моделей, а также полученных экспериментальных данных с учетом масштабного фактора;

- разработать научно обоснованные рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму с учетом реальной пожарной нагрузки, объемно-планировочных и конструктивных особенностей объектов энергетики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложено усовершенствование стандартной схемы испытаний на определение дымообразующей способности, позволяющее в дополнение к измерениям оптической плотности продуктов горения измерять удельную массовую скорость выгорания горючего материала и температуру газовой среды, необходимые при расчете времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму;

- разработаны модификации интегральной и зонной моделей, используемых при расчете времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму, в которых с учетом масштабного фактора используются экспериментальные зависимости оптической плотности дыма от температуры;

- получены для современных веществ и материалов, используемых на объектах энергетики, новые экспериментальные данные по величине дымообразующей способности, а также по зависимости оптической плотности дыма от среднеобъемной температуры, необходимые при расчете времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- совершенствовании научных основ обеспечения безопасной эвакуации людей при пожаре в производственных зданиях объектов энергетики.

Практическая значимость работы заключается в:

- модификации установки по определению пожарной опасности веществ и материалов при их термическом разложении, применяющихся в строительстве, на основе оценки оптических свойств продуктов горения по данным фотометрического анализа с использованием усовершенствованной методики проведения огневых испытаний, что позволит расширить базу данных горючей нагрузки по свойствам современных конденсированных веществ и материалов;

- созданию методики расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на основе модифицированных интегральной и зонной моделей, используемых для расчета пожарных рисков, которая учитывает новые экспериментальные данные для современных веществ и материалов, используемых на объектах энергетики.

Методология и методы исследования. Методологическую и теоретическую основы диссертационных исследований составили труды ученых в области прогнозирования ОФП, тепломассообмена и научные разработки, посвященные методам огневых испытаний на определение оптической плотности дыма и коэффициента дымообразования конденсированных веществ и материалов.

К основным методам данного исследования относятся: численные методы решения систем дифференциальных уравнений, методы тепломассообмена и газодинамики, экспериментальные методы тепломассообмена, методы обработки и анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

- усовершенствованная стандартная схема испытаний на определение дымообразующей способности, позволяющая в дополнение к измерениям оптической плотности продуктов горения измерять удельно массовую скорость выгорания горючего материала;

- модифицированная установка по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов при их термическом разложении, позволяющая оценить оптическую плотность дыма, коэффициент дымообразования и удельную массовую скорость выгорания с использованием усовершенствованной методики проведения огневых испытаний;

- результаты экспериментов и сопоставления экспериментальных и теоретических данных по дымообразующей способности, а также по зависимости оптической плотности дыма от среднеобъемной температуры, экспериментальные данные по удельной массовой скорости выгорания для оболочек кабелей, поливинилхлорида и древесины (сосна) в условно герметичном объеме;

- модифицированная зонная и интегральная модели, в которых используется экспериментальные зависимости оптической плотности продуктов горения от температуры или парциальной плотности кислорода, позволяющие не решать дифференциальное уравнение закона сохранения оптической плотности;

- методика расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики, разработанная на основе модифицированных интегральной и зонной моделей с учетом масштабного фактора и учитывающая экспериментальные данные для современных веществ и материалов, используемых на объектах энергетики;

- результаты численных экспериментов по сравнению снижения уровня видимости в дыму в полномасштабных производственных зданиях объектов энергетики и маломасштабной экспериментальной установке;

- научно обоснованные рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму с учетом реальной пожарной нагрузки, объемно-планировочных и конструктивных особенностей объектов энергетики.

Степень достоверности полученных результатов. Результаты, показанные в данной работе, были получены при использовании: поверенных средств измерений, апробированных физико-математических методов обработки результатов огневых испытаний и численного решения дифференциальных уравнений. Полученные эмпирические результаты исследования имеют достаточно точное для инженерных методов расчета совпадение с теоретическими данными, приведенными в литературных источниках и полученными автором лично.

Апробация работы. Основные результаты были доложены на 15 научных конференциях и семинарах: XI-ой Московской научно-практической конференции «Студенческая наука - 2016» (Москва, НИМГСУ, 2016); XXV-ой международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2016» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016); VI-ой международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017); XX-ой международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, НИУ МГСУ, 2017); VIII-ой международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести» (Алматы 2017); VII-ой научно-практической конференции «Ройтмановские чтения» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019); VIII-ой международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ-2019» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019); IX-ой международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести» (Минск,

Университет Гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, 2019); XXVIII-ой международной научно-технической конференции «СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ – 2019» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019); VIII-ой научно-практической конференции «Ройтмановские чтения» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2020); VIII-ой международной научно-практической конференции «Исторические аспекты, актуальные проблемы и перспективы развития гражданской защиты» (Кокшетау, КТИ КЧС МВД Республики Казахстан, 2020); IX-ом международном научном семинаре «Пожарная безопасность объектов хозяйствования» (Кокшетау, КТИ КЧС МВД Республики Казахстан, 2020); XI-ой международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» (Кокшетау, КТИ КЧС МВД Республики Казахстан, 2020); III-ой международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, МЭИ, 2020); X-ой международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2021».

Практическая реализация работы. Материалы диссертации реализованы при:

- разработке фондовых лекций, проведении лекционных, лабораторных и практических занятий со слушателями, курсантами и студентами Академии ГПС МЧС России по дисциплинам «Теплотехника и прогнозирование опасных факторов пожара» и «Прогнозирование опасных факторов пожара» по темам «Зонная математическая модель пожара» и «Дополнительные соотношения зонной математической модели пожара»;

- проведении научных исследований по развитию и совершенствованию огневых испытаний веществ и материалов по определению оптической плотности дыма и коэффициента дымообразования (НИР Академии ГПС МЧС России);

- проектировании системы дымоудаления в машинном зале Нововоронежской АЭС, расположенной по адресу: Россия, Воронежская область, г. Нововоронеж, промзона и Курской АЭС-2, расположенной по адресу: Курская область, площадка «Макаровка»;

- расчете пожарных рисков и разработке плана безопасной эвакуации людей при пожаре на Нововоронежской АЭС, расположенной по адресу: Россия, Воронежская область, г. Нововоронеж, промзона и Курской АЭС-2, расположенной по адресу: Курская область, площадка «Макаровка».

Публикации. Материалы диссертационной работы изложены в 23 научных работах, их них – 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований, 1 статья в международном рецензируемом журнале из перечня Scopus, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и двух приложений. Содержание работы изложено на 131 страницах машинописного текста, включает в себя 58 рисунков, 11 таблиц. Список литературы включает 110 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проанализированы объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научная новизна работы и ее практическая значимость, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных в результате экспериментов данные, апробация работы, приведено краткое содержание работы.

В первой главе диссертации «Анализ опасности снижения видимости в дыму при пожаре на объектах энергетики» проведен обзор и анализ литературных источников, согласно следующим направлениям: пожарная опасность объектов энергетики, методики определения дымообразующей способности конденсированных веществ и материалов, а также расчетные методы определения времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

Объекты энергетики представляют собой последовательно расположенные технические сооружения и оборудование, необходимые для обеспечения производства электроэнергии (ТЭЦ, ГЭС, АЭС и т.п.). На объектах энергетики, основную опасность с точки зрения пожарной безопасности представляют производственные здания, достаточно развитые по вертикали и горизонтали (признаки атриума).

Из проведенного анализа пожароопасных веществ и материалов, применяемых на объектах энергетики, которые могут послужить причиной возникновения и дальнейшего распространения пожара были отмечены следующие: трансформаторные масла, контрольные кабели, силовые кабели, слаботочные кабели сигнализации и связи.

Очагами пожаров на объектах энергетики как правило становятся электрогенераторы, каналы кабельные, контрольное электрооборудование, силовые установки, трансформаторы.

Проведен анализ опасности снижения видимости в дыму при пожаре на объектах энергетики. Большинство веществ и материалов, применяемых на объектах энергетики согласно существующей базе данных типовой пожарной нагрузки, имеют высокий показатель дымообразующей способности.

Проанализированы современные отечественные и зарубежные методы и методики оценки дымообразующей способности конденсированных веществ и материалов. Выявлены имеющиеся отличия методик и их недостатки.

К основным недостаткам рассмотренных методик оценки дымообразующей способности конденсированных веществ и материалов можно отнести:

- отсутствие измерения массы образца во время проведения огневых испытаний, что исключает возможность определения удельной массовой скорости выгорания и оценить ее влияние на состав продуктов горения и как следствие на их оптическую плотность;

- не учитываются в полной мере влияние размеров и формы образца на процесс терморазложения и оптическую плотность продуктов горения;

- отсутствие точек измерения температуры внутри экспозиционной камеры для определения среднеобъемной температуры продуктов горения.

Проведен анализ воздействия снижения видимости в дыму на человека и

его организм в условиях стресса.

Выполнен анализ результатов расчетов, посредством аналитических соотношений, времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики.

На основании обзора литературных источников сделаны следующие основные выводы:

– для повышения точности расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму необходимо увеличить точность измерения дымообразующей способности для веществ и материалов с низкой дымообразующей способностью;

– выявленные недостатки существующих методов определения оптической плотности и дымообразующей способности конденсированных веществ и материалов свидетельствуют о необходимости их совершенствования.

Во второй главе диссертации «Методы расчета оптической плотности дыма на путях эвакуации при пожаре на объектах энергетики» приведены разработанные модифицированные математические модели и методика расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики. Представлены основные уравнения и условия однозначности интегральной модели расчета термогазодинамики пожара в помещении.

В условно герметичном объеме законы сохранения энергии, оптической плотности дыма и массы кислорода соответственно имеют вид:

$$V \frac{d}{d\tau} (\rho_m c_p T_m) = \eta \psi Q_H^p (1 - \varphi), \quad (1)$$

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = D_m \psi, \quad (2)$$

$$V \frac{d\rho_{O_2m}}{d\tau} = -\eta \psi L_{O_2}, \quad (3)$$

где τ – время, с; T_m – среднеобъемная температура, К; c_p – удельная изобарная теплоемкость газовой среды, Дж/(кг·К); ρ_m – среднеобъемная парциальная плотность газовой среды, кг/м³; η – полнота сгорания; ψ – массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с; Q_H^p – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; φ – коэффициент теплопотерь от газовой среды объема в его стенки; μ_m – среднеобъемная оптическая плотность дыма, Нп/м; D_m – удельный коэффициент дымообразования горючего материала, Нп·м²/кг; ρ_{O_2m} – среднеобъемная парциальная плотность кислорода, кг/м³; L_{O_2} – удельный коэффициент потребления кислорода.

Начальные условия (при $\tau = 0$) для дифференциальных уравнений (1-3):

$$T_m = T_0$$

где T_0 – температура в помещении перед пожаром, К

Совместно решая уравнения (1) и (2) и учитывая, что в герметичном объеме $\rho_m \approx \rho_a$, можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры:

$$\mu_m = K_1 (T_m - T_a), \quad (4)$$

где $K_1 = \frac{D_m \rho_a c_p}{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}$ – коэффициент пропорциональности, Нп/(м·К); ρ_a –

плотность воздуха в объеме перед горением, кг/м³; T_a – температура воздуха в объеме перед горением, К.

После совместного решения уравнений (2) и (3) получаем зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода:

$$\mu_m = K_2 (\rho_{O_2a} - \rho_{O_2m}), \quad (5)$$

где $K_2 = \frac{D_m}{\eta L_{O_2}}$ – коэффициент пропорциональности, Нп·м²/кг; ρ_{O_2a} –

среднеобъемная парциальная плотность кислорода в воздухе, кг/м³.

Из уравнений (4) и (5) видно, что величина среднеобъемной оптической плотности дыма прямо пропорциональна изменениям среднеобъемной температуры и среднеобъемной парциальной плотности кислорода, а также она не зависит от размеров помещения. Поэтому зависимости (4) и (5) могут использоваться при расчете как в маломасштабном, так и в полномасштабном помещении. В случае аналитического решения интегральной модели, когда проемы работают только на выброс газовой среды помещения наружу, аналитические решения на основе законов сохранения энергии для оптической плотности дыма и массы кислорода соответственно имеют вид:

$$\frac{T_m}{T_a} = \exp\left(\frac{A}{B} \tau^n\right), \quad (6)$$

$$\mu_m = \mu_* \left[1 - \exp\left(-\frac{A}{B} \tau^n\right) \right], \quad (7)$$

$$\rho_{O_2m} = \frac{B \eta L_{O_2}}{V} \left\{ \left(1 + \frac{V}{B \eta L_{O_2}} \rho_{O_2a} \right) \exp\left[-\frac{A}{B} \tau^n\right] - 1 \right\}, \quad (8)$$

где $\mu_* = \frac{c_p \rho_a T_a D_m}{\eta (1 - \varphi) Q_H^p}$ – характерная оптическая плотность, Нп/м; $B = \frac{c_p \rho_0 T_0 V}{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}$

– размерный комплекс, кг; n – показатель степени, зависящий от вида горючего материала (твердый или жидкий) и характера процесса выгорания; A – размерный комплекс, зависящий от вида горючего материала (твердый или жидкий) и характера процесса выгорания, кг/с ^{n} .

Совместно решая уравнения (6) и (7), можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от относительного изменения среднеобъемной температуры:

$$\mu_m = K_3 \left(\frac{T_m - T_a}{T_m} \right), \quad (9)$$

где $K_3 = \mu_* = \frac{c_p \rho_a T_a D_m}{\eta (1 - \varphi) Q_H^p}$ – коэффициент пропорциональности, Нп/м;

ρ_a – плотность воздуха в объеме перед горением, кг/м³; T_a – температура воздуха в объеме перед горением, К.

В результате совместного решения уравнений (7) и (8) можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода:

$$\mu_m = K_4(\rho_{O_2a} - \rho_{O_2m}), \quad (10)$$

где $K_4 = \mu_* / B\eta L_{O_2} / V + \rho_{O_2}$ – коэффициент пропорциональности, Нп·м²/кг.

Из уравнений (9) и (10) видно, что величина среднеобъемной оптической плотности дыма прямо пропорциональна относительному изменению среднеобъемной температуры и изменению среднеобъемной парциальной плотности кислорода и не зависит от геометрических размеров. Поэтому зависимости (9) и (10) могут использоваться при расчете как в маломасштабном, так и в полномасштабном помещении.

Таким образом, в рассматриваемых схемах термогазодинамики пожара величину среднеобъемной оптической плотности дыма можно рассчитывать, не решая уравнение закона ее сохранения и не используя коэффициент дымообразования существенно зависящий от продолжительности проведения огневых испытаний и периода осреднения данных.

Разработана методика расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре на объектах энергетики, которая включает в себя следующие этапы:

- сбор исходных данных на основе анализа геометрии помещений, проёмов и т.д.;
- выбор наиболее опасных сценариев развития пожара;
- выбор математической модели расчета динамики ОФП;
- получение экспериментальных зависимостей оптической плотности дыма от среднеобъемной температуры, массовой скорости выгорания, по которым нет данных в существующих базах данных пожарной нагрузки или определение коэффициента дымообразования;
- проведение расчетов на ЭВМ;
- анализ результатов расчета оптической плотности дыма с использованием уравнений (4,5,9,10);
- определение времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

Таким образом, при практическом использовании предложенной методики расчета необходимо экспериментально определить зависимости оптической плотности дыма от температуры для фактически используемых на объекте конденсированных веществ или материалов. После этого выполнить расчет зависимости среднеобъемной температуры (интегральная модель) или среднеобъемной температуры припотолочного слоя (зонная модель) от времени, в котором используются вышеуказанные зависимости с учетом поправки на коэффициент теплопотерь в полномасштабном помещении.

Основным отличием от существующих методик расчета является отсутствие необходимости решения дифференциального уравнения (2), в которое входит удельный коэффициент дымообразования горючего материала.

В выводах по второй главе приведены рекомендации по использованию

предложенных математических моделей для определения времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре на объектах энергетики.

В третьей главе диссертации «Модификация установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов при их термическом разложении» представлено научное обоснование конструктивной схемы модифицированной установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов и приведено описание установки и методики проведения огневых испытаний.

Выполнена постановка задачи экспериментального определения зависимости оптической плотности дыма от температуры в модифицированной маломасштабной установке. Предложено усовершенствование стандартного метода испытаний определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов по ГОСТ 12.1.044-89 п.4.18, устраняющее основные его недостатки (глава 1 диссертации).

Модифицирована установка по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов, реализующая схему измерения оптической плотности дыма в условно герметичном маломасштабном объеме. Схема модифицированной установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов представлена на рисунке 1.

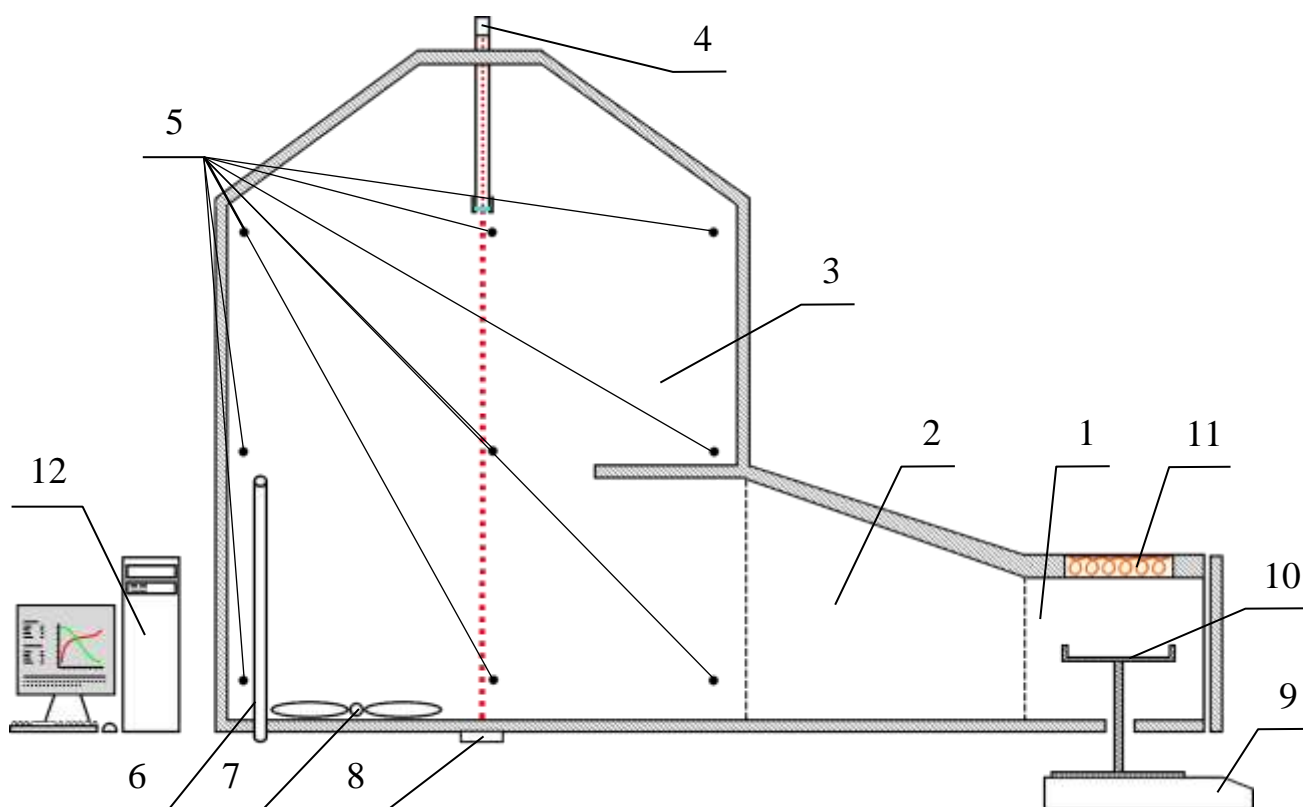


Рисунок 1 – Схема модифицированной экспериментальной установки [3, 11]:

- 1 – камера сгорания; 2 – переходной рукав; 3 – экспозиционная камера; 4 – лазерный модуль;
- 5 – термопары; 6 – зонд отбора газа; 7 – вентилятор; 8 – фоточувствительный элемент;
- 9 – электронные весы; 10 – держатель образца; 11 – электронагревательный излучатель;
- 12 – регистрирующая аппаратура

Для измерения температуры продуктов горения внутри камеры экспозиции установлены в трех разных по высоте плоскостях по девять равномерно распределенных по площади термопар с диапазоном измерения от - 40 до 1000 °С с погрешностью не более $\pm 1,1$ °С.

Для калибровки электронагревательного излучателя использовался водоохлаждаемый датчик плотности теплового потока типа Гордон и регистрирующий прибор с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ. Погрешность измерения плотности теплового потока не превышает ± 8 %.

Для измерения оптической плотности дыма установка по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов была оборудована фотометрическим оборудованием, основные компоненты которого представлены на рисунке 2.

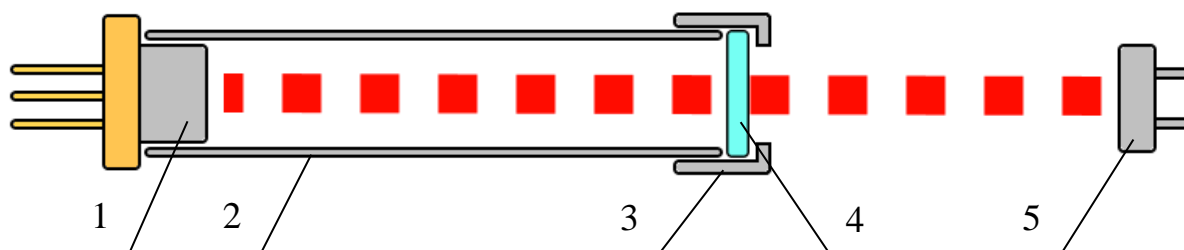


Рисунок 2 – Схема компонентов фотометрического оборудования: 1 – лазерный диод: ADL-63054TL; 2 – полая металлическая литая трубка; 3 – гайка накидная; 4 – кварцевое стекло; 5 – фотодиод ФД24К (ФД-7К)

Длина луча лазера в задымленной зоне составляет 800 мм, длина волны 630-640нм, мощность лазера 5 мВт. Данные по интенсивности светопропускания были получены с фотодиода ФД24К (ФД-7К) посредством цифрового амперметра и вольтметра постоянного тока Щ02П в программе ASCII EL.

Горючие вещества и материалы испытывались в режиме тления и пламенного горения. Необходимый режим достигался посредством изменения плотности падающего теплового потока на поверхность образца согласно калибровочной таблице.

Предварительно подготовленный образец вещества или материала помещался в специальный держатель (кювету).

После достижения заданной плотности падающего теплового потока внутри камеры сгорания на высоте поверхности образца, исследуемое вещество или материал помещался внутрь камеры до полного выгорания или до достижения пика измеряемых параметров.

В процессе огневых испытаний регистрировались показания оптической плотности дыма μ_m (Нп/м), среднеобъемной температуры в экспозиционной камере T (°С), изменение массы образца во время испытания Δm (г), концентраций кислорода O_2 (% об.).

Величина оптической плотности дыма определялась по формуле:

$$\mu_m = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I_{min}}, \quad (11)$$

где μ_m – оптическая плотность дыма, Нп/м; L – длина пути луча света в задымленной среде, м; I_0, I_{min} – соответственно значения начального и конечного светопропускания, %.

Коэффициент дымообразования определялся по следующему выражению (ГОСТ 12.1.044–89, п. 4.18):

$$D_m = \frac{V}{L \cdot m} \ln \frac{I_0}{I_{min}}, \quad (12)$$

где D_m – удельный коэффициент дымообразования горючего материала, Нп·м²/кг; V – объем экспозиционной камеры, м³; m – масса образца, кг.

Проведено экспериментальное исследование влияния параметров внутри камеры сгорания на дымообразующую способность конденсированных веществ и материалов.

Изучено влияние формы и размеров образца и расстояния между образцом и электронагревательным элементом на параметры, значения которых необходимы при расчете оптической плотности дыма.

Проведен сравнительный анализ дымообразующей способности конденсированных веществ и материалов со значениями в базе данных типовой пожарной нагрузки.

На рисунке 3 представлены результаты огневых испытаний древесины на различном удалении от нагревательного элемента (1-18 испытания проводились на модифицированной установке, 19-21 – на установке по ГОСТ 12.1.044-89).

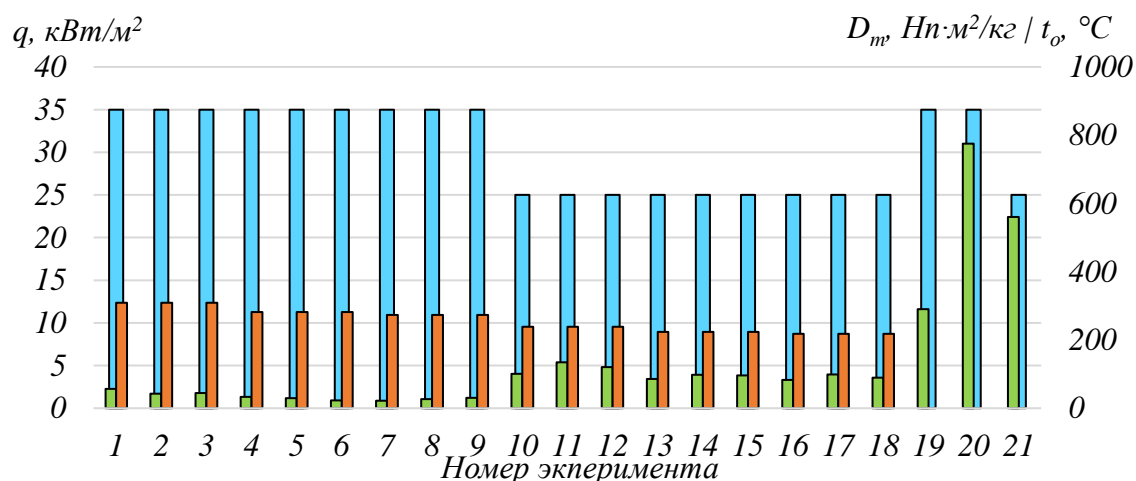


Рисунок 3 – Результаты огневых испытаний древесины: ■ – коэффициент дымообразования; ■ – плотность падающего теплового потока на поверхности образца; ■ – температура на поверхности образца

Сравнительный анализ данных показал существенное отличие значений коэффициента дымообразования, полученного на указанных установках и влияние условий в камере сгорания, геометрических параметров образца на результат огневых испытаний.

На рисунках 4-5 представлены результаты измерения плотности теплового потока, падающего на поверхность образца в камере сгорания модифицированной установки.

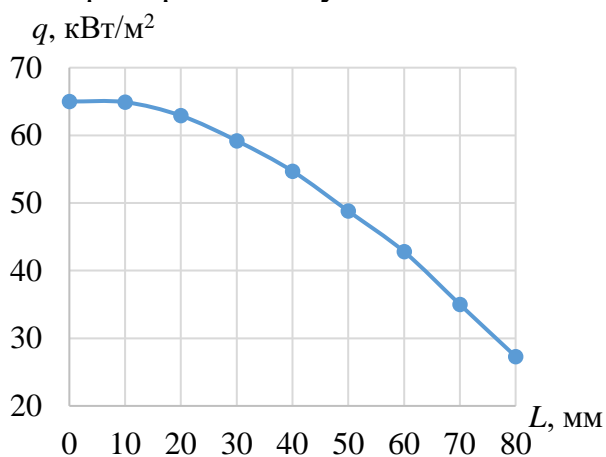


Рисунок 4 – График зависимости плотности теплового потока от расстояния от центра образца

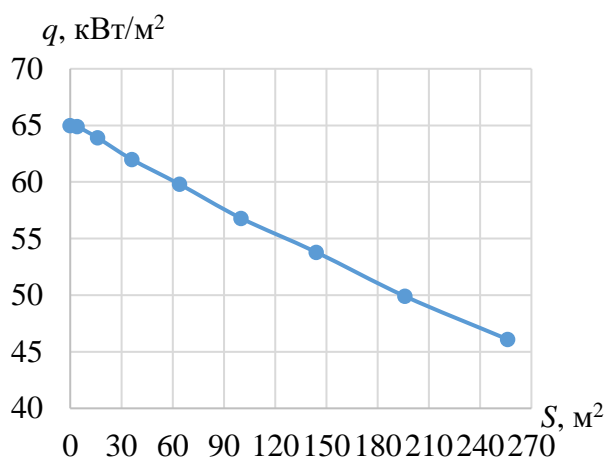


Рисунок 5 – График зависимости средней по площади плотности теплового потока от площади обогрева

Результаты измерений показали, что данная геометрическая форма электронагревательного излучателя способствует существенно неравномерному распределению плотности падающего теплового потока по площади образца. На основании этого предлагается использовать значение плотности падающего теплового потока среднего по площади вместо максимального значения в центре образца

В выводах по третьей главе отмечено отличие с научной и практической точек зрения модифицированной установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов от аналогичных установок по определению дымообразующей способности и возможности ее использования для более достоверного расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

В четвертой главе «Исследование времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики» представлены исходные данные и результаты натуральных и численных экспериментов по прогнозированию динамики ОФП на объекте энергетики.

Приведены исходные данные для математического моделирования распространения токсичных газов при пожаре на объектах энергетики.

Представлены результаты огневых испытаний по определению оптической плотности продуктов горения при термическом разложении конденсированных веществ и материалов. Огневые испытания проводились до среднеобъемной температуры продуктов горения внутри камеры экспозиции, не превышающей критического значения для человека, равного 70 °С. Рассматривались горючие материалы, характерные для производственных зданий объектов энергетики: технические масла, кабельная продукция, древесина. Однако проведение огневых испытаний жидкой пожарной нагрузки на модифицированной установке на данный момент затруднены отсутствием в конструкции установки газовой горелки и аварийного клапана сброса давления.

На рисунках 6-7 представлены зависимости оптической плотности дыма и коэффициента дымообразования от времени экспозиции на примере данных, полученных при термическом разложении кабеля ВВГнг.

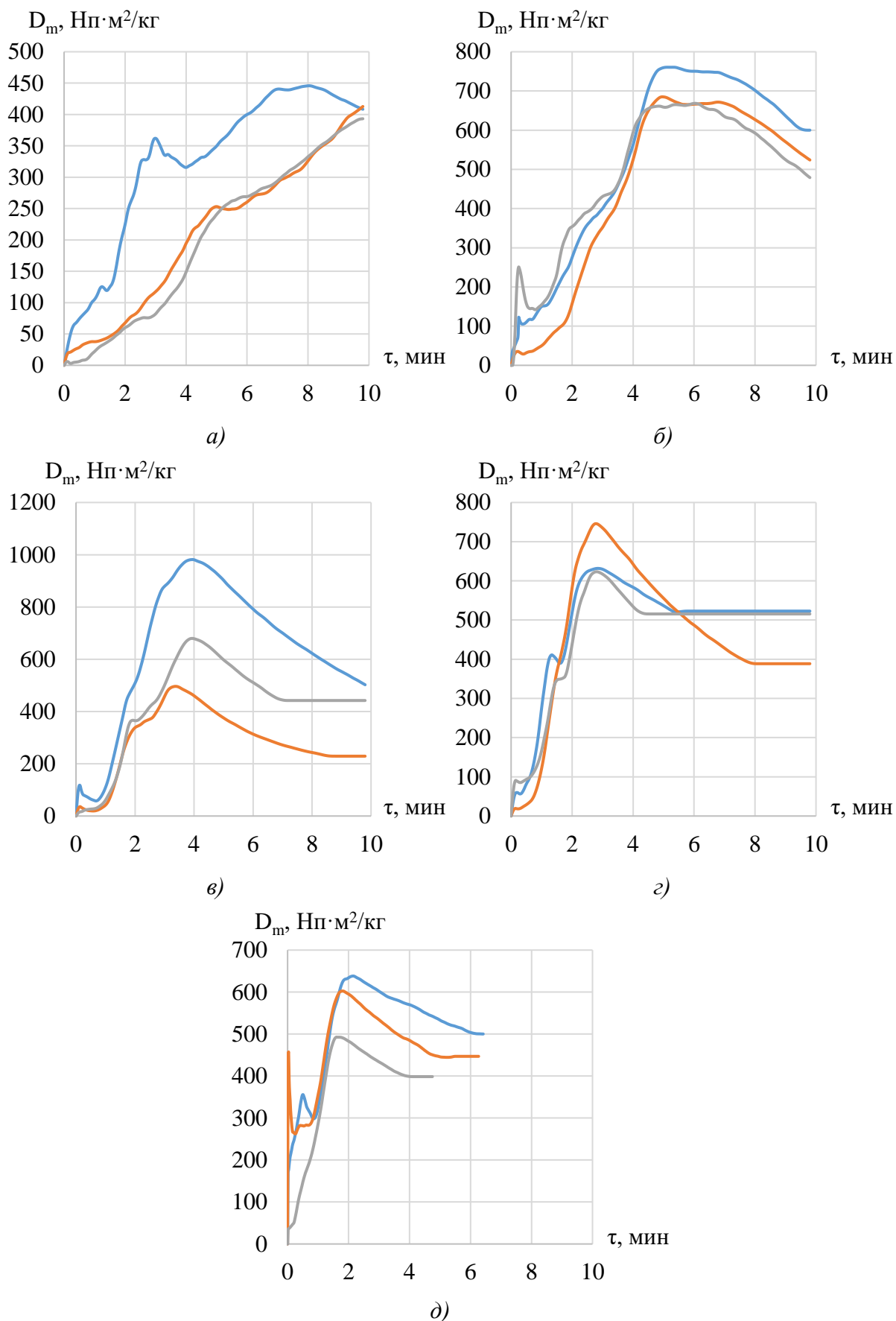


Рисунок 6 – Зависимости удельного коэффициента дымообразования от времени проведения экспериментов при плотности теплового потока: *а* - $20 \text{ кВт}/\text{м}^2$, *б* - $25 \text{ кВт}/\text{м}^2$, *в* - $35 \text{ кВт}/\text{м}^2$; *г* - $50 \text{ кВт}/\text{м}^2$; *д* - $65 \text{ кВт}/\text{м}^2$

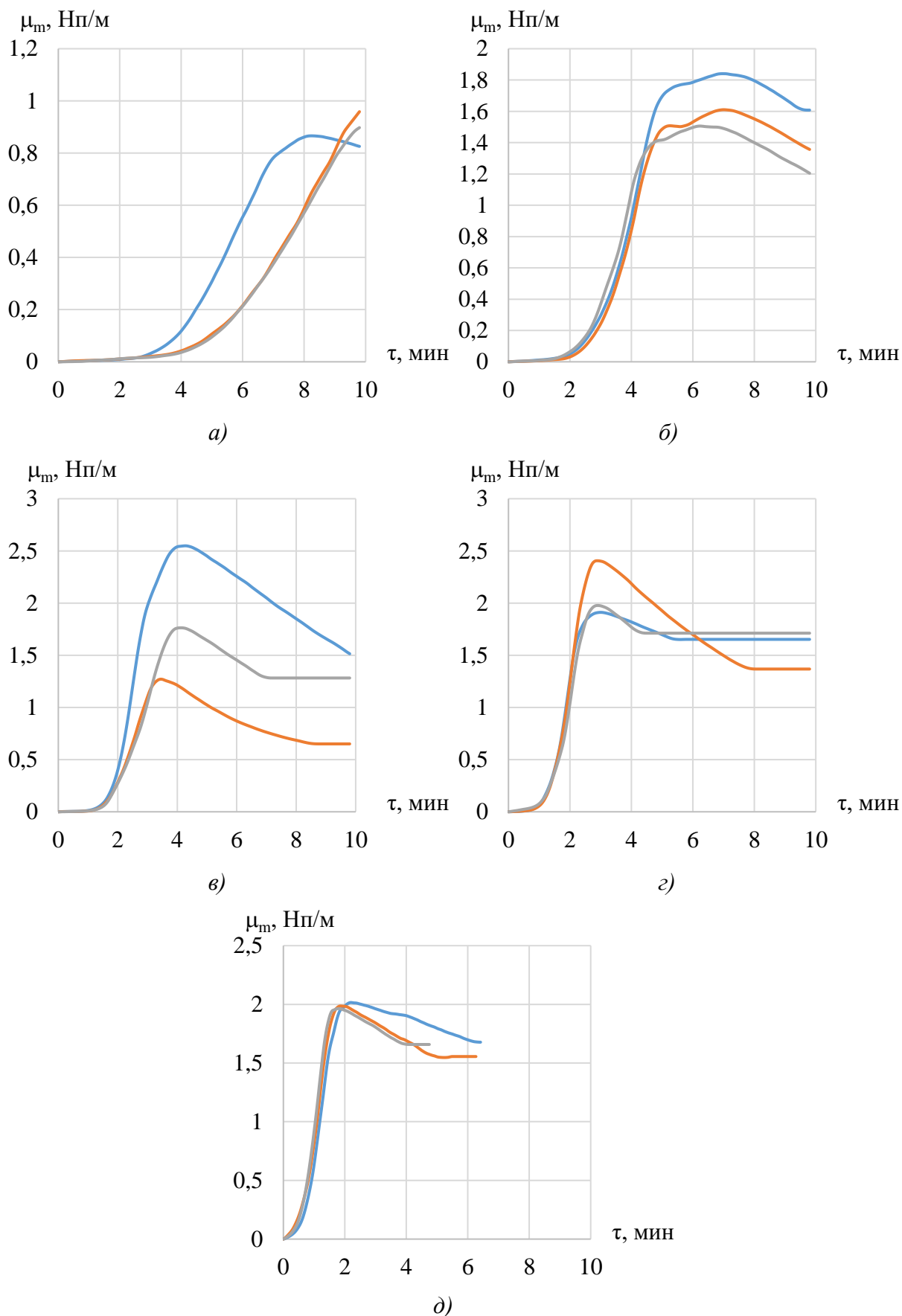


Рисунок 7 – Зависимости оптической плотности дыма от времени проведения экспериментов при плотности теплового потока: а - 20 кВт/м^2 , б - 25 кВт/м^2 , в - 35 кВт/м^2 ; г - 50 кВт/м^2 ; д - 65 кВт/м^2

Для оценки адекватности использования уравнения (2) интегральной модели на рисунке 8 показаны результаты сопоставления расчетных величин среднеобъемной оптической плотности дыма с их экспериментальными значениями при плотности теплового потока 65 кВт/м^2 . При этом в качестве исходных данных к уравнению (2) использовались экспериментальные значения удельного коэффициента дымообразования и массовой скорости выгорания горючего материала.

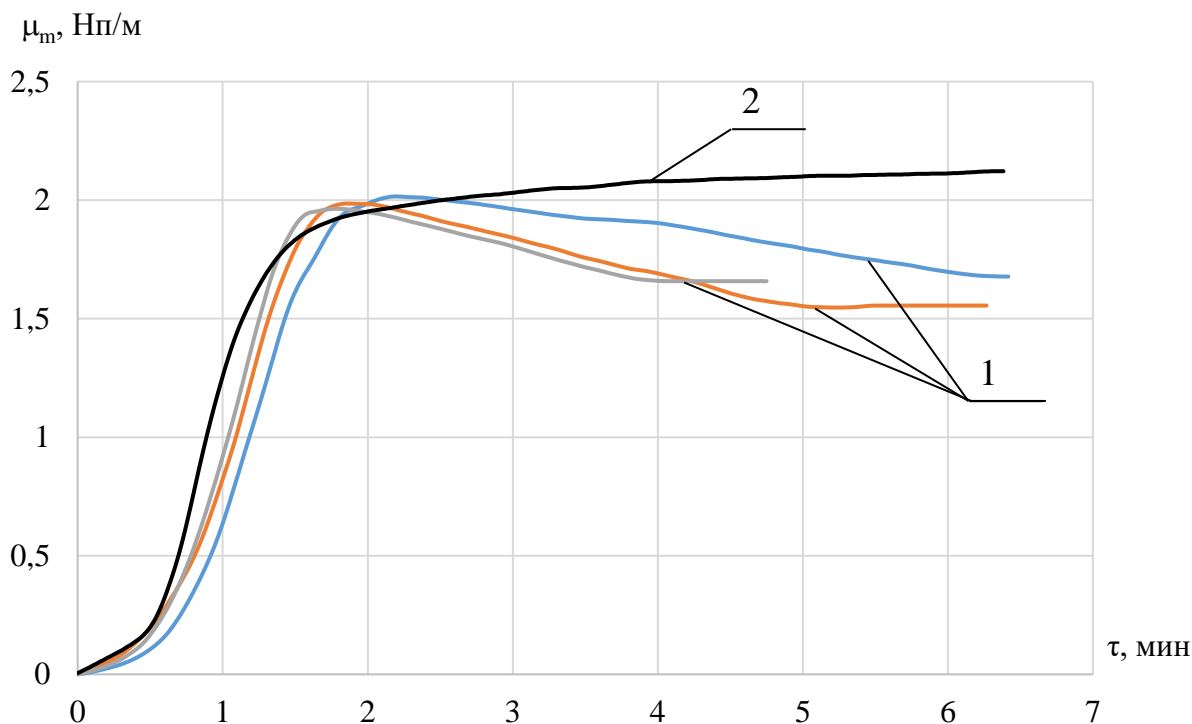
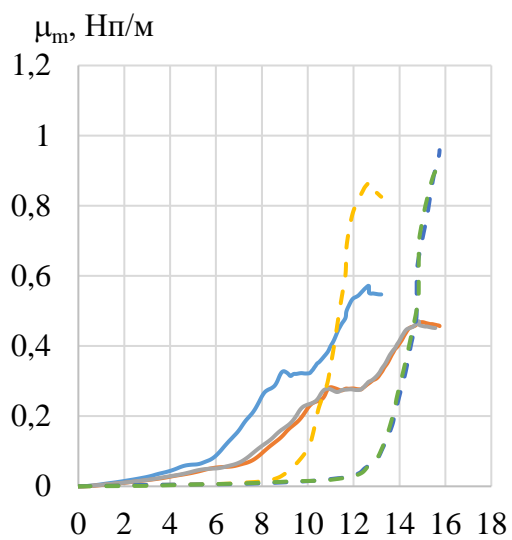


Рисунок 8 – Зависимости оптической плотности дыма от времени проведения огневых испытаний кабеля ВВГнг при плотности теплового потока 65 кВт/м^2 :
1 – эксперимент; 2 – расчет (уравнение (2))

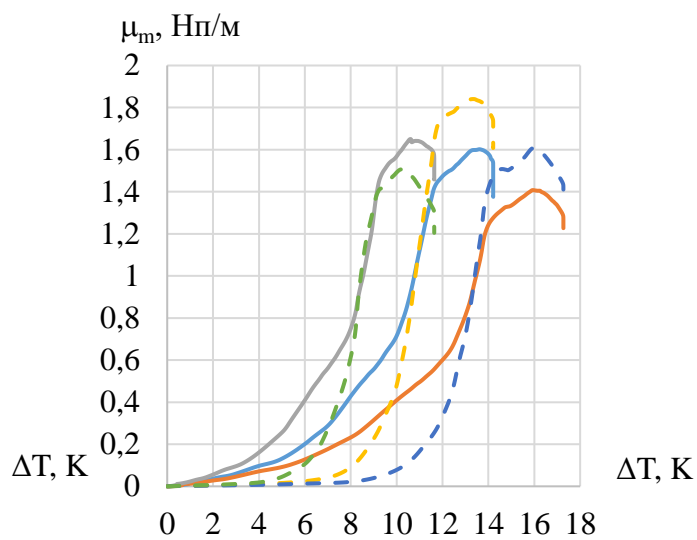
Из рисунка 8 видно, что совпадение расчета с экспериментом – удовлетворительное для инженерного метода расчета. Существенное расхождение после прохождения 100 с от начала процесса объясняется тем, что в этот момент времени были открыты шиберные отверстия в экспозиционной камере для удаления дыма, и процесс горения перестал проходить в герметичном объеме.

Экспериментальные и теоретические (выражение (4)) зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры при различных плотностях теплового потока представлены на рисунке 9.

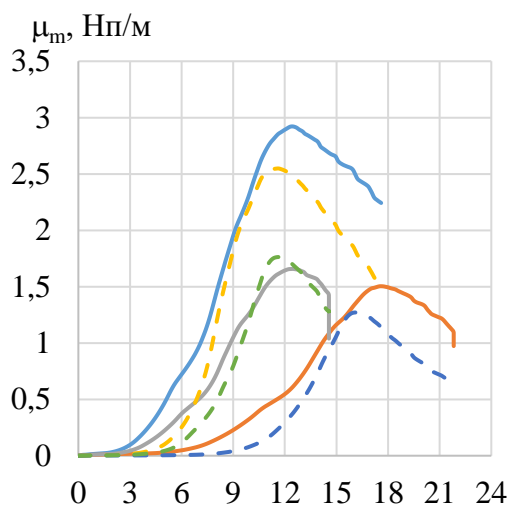
Из рисунка 9 видно, что расчетные зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры качественно соответствуют экспериментальным зависимостям.



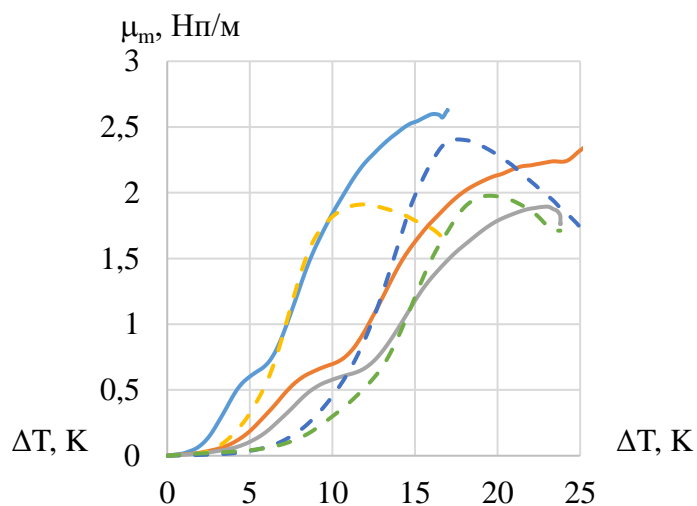
а)



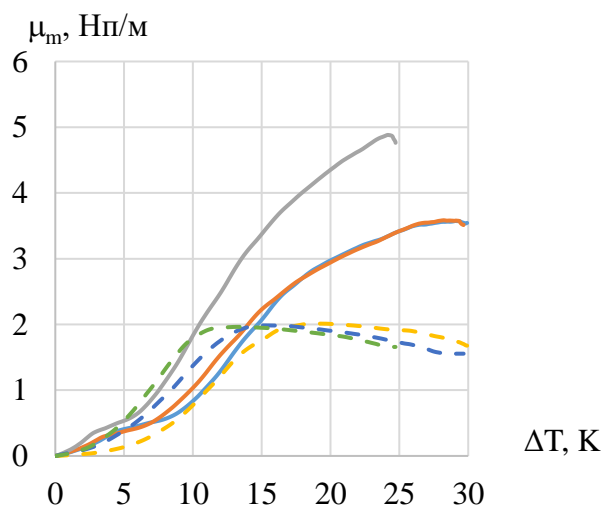
б)



в)



г)



д)

Рисунок 9 – Зависимости оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры при плотности теплового потока: а - 20 кВт/м², б - 25 кВт/м², в - 35 кВт/м²; г - 50 кВт/м²; д - 65 кВт/м²; штриховая линия – эксперимент; сплошная линия – расчет с использованием выражения (4)

Расчет времени блокирования путей эвакуации по потере видимости при пожаре в полномасштабном помещении без использования уравнений закона сохранения оптической плотности дыма (2) и (7) можно проводить следующим образом:

- нахождение зависимостей от времени среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода;
- определение величины среднеобъемной оптической плотности дыма по величине среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода в каждый момент времени;

В ходе проведения огневых испытаний были получены значения коэффициента дымообразования при различной плотности падающего теплового потока для следующих материалов: Кабель ВВГнг, Кабель ВВГ-Пнг(А)-LS, древесина хвойных пород. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения дымообразующей способности

Наименование вещества или материала	Коэффициент дымообразования, $\text{Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ при заданной плотности падающего теплового потока, $\text{кВт}/\text{м}^2$				
	20	25	35	50	65
Кабель ВВГнг	412	634	632	628	587
Кабель ВВГ-Пнг(А)-LS	73,4	80,2	60,2	58,1	52,6
Древесина хвойных пород	38,7	39,5	108,7	98,4	86,6

Анализ данных таблицы показывает, что режим проведения огневых испытаний оказывает существенное влияние на оптическую плотность дыма и коэффициент дымообразования и тем самым повышает значимость качественного проведения калибровки электронагревательного излучателя.

В предложенном экспериментально-теоретическом подходе к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в полномасштабном помещении предлагается использовать экспериментальные зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода, полученные в маломасштабной модифицированной установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов.

При этом отпадает необходимость решения дифференциального уравнения закона сохранения оптической плотности дыма, в которое входит удельная дымообразующая способность, существенно зависящая от условий проведения эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ литературных источников и проведенные численные эксперименты показали, что снижение видимости в дыму является в большинстве случаев первым по времени достижения критического значения для человека опасным фактором пожара. Проведенный анализ существующих методов определения дымообразующей способности конденсированных

веществ и материалов и расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму показал, что они не позволяют с достаточным уровнем достоверности учитывать свойства современных веществ и материалов, находящихся на объектах энергетики, и масштабный фактор.

2. Разработаны модификации интегральной и зонной математических моделей расчета динамики опасных факторов пожара, основу которых составляют эмпирические зависимости оптической плотности дыма от изменения температуры или парциальной плотности кислорода, полученные в маломасштабной установке, с учетом масштабного фактора. Полученные уравнения не содержат геометрических размеров помещения и поверхностей горючих материалов и, следовательно, являются справедливыми в условиях пожара, как в маломасштабном, так и полномасштабном помещении.

3. Разработаны модификации для установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов, которая в отличие от «стандартного» метода экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов позволяет измерять среднеобъемные значения температуры, удельную массовую скорость выгорания и зависимости оптической плотности дыма от изменения температуры или парциальной плотности кислорода. Полученные эмпирические данные позволяют проводить расчет времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму с использованием как существующих интегральной и зонной математических моделей, так и предложенных в данной работе их модификаций.

4. Результаты экспериментов показали, что удельная массовая скорость выгорания и коэффициент дымообразования существенно зависят от времени терморазложения в маломасштабной установке. Значения вышеуказанных параметров существенно зависят от промежутка времени осреднения и имеют значительные отличия от величин, полученных при стандартных методах огневых испытаний и соразмерны с указанными значениями в актуальных базах данных типовой пожарной нагрузки.

5. Разработана методика расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму с использованием модифицированных интегральных и зонных моделей, а также полученных экспериментальных данных с учетом масштабного фактора. С использованием разработанной методики проведения огневых испытаний получены экспериментальные данные по оптической плотности дыма, удельному коэффициенту дымообразования и удельной скорости выгорания для современных веществ и материалов, используемых на объектах энергетики, на примере кабеля ВВГнг.

6. Разработаны научно обоснованные практические рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре для людей без средств индивидуальной защиты с учетом объемно-планировочных и конструктивных особенностей объектов энергетики на примере производственных зданий ТЭЦ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Мустафин, В.М. Влияние начальной освещенности и дымообразующей способности на расчетное время блокирования путей эвакуации по потере видимости [Текст] / Мустафин В.М., Пузач С.В. // Безопасность жизнедеятельности. – 2020. – №2. – С. 17-22.

2. Мустафин, В.М. Влияние условий проведения испытаний в камере сгорания мелкомасштабной экспериментальной установки на дымообразующую способность древесины [Текст] / Мустафин В.М., Пузач С.В., Акперов Р.Г. // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т.29. – №1. – С. 23-32.

3. Мустафин, В.М. Влияние плотности падающего теплового потока на дымообразующую способность образца современной кабельной продукции [Текст] / Мустафин В.М., Пузач С.В., Акперов Р.Г. // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – №1. – С. 24-33. DOI 10.25257/FE.2021.1.24-33.

4. Мустафин, В.М. Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении [Текст] / Мустафин В.М., Пузач С.В., Акперов Р.Г. // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т.30. – №3. – С. 76-87.

Публикации в журналах, индексируемых в Scopus:

5. Mustafin, V.M. Determining the smoke-generating ability of modern cable products needed to model fires in energy facilities [Текст] / V.M. Mustafin, S.V. Puzach, R.G. Akperov // The Third Conference "Problems of Thermal Physics and Power Engineering" Journal of Physics: Conference Series 1683 022053, 25.12.2020.

Публикации в материалах конференций:

6. Мустафин, В.М. Актуальные вопросы пожарной безопасности. Определение значений параметров, влияющих на расчет опасных факторов пожара, для современных веществ и материалов [Текст] / В.М. Мустафин // Материалы XI Московской научно-практической конференции «Студенческая наука – 2016». – М.: Московский студенческий центр, 2017 – С. 78-80.

7. Мустафин, В.М. Исследование влияния притока воздуха в очаг горения на парциальную плотность монооксида углерода [Текст] / В.М. Мустафин, С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин // Материалы XXV международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 253-256.

8. Мустафин, В.М. Обработка экспериментальных данных для определения параметров токсичных продуктов горения [Текст] / В.М. Мустафин, С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин // Материалы VI международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – 480 с. ISBN 978-5-9229-0141-3.

9. Мустафин, В.М. Анализ продуктов горения строительных материалов на основе древесины в условиях закрытой схемы пожара [Электронный ресурс] / В.М. Мустафин, Е.В. Сулейкин // Материалы XX международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистров, аспирантов и молодых ученых «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». – М.: МГСУ, 2017. – С. 489-492. – URL: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/> (дата обращения: 10.01.2022).

10. Мустафин, В.М. Сравнительный анализ экспериментальных пожароопасных характеристик веществ и материалов с представленными в базе данных типовой пожарной нагрузки [Текст] / В. М. Мустафин, С. В. Пузач, Е. В. Сулейкин, Р. Г. Акперов // Материалы VIII международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести». – Алматы, 2017. – С. 194-198.

11. Мустафин, В.М. Обоснование расстояния между образцом и электронагревательным излучателем экспериментальной установки при испытании на дымообразующую способность [Текст] / В.М. Мустафин, С.В. Пузач, Р.Г. Акперов // Материалы VII научно-практической конференции «Ройтмановские чтения». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 110-113.

12. Мустафин, В.М. Влияние различных условий в камере сгорания на дымообразующую способность материала [Текст] / В.М. Мустафин, С.В. Пузач, Р.Г. Акперов // Материалы VIII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2019». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 94-97.

13. Мустафин, В.М. Зависимость оптической плотности дыма от плотности теплового потока при терморазложении полимерных материалов пониженной горючести [Текст] / В.М. Мустафин, С.В. Пузач, Р.Г. Акперов // Материалы IX международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести». – Минск: Белорусский государственный университет, 2019. – С. 163-166.

14. Мустафин, В.М. Анализ влияния расстояния между нагревательным элементом и образцом на дымообразующую способность древесины [Текст] / В.М. Мустафин // Материалы XXVIII международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2019». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 104-109.

15. Мустафин, В.М. Современный подход к определению критического значения снижения видимости в дыму при эвакуации людей из помещения [Текст] / В.М. Мустафин // Материалы XXVIII международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2019». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 109-112.

16. Мустафин, В.М. Определения дымообразующей способности современной кабельной продукции, используемой при моделировании пожара на объектах энергетики [Текст] / В.М. Мустафин, С.В. Пузач, Р.Г. Акперов //

Материалы VIII научно-практической конференции «Ройтмановские чтения». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 80-83.

17. Мустафин, В.М. Влияние массы и размеров образцов для огневых испытаний на коэффициент дымообразования изделий из поливинилхлорида и древесины [Текст] / В.М. Мустафин, С.В. Пузач, Р.Г. Акперов, Я.Ю. Ващенко // Материалы VIII научно-практической конференции «Ройтмановские чтения». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 77-80.

18. Мустафин, В.М. Зависимость коэффициента дымообразования от массы и размеров образцов изделий из поливинилхлорида и древесины [Текст] / В.М. Мустафин // Материалы VIII международной научно-практической конференции адъюнктов, магистрантов, курсантов и студентов «Исторические аспекты, актуальные проблемы и перспективы развития гражданской обороны». – Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, 2020. – С. 81-84.

19. Мустафин, В.М. Анализ влияния условий в камере сгорания на величину удельного коэффициента дымообразования [Текст] / В.М. Мустафин // Материалы IX международного научного семинара «Пожарная безопасность объектов хозяйствования». – Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, 2020. – С. 56-61.

20. Мустафин, В.М. Современные методы обработки экспериментальных данных при проведении огневых испытаний на определение дымообразующей способности [Текст] / В.М. Мустафин // Материалы XI международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций». – Кокшетау: КТИ МЧС РК, 2020. – С. 87-92.

21. Мустафин, В.М. Определение дымообразующей способности современной кабельной продукции, необходимой для моделирования пожаров на объектах энергетики [Текст] / В.М. Мустафин, С.В. Пузач, Р.Г. Акперов // Материалы III международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики». – М.: Издательство МЭИ, 2020. – С. 231-232.

22. Мустафин, В.М. Методы определения дымообразующей способности веществ и материалов. Особенности измерения [Текст] / В.М. Мустафин, С.В. Пузач // Материалы X международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности - 2021». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 56-61.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664548. Программа для обработки и формирования базы параметров пожарной нагрузки / Правообладатели: В. М. Мустафин, О. Б. Болдрушкиев, С. В. Пузач, Р. Г. Акперов; авторы: В. М. Мустафин, О. Б. Болдрушкиев, С. В. Пузач, Р. Г. Акперов; заявка № 2021619872 12.06.2021; регистрация 08.09.2021.

Подписано в печать 19.04.2022. Формат 60×84 1/16

Печать офсетная. Печ. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ №406

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