

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

Академия Государственной противопожарной службы

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)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Москва – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ СНИЖЕНИЯ ВИДИМОСТИ В ДЫМУ ПРИ ПОЖАРЕ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ.....	13
1.1 Особенности пожарной опасности объектов энергетики.....	13
1.2 Пожароопасные вещества и материалы, применяемые на объектах энергетики.....	21
1.3 Анализ опасности снижения видимости в дыму при пожаре.....	24
1.4 Методы оценки дымообразующей способности веществ и материалов....	27
1.5 Анализ результатов аналитических расчетов времени блокирования путей эвакуации по потере видимости.....	32
1.6 Анализ методов расчета динамики распространения опасных факторов пожара.....	40
1.7 Выводы по первой главе.....	42
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ДЫМА НА ПУТЯХ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ.....	45
2.1 Математические модели для определения времени блокирования путей эвакуации при снижении видимости в дыму.....	45
2.1.1 Расчет дальности видимости в дыму по интегральной модели пожара в помещении.....	45
2.1.2 Расчет дальности видимости в дыму по зонной модели пожара в помещении.....	47
2.2 Обоснование возможности применения результатов маломасштабных экспериментов к полномасштабному помещению.....	49

2.2.1	Условно герметичное помещение	49
2.2.2	Начальная стадия пожара	52
2.3	Методика расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре на объектах энергетики.....	54
2.4	Выводы по второй главе	60
ГЛАВА 3. МОДИФИКАЦИЯ УСТАНОВКИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ		61
3.1.	Постановка задачи экспериментального определения зависимости оптической плотности дыма от температуры в модифицированной маломасштабной установке	61
3.2.	Выбор оборудования для определения зависимости оптической плотности дыма от температуры.....	63
3.3.	Описание модифицированной маломасштабной установки и методики проведения огневых испытаний	67
3.4.	Экспериментальные исследования влияния параметров внутри камеры сгорания на дымообразующую способность	75
3.4.1.	Влияние расстояния между образцом и электронагревательным элементом.....	75
3.4.2.	Влияние площади и массы образца на параметры, значения которых необходимы при расчете оптической плотности дыма	81
3.4.3.	Сравнительный анализ значений дымообразующей способности веществ и материалов.....	86
3.5.	Выводы по третьей главе	89
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ПО ПОТЕРЕ ВИДИМОСТИ В ДЫМУ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ		90

4.1 Исходные данные для моделирования динамики развития опасных факторов пожара на объектах энергетики.....	90
4.2 Анализ экспериментальных данных, полученных на маломасштабной установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов	91
4.3 Общий анализ результатов экспериментов	102
4.4 Уточнение методики расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики	103
4.5 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 производственных зданий теплоэлектростанции.....	104
4.6 Выводы по четвертой главе.....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты внедрения	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для электронно-вычислительной машины	130

ВВЕДЕНИЕ

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 [1-3]. 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 [4],

Ю.А. Поляков, С.В. Пузач [1-3, 5-9], В.И. Присадков, В.М. Есин, D.Drysdale [10], W. K. Chow, T. Tanaka [11], S. Yamada, K. Matsuyama, G.D. Lougheed и др.

В разработку научных основ теории образования и распространения продуктов горения, снижения видимости в дыму и их совместного влияния на организм человека, а также методов испытаний и контроля пожароопасных свойств веществ и материалов внесли Ю.С. Зотов, С.В. Пузач [1-3, 5-9], Л.К. Исаева [12], Н.В. Ландышев, Т.Г. Меркушкина, В.В. Гулак, Е.Н. Покровская [13-16], В.А. Ушков [17-21], Д.В. Трушкин [22-24], С.Л. Барботько [25-30], 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.

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.

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.

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 и практическая значимость работы заключается в:

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

- 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;

- создании 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, теплообмена 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 теплообмена и газодинамики, экспериментальные методы теплообмена, методы обработки и анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований.

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».

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.

Личный вклад автора. Результаты диссертационных исследований получены автором лично и при его непосредственном участии. Автор принимал участие в обсуждении полученных результатов диссертационных исследований и формулировке выводов. Опубликованные по результатам диссертации научные статьи написаны им лично и в соавторстве, его личный вклад в эти работы не вызывает сомнений.

Апробация результатов. 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».

Публикации: по результатам диссертационного исследования автором опубликовано 23 научные работы, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований, 1 статья в рецензируемом журнале из международной базы цитирования 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ СНИЖЕНИЯ ВИДИМОСТИ В ДЫМУ ПРИ ПОЖАРЕ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

1.1 Особенности пожарной опасности объектов энергетики

Объекты электроэнергетики – имущественные объекты, непосредственно используемые в процессе производства, передачи электрической энергии, оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике и сбыта электрической энергии, в том числе объекты электросетевого хозяйства [31].

Под объектами энергетики понимается комплекс сооружений и оборудования, вырабатывающего энергию. К такого рода предприятиям относятся электростанции. Они бывают: атомные, гидрологические и тепловые.

Основные требования по обеспечению пожарной безопасности на действующих объектах энергетики изложены в работах [32-33]. Данные требования являются обязательными для всех сотрудников как постоянно работающих на данных объектах, так и временно производящих ремонтно-наладочные, строительно-монтажные работы и испытания технологического оборудования.

Объекты энергетики представляют собой последовательно расположенные технические сооружения и оборудования, необходимых для обеспечения производства электроэнергии. На объектах энергетики, основную опасность с точки зрения пожарной безопасности представляют производственные здания большого объема, основной пожарной нагрузкой которого являются: нефтепродукты и их производные (технические масла), оболочки кабелей.

Строительство данных объектов производится согласно государственным планам, в соответствии с развитием производственных сил страны и отраслей народного хозяйства.

На рисунках 1.1-1.3 показан характерный внешний вид производственных зданий объектов электроэнергетики России на примере: ТЭЦ-27, ГЭС-1 и САЭС (Смоленская область).

ТЭЦ-27 (бывшая – Северная ТЭЦ) находится на территории Мытищинского района Московской области. Данная теплоэлектроцентраль обеспечивает электроэнергией и теплом свыше миллиона потребителей города Мытищи, а также Северного и Северо-Восточного округов Москвы. В качестве топлива теплоэлектроцентраль использует природный газ.



Рисунок 1.1 – Характерный вид производственных зданий ТЭЦ (Московская область) [34]

Государственная электрическая станция № 1 (имени П. Г. Смидовича) – старейшая из действующих тепловая электростанция в России. Находится на территории Раушской набережной в городе Москва.

Смоленская атомная электрическая станция, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» государственной корпорации «Росатом». Данная станция находится на территории Смоленской области у города Десногорска. Расположена на берегу Десногорского водохранилища.



Рисунок 1.2 – Характерный вид производственных зданий ГЭС (Москва, ГЭС-1) [34]



Рисунок 1.3 – Характерный вид производственных зданий АЭС (Смоленская область) [34]

Самыми распространенными на территории страны объектами электроэнергетики являются теплоэлектроцентрали.

Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) – вид тепловой электростанции, которая помимо производства электроэнергии является источником пара и горячей воды в централизованных системах теплоснабжения в том числе и для обеспечения отопления и горячего водоснабжения в жилых и промышленных объектах.

ТЭЦ, вырабатывая электроэнергию, использует тепловую энергию пара. Часть которой идет в виде конденсата, отработанного пара на нагрев сетевой воды, которая поступает на котельные и тепловые пункты. Эффективность использования пара зависит от вида паровой турбины, каждая из которых имеет различные способы отбора пара и позволяют регулировать количество отбираемого пара.

Теплоэлектроцентраль относится к взрывопожароопасным объектам, так как в производственном и технологическом процессе обращаются опасные вещества и материалы основными из которых являются: угольная пыль, мазут, технические масла, оболочки кабелей и водород.

Особую опасность на таких объектах представляют пожары на трансформаторах. Такие пожары делятся по месту их возникновения. При возникновении короткого замыкания, существует возможность возникновения электрической дуги. При контакте её с техническими маслами и образовавшимися при нагреве масла горючими газами может произойти серия взрывов, в следствии чего происходит разгерметизация маслосодержащих корпусов с последующим растеканием горящего масла. Пожары на трансформаторах могут распространиться на кабельные каналы и туннели, а также создавать угрозу соседним установкам и трансформаторам. Такие пожары представляют высокую опасность, так как в объеме одного трансформатора может содержаться до 100 т технического масла.

Пожары в кабельных помещениях могут послужить причиной его распространения по зданию и создать угрозу развития на других участках энергосетей.

Объекты энергетики помимо веществ и материалов, используемых в качестве топлива для силовых установок, а также в системах смазки и охлаждения, имеют большое количество кабельных сетей различного назначения. Кабельная продукция, применяемая на данных объектах, подразделяются на два основных вида: силовые кабели, контрольные кабели.

Современная кабельная продукция имеют большой ассортимент по видам изоляции, конструкции и материалам жил. Применение того или иного вида зависит от назначения, способов и условия прокладки, числа жил и т.п.

Внутри зданий и помещений объектов энергетики кабели разделяются в потоки согласно их функциональному назначению по блокам и ячейкам. Расположенные вдоль стен кабели крепятся на специальные крепежные элементы, представленные на рисунке 1.4.

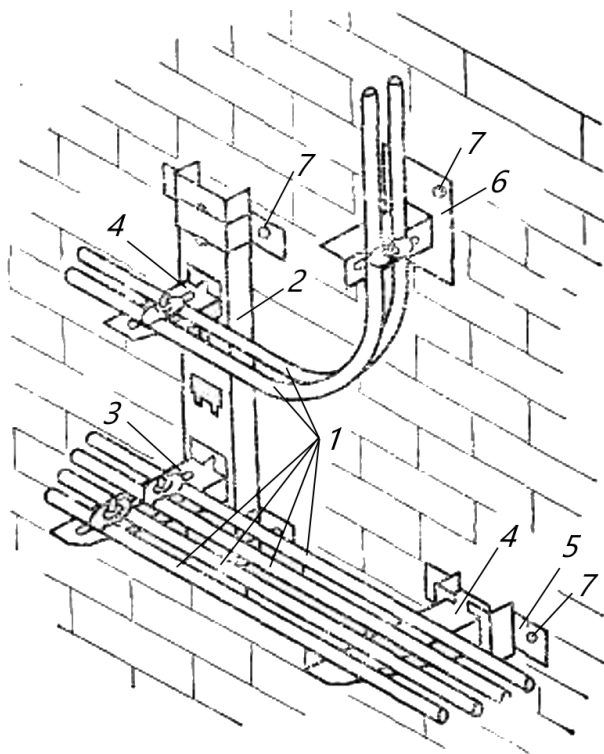


Рисунок 1.4 – Характерная схема крепления кабелей вдоль стены: 1 – кабели; 2 – вертикальный держатель; 3 – фиксатор; 4 – перфорированные платформы; 5 – основание платформы; 6 – модуль опоры; 7 – крепление к стене

Второй способ прокладки кабелей внутри здания и помещений объектов энергетики многослойное расположение внутри металлического короба, схема которого представлена на рисунке 1.5.

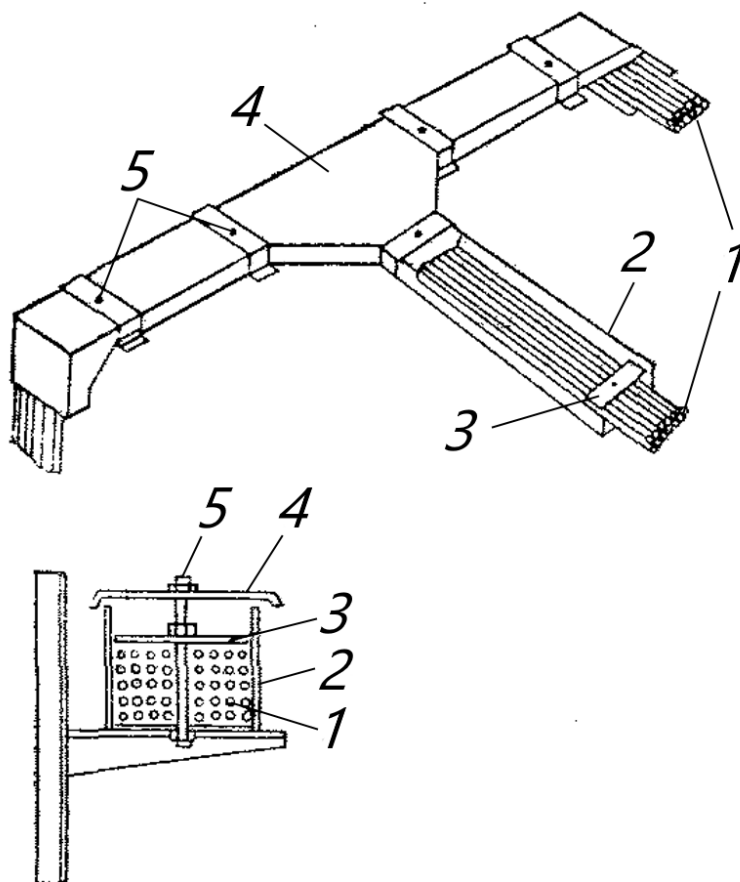


Рисунок 1.5 – Характерная схема прокладки кабелей в металлических коробах:

1 – кабели; 2 – корпус короба; 3 – планка прижимная; 4 – крышка; 5 – крепежная шпилька

Помимо этого, прокладка электрокабелей внутри помещений объектов энергетики осуществляется посредством галерей, полуэтажей, коридоров, подвалов, блоков, лотков и кабельных каналов.

На ряду с этим большое количество кабелей прокладываются подземным способом, к которым относятся следующие:

- Траншеи;
- Кабельные блоки;
- Кабельные каналы;
- Кабельные туннели;
- Коллекторы.

С точки зрения снижения видимости в дыму наиболее опасны для человека кабельные туннели и коллекторы. Объекты энергетики посредством подземных коллекторов и туннелей соединяются со всеми объектами города. Основной пожарной нагрузкой в них являются различного рода оболочки электрокабелей. В Москве общая протяженность коллекторов составляет 717 километров. Принципиальная схема коллектора представлена на рисунке 1.6.

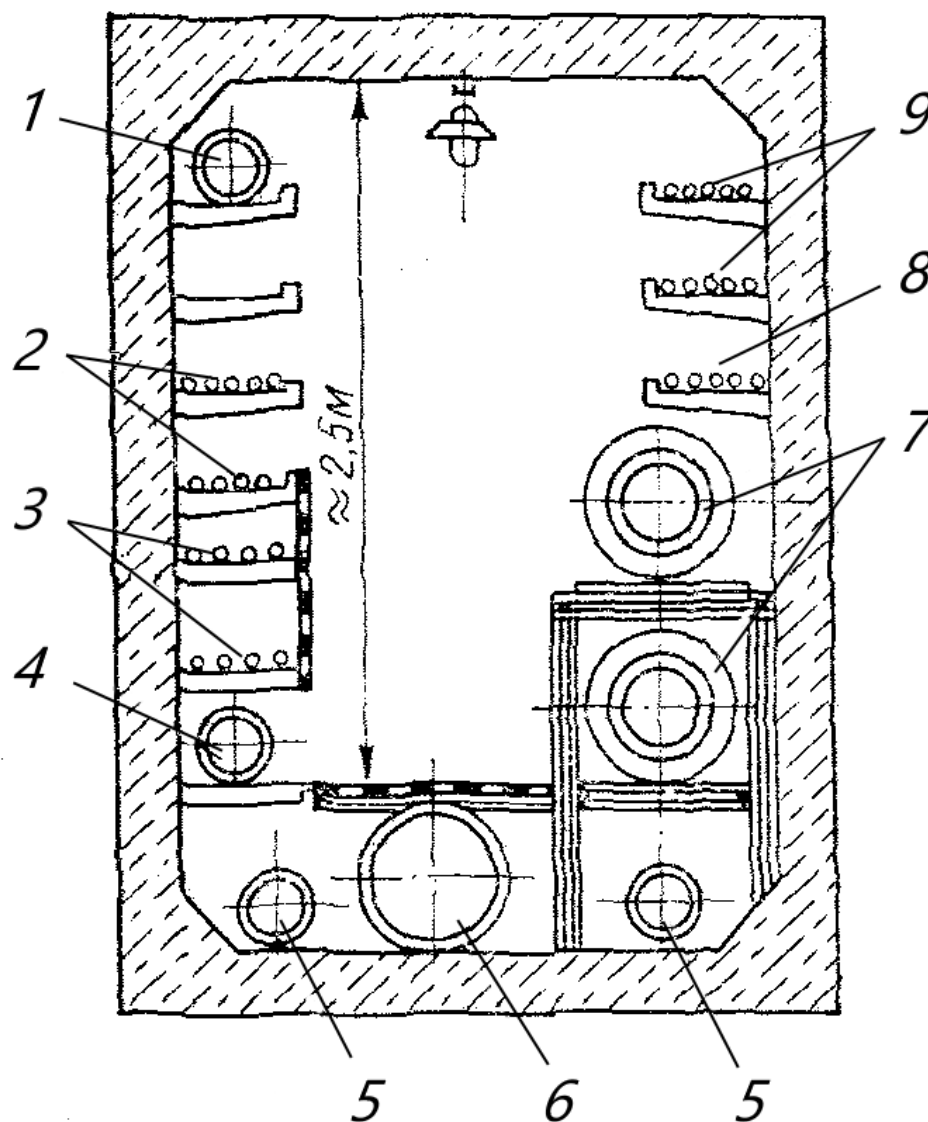


Рисунок 1.6 – Характерная схема взаимного расположения коммуникаций в коллекторе:

- 1 – газопровод; 2 – кабели само-обеспечения; 3 – силовые кабели; 4 – вода;
 5 – канализационные трубы; 6 – ливнесток; 7 – трубы с горячей водой; 8 – кабели связи;
 9 – контрольные кабели

В отличие от коллекторов кабельные туннели имеют больше свободного пространства и имеют по всей длине туннеля свободный проход для удобства работы обслуживающего персонала. Кабели и провода укладываются вдоль стен в специальные лотки и короба, установленные на консолях. Принципиальная схема кабельного туннеля представлена на рисунке 1.7.

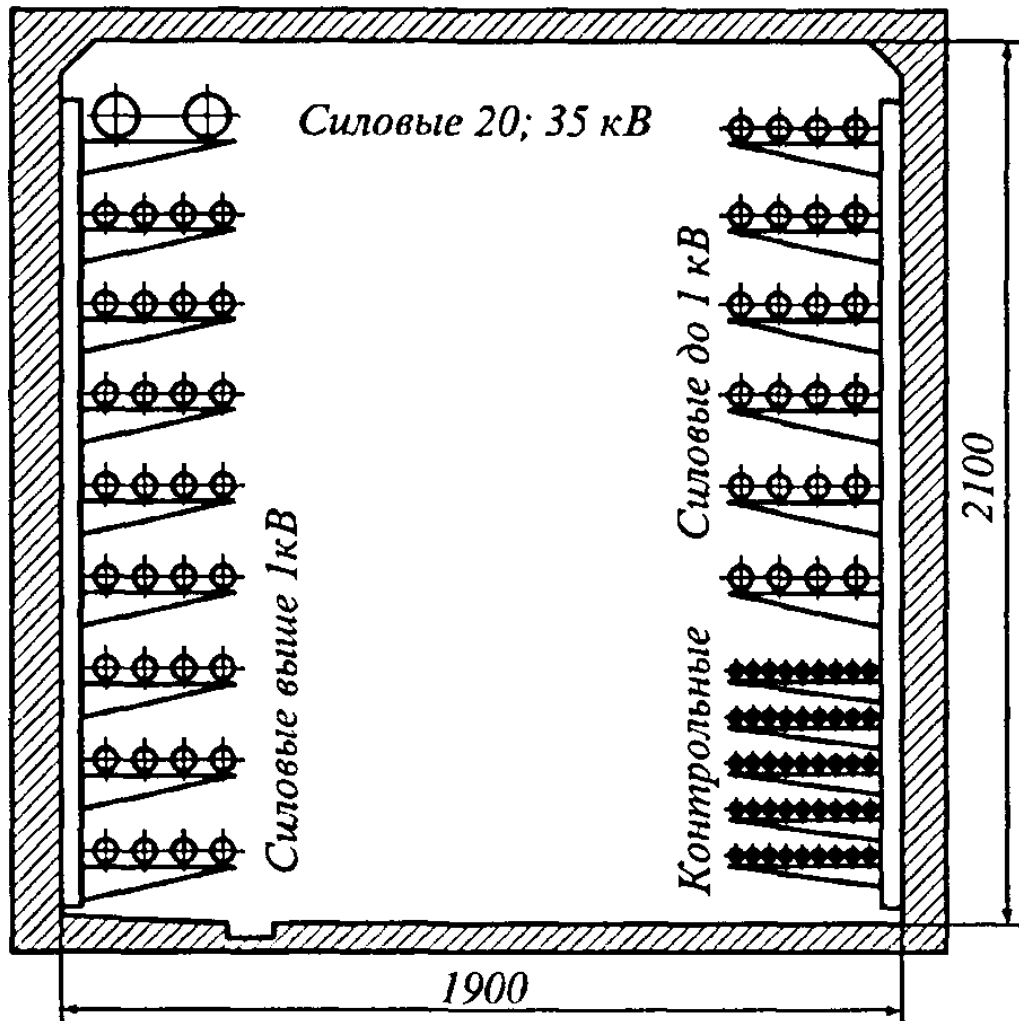


Рисунок 1.7 – Характерная схема поперечного сечения кабельного туннеля

Основными причинами возникновения пожаров на таких объектах, в которых основная пожарная нагрузка оболочки электрокабелей являются нагрев соединений, пробой изоляции и короткое замыкание. Горение оболочек электрокабелей как правило сопровождаются быстрым повышением температуры и, как следствие, увеличением линейной скорости распространения пламени.

Также быстро происходит снижение видимости в дыму. Из-за того, что расположение кабельных туннелей и коллекторов не строго горизонтальное, создаются опасные участки скопления продуктов горения и участки с повышенной линейной скоростью распространения пламени.

Таким образом, пожары в коллекторах и кабельных туннелях опасны не только внутри своего объема, но и могут стать причиной возгорания в трансформаторных блоках, распределительных устройствах и на пультах управления вызывая оплавление контактов и искрение посредством различных неплотностей в люках, дверях и перекрытиях.

1.2 Пожароопасные вещества и материалы, применяемые на объектах энергетики

Статистика пожаров [35-39] показывает, что одной из основных причин возникновения пожаров является наличие неисправности в электротехнической продукции. На объектах энергетики в основном очагом пожара являются резервуары с техническими маслами, оболочки электрических кабелей.

Рассматривая пожароопасные вещества и материалы, применяемые на объектах энергетики можно выделить следующее:

- горючие оболочки электрических кабелей;
- технические масла для трансформаторов и турбин;
- дизельное топливо (для питания аварийных систем);
- водород (для системы охлаждения генераторов);
- горючие адсорбенты (древесный уголь);
- горючие строительные и отделочные материалы и др.

Все объекты энергетики имеют большое количество силовых кабелей, которые предназначены для передачи переменного тока от источника к конечному потребителю. Силовые кабели имеют различные модификации исходя из их

размера, конструктивных особенностей и вида материалов из которых они состоят. Современные виды силовых кабелей имеют много составных элементов из которых выделяют четыре основных:

- токопроводящая жила;
- изоляция жилы;
- оболочка кабеля;
- наружный защитный слой.

Токопроводящие жилы обычно выполнены из меди или алюминия, если жила выполнена из алюминия, то перед аббревиатурой обозначения кабеля ставится буква «А». Сечения жил могут быть секторными, треугольными и круглыми, а по количеству и размеру проволок в жиле подразделяются на 6 классов гибкости.

По составу изоляции силовые кабели делятся на четыре основных вида с изоляцией из:

- поливинилхлорида;
- резины;
- пропитанной бумаги с алюминиевой или свинцовой оболочкой;
- полиэтилена.

Изоляция из поливинилхлорида является одной из самых дешевых, однако рассчитаны для эксплуатации в электросетях с напряжением до 6 кВ. Данная изоляция имеет хорошую эластичность и возможность улучшения различных эксплуатационных свойств (пониженная горючесть, термостойкость, низкое дымовыделение, морозостойкость и т.д.).

Резиновая изоляция имеет свои преимущества такие как: низкая гигроскопичность и высокая гибкость. К недостаткам можно отнести разрушение под воздействием озона и ультрафиолета. Кабели с данным видом изоляции предназначены для эксплуатации в электросетях с напряжением до 10 кВ.

Изоляция из пропитанной бумаги подвержена воздействию влаги поэтому её конструктивно защищают слоем из алюминия, а в случае применения в агрессивных средах в качестве защитного слоя используют свинец. Кабели с данным видом изоляции предназначены для эксплуатации в электросетях с напряжением до 35 кВ.

Изоляция из сшитого полиэтилена применяется в кабелях, рассчитанных на работу с высоким напряжением. По этому показателю они делятся на три группы: первая рассчитана на напряжение от 6 до 35 кВ, вторая – от 45 до 150 кВ и третья – от 220 до 330 кВ.

Данные оболочки имеют разную степень пожарной опасности, однако большинство видов за исключением кабелей с обозначением «LS» (низкое дымовыделение) имеют высокую дымообразующую способность. Согласно базе данных типовой пожарной нагрузки [4] коэффициент дымообразования для различных видов оболочек электрокабелей варьируется от 407 до 850 Нп·м²/кг.

Технические масла на объектах энергетики используются для охлаждения и смазки агрегатов. Системы смазки генераторов имеют как правило емкости с маслом вместимостью до 10 тонн. Насосы и маслопроводы, входящие в данную систему, могут нагнетать давление масла до 1,4 МПа. Это создает опасность в случае разгерметизации системы смазки, масло под давлением может способствовать быстрому распространению пожара. В туннелях с маслонаполненными кабелями кроме изолирующих оболочек может гореть трансформаторное масло, рабочая температура которого в трубах составляет 35-40 °С и оно находится под избыточным давлением. В данных туннелях, в особенности при аварии, пожар быстро распространяется путем растекания горящего масла по уклонам, что значительно увеличивает площадь пожара.

С точки зрения снижения видимости в дыму наиболее опасными материалами являются горючие оболочки электрических кабелей.

1.3 Анализ опасности снижения видимости в дыму при пожаре

Безопасность людей при возникновении пожара на объектах энергетики зависит от многочисленных факторов, одним из которых является потеря видимости в дыму. Этот опасный фактор пожара, с которым в первую очередь сталкивается человек в процессе эвакуации. Данный фактор опасен тем, что человек дезориентируется и как следствие может не успеть эвакуироваться в безопасную зону до того времени, когда на него начинают воздействовать другие опасные факторы пожара [40-42].

Потеря видимости в дыму представляет особую опасность на объектах энергетики при работе на особо опасных для этого участках. Характерный вид данных участков представлен на рисунках 1.8-1.9. На вышеуказанных участках снижение видимости в дыму помимо снижения скорости эвакуации, увеличения времени воздействия других опасных факторов пожара может стать причиной получения серьезных механических травм вплоть до гибели [41-44]. Работая на высоте на специальных этажерках внутри производственного здания объектов энергетики, существует опасность падения рабочих при плохой видимости и возможной паники в виду больших объемов пожарной нагрузки и как следствие высокой скорости образования и распространения продуктов горения.

Подземные коллектора и кабельные туннели как правило не имеют источников естественного освещения, что в свою очередь существенно увеличивает вероятность быстрого снижения видимости в дыму при пожаре оболочек электрокабелей. Крепления, расположенные вдоль стен, при потере видимости в дыму могут стать причиной возникновения травм и снижения скорости эвакуации.



Рисунок 1.8 – Производственное помещение ТЭЦ-2 [34]



Рисунок 1.9 – Трубно-кабельный коллектор [34]

Скорость эвакуации в условиях снижения видимости в дыму во многом будет зависеть от уровня освещенности и от того насколько человек знаком с планировкой здания и путями эвакуации [41-47]. Так, например, допустимый уровень видимости в дыму для людей, знающих планировку здания, и эвакуационный путь составляет: 3-5 м [11, 48-50].

Человек в свою очередь при передвижении в пространстве в большей степени опирается на зрение, а в ситуации, когда органы зрения не получают всю информацию об окружающем пространстве процесс эвакуации и его ориентация намного усложняются. Принято считать, что для человека в задымленной зоне предельная дальность видимости не должна быть меньше 20 м [51-53] в том случае, когда длина помещения меньше 20 м принято её считать предельной дальностью видимости [51-53]. Если дальность видимости снизилась до значения меньше предельного, то это означает что такой опасный фактор пожара как снижение видимости в дыму достиг критического значения.

Результаты математического моделирования пожаров, как правило, свидетельствуют о том, что такой опасный фактор пожара как снижение видимости в дыму, первым наряду с другими достигает своего критического значения [54-55].

Исходя из этого, точность расчета времени блокирования путей эвакуации при пожаре в объеме здания или помещения с определенной степенью освещенности напрямую зависит от точности определения дымообразующей способности пожарной нагрузки [54-55].

Показатель дымообразующей способности материала помимо моделирования пожара, так же применяется при сертификации и определяется при помощи оборудования по ГОСТ 12.1.044-89, но, как правило, значения, получаемые на данном оборудовании, существенно отличается от тех значений, которые применяются при моделировании пожара.

Одной из основных пожарных нагрузок на объектах энергетики, имеющих наибольшую дымообразующую способность, является кабельная продукция. При

моделировании пожара используются значения, приведенные в базе данных типовой пожарной нагрузки [4]. Данная база насчитывает шесть типов оболочек кабелей, что на данный момент очень мало. Значения дымообразующей способности данных видов оболочек кабелей варьируется от 407 до 850 Нп·м²/кг, что имеет достаточно большой разброс и показывает необходимость определения дымообразующей способности для современных видов кабельной продукции различных по конструктивному исполнению и химическому составу, которые используются на объектах энергетики.

1.4 Методы оценки дымообразующей способности веществ и материалов

Дымообразующая способность горючих материалов на территории Евразийского экономического союза на данный момент определяется согласно методу экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов, описанного в ГОСТ 12.1.044-89 [56-60].

Данный метод описывает процесс подготовки образцов и непосредственно огневых испытаний, помимо этого описаны требования к измерительному оборудованию.

Оборудование по определению дымообразующей способности строительных материалов и измерения коэффициента дымообразования представлено на рисунке 1.10. Данная установка имеет две камеры: сгорания и экспозиционную. Камера сгорания относительно экспозиционной камеры имеет небольшой объем. Электронагревательный излучатель и держатель образца расположены параллельно друг другу и под углом к горизонту под 45°.

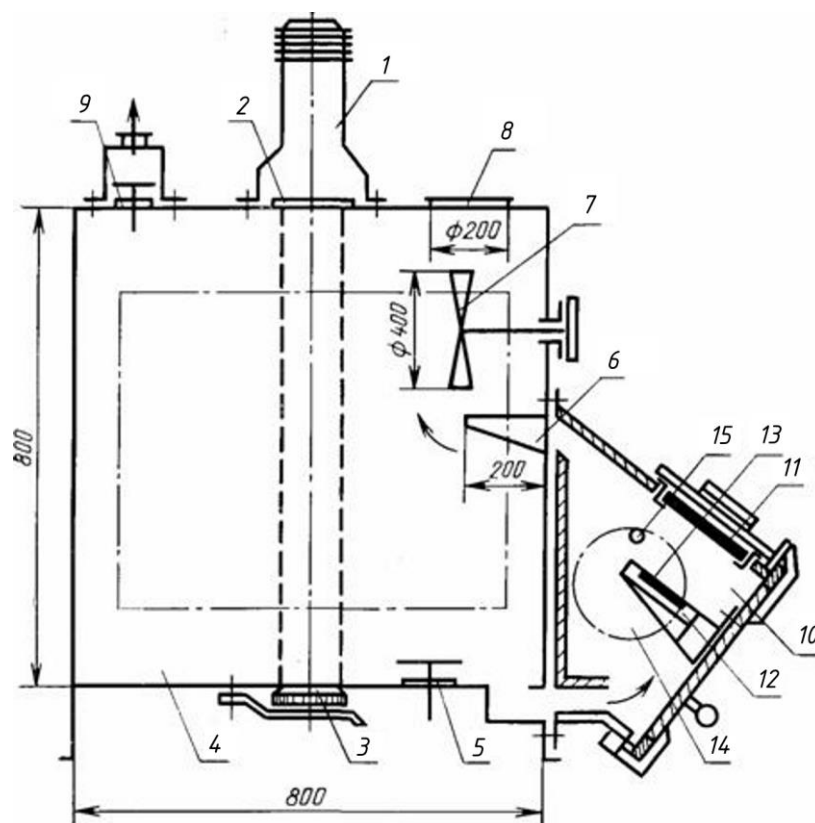


Рисунок 1.10 – Оборудование по определению коэффициента дымообразования [56]:
 1 – источник света; 2 – кварцевое стекло; 3 – приемник света; 4 – камера экспозиции;
 5, 9 – клапаны продувки; 6 – направляющий козырек; 7 – вентилятор;
 8 – предохранительная мембрана; 10 – камера сгорания; 11 – электронагревательный
 излучатель; 12 – держатель образца; 13 – вкладыш под образец; 14 – окно из кварцевого
 стекла; 15 – запальная горелка

Объем камеры сгорания составляет 0,03 куб. м, внутренняя поверхность стенок утеплена асбосилитовыми плитами. Корпус обеих камер выполнен из нержавеющей стали. Внутри камеры сгорания расположена запальная горелка для проведения испытаний с принудительным инициированием пламенного горения от открытого пламени.

Камеру сгорания от камеры экспозиции отделяют два проема в нижней и верхней части совместной стенки. Размеры проемов составляют 30×160 мм. Такое их расположение способствует естественной циркуляции воздуха и продуктов горения между камерами. Над верхним проемом внутри камеры экспозиции установлен направляющий металлический козырек, главной задачей которого является равномерное распределение продуктов горения по всему объему камеры.

Камера экспозиции имеет два клапана для удаления продуктов горения в систему вентиляции после проведения огневых испытаний и один аварийный клапан сброса избыточного давления. Аварийный клапан расположен в верхней части установки и направлен в верх, сам клапан выполнен в виде мембраны, в случае образования взрывоопасной концентрации и как следствие взрыва мембрана вскрывается и сбрасывает избыточное давление.

Так же внутри камеры экспозиции расположен вентилятор для перемешивания продуктов горения с воздухом и фотометрическое оборудование, состоящее из приемника и источника света. Источник света исполнен в виде гелий-неонового лазера мощностью от 2 до 5 мВт с длиной волны 625-740 нм. Лазер расположен снаружи установки. В центре верхней стенки камеры экспозиции установлено крепление для него и кварцевое стекло с подогревом. Луч лазера направлен строго вертикально, а расстояние в задымленной зоне составляет 800 мм. Фотометрическое оборудование должно обеспечивать измерение светового потока в рабочем диапазоне светопропускания от 2 до 90 % с погрешностью не более 10% [56]. В случае выхода значения светопропускания за границы диапазона согласно методике [56] размер образца допускается уменьшить.

Камера экспозиции имеет внутренние размеры равные: 0,8×0,8×0,8 м. Среднее время проведения огневых испытаний 10-20 минут. Размер образца для испытания изначально равен: 40×40 мм. Начальная плотность теплового потока на поверхность образца задается равной 35 кВт/м² далее изменяется с шагом 5 кВт/м². Испытания проводятся в двух режимах терморазложения: горении и тлении. Результаты испытаний и условия их проведения регистрируют в протоколе.

Согласно данному методу [56] коэффициент дымообразования определяется как удельно массовый коэффициент по следующей формуле:

$$D_m = \frac{V}{L \cdot m} \ln \frac{T_0}{T_{min}}; \quad (1.1)$$

где: V – объем камеры экспозиции, м³; L – расстояние в задымленной зоне, которую проходит луч лазера, м; m – масса образца, кг; T_0, T_{min} – соответственно значения начального и конечного светопропускания, % [56].

Масса образца измеряется предварительно на поверенных средствах измерения массы. В случае, когда минимальное значение светопропускания выходит за пределы рабочего диапазона или находится вблизи его границ, допускается изменять размеры образца [56]. При этом измениться и масса образца, которая учитывается в формуле 1.1.

Дымообразующая способность конденсированных веществ и материалов, как правило, основана на общефизических оптических свойствах смеси воздуха и продуктов горения. Измерение данного параметра производится, как правило, на поверенных средствах измерения интенсивности светопропускания. Однако методы измерения дымообразующей способности имеют отличия. Отличия бывают в конструкции измерительных установок, условиях внутри камеры сгорания, размерах образцов и методах расчета [24, 28, 61]. Как правило, существует два удельных коэффициента дымообразования: первый рассчитывается из учета массы образца, а второй из учета обогреваемой площади поверхности образца.

Комплексный учет массы, площади и соотношения объема образца к объему камеры экспозиции в расчете коэффициентов дымообразования на данный момент отсутствует.

В ряде методов есть ограничение по толщине образца, однако в расчете данный параметр никак не учитывается. Однако изменение площади обогреваемой поверхности и толщины образца оказывает влияние на точность и воспроизводимость результатов огневых испытаний для одного и того же вещества или материала [26-28, 62].

За рубежом, как правило, существует два способа измерения оптической плотности дыма. Первый способ – измерения в условно замкнутом объеме, второй – измерение проводится на участке, через который удаляется дым наружу. Основными зарубежными методами определения дымообразующей способности являются [63-69]: ASTM E662-09, ASTM D2843-10, ISO 9705-1:2016. Каждый метод описывает свое измерительное оборудование [70], представленное на рисунке 1.11.

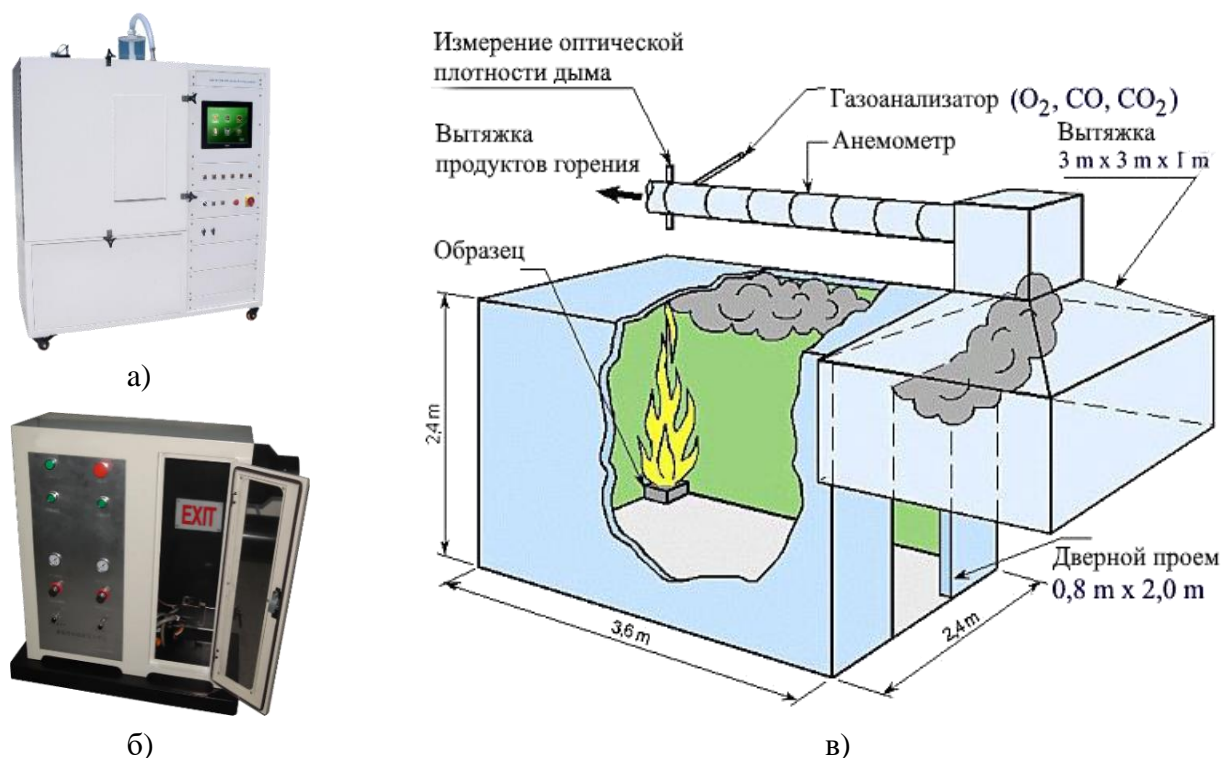


Рисунок 1.11 – Зарубежные установки, позволяющие определить дымообразующую способность конденсированных веществ и материалов [69]: а) «Smoke Box NBS» камера для испытания плотности дыма [64]; б) Дымовая камера [63]; в) Схема огневой комнаты [66]

Данные установки, как правило, включают в себя всё необходимое измерительное оборудование для расчета коэффициентов дымообразования, однако на зарубежном рынке устройств существует отдельная система фотометрического определения оптической плотности дыма производства FTT (DIN 50055). Она предназначена для использования с оборудованием, исследующим образование дыма при горении веществ и материалов. Данный аппарат, показанный на рисунке 1.12, используется для следующих установок: для испытания в установке «угол комнаты», (ISO 9705) [66], для испытания воздействием одиночного источника горения (SBI), (EN 13823), установка для измерения тепловыделения по IEC 60332 Часть 3 (согласно проекту, FIPEC), туннель Штейнера или установка испытания напольных покрытий с тепловыделяющей панелью (EN ISO 9239-1) и т.п.



Рисунок 1.12 – Система измерения плотности дыма при помощи белого света
DIN 50055 [34]

Установка состоит из следующих элементов:

- источника света;
- системы измерения интенсивности светового потока;
- блока управления.

Расчет значения коэффициента дымообразования производится на основании полученных данных ослабления пучка света по соответствующей расчетной методике на установке, на которой применяется данное измерительное оборудование.

1.5 Анализ результатов аналитических расчетов времени блокирования путей эвакуации по потере видимости

Согласно интегральной математической модели развития пожара в помещении и методике [4, 51-53] в условно герметичном объеме здания или помещения простой геометрической формы, время блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара можно определить посредством следующих

аналитических решений [4, 51-53]:

$$\tau_{кр}^{T.} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[1 + \frac{70 - t_0}{(273 + t_0) \cdot z} \right] \right\}^{1/n}; \quad (1.2)$$

$$\tau_{кр}^{n.г.} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[1 - \frac{V \ln(1,05\alpha E)}{l_{np} B D_m z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}; \quad (1.3)$$

$$\tau_{кр}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[1 - \frac{0,044}{\left(\frac{B \cdot L_{O_2}}{V} + 0,27 \right) \cdot z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}; \quad (1.4)$$

$$\tau_{кр}^{T.г.} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[1 - \frac{V \cdot X}{B \cdot L \cdot z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}; \quad (1.5)$$

где: A – размерный параметр, учитывающий удельную массовую скорость выгорания горючего материала и площадь пожара, кг/сⁿ; B – размерный комплекс, зависящий от теплоты сгорания материала и свободного объема помещения, кг; t_0 – начальная температура воздуха, °С; z – безразмерный параметр, учитывающий неравномерность распределения ОФП по высоте помещения; V – свободный объем помещения, м³; E – начальная освещенность, лк; D_m – дымообразующая способность горящего материала, Нп·м²/кг; α – коэффициент отражения предметов на путях эвакуации; l_{np} – предельная дальность видимости в дыму; L – удельный выход токсичных газов при сгорании 1 кг материала, кг/кг.; X – предельно допустимое содержание токсичного газа в помещении, кг/м³.

Для анализа времени наступления критических значений для каждого из опасных факторов пожара были применены данные аналитические соотношения. Анализ результатов численного решения по аналитическим соотношениям был проведен с использованием программы Microsoft Excel [54], внутри которой были прописаны формулы (1.2-1.5) и исходные данные для расчетов. Исходные данные были разделены на две группы: параметры, относящиеся к пожарной нагрузке и параметры здания или помещения. В качестве параметров пожарной нагрузки были

использованы значения из базы данных типовой пожарной нагрузки [4]. В качестве параметров, относящихся к зданию или помещению, были приняты следующие значения: $H = 6$ м, $h = 1,7$ м, $\eta = 1$, $l_1 = 20$ м, $l_2 = 50$ м, $\varphi = 0,55$, $E = 50$ лк, $\alpha = 0,3$, $C_p = 0,00105$ МДж/кг, $t_0 = 20$ °С.

где: H – высота помещения, м; h – высота рабочей зоны, м; η – коэффициент полноты горения; l_1 – ширина помещения, м; l_2 – длина помещения, м; φ – коэффициент теплопотерь; C_p – удельная изобарная теплоемкость газа, МДж/кг; t_0 – начальная температура воздуха в помещении, °С; E – начальная освещенность, лк; α – коэффициент отражения предметов на путях эвакуации.

Результаты анализа, численного решения по аналитическим соотношениям (1.2-1.5) показали, что для 88,06 % видов пожарной нагрузки согласно базе [4] снижение видимости в дыму, как опасный фактор пожара, достигает критического для человека значения первым. Результаты расчетов представлены на рисунке 1.13.

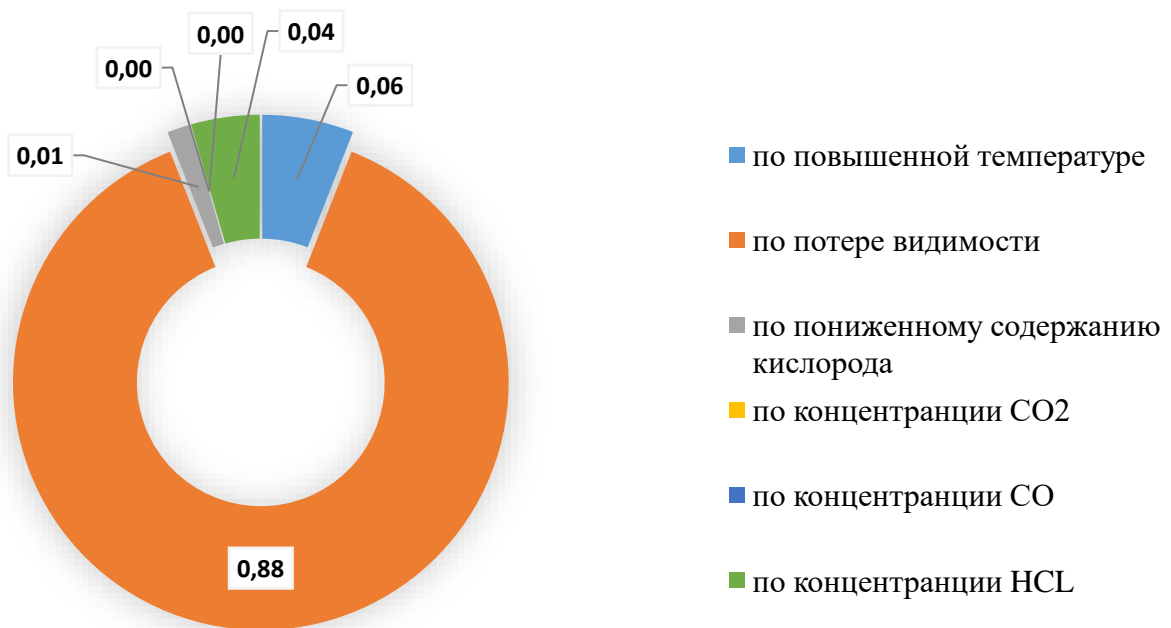


Рисунок 1.13 – Диаграмма частоты достижения критических значений опасными факторами пожара

Более подробно результаты численного эксперимента представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Время достижения критических значений по опасным факторам пожара.

№ п/ п	Вид пожарной нагрузки	Время достижения критических значений по опасным факторам пожара					
		$\tau_{кр}^T$	$\tau_{кр}^{CO}$	$\tau_{кр}^{CO_2}$	$\tau_{кр}^{O_2}$	$\tau_{кр}^{HCL}$	$\tau_{кр}^{п.в.}$
1.	Пшеница, рис, гречиха и мука из нее (пищевая промышленность)	7,8	9,7	-	9,4	-	1,1
2.	Оболочка и изоляция кабеля АВВГ ПВХ	6,4	17,9	-	8,9	3,9	1,8
3.	Резиновая изоляция провода типа КПРТ, ПТ, ВПРС	5,2	-	-	9,1	-	1,9
4.	Резинотехнические изделия: резина, изд. из нее	5,3	-	-	9,0	-	1,9
5.	Здание 1-2 степени огнестойкости: мебель + бытовые изд.	8,6	-	-	9,1	3,8	2,1
6.	Здание 3-4 степени огнестойкости: мебель + бытовые изд.	8,6	-	-	9,1	3,8	2,1
7.	Провод 25% (КПРТ, ПР, ШРПС) + кабель 75% (АВВГ, АПВГ, ТПВ)	5,5	-	-	9,2	6,1	2,2
8.	Кабели АВВГ+ АПВГ (кабельный подвал/лоток)	5,8	18,6	-	9,2	4,8	2,2
9.	Телефонный кабель ТПВ ПВХ + полиэтилен	5,4	24,4	-	9,3	5,9	2,3
10.	Электротехнические материалы: текстолит, карболит	7,0	-	-	8,9	8,1	2,3
11.	Автомобиль: 10% эмаль + 15% (ППУ, кожа ПВХ) + 30% (резина, бензин)	5,7	-	-	9,0	6,9	2,4
12.	Дизельное топливо	4,7	-	-	9,1	-	2,5
13.	Толуол	5,0	23,9	-	9,1	-	2,5
14.	Зал: 10% (ткань, искусственная кожа, ПВХ, ППУ) + 20% дерево с покрытием + 50% ДВП	8,0	-	-	8,8	4,1	2,8
15.	Индустриальное масло	4,9	-	-	9,7	-	2,8
16.	Полиэтилен, полистирол, полипропилен	5,4	-	-	8,8	9,1	2,8
17.	Оболочка кабеля АПВГ ПВХ + полиэтилен	5,3	19,2	-	9,3	6,0	2,8
18.	Керосин	4,9	29,1	-	9,1	-	2,9
19.	Ксилол	5,0	24,3	-	8,9	-	3,0
20.	Ковролин	8,2	7,9	-	8,1	8,2	3,0
21.	Нефть	4,8	23,5	-	9,1	-	3,0
22.	Каюта с синтетической отделкой дерево + ткани + отделка	8,1	-	-	9,1	3,1	3,2
23.	Сырье для легкой промышленности: шерсть	6,9	-	-	9,0	-	3,4
24.	Тара: 50% древесина + 25% картон + 25% полистирол	7,0	17,2	-	9,1	8,8	3,4
25.	Помещение, облицованное панелями ДВП	7,5	-	-	9,3	-	3,5
26.	упаковка: 40% бумага + 30% картон + 15% полиэтилен + 15% полистирол	6,6	16,4	-	9,1	11,0	3,5
27.	Бензин А76	4,9	19,6	-	9,1	-	3,9
28.	Мебель; дерево + облицовка	8,5	-	-	8,9	8,2	3,9
29.	Турбинное масло ТП22	4,9	-	-	10,2	-	3,9
30.	Верхняя одежда: ворс, ткани (шерсть + нейлон)	6,6	-	-	8,1	-	4,0
31.	Здание 1-2 степени огнестойкости: мебель + ткани	8,4	-	-	8,8	6,2	4,0
32.	Здание 3-4 степени огнестойкости: мебель + ткани	8,4	-	-	8,8	6,2	4,0
33.	Клееные стройматериалы: фанера	7,5	12,5	-	9,2	-	4,0
34.	Мебель + 80% бумага + 20% ковровое покрытие	8,5	16,3	-	8,8	-	4,2
35.	Окрашенные полы стены дерево + краска	8,5	-	-	9,0	24,6	4,2
36.	Производство фанеры: 50% древесина + 50% фанера	8,0	17,4	-	9,1	-	4,2
37.	Сырье и синтетические изд. из каучука	4,9	26,5	-	9,2	13,6	4,3
38.	Хвойные древесные материалы	8,6	-	-	9,0	-	4,5
39.	Лесопильный цех 1-3 степени огнестойкости: древесина	8,6	-	-	9,0	-	4,7
40.	Лесопильный цех 4-5 степени огнестойкости: древесина	8,6	-	-	9,0	-	4,7
41.	Сценическая часть зрительного зала: древесина	8,6	-	-	9,0	-	4,7
42.	Цех деревообработки: древесина	8,6	-	-	9,0	-	4,7
43.	Цех сушки древесины: древесина	8,6	-	-	9,0	-	4,7
44.	Штабель древесный: хвойный + лиственный лес	8,6	-	-	9,0	-	4,7
45.	Здание 1 степени огнестойкости: 25% ткани + 75% мебель	8,3	-	-	8,8	-	4,8

№ п/п	Вид пожарной нагрузки	Время достижения критических значений по опасным факторам пожара					
		$\tau_{кр}^T$	$\tau_{кр}^{CO}$	$\tau_{кр}^{CO_2}$	$\tau_{кр}^{O_2}$	$\tau_{кр}^{HCL}$	$\tau_{кр}^{п.в.}$
46.	Здание 3 степени огнестойкости: 25% ткани + 75% мебель	8,3	-	-	8,8	-	4,8
47.	Административное помещение: 25% бумага + 75% мебель	8,6	-	-	9,0	-	4,9
48.	Выставочный зал, мастерская: 1% краска + 9% ткани + 90% дерево	8,6	-	-	8,9	-	4,9
49.	Кабинет: 25% бумага + 75% мебель	8,6	-	-	9,0	-	4,9
50.	Древесные стройматериалы (лиственные)	8,6	-	-	9,0	-	4,9
51.	Вешала текстильных изделий	7,8	22,0	-	8,2	-	5,0
52.	Занавес зрительного зала кинотеатра	8,6	-	-	9,1	-	5,0
53.	Промышленные товары; текстильные изделия	7,8	22,2	-	8,2	-	5,0
54.	Библиотеки, архивы: книги, журналы на стеллажах	8,4	12,3	-	9,0	-	5,2
55.	Общественные здания: 90% мебель + 10% линолеум ПВХ	8,6	-	-	8,8	6,2	5,2
56.	Лекарственные препараты: 95% этиловый спирт + 5% глицерин	6,2	9,5	-	9,0	-	5,3
57.	Склад оргстекла (ПММА) - оргстекло	6,2	16,2	-	9,1	-	5,6
58.	Этиловый спирт	6,1	9,6	-	9,0	-	5,7
59.	Ацетон	5,9	9,9	-	9,1	-	5,8
60.	Издательство типографии	8,2	8,9	-	9,1	-	5,9
61.	Склад бумаги в рулонах	8,3	11,8	-	9,1	-	5,9
62.	Дерево: 5% лак + 95% древесина	5,5	-	-	9,7	-	7,2
63.	Склад льноволокна	8,1	-	-	8,6	-	-
64.	Склад тюков с хлопком	7,8	-	-	9,2	-	-
65.	Сырье: лен разрыхленный	8,1	-	-	8,6	-	-
66.	Сырье: 75% хлопок + 25% капрон	8,1	-	-	7,5	-	-
67.	Сырье: хлопок разрыхленный	7,9	-	-	8,3	-	-

Примечание: знак «←» означает что по данному опасному фактору в объеме заданного помещения и исходных параметров критического значения не наступает.

Анализируя данные, приведенные в таблице 1.1, можно сделать следующие выводы:

– оболочки кабелей среди предложенного списка типовой пожарной нагрузки [4] по своим теплотехническим и пожароопасным свойствам являются наиболее опасными, так как при их горении время блокирования путей эвакуации меньше по сравнению с другими видами пожарной нагрузки;

– для пожарной нагрузки группы Д1 [32] с малой дымообразующей способностью, такие как лён и хлопок, места её хранения наиболее безопасны в заданном объеме помещения.

Согласно методикам [51, 52] в случае отсутствия информации по начальной освещенности E , лк внутри объекта защиты можно принять равным значению в 50 лк. Но рассматривая требования в нормах освещенности [70], приведенные в таблице 1.2, можно сделать вывод что значение степени освещенности на путях эвакуации может варьироваться в пределах от 20 до 750 лк и выше [54].

Таблица 1.2 – Нормы освещенности для некоторых типов помещений [70]

Тип помещения	нормы освещенности, лк
Ремонтные мастерские	750
Проектные залы и комнаты конструкторские, чертежные бюро	500
Читальные залы	400
Кабинеты, рабочие комнаты, офисы представительства	300
Конференцзалы, залы заседаний	200
Фойе и тамбуры	150
Книгохранилища, архивы, фонды открытого доступа	75
Снарядные, инвентарные, хозяйственные кладовые	50
Поэтажные внеквартирные коридоры, вестибюли, лифтовые холлы	30
Лестницы	20
Шахты лифтов	5

На основании данных требований к степени освещенности повторно были проведены вышеописанные расчеты с поправкой на степень освещенности. Результаты расчетов представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Частота достижения (в %) критических значений по опасным факторам пожара

опасные факторы пожара	влияние степени освещенности E , лк на частоту достижения критических значений, % первым среди опасных факторов пожара							
	1500	750	500	400	300	200	100	50
<i>повышенная температура</i>	20,9	20,9	20,9	17,91	17,91	14,93	11,94	7,46
<i>снижение видимости в дыму</i>	73,13	74,63	74,63	77,61	77,61	80,6	85,07	89,55
<i>концентрация O_2</i>	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49	1,49
<i>концентрация CO_2</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>концентрация CO</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>концентрация HCL</i>	4,48	2,99	2,99	2,99	2,99	2,99	1,49	1,49

Из таблицы 1.3 видно, что увеличение степени освещенности положительно сказывается на времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму. Однако даже при максимально требуемой степени освещенности снижение видимости в дыму является приоритетным по времени наступления критических значений опасный фактор пожара среди основных. Помимо степени освещенности на время блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму большое

влияние имеет значение коэффициента дымообразования.

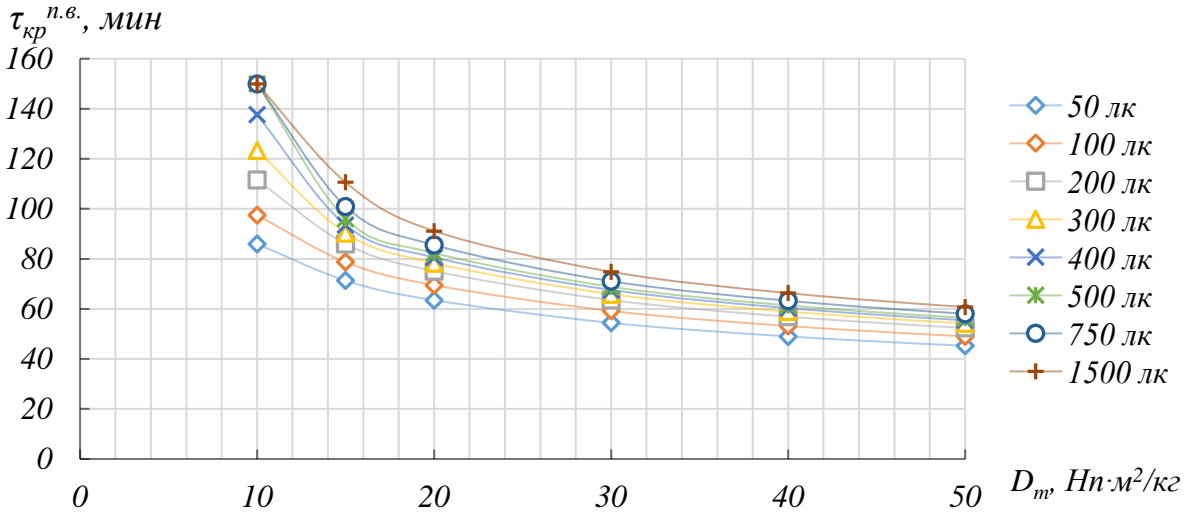
Поэтому для наглядной демонстрации были проведены расчеты, согласно формуле (1.3), времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму для условного горючего материала со следующими свойствами: $\psi_{уд} = 0,0115 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$, $v_l = 0,013 \text{ м/с}$, $Q_n = 13,8 \text{ МДж/К}$, $D_m = 10\text{-}1500 \text{ Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$; $E = 50\text{-}1500 \text{ лк}$, где Q_n – низшая теплота сгорания материала, МДж/К; $\psi_{уд}$ – удельная массовая скорость выгорания вещества, кг/м²·с; v_l – линейная скорость распространения пламени, м/с; D_m – коэффициент дымообразования, Нп·м²/кг; E – степень освещенности, лк.

Полученные результаты сведены в таблицу 1.4. Анализ, приведенных в таблице значений показал, что, чем меньше значение коэффициента дымообразования, тем больше влияние точности измерения на результат расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

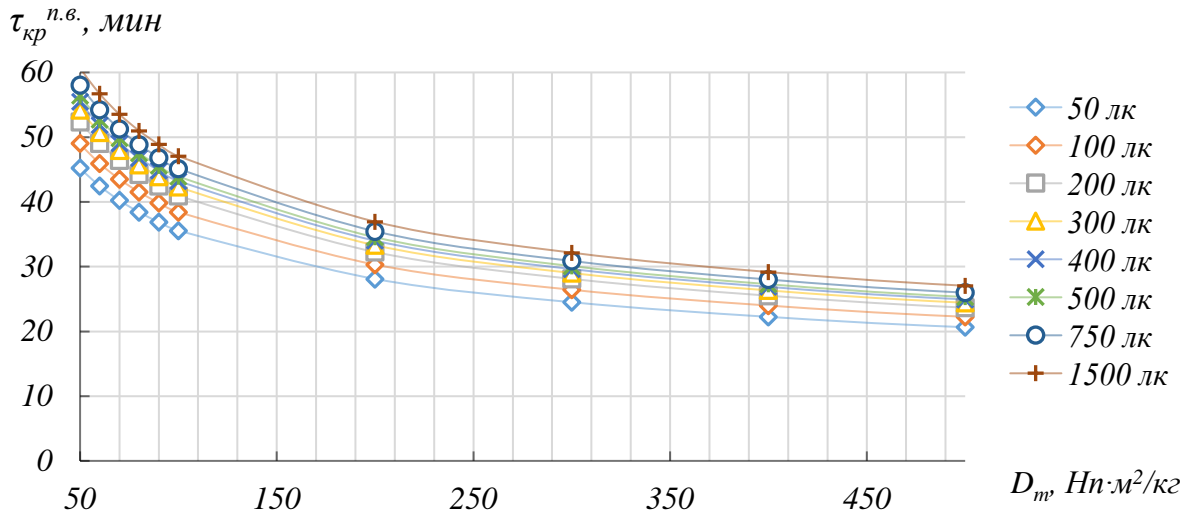
Таблица 1.4 – Время достижения критических значений по потере видимости [54]

D_m , Нп·м ² /кг	влияние степени освещенности E , лк на время $\tau_{кр}^{п.в.}$, мин достижения критического значения по потере видимости							
	50	100	200	300	400	500	750	1500
10	85,9	97,4	111,5	123,3	137,6	-	-	-
15	71,3	78,7	86,0	90,4	93,5	96,1	101,0	110,6
20	63,5	69,5	75,1	78,3	80,6	82,3	85,5	91,1
30	54,4	59,2	63,5	65,9	67,6	68,8	71,1	74,8
40	49,0	53,2	56,9	58,9	60,3	61,4	63,3	66,3
50	45,3	49,0	52,4	54,2	55,5	56,4	58,1	60,8
60	42,5	45,9	49,0	50,7	51,9	52,7	54,2	56,7
70	40,2	43,5	46,4	48,0	49,0	49,9	51,3	53,5
80	38,4	41,5	44,3	45,8	46,8	47,5	48,9	51,0
90	36,9	39,9	42,5	43,9	44,9	45,6	46,8	48,9
100	35,6	38,4	40,9	42,3	43,2	43,9	45,1	47,1
200	28,1	30,3	32,3	33,3	34,0	34,5	35,5	37,0
300	24,5	26,4	28,1	29,0	29,6	30,1	30,9	32,2
400	22,3	24,0	25,5	26,3	26,9	27,3	28,0	29,2
500	20,6	22,3	23,7	24,4	24,9	25,3	26,0	27,1
750	18,0	19,4	20,7	21,3	21,8	22,1	22,7	23,6
1500	14,3	15,4	16,4	16,9	17,3	17,5	18,0	18,7
3000	11,3	12,2	13,0	13,4	13,7	13,9	14,3	14,8
5000	9,6	10,3	11,0	11,3	11,5	11,7	12,0	12,5

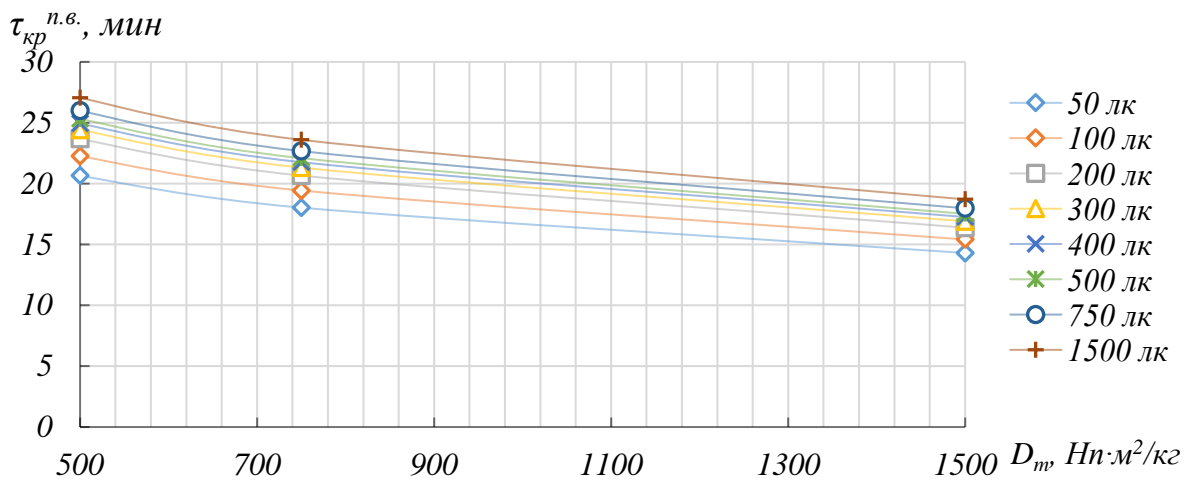
Результаты расчетов также представлены на рисунке 1.14.



а) малая дымообразующая способность до 50 Нп·м²/кг (Д1)



б) умеренная дымообразующая способность от 50 до 500 Нп·м²/кг (Д2)



в) высокая дымообразующая способность от 500 Нп·м²/кг (Д3)

Рисунок 1.14 – Графики зависимости времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму от дымообразующей способности условной пожарной нагрузки

Из рисунка видно, что зависимость времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму от значения коэффициента дымообразования имеет логарифмическую зависимость.

Согласно данным из приведенной таблицы 1.4 можно сделать следующие выводы:

– для материалов с высокой дымообразующей способностью погрешность измерения коэффициента дымообразования в $\pm 1 \text{ Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$ в среднем приведет к погрешности в расчете времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на 0,070 %;

– для материалов со средней дымообразующей способностью погрешность измерения коэффициента дымообразования в $\pm 1 \text{ Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$ в среднем приведет к погрешности в расчете времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на 0,812 %;

– для материалов с высокой дымообразующей способностью погрешность измерения коэффициента дымообразования в $\pm 1 \text{ Нп}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$ в среднем приведет к погрешности в расчете времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на 5,360 %.

1.6 Анализ методов расчета динамики распространения опасных факторов пожара

Прогнозирование пожара по определению является сложной в рамках прогноза математической задачей, так как пожар – это неконтролируемый процесс горения, приводящий к ущербу или гибели людей. Разработка метода расчета образования и распространения пожара и продуктов горения в объеме помещения является сложной задачей ещё потому, что такой процесс как пожар должен рассматриваться с точки зрения различных дисциплин.

В основе методов расчета динамики распространения опасных факторов пожара должны рассматриваться процессы химических реакций, сопутствующие

этому процессы тепломассообмена, потере прочности и целостности несущих и ограждающих конструкций и т.д.

К основным сложностям в разработке методов расчета можно отнести следующие:

- учет процессов фазового перехода веществ и материалов при пожаре и влияние на него;
- учет процессов выделения и образования горючих газов из пожарной нагрузки под воздействием температуры и возможности образования взрывоопасных концентраций;
- учет естественной и принудительной вентиляции, образования турбулентных потоков частиц продуктов горения и свежего воздуха;
- учет воздействия пожара на конструктив здания.

На сегодняшний день существует три математических модели расчета образования и динамики распространения опасных факторов пожара [4, 7-9, 51] такие как:

- Интегральная;
- Зонная (Зональная);
- Полевая.

Интегральная математическая модель пожара в помещении определяет основные параметры опасных факторов пожара как среднеобъемные показатели равные для всего объема здания или помещения.

Интегральная модель проста в применении, имеет ряд упрощений и допущений, хорошо работает на небольших объемах. Данную модель не рекомендуется применять для объектов большой площади или высотных зданий атриумного типа.

Данный метод относится к детерминированным.

Зонная математическая модель пожара в помещении в отличии от интегральной модели делит объем здания или помещения на три основных зоны:

зона припотолочных газов, зона конвекции над очагом и незадымляемая зона чистого воздуха.

Аналогично интегральной модели зонная модель использует интегральные уравнения и, как следствие, расчетные значения параметров опасных факторов пожара рассчитываются средними по расчетной зоне.

Зонная модель хорошо применима для геометрически простых зданий и помещений, больших по площади, имеющих рабочие зоны на разных уровнях с наклонными поверхностями.

Полевая математическая модель пожара в помещении, так же имеющая название дифференциальная, основана на применении дифференциального метода вычисления, согласно которому прогнозируется пространственно-временное распределение параметров опасных факторов пожара в любой точке здания или помещения. Полевая математическая модель хорошо работает с объектами со сложной геометрией. Сегодня для расчета динамики распространения опасных факторов пожара применяются специализированные программные продукты, которые ускоряют процесс расчета и имеют различного рода визуализацию процессов горения.

1.7 Выводы по первой главе

1. Пожары на объектах энергетики приводят к гибели и травмированию персонала и большому материальному ущербу и являются причиной остановки многих объектов народного хозяйства, работа которых напрямую зависит от получаемой энергии в виде тепла и электричества.

2. Наиболее опасной пожарной нагрузкой с точки зрения потери видимости в дыму на объектах энергетики являются горючие оболочки кабелей. Однако, в литературных источниках нет данных по дымообразующей способности современной кабельной продукции, находящейся на объектах энергетики.

3. Проведенные численные эксперименты с использованием аналитических соотношений интегральной математической модели пожара в помещении установили, что для большинства видов пожарной нагрузки со средней и высокой дымообразующей способностью снижение видимости в дыму будет определяющим опасным фактором пожара при расчете времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

4. Для повышения точности расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму необходимо увеличить точность измерения дымообразующей способности для веществ и материалов, находящихся на объектах энергетики. Однако, дымообразующая способность определяется из испытаний на маломасштабных установках. Поэтому использование полученных данных при расчете потере видимости в полномасштабных реальных помещениях требует теоретического обоснования.

5. Метод экспериментального определения коэффициента дымообразования твердых веществ и материалов по ГОСТ-12.1.044-89, а также зарубежные аналоги установок по определению оптической плотности дыма являются действующими методами для классификации строительных материалов по дымообразующей способности, однако имеют существенные недостатки, не позволяющие их использовать для получения достоверных исходных данных к моделям пожара.

По результатам обзора литературных источников можно сформулировать следующие основные **задачи**, необходимые для достижения поставленной цели в работе:

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

- 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.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ДЫМА НА ПУТЯХ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

2.1 Математические модели для определения времени блокирования путей эвакуации при снижении видимости в дыму

2.1.1 Расчет дальности видимости в дыму по интегральной модели пожара в помещении

Интегральная модель использует дифференциальные уравнения, описывающие процесс пожара. Эти уравнения были сформулированы (предложены) профессором Ю.А. Кошмаровым в 1976 году [4]. Данные дифференциальные уравнения базируются на фундаментальных законах природы. Данная модель применима, когда [51-52]:

- достаточно большой источник пожара (соизмерим с размерами помещения);
- относительно небольшой объем помещений.

Учитывая особенности данной модели, её применение рекомендовано при выполнении следующих условиях [51-52]:

- расчетный объем здания имеет простую геометрию и малый объем помещений;
- расчетный объем помещений имеет соизмеримые линейные размеры, имеющие отличия не более чем в 5 раз, а также очаг пожара должен быть соизмерим с объемом помещения;
- расчет является предварительным в целях выявления наиболее неблагоприятного сценария.

При выборе помещения, вытянутого по одной из осей более чем в пять раз больше относительно других, допускается деление объема помещения на участки, удовлетворяющих, вышеупомянутым условиям. Участки рассматриваются как отдельные помещения с проемами равными сечению между участками. Однако такой способ применим только в случае, когда только один размер превышает два других.

Рассчитать критическую дальность видимости в дыму согласно интегральной модели возможно согласно уравнению баланса оптической плотности дыма [4]:

$$V \cdot d\mu_m / d\tau = \psi \cdot D_m, \quad (2.1)$$

где: V – объем помещения, м³; μ_m – оптическая плотность дыма в помещении, Нп/м; τ – время, с; ψ – массовая скорость выгорания вещества или материала, кг/с; D_m – дымообразующая способность вещества или материала, Нп·м²/кг;

Принято считать, что предельная дальность видимости в дыму для человека равна 20 м [51-52] или принимается равной наибольшему из двух линейных горизонтальных размеров помещения в случае, когда они не превышают 20 м.

Предельная дальность видимости $l_{пр}$, м с оптической плотностью дыма μ , Нп/м при обычных условиях связана следующим соотношением [4, 51-52, 71]:

$$l_{пр} = 2,38/\mu, \quad (2.2)$$

Среднеобъемная оптическая плотность дыма μ_m , Нп/м равна отношению оптического количества дыма S , Нп·м² к объему помещения [4]:

$$\mu_m = \frac{S}{V}, \quad (2.3)$$

Оптическое количество дыма в объеме помещения является произведением эффективного сечения экстинкции частиц χ , м², среднеобъемной концентрации твердых частиц дыма N , м⁻³ и занимаемого объема помещения [4]:

$$S = \chi NV, \quad (2.4)$$

Оптическая плотность дыма в объеме помещения определяется при решении балансового уравнения (2.1). Оптическая плотность дыма для помещения в n -й момент времени определяется согласно уравнению:

$$\mu_{(n)} = \frac{\psi \cdot D_m}{V} \cdot d\tau, \quad (2.5)$$

Критическое время наступления ОФП, в том числе, по потере видимости в дыму, для помещения с высотой не более 6 метров, соответствующего условиям для использования интегральной модели, не оборудованном системами противопожарной защиты, допускается рассчитывать при помощи данного аналитического соотношения [4, 51-52, 71]:

$$\tau_{кр}^{н.в.} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 - \frac{V \cdot \ln(1.05 \cdot \alpha \cdot E)}{l_{np} \cdot B \cdot D_m \cdot z} \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{n}}, \quad (2.6)$$

где: $B = \frac{353 \cdot c_p \cdot V}{(1-\varphi) \cdot \eta \cdot Q_H}$ – размерный комплекс, кг; A – размерный параметр,

основанный на удельной массовой скорости выгорания пожарной нагрузки и площади горения, кг/сⁿ; n – показатель степени, основанный на изменении массы выгорающего материала во времени; α – коэффициент отражения предметов на путях эвакуации; E – начальная освещенность, лк; Z – безразмерный параметр, основанный на неравномерности распределения ОФП по высоте помещения.

2.1.2 Расчет дальности видимости в дыму по зонной модели пожара в помещении

Впервые зонная математическая модель пожара в помещении была предложена в диссертационном исследовании Воланина Е., работа которого была выполнена под руководством профессора Кошмарова Ю. А. Дальнейшим развитием данной модели занимались Воланина Е., Тимошенко В. Н. и др.

Зонная математическая модель пожара в помещении в отличие от интегральной модели делит объем здания или помещения на три основных зоны: зона припотолочных газов, зона конвекции над очагом и незадымляемая зона чистого воздуха. Общая схема тепломассообмена согласно данной модели представлена на рисунке 2.1.

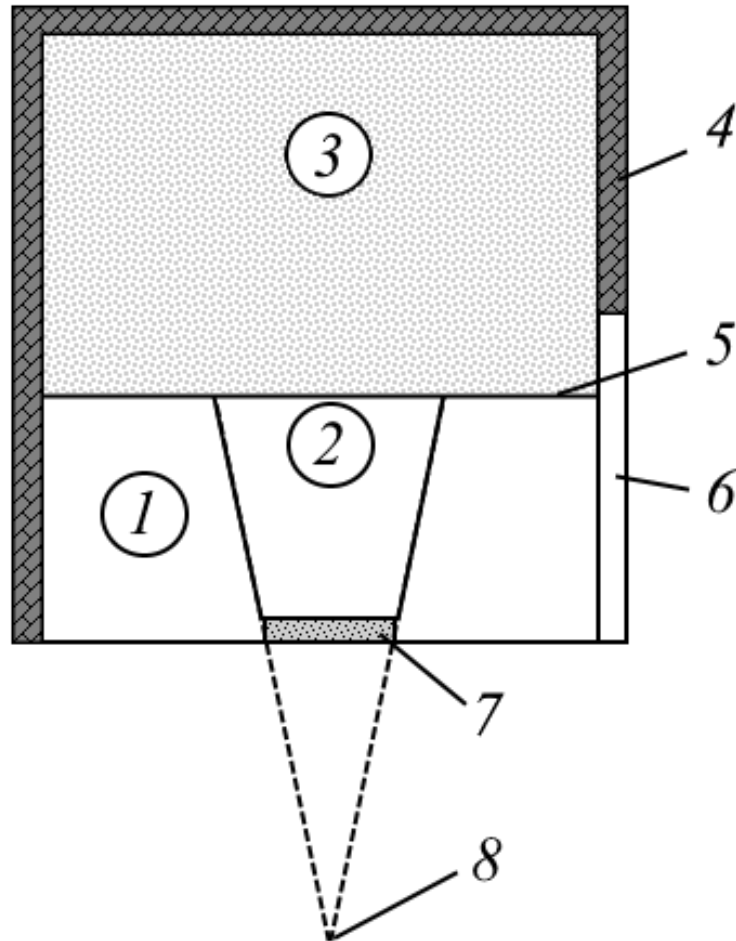


Рисунок 2.1 – Схема тепломассообмена в здании или помещении при расчете по зонной математической модели пожара [72]: 1 – зона чистого воздуха; 2 – зона конвективной колонки; 3 – зона припотолочного слоя (дымовая зона); 4 – ограждающие конструкции; 5 – нейтральная плоскость; 6 – открытый проем; 7 – пожарная нагрузка; 8 – расчетный источник теплоты

Аналогично интегральной модели зонная модель использует интегральные уравнения и, как следствие, расчетные (средние по рассматриваемой зоне) значения параметров опасных факторов пожара.

Зонная модель хорошо применима для геометрически простых зданий и помещений, больших по площади, имеющих рабочие зоны на разных уровнях с наклонными поверхностями.

Данная модель часто применяется для расчетов динамики распространения опасных факторов пожара на его начальной стадии развития.

Уравнение баланса оптического количества дыма в припотолочном слое имеет вид [4]:

$$\frac{d(\mu_m V)}{d\tau} = D_m \psi, \quad (2.7)$$

и, следовательно:

$$\mu_m = \frac{1}{V} \int_0^{\tau} D_m \psi d\tau = \frac{D_m m}{V}, \quad (2.8)$$

где: V – объем помещения, м³; μ_m – оптическая плотность дыма в помещении, Нп/м; τ – время, с; ψ – массовая скорость выгорания вещества или материала, кг/с; D_m – дымообразующая способность вещества или материала, Нп·м²/кг; m – масса, кг.

2.2 Обоснование возможности применения результатов маломасштабных экспериментов к полномасштабному помещению

2.2.1 Условно герметичное помещение

Рассмотрим математическую модель определения оптической плотности дыма для условно герметичного объема здания или помещения. Схема теплообмена в условно герметичном объеме здания или помещения представлена на рисунке 2.2 [72].

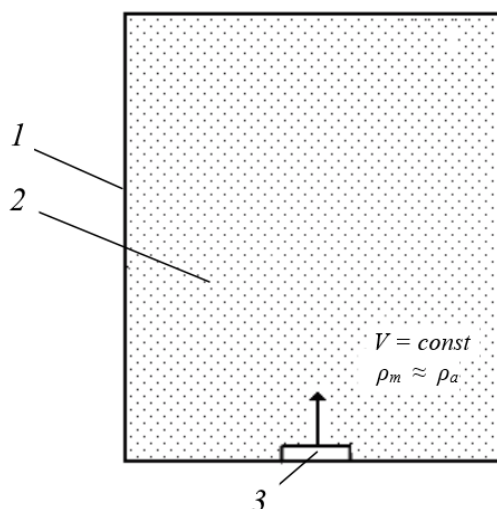


Рисунок 2.2 – Схема теплообмена в условно герметичном объеме здания или помещения [72]: 1 – ограждающие конструкции (стенки); 2 – дымовая зона; 3 – пожарная нагрузка (конденсированное вещество или материал)

Законы сохранения энергии, уравнения баланса оптического количества дыма и массы кислорода в условно герметичном объеме соответственно имеют вид [4]:

$$V \frac{d}{d\tau} (\rho_m c_p T_m) = \eta \psi Q_H^P (1 - \varphi), \quad (2.9)$$

$$V \frac{d\mu_m}{d\tau} = D_m \psi, \quad (2.10)$$

$$V \frac{d\rho_{O_2m}}{d\tau} = -\eta \psi L_{O_2}, \quad (2.11)$$

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 – удельная 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.

Удельную изобарную теплоемкость газовой среды принимаем равной как для воздуха [8-9]: $c_p = 1000$ Дж/(кг·К).

Среднеобъемная температура T_m в начале расчета принимаем равной температуре в помещении перед пожаром.

Совместно решая уравнения (2.9) и (2.10) и учитывая, что в герметичном объеме $\rho_m \approx \rho_a$, можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры [73]:

$$\mu_m = K_1(T_m - T_a), \quad (2.12)$$

где $K_1 = \frac{D_m \rho_a c_p}{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}$ – коэффициент пропорциональности, Нп/(м·К); T_a – температура воздуха в объеме перед горением, К; ρ_a – плотность воздуха в объеме перед горением, кг/м³.

После совместного решения уравнений (2.10) и (2.11) получаем зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода [73]:

$$\mu_m = K_2(\rho_{O_2a} - \rho_{O_2m}), \quad (2.13)$$

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 (2.12) и (2.13) 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 (2.12) и (2.13) могут использоваться при расчете как в маломасштабном, так и в полномасштабном помещении.

Полученные формулы (2.12) и (2.13) можно использовать в зонной математической модели, так как припотолочный слой можно рассматривать как условно герметичный согласно уравнению (2.7) с выделением дыма не в конвективной колонке, а в припотолочном слое.

2.2.2 Начальная стадия пожара

В случае выбора интегральной математической модели, если 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 [4]:

$$\frac{T_m}{T_a} = \exp\left(\frac{A}{B} \tau^n\right), \quad (2.14)$$

$$\mu_m = \mu_* \left[1 - \exp\left(-\frac{A}{B} \tau^n\right) \right], \quad (2.15)$$

$$\rho_{O_{2m}} = \frac{B \eta L_{O_2}}{V} \left\{ \left(1 + \frac{V}{B \eta L_{O_2}} \rho_{O_{2a}} \right) \exp\left[-\frac{A}{B} \tau^n\right] - 1 \right\}, \quad (2.16)$$

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/сⁿ.

Совместно решая уравнения (2.14) и (2.15), можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от относительного изменения среднеобъемной температуры [73]:

$$\mu_m = K_3 \left(\frac{T_m - T_a}{T_m} \right), \quad (2.17)$$

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 (2.15) и (2.16) можно получить зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения

среднеобъемной парциальной плотности кислорода [73]:

$$\mu_m = K_4(\rho_{O_2a} - \rho_{O_2m}), \quad (2.18)$$

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

Из уравнений (2.17) и (2.18) видно, что величина среднеобъемной оптической плотности дыма прямо пропорциональна относительному изменению среднеобъемной температуры и изменению среднеобъемной парциальной плотности кислорода. Поэтому зависимости (2.17) и (2.18) 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 её сохранения.

На основе, полученных в работе [9] схем пожара для описания характерной оптической плотности дыма можно использовать следующую формулу:

$$\mu_m = K \frac{D_m}{Q_H^P}, \quad (2.19)$$

где μ_m – среднеобъемная оптическая плотность дыма, Нп/м; K – коэффициент пропорциональности, Дж/м³; D_m – коэффициент дымообразования, Нп·м²/кг; Q_H^P – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг.

Полученную формулу (2.19) можно записать как:

$$\mu_m = \mu^* D_m, \quad (2.20)$$

где $\mu^* = K / Q_H^P$ – характерная оптическая плотность дыма, Нп/м.

Коэффициент пропорциональности в данном случае имеет прямую зависимость трех температурных показателей, выраженных в данной формуле [9]:

$$K = f(T_{cp}, T_6, \varphi) \quad (2.21)$$

Расписанная формула (2.21) в основе своей не имеющая прямой зависимости от размеров помещения, является справедливой для описания процессов пожара в маломасштабном и полномасштабном помещении.

Данное выражение дает возможность сопоставлять эмпирическим путем, полученные данные на маломасштабной установке с расчетными данными на

полномасштабном здании или помещении с учетом коэффициента теплопотерь.

Таким образом, выражение (2.21) в совокупности с экспериментальными данными позволяет проводить расчет среднеобъемной оптической плотности дыма в полномасштабном здании или помещении с учетом поправки на коэффициент теплопотерь.

2.3 Методика расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре на объектах энергетики

Точность расчета дальности видимости существенно зависит от величины дымообразующей способности [6, 74-75] веществ и материалов, полученной экспериментально. Дымообразующая способность, в свою очередь, зависит от химического состава и физических параметров пожарной нагрузки [10-12, 76-77], а также на данный показатель существенно влияют параметры газовой среды помещения и количество окислителя [9, 29, 78-81].

При расчете снижения видимости в дыму необходимо учитывать такие факторы как:

- процессы естественной конвекции;
- принудительная вентиляция (дымоудаление, подпор воздуха);
- орошение автоматическими системами пожаротушения.

Последние два не учитываются, так как свободное развитие пожара более опасно, а системы обеспечения пожарной безопасности имеют вероятность срабатывания.

Методика расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре на объекте энергетики представлена в виде блок-схемы на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Блок-схема методики расчета потере видимости в дыму при пожаре на объекте энергетики

Процесс сбора исходных данных включает в себя следующие пункты:

- сбор геометрических параметров здания, помещений, проемов и т.д.;
- выявление в порядке количества и степени пожарной опасности видов пожарной нагрузки;
- определение расположения и массы пожарной нагрузки;
- анализ имеющихся на объекте технических систем, обеспечивающих пожарную безопасность;
- определение мест возможного нахождения людей и путей их эвакуации.

Сценарии развития пожара создаются на основе анализа, собранных исходных данных. Полученные сценарии анализируются и из их числа выбирается наиболее неблагоприятный. Построение дерева событий [52] в данной работе не рассматривается.

Выбор математической модели расчета динамики ОФП осуществляется согласно критериям в работах [9, 51-52, 82-87] с учетом возможности и рациональности использования той или иной модели на рассматриваемом объекте.

Далее в случае отсутствия данных, описывающих пожароопасные свойства пожарной нагрузки, производится отбор образцов с последующим проведением огневых испытаний по методу, описанному далее в главе 3 (п.3.3).

При получении всех необходимых исходных данных для моделирования пожара производится расчет динамики распространения ОФП в том числе расчет времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

Для определения времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму необходимо определить критические значения для данного типа объекта таких параметров как: предельная дальность видимости в дыму и критическое значение оптической плотности дыма.

Предельную дальность видимости принято считать равной 20 м [88] при условии, если длина здания или помещения больше этого значения. В случае, когда горизонтальные размеры здания или помещения меньше 20 м значение предельной дальности видимости в дыму принимается равным длине данного объекта [51-52].

Критическое значение оптической плотности дыма для человека в условиях потери видимости в дыму на объектах энергетики определяется исходя следующей зависимости [88]:

$$B_{кр} = \frac{\alpha E_0}{\pi} e^{-\mu_{кр} l_{np}} \quad (2.22)$$

$$C = \ln \left(\frac{\alpha E_0}{\pi B_{кр}} \right) \quad (2.23)$$

$$\mu_{кр} = \frac{C}{l_{np}} = \frac{2,38}{l_{np}} \quad (2.24)$$

где l_{np} – предельная дальность видимости в дыму, м; $\mu_{кр}$ – критическое значение оптической плотности дыма, m^{-1} ; $B_{кр}$ – яркостной порог для зрения

человека в дыму, кд/м^2 ; E_0 – начальная освещенность поверхностей, лк; α – коэффициент отражения поверхности; C – безразмерная характеристика типа объекта наблюдения (фактор видимости).

Яркостной порог для зрения человека согласно работе [88] принимается равным значению $0,302 \text{ кд/м}^2$. Значения начальной освещенности и коэффициента отражения поверхности, при отсутствии данных для определенного объекта, приниматься равными 50 лк и 0,3 соответственно.

Значения, принимаемые для коэффициента отражения поверхности подробно описаны в [89]. Согласно данному источнику, значение коэффициента отражения 0,3 относится к стенам из силикатного кирпича и бетона.

При условии, когда на объекте энергетики фактические значения начальной степени освещенности и коэффициента отражения поверхностей на путях эвакуации значительно отличаются от стандартных значений [51-52], необходимо использовать фактические значения данных показателей, так как они в значительной степени влияют на значение фактора видимости C [54, 85].

Согласно [4, 51-52] в обычных условиях безразмерная характеристика типа объекта наблюдения C принимается равным значению 2,38. При условии, когда предельная дальность видимости равна 20 м критическое значение оптической плотности дыма равно $0,119 \text{ м}^{-1}$.

Однако при расчете безразмерной характеристики типа объекта C критическое для человека значение оптической плотности дыма необходимо принимать равным согласно соотношениям (2.23, 2.24).

Расчетные показатели критического для человека значения оптической плотности дыма при пожаре на объектах энергетики представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Критические для человека значения оптической плотности дыма [74]

Безразмерная характеристика типа объекта наблюдения С	Критическое значение оптической плотности дыма $\mu_{кр}$, m^{-1} при заданной предельной дальности видимости в дыму $l_{пр}$, м			
	20	15	10	5
2,0	0,100	0,133	0,20	0,40
2,1	0,105	0,140	0,21	0,42
2,2	0,110	0,147	0,22	0,44
2,3	0,115	0,153	0,23	0,46
2,4	0,120	0,160	0,24	0,48
2,5	0,125	0,167	0,25	0,50
2,6	0,130	0,173	0,26	0,52
2,7	0,135	0,180	0,27	0,54
2,8	0,140	0,187	0,28	0,56
2,9	0,145	0,193	0,29	0,58
3,0	0,150	0,200	0,30	0,60
3,1	0,155	0,207	0,31	0,62
3,2	0,160	0,213	0,32	0,64
3,3	0,165	0,220	0,33	0,66
3,4	0,170	0,227	0,34	0,68
3,5	0,175	0,233	0,35	0,70
3,6	0,180	0,240	0,36	0,72
3,7	0,185	0,247	0,37	0,74
3,8	0,190	0,253	0,38	0,76
3,9	0,195	0,260	0,39	0,78
4,0	0,200	0,267	0,40	0,80
4,1	0,205	0,273	0,41	0,82
4,2	0,210	0,280	0,42	0,84
4,3	0,215	0,287	0,43	0,86
4,4	0,220	0,293	0,44	0,88
4,5	0,225	0,300	0,45	0,9
4,6	0,230	0,307	0,46	0,92
4,7	0,235	0,313	0,47	0,94
4,8	0,240	0,320	0,48	0,96
4,9	0,245	0,327	0,49	0,98
5,0	0,250	0,333	0,50	1,00

Зависимость критического для человека значения оптической плотности дыма от безразмерной характеристики типа объекта отражения при различном значении предельной дальности видимости в дыму представлена на рисунке 2.4.

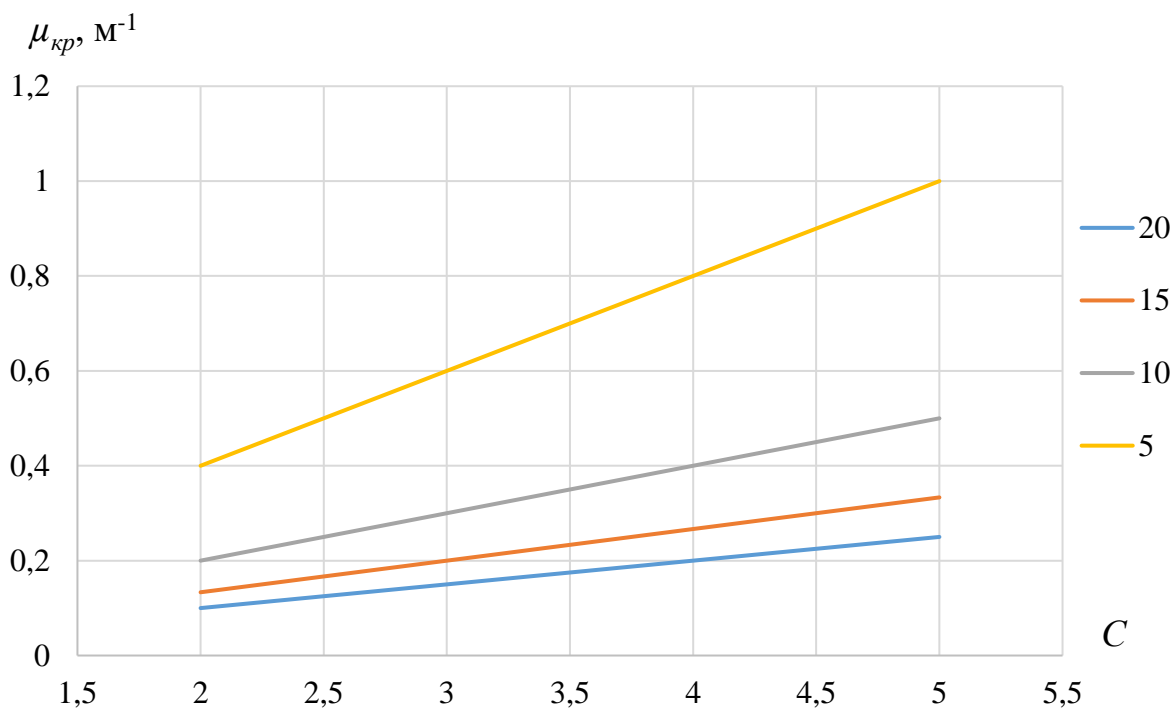


Рисунок 2.4 – График зависимости критического для человека значения оптической плотности дыма от безразмерной характеристики типа объекта отражения при различном значении предельной дальности видимости в дыму

Таким образом, определив критическое для человека значение оптической плотности дыма на исследуемом объекте энергетики, производится расчет времени достижения оптической плотности дыма данного значения. В случае, когда это время меньше значения времени достижения критических значений другими опасными факторами пожара, оно будет считаться временем блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму согласно следующему выражению [4, 51-52]:

$$\tau_{\text{бл}} = \min \left\{ \tau_{\text{кр}}^{\text{н.в.}}, \tau_{\text{кр}}^{\text{T}}, \tau_{\text{кр}}^{\text{м.э.}}, \tau_{\text{кр}}^{\text{O}_2} \tau_{\text{кр}}^{\text{м.н.}} \right\} \quad (2.25)$$

Для использования, предложенной методики по расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму изначально будет необходимо подготовить образцы веществ или материалов, которые фактически применяются на объекте моделирования, провести серию огневых испытаний с целью определения зависимости оптической плотности дыма от температуры продуктов горения. На основе, полученных зависимостей с учетом коэффициента теплопотерь в полномасштабном помещении выполнить расчет динамики

нарастания температуры по интегральной или зонной модели.

Полученные экспериментальные данные на модифицированной установке возможно применять для стандартного подхода [4] с использованием коэффициента дымообразования при решении системы дифференциальных уравнений.

2.4 Выводы по второй главе

1. Разработаны модификации интегральной и зонной математических моделей, в которых вместо решения уравнения закона сохранения оптической плотности дыма можно использовать аналитические выражения зависимости $\mu_m = f(T)$ или $\mu_m = f(\rho_{O_2})$.

2. Обоснована возможность применения результатов огневых испытаний в маломасштабной модифицированной установке для полномасштабного объема здания или помещения. Полученные данные огневых испытаний позволяют проводить расчет среднеобъемной оптической плотности дыма в полномасштабном объеме здания или помещения.

3. Предложенный подход расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму по сравнению с действующими методиками предлагает использовать эмпирические зависимости, полученные при проведении огневых испытаний современных конденсированных веществ и материалов, которые фактически используются на объекте.

ГЛАВА 3. МОДИФИКАЦИЯ УСТАНОВКИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ

3.1. Постановка задачи экспериментального определения зависимости оптической плотности дыма от температуры в модифицированной маломасштабной установке

Необходимо разработать модификации маломасштабной установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов, получить экспериментальные и теоретические зависимости оптической плотности дыма от среднеобъемной температуры газовой смеси, коэффициента дымообразования и массовой скорости выгорания от времени экспозиции.

Интенсивность светопропускания определяются при помощи фотометрического оборудования, получаемые значения фиксировать при помощи цифрового амперметра и вольтметра постоянного тока Щ02П.

Значения оптической плотности дыма рассчитываются по формуле [20, 90]:

$$\mu_m = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I_{min}}, \quad (3.1)$$

где μ_m – оптическая плотность дыма, Нп/м; I_0 , I_{min} – соответственно значения начального и конечного светопропускания, %; L – длина пути луча света в задымленной среде, м [90].

Массовую скорость выгорания вещества или материала определять в процессе проведения огневых испытаний посредством измерения массы образца на электронных весах AND GF-6100 по формуле [4]:

$$\psi = \frac{m_i - m_{i+1}}{\tau_i - \tau_{i+1}}, \quad (3.2)$$

где: ψ – массовая скорость выгорания, г/с; m – масса образца, г; τ – время

фиксации значения массы образца, с.

Коэффициент дымообразования, исследуемого конденсированного вещества или материала, определяется согласно формуле [56, 91-93]:

$$D_m = \frac{V}{L \cdot m} \ln \frac{I_0}{I_{min}}, \quad (3.3)$$

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

Перед началом проведения серии огневых испытаний на модифицированной маломасштабной установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов, позволяющей измерять величину оптической плотности дыма и удельного дымообразования, необходимо провести:

1. Разработку методики проведения огневых испытаний и правил техники безопасности;
2. Поверку измерительного оборудования, к числу которого относятся: электронные весы, низкоинерционные термопары, цифровой амперметр и вольтметр постоянного тока;
3. Калибровку электронагревательного излучателя с учетом возможности проведения огневых испытаний с различной удаленностью поверхности образца от источника излучения;
4. Выбор исследуемых веществ или материалов и подготовку их для проведения огневых испытаний.

3.2. Выбор оборудования для определения зависимости оптической плотности дыма от температуры

Оптическая плотность дыма определяется по закону Бугера [90] на основе затухания монохроматического света в дыме. Для её определения необходимо фотометрическое оборудование с источником направленного луча и приемником, позволяющим измерять значения интенсивности падающего на его поверхность света.

Температура продуктов горения необходимо измерять термопарой с низкой инерционностью и большим диапазоном измерения вплоть до 1000 °С.

Установка по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов, разработанная в Академии ГПС МЧС России в рамках научного исследования [93], представленная на рисунке 3.1, не оснащена фотометрическим оборудованием, однако в отличие от стандартной установки, описанной в главе 1 п. 1.4. она позволяет измерять температуру продуктов горения в 27 точках внутри экспозиционной камеры и массовую скорость выгорания исследуемого конденсированного вещества или материала.

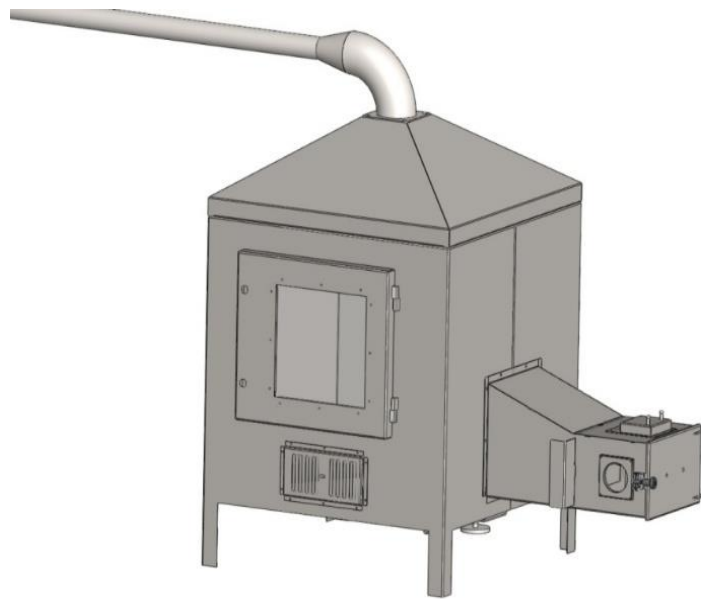


Рисунок 3.1 – Общий вид 3D модели установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов [94]

На основании изложенного было принято решение модифицировать установку по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов оснастив её фотометрическим оборудованием аналогичным [56]. В качестве источника света был выбран лазерный диод: ADL-63054TL мощностью 5мВт и длиной волны 630-640 нм внешний вид которого представлен на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Внешний вид лазерного диода ADL-63054TL [34]

Основные технические характеристики данного лазерного диода представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики ($t_{\text{раб.}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Параметр	Значение
Тип диода	лазерный
Длина волны излучения, нм	635±5
Оптическая мощность, мВт	5
Пороговый ток, мА	24
Рабочий ток, мА	33
Рабочее напряжение, В	2.2
Тип корпуса	ТО-5.6mm, 3-pin, window cap
Рабочие температуры, °C	-10...+50

В качестве приемника света был выбран кремниевый фотодиод ФД24К (ФД-7К) внешний вид которого представлен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Внешний вид фотодиода ФД24К (ФД-7К) [34]

Основные технические характеристики данного фотодиода представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Основные технические характеристики фотодиода ФД-24К

Параметр	Значение
Токовая фоточувствительность, при рабочем напряжении 27 В и освещенности 1000 лк, мкА/лк	не менее 0,47
Темновой ток, мкА	не более 2,5
Постоянная времени фотоприемника, мкс	не более 10
Емкость фотодиода, пФ	600

В качестве прибора сбора данных с фотодиода был выбран цифровой амперметр и вольтметр постоянного тока Щ02П для измерения и преобразования силы тока и напряжения в цепях постоянного тока в выходные унифицированные сигналы постоянного тока и последовательный цифровой интерфейс RS485.

Прибор, внешний вид которого представлен на рисунке 3.4, может работать в составе полевой сети на основе последовательного интерфейса RS-485 с протоколом Modbus RTU в качестве ведомого устройства.

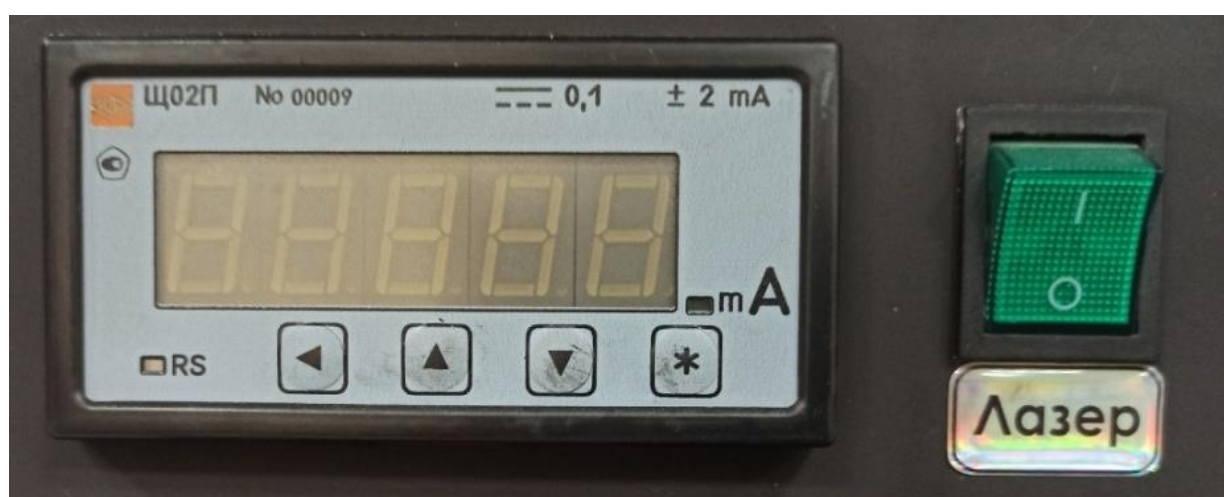


Рисунок 3.4 – Внешний вид цифрового амперметра и вольтметра постоянного тока Щ02П и кнопки включения лазера

Данный прибор имеет информационное табло с элементами управления и настройки отображаемой информации. Рядом с ним была установлена кнопка включения лазера и преобразователь RS-485 на USB интерфейс с возможностью передачи данных на ПК в реальном времени. Прием и обработка данных, получаемых с прибора, осуществлялась посредством компьютерной программы ASCII EL, идущего в комплекте с прибором. Интерфейс данного ПО показан на рисунке 3.5.

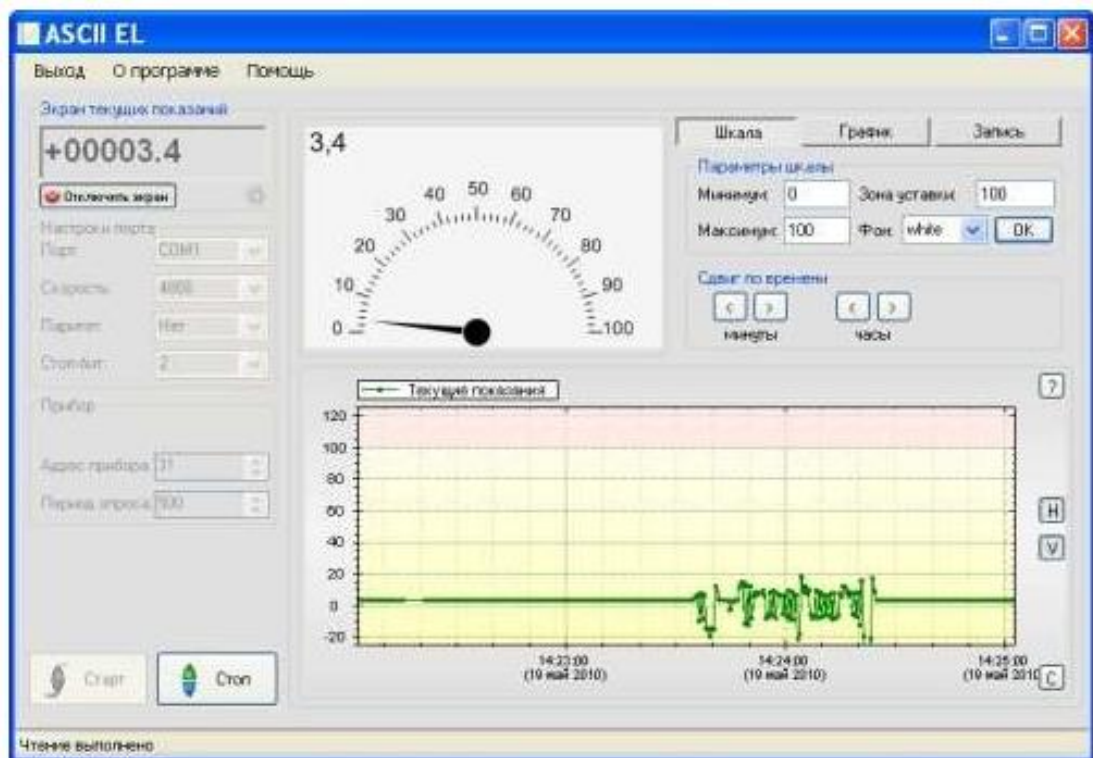


Рисунок 3.5 – Диалоговое окно программы ASCII EL [34]

Для измерения температуры продуктов горения были использованы уже имеющиеся внутри экспозиционной камеры установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов низко-инерционные термомпары типа КТХА 02.01-062-К1-И-Т600-1.5-60/3300 с диапазоном измерения от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.3. Описание модифицированной маломасштабной установки и методики проведения огневых испытаний

Установка по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов разработана в целях проведения научных исследований и модернизации существующих методов определения пожарной опасности веществ и материалов. На данную установку авторами [93] в 2017 году был получен патент Российской Федерации на полезную модель № 174688 [93].

Данная установка имеет две схемы измерения «Открытая» и «Закрытая». «Открытая» схема измерения, представленная на рисунке 3.6, заключается в том, что измерения проводятся при постоянном оттоке продуктов горения из экспозиционной камеры, тем самым имитируется ситуация пожара, регулируемого вентиляцией [95].

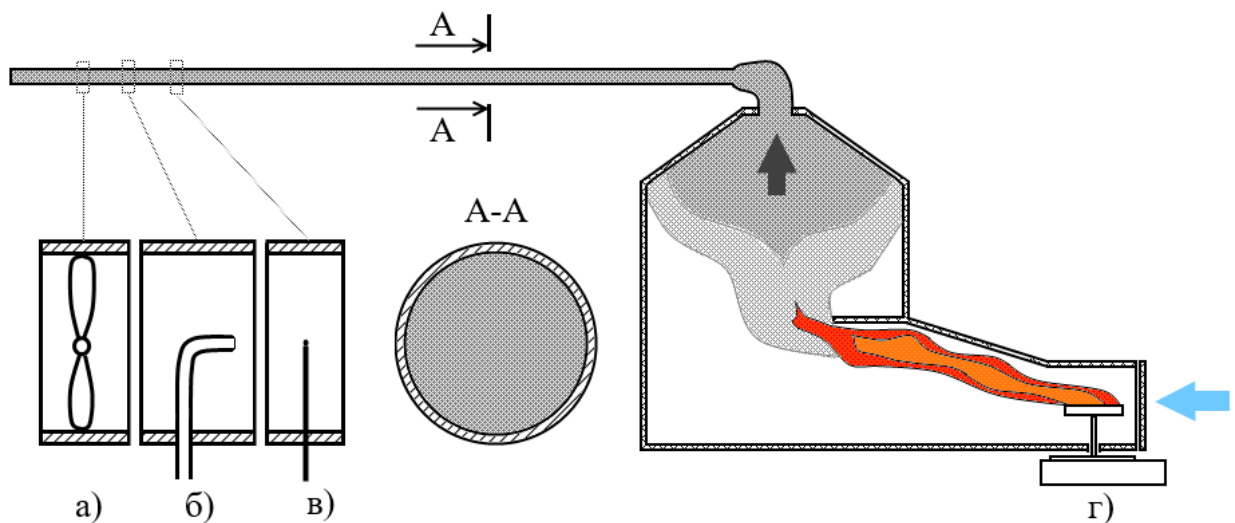


Рисунок 3.6 – Схема измерения «Открытая» на установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов: а) термоанемометр; б) место забора продуктов горения; в) термопара; г) электронные весы

«Закрытая» схема измерения, представленная на рисунке 3.7, заключается в том, что измерения проводятся в условно герметичном объеме, тем самым имитируется ситуация пожара, регулируемого нагрузкой.

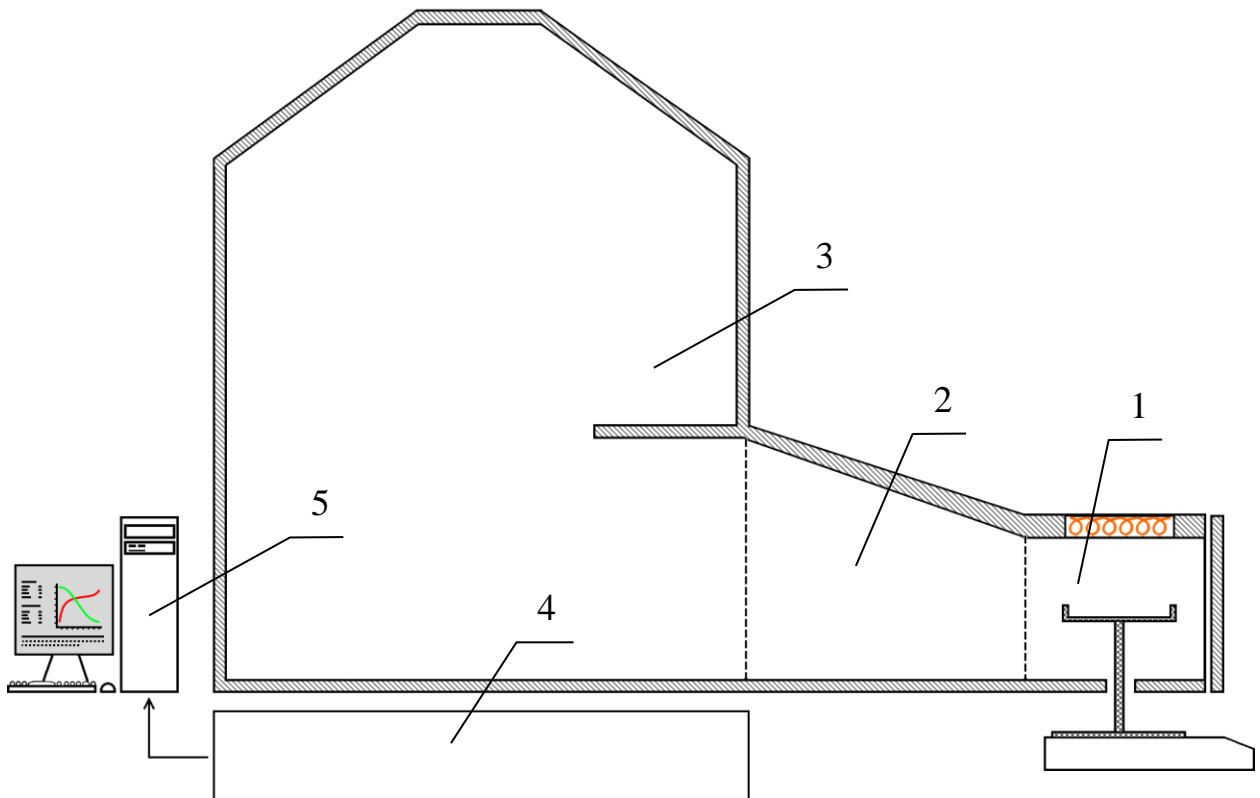


Рисунок 3.7 – Общая блок-схема «Закрытая» установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов: 1 – камера сгорания; 2 – переходной рукав; 3 – экспозиционная камера; 4 – контрольно-измерительный блок; 5 – персональный компьютер

Для решения задач данного исследования было принято решение использовать «Закрытую» схему измерения, так как именно она описывает процесс пожара на его начальном этапе [96]. В рамках данной схемы имеется возможность измерения массовой скорости выгорания, температуры продуктов горения по всему объему экспозиционной камеры и концентрации газов, являющихся компонентами газовой среды, образующейся при терморазложении конденсированных веществ и материалов [96]. На рисунке 3.8 схематически показано расположение измерительного и иного оборудования.

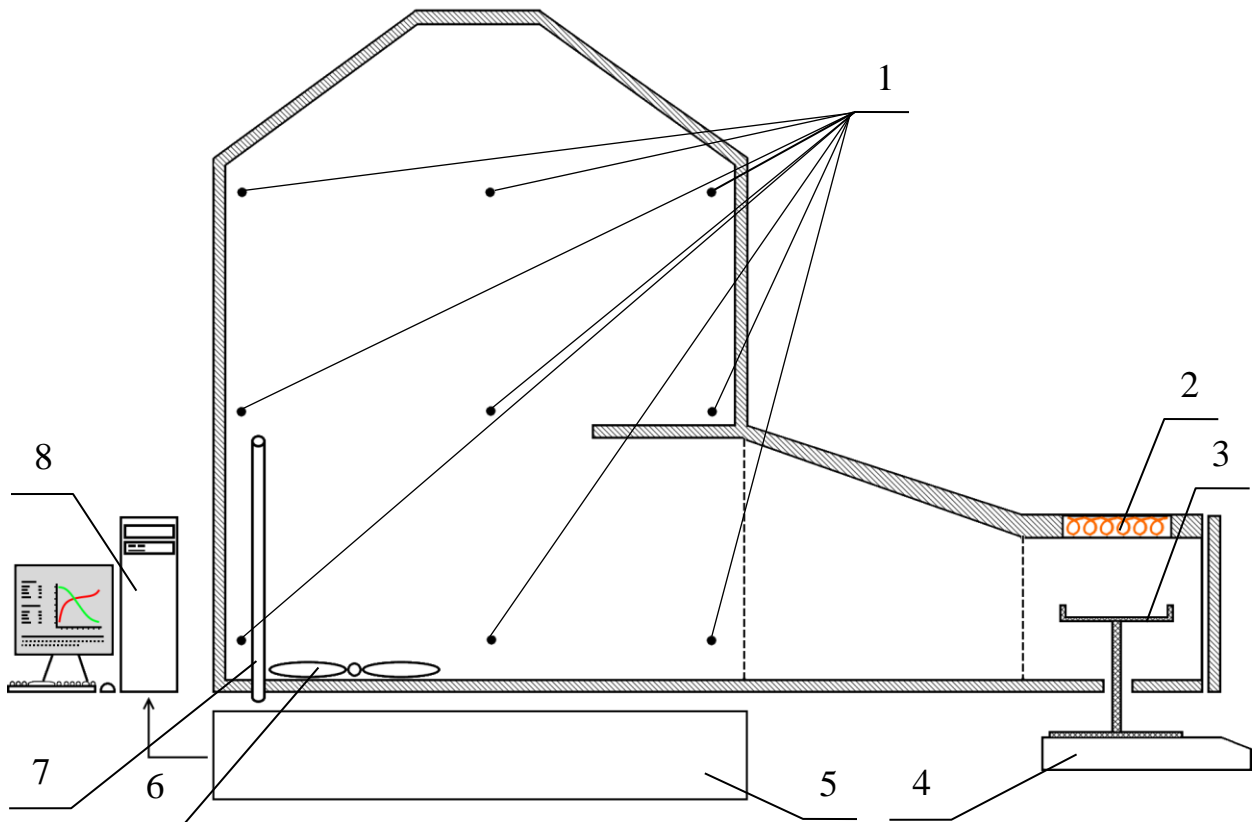


Рисунок 3.8 – Схема расположения измерительной и иной аппаратуры на установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов: 1 – термопары; 2 – электронагревательный излучатель; 3 – держатель образца; 4 – электронные весы; 5 – контрольно-измерительный блок; 6 – вентилятор; 7 – зонд отбора газа; 8 – персональный компьютер

Приведенная установка имеет две основные камеры (камера экспозиции и камера сгорания), соединенные между собой большим переходным рукавом, основной задачей которого является отделить языки открытого пламени от продуктов горения. Контрольно-измерительный блок представляет собой совокупность измерительных приборов и кнопок управления над измерительным и иным оборудованием. Персональный компьютер необходим для получения, обработки и хранения эмпирических данных.

В объеме камеры экспозиции установлены трубки отбора газовой смеси, термопары по всему объему камеры в количестве 27 шт. и лопасти вентилятора для перемешивания газовой смеси продуктов горения с чистым воздухом.

Контрольно-измерительный блок включает в себя два тумблера включения вентилятора и включения измеритель-регулятора ТРМ10, представленного на рисунке 3.9. Данный прибор предназначен для управления электронагревательным излучателем за счет измерения температуры в центре него посредством установленной низкоинерционной термопары на поверхности излучателя в камере сгорания.



Рисунок 3.9 – Внешний вид измеритель-регулятора ТРМ10 [34]

Также контрольно-измерительный блок включает в себя четыре восьмиканальных измерителя УКТ38 с аварийной сигнализацией, представленного на рисунке 3.10. Данный комплекс приборов подключен к двадцати семи термопарам, установленным внутри экспозиционной камеры, и предназначен для измерения температуры внутри неё.



Рисунок 3.10 – Внешний вид УКТ38 восьмиканальный измеритель с аварийной сигнализацией [34]

Ещё одним компонентом контрольно-измерительного блока является многоканальный газоанализатор Dräger X-am 7000 с установленными датчиками следующих газов: CO, CO₂, O₂ и HCN, внешний вид которого представлен на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11 – Внешний вид многоканального газоанализатора Dräger X-am 7000 [34]

На рисунке 3.12 представлена схема поперечного сечения камеры сгорания. Камера сгорания утеплена двумя слоями утеплителя. Непосредственно над поверхностью электронагревательного излучателя 2 установлена система проточного водоохлаждения 6. Корпус 7 выполнен из нержавеющей стали толщиной 3 мм.

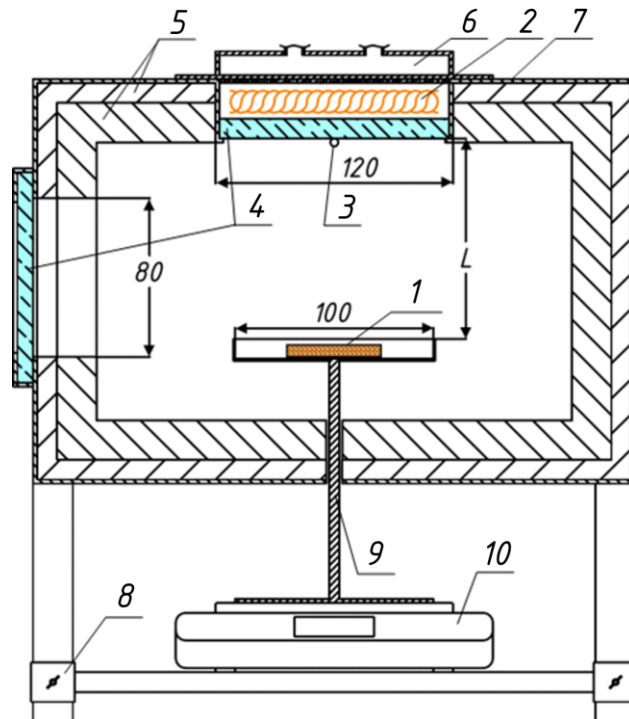


Рисунок 3.12 – Схема поперечного сечения камеры сгорания экспериментальной установки [55]: 1 – образец для испытания; 2 – электронагревательный излучатель; 3 – низкоинерционная термопара; 4 – стекло из кварца; 5 – теплоизолирующий материал; 6 – система проточного водяного охлаждения; 7 – корпус камеры сгорания; 8 – система регулировки удаленности от электронагревательного излучателя до испытуемого образца; 9 – держатель для образца; 10 – электронные весы

Внутри камеры сгорания установлено два керамических стекла 4, из которых одно смотровое, другое как часть электронагревательного излучателя 2. Непосредственно под электронагревательным излучателем установлена калибровочная термопара 3.

Держатель образца 9 стоит на электронных весах 10 и при необходимости посредством системы 8 может изменять свое положение по вертикали.

В отличие от установки [56], описанной в главе 1 п. 1.4, камера сгорания не оборудована искусственным источником зажигания (газовой горелкой), образец для огневых испытаний располагается горизонтально, что, в свою очередь, позволяет проводить испытания жидких веществ.

Для реализации возможности измерения оптической плотности дыма установка [94] была модифицирована. В верхней части камеры экспозиции была установлена литая металлическая трубка с кварцевым стеклом в нижней части, как показано на рисунке 3.13. Луч света от лазерного диода до фотодиода проходит через данную трубку. Расстояние от нижней поверхности стекла до фотодиода ФД24К (ФД-7К) составляет 800 мм.

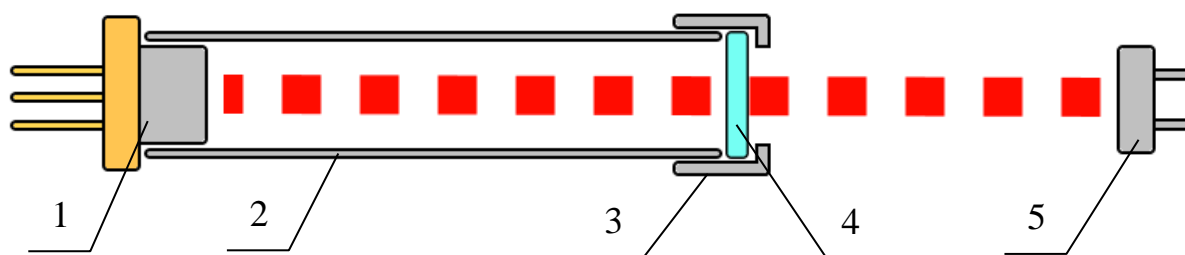


Рисунок 3.13 – Схема компонентов фотометрического оборудования: 1 – лазерный диод: ADL-63054TL; 2 – литая металлическая трубка; 3 – накидная гайка; 4 – кварцевое стекло; 5 – фотодиод ФД24К (ФД-7К)

Чтобы избежать замутнения линзы во время огневых испытаний от нагрева, лазерный диод был установлен вне установки над трубкой.

Также в контрольно-измерительный блок были добавлены два тумблера включения лазера и включения цифрового амперметра и вольтметра постоянного

тока Щ02П для измерения показаний с фотодиода при проведении огневых испытаний и сам прибор.

Схема установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов после модификации представлена на рисунке 3.14.

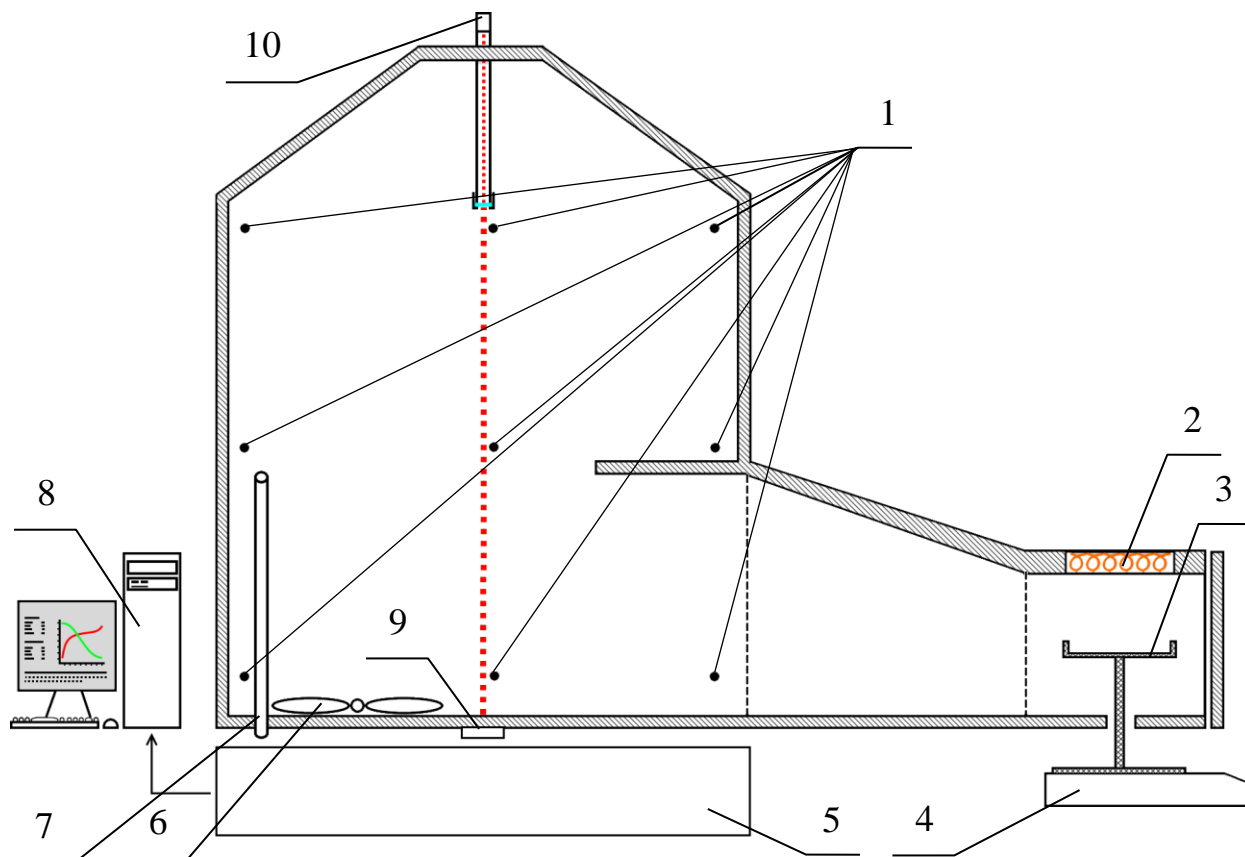


Рисунок 3.14 – Схема модифицированной экспериментальной установки [55]:

1 – термопары; 2 – электронагревательный излучатель; 3 – держатель образца; 4 – электронные весы; 5 – контрольно-измерительный блок; 6 – вентилятор; 7 – зонд отбора газа; 8 – персональный компьютер; 9 – фотодиод ФД24К (ФД-7К); 10 – лазерный диод: ADL-63054TL

Перед проведением огневых испытаний на модифицированной установке подготавливаются образцы простой геометрической формы одинакового размера и массы. Измеряется влажность и температура в помещении.

Огневые испытания исследуемых образцов проводятся в двух режимах: в режиме тления и в режиме горения. Режим задается изменением плотности падающего теплового потока на поверхность образца.

На протяжении проведения огневых испытаний в режиме тления образцы не должны самовоспламеняться. В случае их самовоспламенения последующие

испытания проводят при уменьшенном на 5 кВт/м^2 значении плотности падающего теплового потока. Плотность теплового потока снижается до тех пор, пока самовоспламенение образца не прекратится.

Порядок проведения огневых испытаний включает следующие пункты:

1. Производится запуск электронагревательного излучателя путем подачи на него напряжения согласно калибровочной таблице необходимой величины для создания по уровню поверхности образца плотности падающего теплового потока равной 35 кВт/м^2 .

2. Подается питающее напряжение на лазер и цифровой амперметр постоянного тока Щ02П. Фиксируется начальное значение светопропускания, соответствующее верхнему пределу измерений регистрирующего прибора и принимаемое за 100%;

3. Включают четыре восьмиканальных измерителя УКТ38, запускается предустановленное ПО на ПК для фиксации значений температуры внутри экспозиционной камеры;

4. Включают многоканальный газоанализатор Dräger X-am 7000, запускается предустановленное ПО на ПК для фиксации значений концентрации следующих газов: CO , CO_2 , O_2 и HCN внутри экспозиционной камеры;

5. Включают электронные весы, запускается предустановленное ПО на ПК для фиксации значений массы образца во время испытания;

6. Подготовленный образец помещается в лодочку из нержавеющей стали. Открывается дверца камеры сгорания и без задержки устанавливается лодочка с образцом в держатель, после чего дверца закрывается;

7. Испытание прекращается при достижении минимального значения светопропускания, массы, концентрации кислорода и максимального значения фиксируемых газов;

8. По окончании огневого испытания лодочка с остатками образца вынимается из камеры сгорания. Установка вентилируется пока все продукты горения не удалятся из экспозиционной камеры;

9. Сохраняются фиксируемые значения измерений для дальнейшей обработки данных.

3.4. Экспериментальные исследования влияния параметров внутри камеры сгорания на дымообразующую способность

3.4.1. Влияние расстояния между образцом и электронагревательным элементом

Для проведения данного исследования на модифицированной установке были произведены замеры значений температуры внутри камеры сгорания в точках, указанных на рисунке 3.15. Измерения проводились при достижении температуры на поверхности электронагревательного излучателя равной: 500, 600 и 700°C.

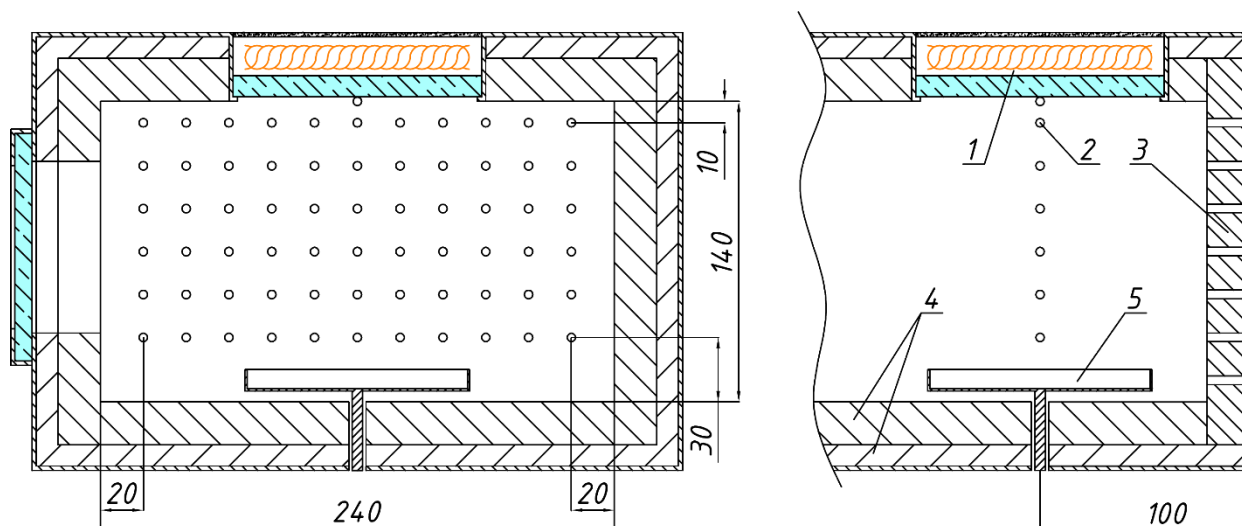


Рисунок 3.15 – Схема расположения термопар внутри камеры сгорания модифицированной установки [97]: 1 – электронагревательный излучатель; 2 – точки замера температуры; 3 – стенка из теплоизоляционного материала с отверстиями для термопар; 4 – теплоизоляционный слой; 5 – держатель образца

Результаты замеров показали, что на расстоянии 110 мм от внешней поверхности кварцевого стекла излучателя разница температур t_n на нагревательном элементе и t_o на поверхности образца может достигать порядка 350-450 °С как показано на рисунке 3.16.

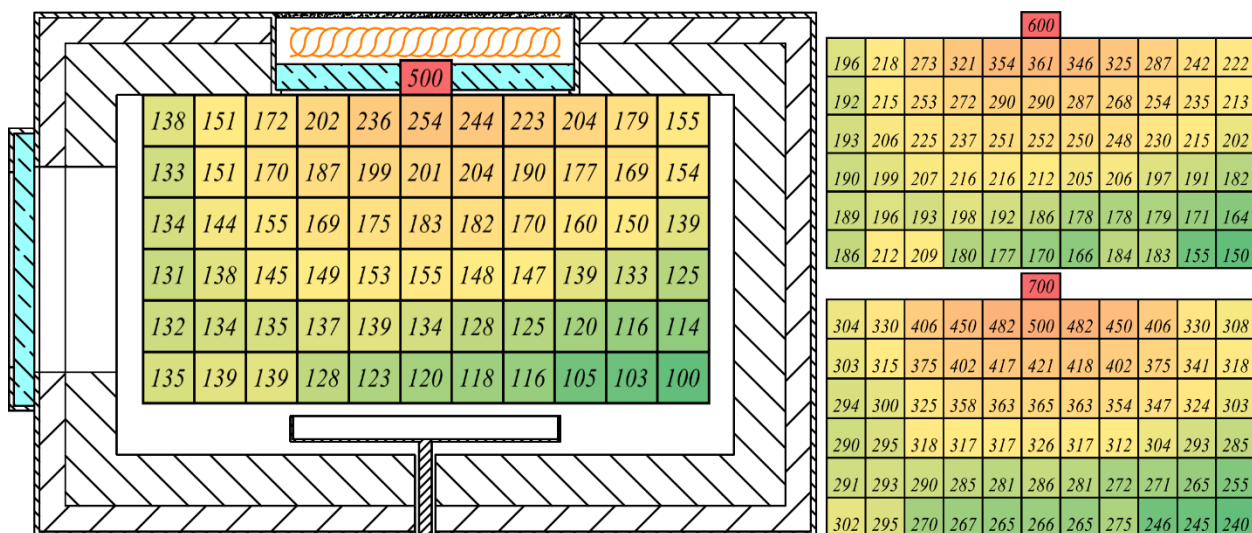


Рисунок 3.16 – Результаты измерения температуры (в °С) внутри камеры сгорания модифицированной установки

Также для проведения данного исследования на модифицированной установке необходимо провести калибровку электронагревательного излучателя на различном расстоянии от центра излучения перпендикулярно ему в направлении держателя образца [55, 98].

Калибровка проводилась без образца, измерения плотности теплового потока выполнялись на расстоянии от центра излучения, равном: 35, 55 и 70 мм. Далее путем аппроксимации были получены значения для других расстояний [55, 98]. Результаты калибровки приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Соотношение между температурой поверхности излучателя и плотностью лучистого теплового потока, падающего на поверхность образца, на различном расстоянии между излучателем и образцом [55]

q , кВт/м ²	t_n , °C, на расстоянии L , мм										
	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35
65	891	860	833	809	793	777	764	746	733	719	708
60	873	842	815	792	774	757	742	727	715	702	693
55	854	824	798	775	756	737	722	707	696	684	675
50	835	806	780	758	738	718	702	688	677	666	658
45	811	783	758	736	716	697	681	667	657	646	638
40	783	756	732	711	693	675	660	646	635	624	616
35	755	728	705	685	667	650	635	621	610	599	591
30	726	701	678	659	641	623	608	593	581	569	560
25	687	663	642	624	605	587	572	557	546	535	526
20	641	619	599	582	563	544	529	516	506	496	488
15	586	566	547	532	513	494	479	466	457	447	440
10	509	491	475	462	446	430	417	405	396	386	379
5	386	373	361	351	340	329	320	313	309	304	300

Измерение плотности лучистого теплового потока проводилось с использованием водо-охлаждаемого датчика теплового потока внутри камеры сгорания с закрытой дверцей. Плотность теплового потока измерялась на разных уровнях удаления от нагревательного элемента. Температура измерялась низкоинерционной бронированной термопарой непосредственно на внутренней поверхности излучателя. При пересчете использовался коэффициент теплопоглощения и допуска прибора. Первое измерение проводилось при максимально допустимом напряжении на излучателе. Далее напряжении постепенно снижалось и записывались показания с датчика теплового потока.

Калибровка на разном удалении от нагревательного образца положительно сказывается на точности и воспроизводимости огневых испытаний, проводимых на модифицированной установке [99].

По результатам калибровки были проведены огневые испытания древесины хвойных пород. Температура на поверхности излучателя изменялась от 526 до 685 °C для создания одинаковой плотности падающего теплового потока при проведении огневых испытаний с различным расстоянием между излучателем и поверхностью образца. Расстояние было задано 35, 55 и 70 мм [55, 100].

Результаты огневых испытаний (таблица 3.4 и на рисунок 3.17) (где q – плотность падающего теплового потока, кВт/м²; L – расстояние между поверхностью образца и излучателем, мм; t_n – температура на поверхности излучателя; t_o – температура поверхности образца, °С) показали, что условия в камере сгорания [55, 100] в режиме тления и пламенного горения значительно влияют на значение коэффициента дымообразования.

Таблица 3.4 – Влияние условий в камере сгорания на величину удельного коэффициента дымообразования древесины [55, 99]

№ экспериментов	Режим испытания	l , см	q , кВт/м ²	t_n , °С	t_o , °С	D_m , Нп·м ² /кг
1	горение	7,0	35	685	309	56,9
2	горение	7,0	35	685	309	42,8
3	горение	7,0	35	685	309	44,8
4	горение	5,5	35	635	282	33,6
5	горение	5,5	35	635	282	29,5
6	горение	5,5	35	635	282	23,2
7	горение	3,5	35	591	273	22,1
8	горение	3,5	35	591	273	26,4
9	горение	3,5	35	591	273	30,4
10	тление	7,0	25	624	239	100,9
11	тление	7,0	25	624	239	134,5
12	тление	7,0	25	624	239	120,5
13	тление	5,5	25	572	224	85,7
14	тление	5,5	25	572	224	98,4
15	тление	5,5	25	572	224	96,2
16	тление	3,5	25	526	218	82,9
17	тление	3,5	25	526	218	98,6
18	тление	3,5	25	526	218	89,4

Полученные зависимости удельного коэффициента дымообразования от расстояния между образцом и электронагревательным элементом представлены на рисунке 3.17.

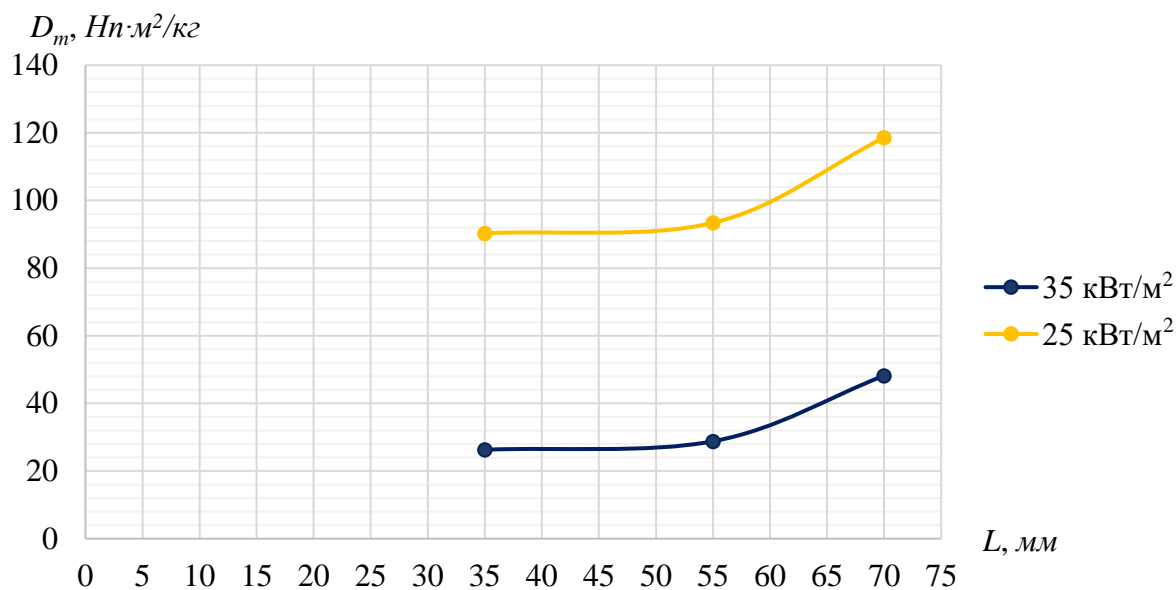


Рисунок 3.17 – Зависимость изменения значения удельного коэффициента дымообразования от расстояния между образцом и электронагревательным элементом [97]

Для сравнения были проведены огневые испытания на тех же образцах по стандартному методу [56], результаты которых представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты огневых испытаний по оценке дымообразующей способности древесины [55]

№ экспериментов	Режим испытания	l , мм	q , кВт/м ²	t_n , °С	D_m , Нп·м ² /кг
1	горение (горелка)	60	35	766	290
2	тление	60	35	766	775
3	тление	60	25	700	560

Из таблиц 3.4 и 3.5 видно, что значения коэффициента дымообразования существенно зависят от конструктивных особенностей установки и условий проведения испытаний [55, 97], более наглядно это отображено на рисунке 3.18.

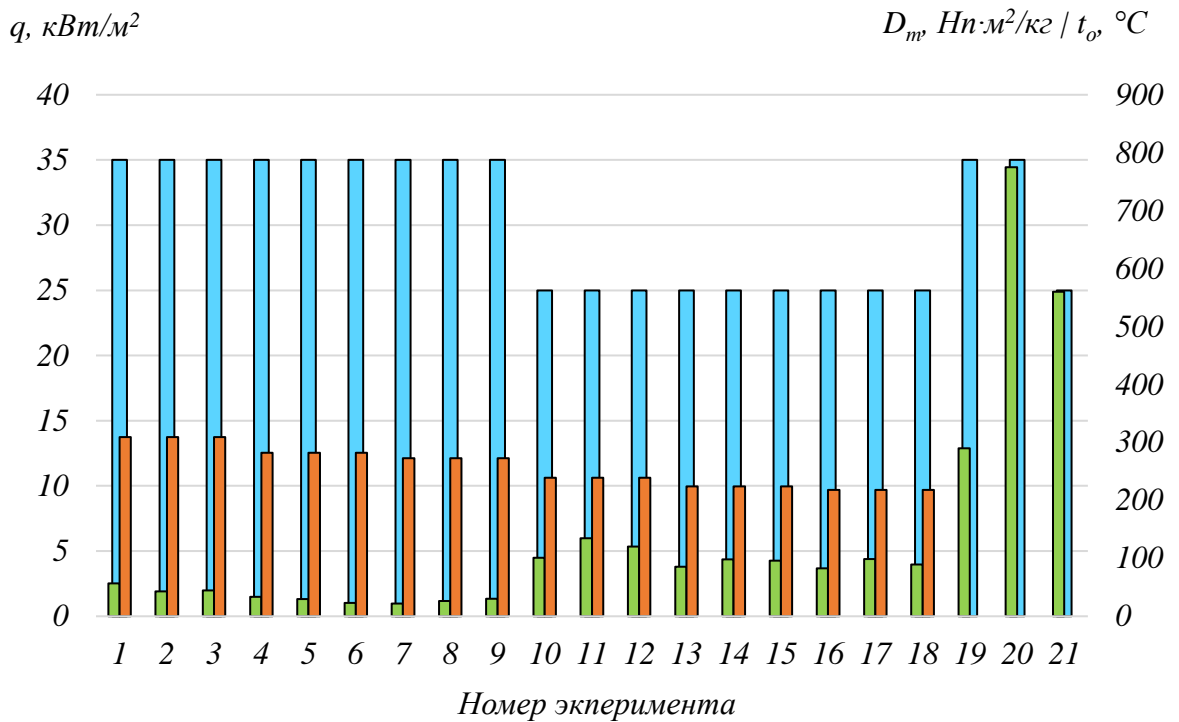


Рисунок 3.18 – Результаты огневых испытаний древесины: ■ – коэффициент дымообразования; ■ – плотность падающего теплового потока на поверхности образца; ■ – температура на поверхности образца [55]

Как видно из вышеприведенных таблиц 3.4-3.5 и рисунка 3.18 конструктивные особенности установок [56, 93] и условия проведения огневых испытаний в значительной степени влияют на значения коэффициента дымообразования.

Помимо этого, модифицированная установка по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов при их термическом разложении выдает значения коэффициента дымообразования, соразмерные со значениями, применяемыми при моделировании пожара [101], которые, в свою очередь, на порядок отличаются от значений, получаемых на стандартной установке [56].

3.4.2. Влияние площади и массы образца на параметры, значения которых необходимы при расчете оптической плотности дыма

При определении дымообразующей способности вещества или материала в разных методиках используют значение либо его массы, либо площади [92]. Это позволяет оценить изменение оптической плотности дыма в замкнутом объеме, имея значения удельной массовой скорости выгорания [102].

Для проведения исследования влияния площади и массы образца на значения удельной массовой скорости выгорания была проведена серия огневых испытаний на модифицированной установке по «Открытой» и «Закрытой» схеме. Испытания проводились на древесине лиственных пород. Образцы для испытания имели отличия только в площади обогрева, которая была равна: 20, 40, 60, 80, 100 см² и массе соответственно.

Результаты огневых испытаний, проведенных на модифицированной установке приведены на рисунке 3.19. Анализ результатов показал, что массовая скорость выгорания при обеих схемах значительно не отличается. При этом у образцов с разной площадью экспонируемой поверхности значения удельной массовой скорости выгорания различаются [102].

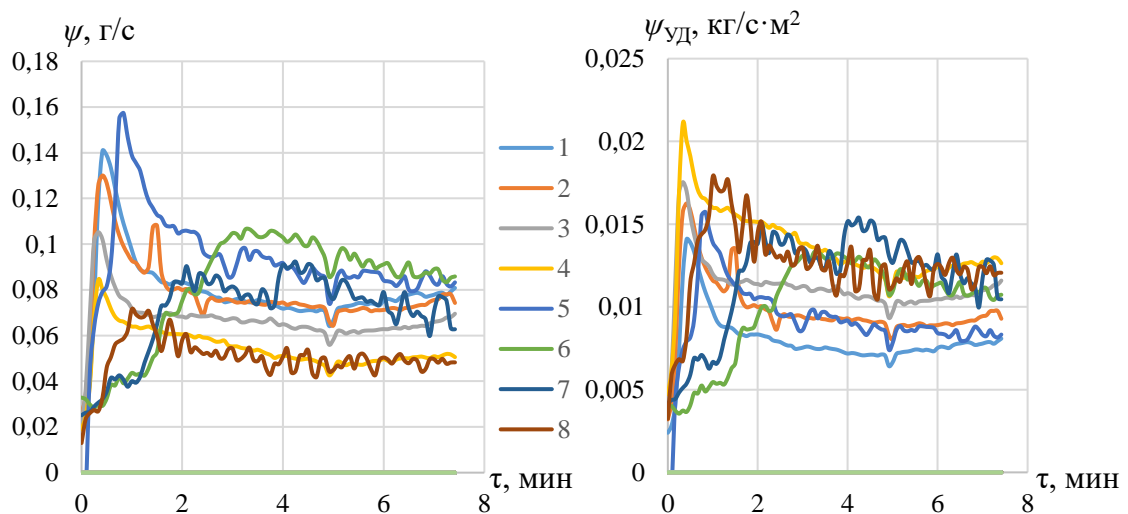


Рисунок 3.19 – Графики зависимости удельной массовой и массовой скорости выгорания древесины лиственных пород: 1-4 – открытая схема; 5-8 – закрытая схема

На рисунке 3.20, схематично показано, что при испытании твердой пожарной нагрузки уменьшение площади образца приводит к увеличению термического воздействия на стенки образца.

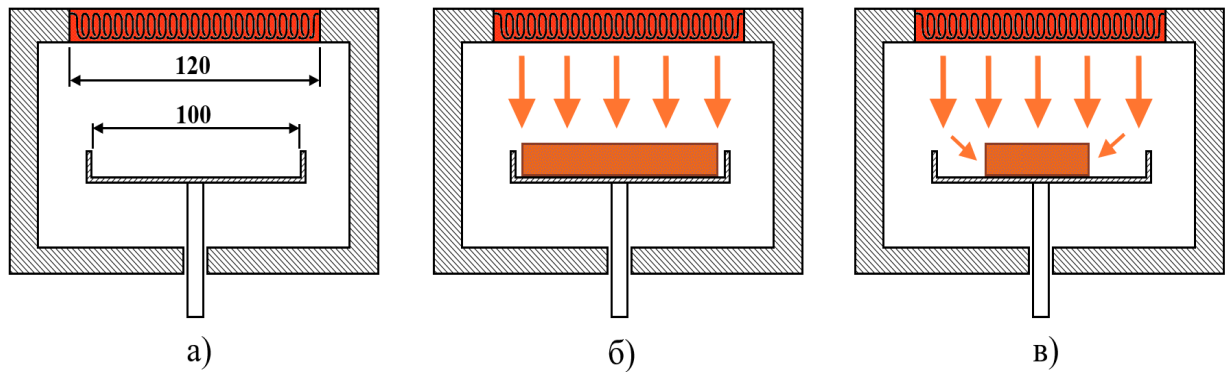


Рисунок 3.20 – Схема камеры сгорания модифицированной установки:

- а) соотношение размеров держателя образца и нагревательного элемента; б) обогрев образца размером 100×100 мм; в) обогрев образца размером 50×50 мм

Данное увеличение термического воздействия объясняется тем, что при использовании плоской формы излучателя в центре него создается максимальный поток излучения, по мере отдаления от центра он ослабевает. Для оценки степени неравномерности плотности падающего теплового потока на поверхность образца при плоской форме излучателя были проведены замеры внутри камеры сгорания модифицированной установки. Измерение проводилось при температуре на излучателе 777 °С. Измерения выполнялись на расстоянии 60 мм от плоскости излучателя, от центра с шагом 10 мм. Схема расположения датчика теплового потока внутри камеры сгорания показана на рисунке 3.21.

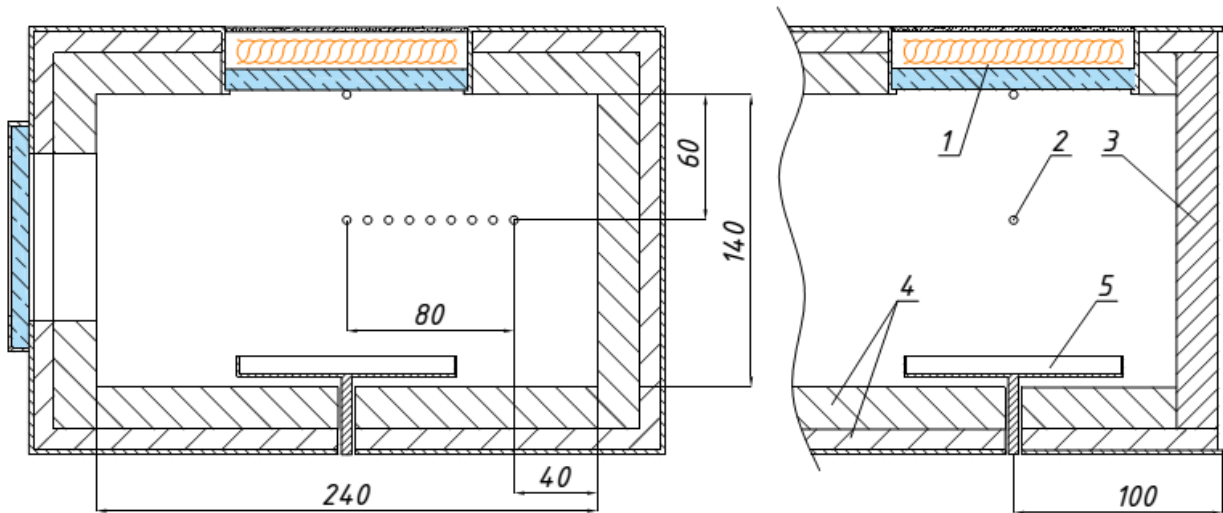


Рисунок 3.21 – Схема расположения датчика теплового потока внутри камеры сгорания модифицированной установки: 1 – электронагревательный излучатель; 2 – точки замера плотности теплового потока; 3 – стенка из теплоизоляционного материала; 4 – теплоизоляционный слой; 5 – держатель образца

Измерения проводились датчиком теплового потока типа Гордон ФОА-013 с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ и погрешностью, не превышающей $\pm 8\%$. Результаты измерения наглядно представлены на рисунке 3.22.

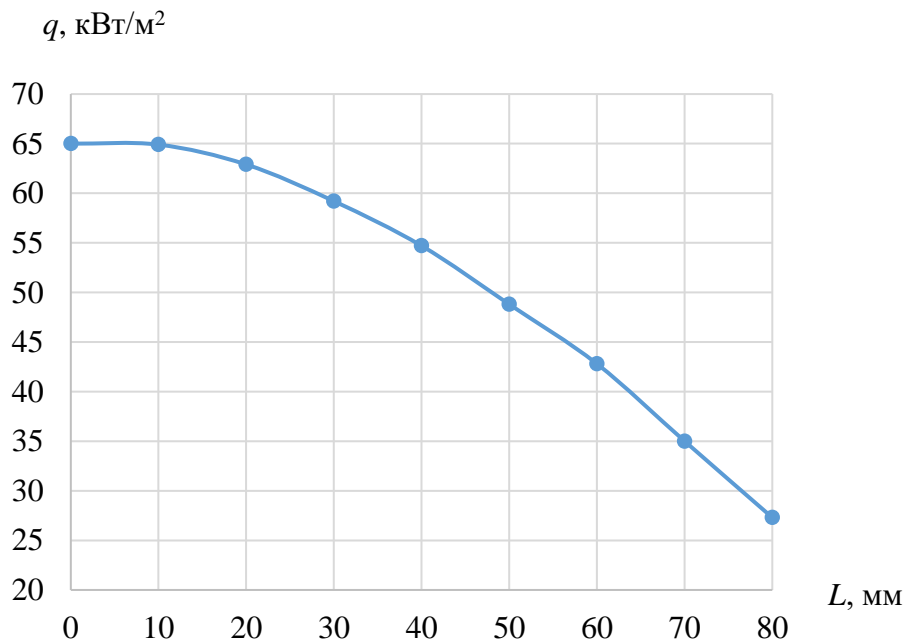


Рисунок 3.22 – График зависимости теплового потока от расстояния от центра образца

Пересчитав полученные значения в средний тепловой поток, приходящийся на обогреваемую площадь, была получена линейная зависимость, представленная на рисунке 3.23.

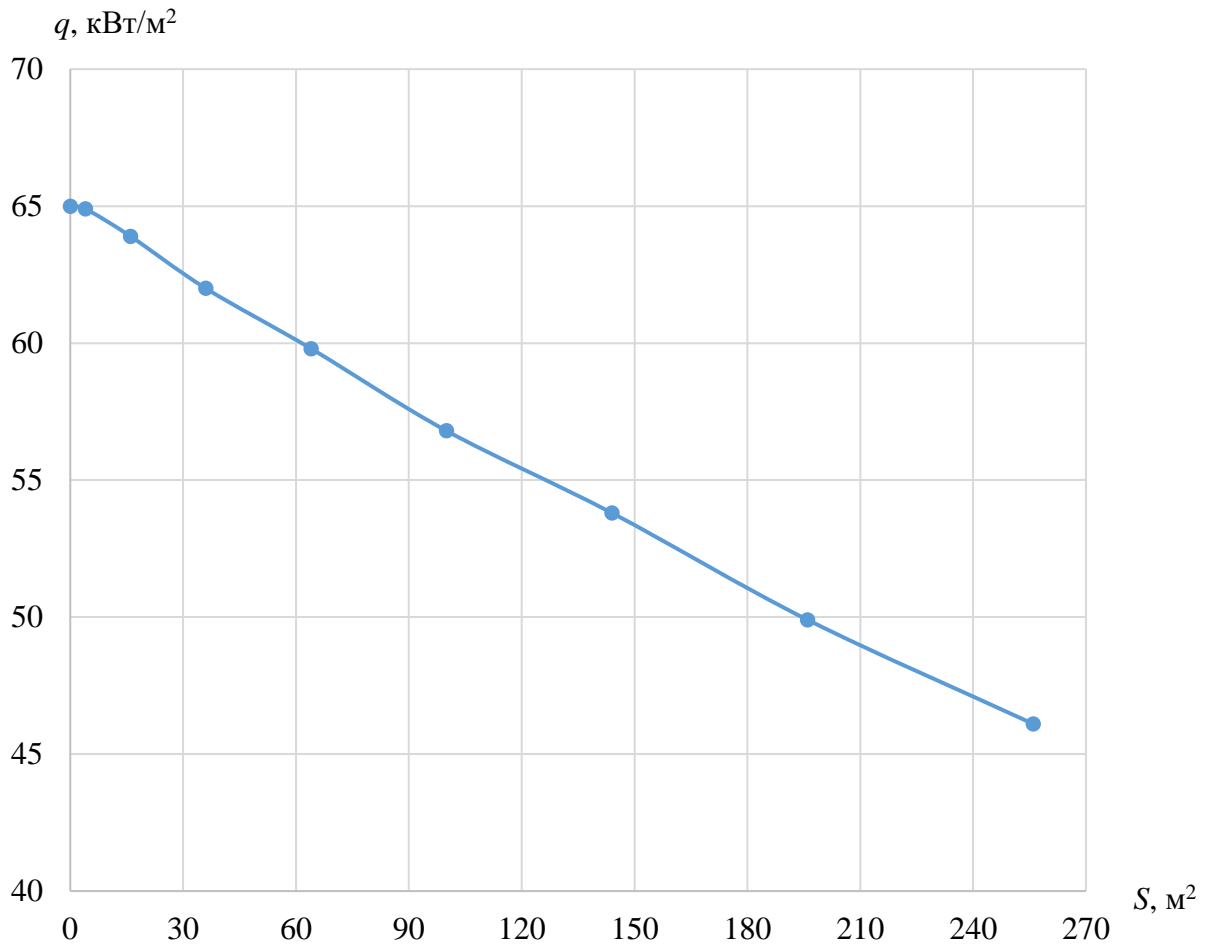


Рисунок 3.23 – График зависимости среднего по площади теплового потока от площади обогрева

Данная неравномерность распределения плотности теплового потока по площади влияет на процесс терморазложения и дымообразования. Однако при проведении огневых испытаний по методу [56] в случае, когда минимальное значение светопропускания выходит за пределы рабочего диапазона или находится вблизи его границ, допускается изменять размеры образца. Изменение размера образца приведет к уменьшению или увеличению массы образца, которая учитывается в формуле (3.3). Однако изменение площади и массы образца может привести к существенной разнице в значениях коэффициента дымообразования.

Поэтому были проведены эксперименты по определению коэффициента дымообразования при различной площади образцов на установке [93]. В качестве исследуемого материала использовался поливинилхлорид [103] (рисунок 3.24-3.25), из которого изготавливается изоляция современной кабельной продукции для объектов энергетики.

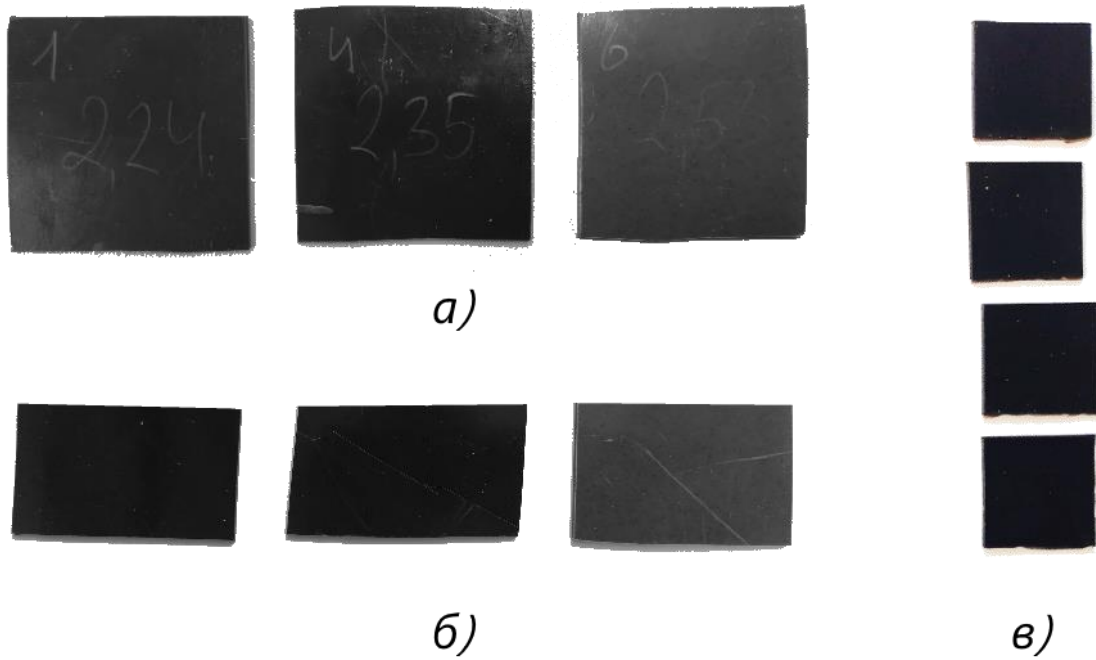


Рисунок 3.24 – Образцы поливинилхлорида для огневых испытаний:

а – образцы размером $40 \times 40 \times 1$; б – образцы размером $40 \times 20 \times 1$; в – образцы размером $20 \times 20 \times 1$

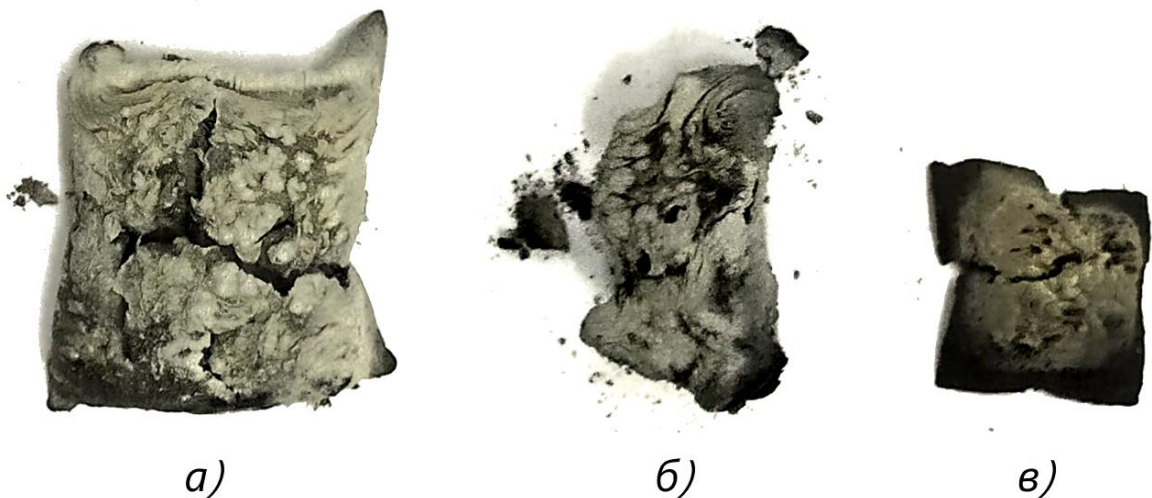


Рисунок 3.25 – Образцы поливинилхлорида после огневых испытаний:

а – образцы размером $40 \times 40 \times 1$; б – образцы размером $40 \times 20 \times 1$; в – образцы размером $20 \times 20 \times 1$

Зависимости коэффициента дымообразования от площади поверхности и массы образцов представлены на рисунке 3.26.

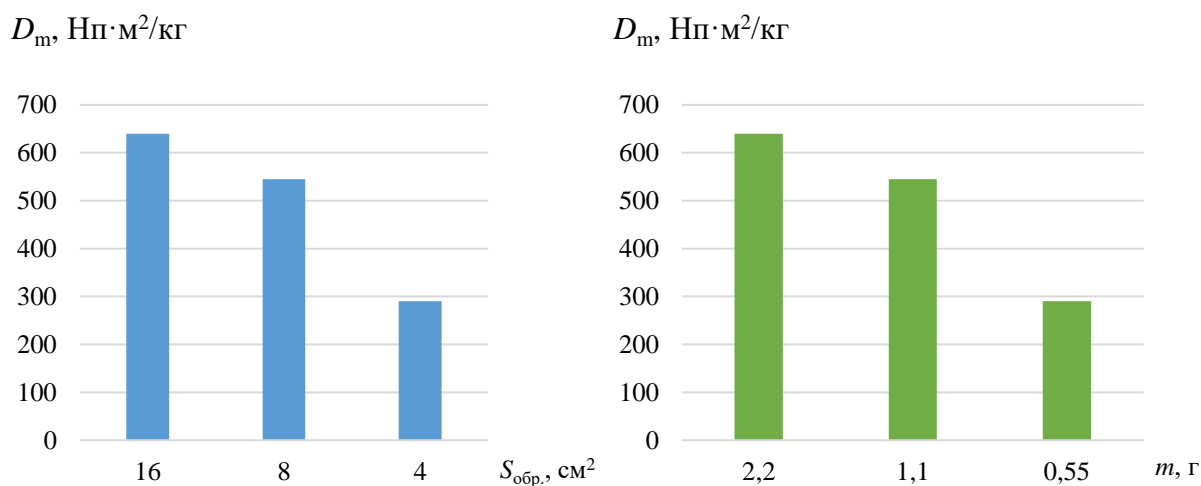


Рисунок 3.26 – Зависимость коэффициента дымообразования от площади образца и массы поливинилхлорида на установке [56]

Анализ результатов огневых испытаний показал, что важно учитывать влияние площади и массы образца на значение коэффициента дымообразования при проведении огневых испытаний. Для повышения точности моделирования пожара, и, в частности, расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму, становится актуальным исследование зависимости отношения объема экспозиционной камеры к площади и массе образца на коэффициент дымообразования веществ и материалов.

3.4.3. Сравнительный анализ значений дымообразующей способности веществ и материалов

Определение значения коэффициента дымообразования актуально при проведении сертификации и получении исходных данных для расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму. Для некоторых

веществ и материалов значения данного параметра приведено в базе данных типовой пожарной нагрузки [4]. Однако, как правило, значения, приведенные в базе данных, отличаются от значений, получаемых по методу [56]. Так, например, на рисунке 3.27 представлены значения для древесных материалов, приведенные в базе данных [4] в сравнение со значениями, полученными по методу [56] и на модифицированной установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов.

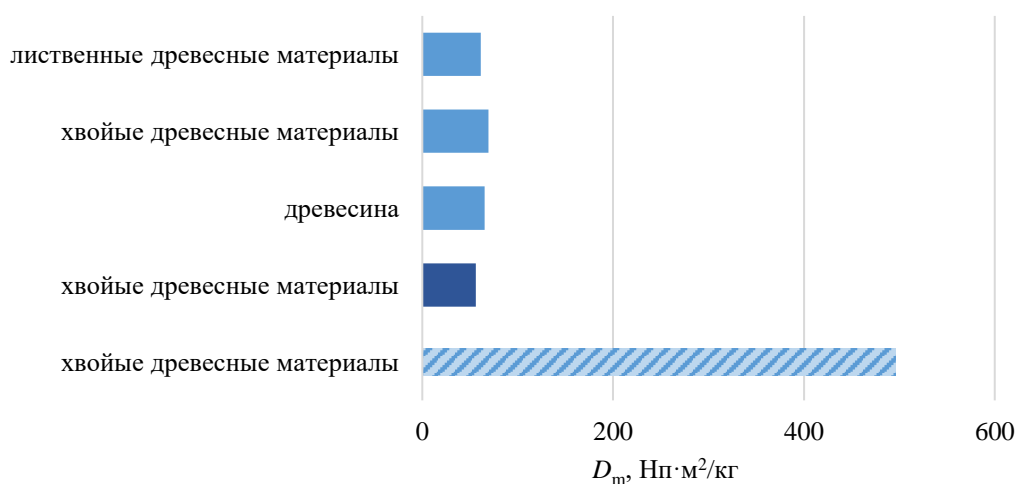


Рисунок 3.27 – Гистограмма значений дымообразующей способности древесных материалов [69]: ■ – база данных типовой пожарной нагрузки; ■ – усреднённые значения, полученные на модифицированной установке; ▨ – усреднённые значения, полученные на стандартной установке

Как видно из графика экспериментальные значения, полученные на двух разных установках, на порядок отличаются друг от друга, однако огневые испытания проводились при одинаковых условиях. Образцы древесины хвойных пород имели размеры $40 \times 40 \times 3$ мм и массу $3 \pm 0,2$ г. Плотность теплового потока на поверхности образцов составляла 35 кВт/м^2 [61].

Оболочки кабелей являются одной из основных пожарных нагрузок, постоянно и в большом объеме находящиеся на объектах энергетики. Согласно базе данных типовой пожарной нагрузки [4] кабельная продукция имеет высокий показатель дымообразующей способности и варьируется от 407 до $850 \text{ Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ для шести упомянутых в ней видов оболочек кабеля. Отсутствие данных по

современным видам кабельной продукции и большой разброс в значениях говорит о необходимости исследования дымообразующей способности современной кабельной продукции, различной по конструктивному исполнению и химическому составу, которая используется на объектах энергетики [104].

На рисунке 3.28 представлены значения коэффициентов дымообразования, полученные на установках [69, 104], в сравнении со значениями, приведёнными в базе данных [4].

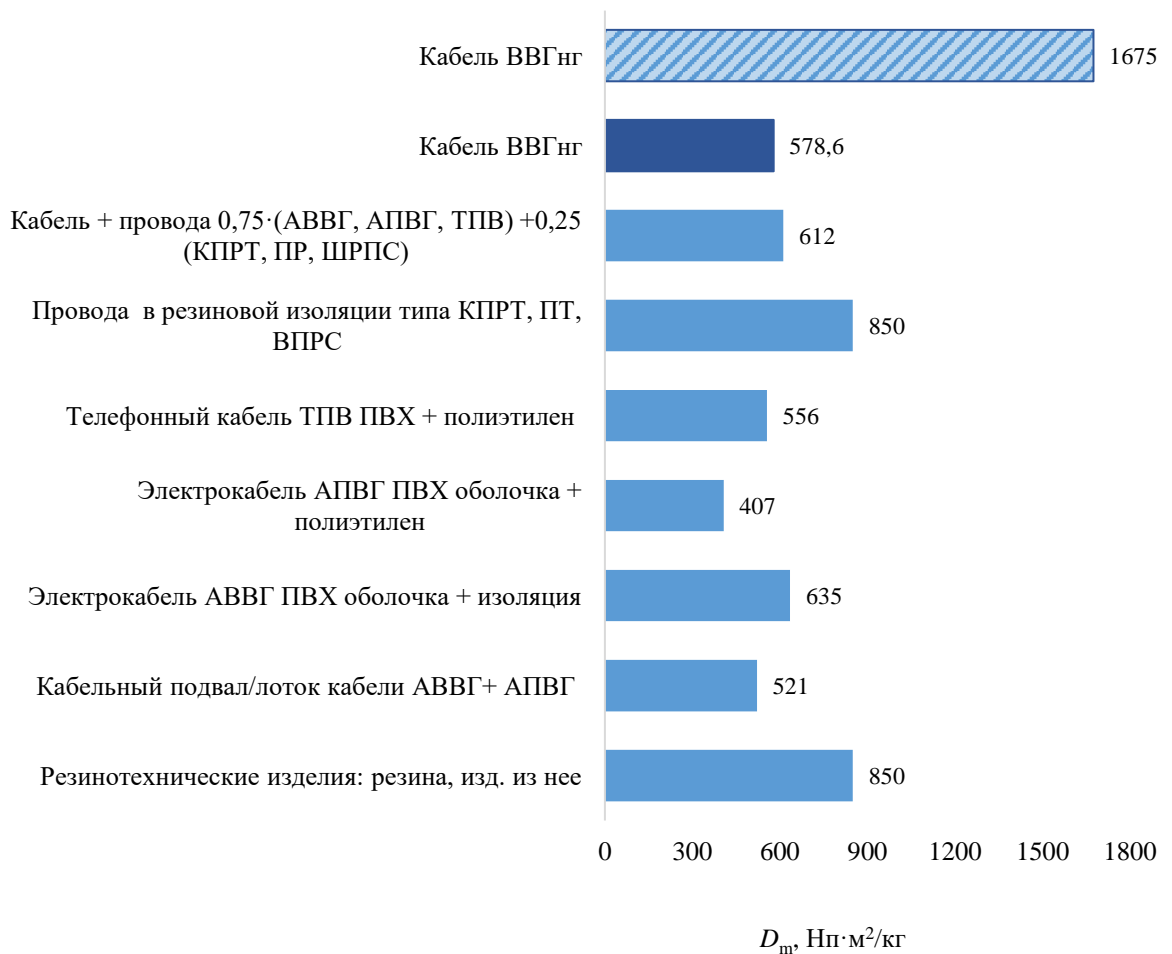


Рисунок 3.28 – Гистограмма значений дымообразующей способности кабельной продукции [69, 104]: ■ – база данных типовой пожарной нагрузки; ■ – усреднённые значения, полученные на модифицированной установке; ▨ – усреднённые значения, полученные на стандартной установке [56]

Как видно из графика экспериментальные значения, полученные на двух разных установках, в три раза отличаются друг от друга, однако огневые испытания проводились при одинаковых условиях. Образцы кабеля ВВГнг имели одинаковые

размеры, форму и массу. При этом значения, полученные на модифицированной установке соразмерны со значениями [4], используемыми в качестве исходных данных для моделирования пожаров.

3.5. Выводы по третьей главе

1. На основании проведенного анализа методов измерения интенсивности светопропускания и определения оптической плотности дыма [56, 64-68] было подобрано фотометрическое оборудование, измерительный комплекс с программным обеспечением.

2. Произведена модификация установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов при их термическом разложении. В конструкцию установки было добавлено фотометрическое оборудование. Подобрано и настроено программное обеспечение.

3. Разработана методика проведения огневых испытаний на модифицированной установке для измерения оптической плотности дыма, температуры продуктов горения и удельной массовой скорости выгорания. Проведена калибровка электронагревательного излучателя датчиком теплового потока на различном удалении от поверхности излучателя.

4. Проведенные огневые испытания оболочек кабеля и древесины показали, что значения, полученные на модифицированной установке в значительной степени, отличаются от значений, полученных по стандартному методу [56], однако они соизмеримы со значениями из базы данных [4].

5. Анализ результатов серий огневых испытаний на модифицированной установке показал, что масса, размер, форма и расположение образца внутри камеры сгорания оказывает значительное влияние на оптическую плотность дыма за счет неравномерности распределения плотности падающего теплового потока.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ПО ПОТЕРЕ ВИДИМОСТИ В ДЫМУ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

4.1 Исходные данные для моделирования динамики развития опасных факторов пожара на объектах энергетики

Рассматривая производственные здания ТЭЦ и сценарии развития пожара на данных объектах были выявлены характерные и наиболее опасные конденсированные, горючие вещества и материалы и их свойства согласно типовой базе пожарной нагрузки [4]:

– жидкая горючая нагрузка: масло трансформаторное: $D_m = 243$ Нп/м²·кг,
 $Q_H^P = 41,9$ МДж/кг, $\psi_{y\partial} = 0,03$ кг/м²·с;

– твердая горючая нагрузка: оболочка кабеля ПВХ: $D_m = 635$ Нп/м²·кг,
 $Q_H^P = 25$ МДж/кг, $\psi_{y\partial} = 0,0244$ кг/м²·с;

где $\psi_{y\partial}$ – удельная массовая скорость выгорания горючего материала, кг/м²·с;
 Q_H^P – низшая рабочая теплота сгорания, МДж/кг; D_m – коэффициент дымообразования, Нп/м²·кг.

При расчете были заданы следующие начальные условия внутри помещения: температура $T_0 = 20$ °С; скорость движения воздуха $w_v = 0$ м/с; давление воздуха $p_0 = 101,325$ кПа;

Для реализации возможности применения расчетов на полномасштабном объеме помещения использовался коэффициент теплопотерь φ , значение которого было установлено как 0,6.

Временным критерием продолжительности огневых испытаний и численных экспериментов было достижение предельной для человека температуры продуктов горения, которая согласно [51] не должна превышать 70 °С.

Для маломасштабного объема (экспозиционной камеры установки)

коэффициент φ рассчитывается из системы уравнений интегральной модели исходя из формулы (2.21) с использованием коэффициента дымообразования, полученного эмпирическим путем.

4.2 Анализ экспериментальных данных, полученных на маломасштабной установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов

Огневые испытания проводились на модифицированной установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов. Образцы для испытаний были заранее подготовлены максимальной равные по массе, форме и размерам. В качестве образцов был выбран кабель ВВГнг [71], представленный на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Сечение кабеля ВВГнг [105]

В процессе проведения огневых испытаний фиксировались следующие параметры: температура продуктов горения, интенсивность светопропускания и масса образца во время испытания. Средняя частота записи измерительных приборов была равна 3 с^{-1} .

Образец в камере сгорания устанавливался горизонтально. Плотность падающего теплового потока была установлена на уровнях 20, 25, 35, 50 и 65 кВт/м² для различных серий испытаний соответственно. Масса подготовленных образцов составляла $3 \pm 0,1$ г.

В отличие от стандартного метода (ГОСТ 12.1.044-89, п. 4.18) огневые испытания на модифицированной установке по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов проводились без поджига от открытого источника пламени в камере сгорания. В модифицированной установке образцы воспламенялись под воздействием теплового потока. Время воспламенения напрямую зависело от значения плотности падающего теплового потока.

В результате проведения серий огневых испытаний были получены массивы данных по оптической плотности дыма, температуре продуктов горения и массы образца на протяжении всего процесса термического разложения.

Данные фиксировались на персональный компьютер посредством специализированных программ. Для каждого измерительного прибора использовалось индивидуальное программное обеспечение с определенной спецификой записи данных.

Оптическая плотность дыма рассчитывалась по формуле (3.1). В качестве интенсивности светопропускания использовались значения, полученные с фотодиода ФД24К (ФД-7К). Частота записи данных с фотодиода равна 1 Гц.

Температура продуктов горения внутри камеры экспозиции измерялась посредством двадцати семи установленных внутри камеры, бронированных, низкоинерционных термопар. Запись значений температуры производилась через четыре устройства контроля температуры УКТ38 марки «ОВЕН». Частота записи данных с данного устройства равна 0,316 Гц.

Масса образца фиксировалась с момента укладки образца на держатель внутри камеры сгорания. Запись значений массы образца производилась через электронные весы «AND GF-6100». Частота записи данных с данных электронных весов равна 0,333 Гц.

Полученные в ходе проведения огневых испытаний массивы данных включали в себя время фиксации измеряемого параметра с его значением. Массивы данных представляли многострочный текстовый файл, отдельный для каждого измерительного прибора.

Для совместной обработки полученных данных была разработана программа для обработки и форматирования базы параметров пожарной нагрузки [106]. Данная программа реализована на языке программирования «Visual Basic for Applications» в рабочей книге MS Excel. Основные рабочие окна программы показаны на рисунках 4.2-4.5.

Обработка данных включает в себя три основных этапа: ввод данных, полученных с обособленных, измерительных приборов; запуск автоматической обработки данных; корректировка и получение результатов.

Ввод данных производится вручную, копированием многострочного текстового массива в соответствующие вкладки: «Л», «Г», «М», «Т» [107].

На втором этапе, согласно заложенному алгоритму, значения по температуре продуктов горения и массе образца преобразуются в массив данных с частотой записи 1 Гц. Данное решение реализовано на вкладке «Разбивка», показанной на рисунке 4.2. Данный алгоритм основан на интерполяции, частичной аппроксимации [108] и поиску грубой погрешности с заменой на статистически верное значение.

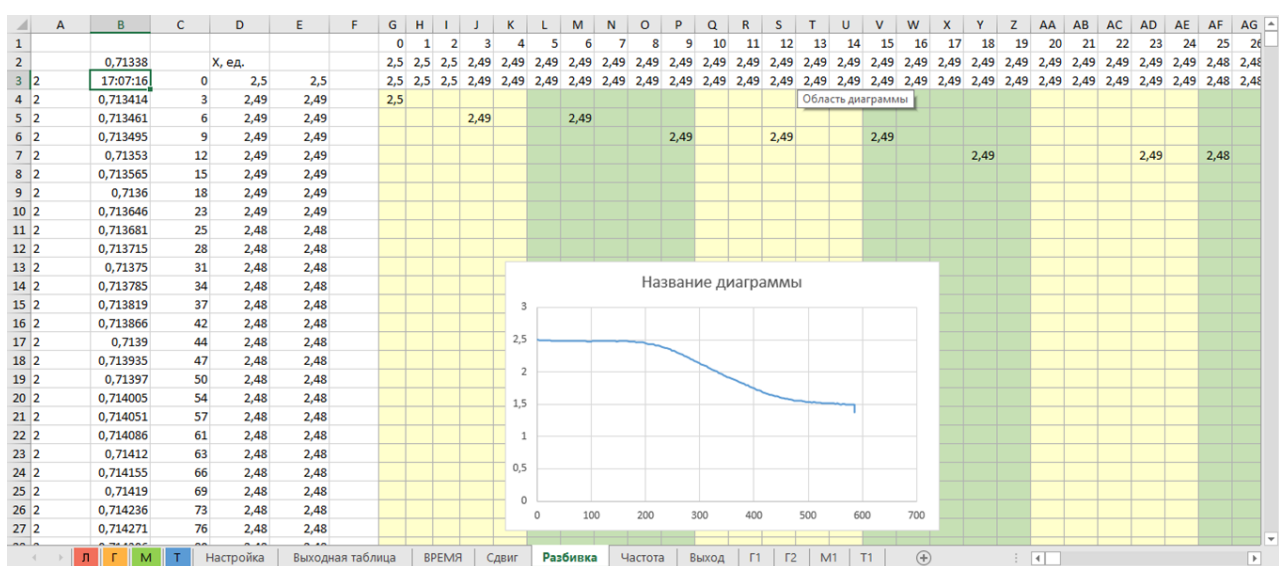


Рисунок 4.2 – Лист интерполяции и округления значений для каждой секунды [106]

Далее данная программа посредством макросов создает временные

переменные для хранения данных. Исходя из времени записи данных во вкладке «Время» в соответствующий столбец, согласно прописанному алгоритму, записывается значение времени для каждого параметра. Эти значения показывают с какой секунды от времени начала записи на обособленных, измерительных приборах идет совместная, синхронная запись данных. Данное решение реализовано на вкладке «Время», показанной на рисунке 4.3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	17:07:16	17:07:16	17:07:16	17:07:16	17:07:16	17:03:31	17:03:06	17:07:06												
2	0:00:00																			
3	0	0	0	0	0	225	250	10												
4		1	1	1	1	225	251	11												
5		2	2	2	2	231	252	12												
6		3	3	3	3	234	253	13												
7		4	4	4	4	237	254	14												
8		5	5	5	5	240	255	15												
9		6	6	6	6	243	256	16												
10		7	7	7	7	246	257	17												
11		8	8	8	8	249	258	18												
12		9	9	9	9	252	259	19												
13		10	10	10	10	255	260	20												
14		11	11	11	11	258	261	21												
15		12	12	12	12	261	262	22												
16		13	13	13	13	264	263	23												
17		14	14	14	14	267	264	24												
18		15	15	15	15	270	265	25												
19		16	16	16	16	273	266	26												
20		17	17	17	17	276	267	27												
21		18	18	18	18	279	268	28												
22		19	19	19	19	282	269	29												
23		20	20	20	20	285	270	30												
24		21	21	21	21	288	271	31												
25		22	22	22	22	291	272	32												
26		23	23	23	23	294	273	33												
27		24	24	24	24	297	274	34												
28		25	25	25	25	300	275	35												

Рисунок 4.3 – Лист учета начала времени записи с обособленных, измерительных приборов [106]

Далее значения, полученные с обособленных измерительных приборов, выстраиваются согласно полученным временным интервалам во вкладке «Сдвиг», как показано на рисунке 4.4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	17:07:16	17:07:16	17:07:16	17:07:16	17:07:16	17:03:31	17:03:06	17:07:06												
2	0:00:00																			
3	0	0,04	0	0	20,9	2,67	21	1												
4		0,04	0	0	20,9	2,67	21	1												
5		0,04	0	0	20,9	2,67	21	1												
6		0,04	0	0	20,9	2,67	21	1												
7		0,04	0	0	20,9	2,67	21	1												
8		0,04	0	0	20,9	2,67	21	1												
9		0,04	0	0	20,9	2,67	21	1												
10		0,04	0	0	20,9	2,67	21	1												
11		0,04	0	0	20,9	2,66	21	1												
12		0,04	0	0	20,9	2,66	21	1												
13		0,04	0	0	20,9	2,66	21	0,99												
14		0,04	0	0	20,9	2,66	21	0,99												
15		0,04	0	0	20,9	2,66	21	0,99												
16		0,04	0	0	20,9	2,66	21	0,99												
17		0,04	0	0	20,9	2,66	22	0,99												
18		0,04	0	0	20,9	2,66	22	0,99												
19		0,04	0	0	20,9	2,66	22	0,99												
20		0,04	0	0	20,9	2,65	22	0,99												
21		0,04	0	0	20,9	2,65	22	0,99												
22		0,04	0	0	20,9	2,65	22	0,99												
23		0,04	0	0	20,9	2,65	22	0,99												
24		0,04	0	0	20,9	2,65	22	0,99												
25		0,04	0	0	20,9	2,65	22	0,98												

Рисунок 4.4 – Лист формирования данных с учетом времени начала записи [106]

На третьем этапе во вкладке «Настройка» можно увидеть предварительный

результат обработки данных в виде графических зависимостей. На данном этапе можно внести корректировку первичных данных в случае обнаружения программных ошибок записи измерительными приборами. Также можно задать частоту перезаписи данных.

Далее программа на основании введенных значений и внесенных корректировок рассчитывает: удельно массовую скорость выгорания, оптическую плотность дыма и коэффициент дымообразования.

Конечный результат обработки данных имеет табличную форму, представленную на рисунке 4.5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
3						время, мин	м, г	V_r , г/с	$V_{пл}$, г/м ³ ·с	$V_{пл}$, кг/м ³ ·с	Δ м, г	I, мА	$\mu_{пл}$, Нп/м	$D_{пл}$, Нп м ² /кг	T, °C	T, K	ΔT	K	μ , Нп/м	CO ₂ ;CO;HCN;O ₂		кг/м ³		кг/м ³
4	Площадь образца:	1	см ²	0	0,893999	-0,00916	-91,5637	-0,09156	0	0	#ДЕЛ/0!	0	0,201111	273,2011	0	0	0	0	20,9	2,5	20	0	0,298288	
5		0,0001	м ²	0,166667	0,985563	-0,00877	-87,7944	-0,08773	-0,09156	0	#ДЕЛ/0!	0	0,214009	273,214	0,012898	39,33903	0,000839	0	20,9	2,49226	20,42772	0	0,297777	
6	Частота:	10	сек	0,333333	1,073297	-0,00845	-84,548	-0,08455	-0,1793	0	#ДЕЛ/0!	0	0,226595	273,2266	0,025484	77,72431	0,001657	0	20,9	2,488611	20,99625	0	0,297101	
7	L	0,8	м ²	0,5	1,157845	-0,00818	-81,7736	-0,08177	-0,26385	0	#ДЕЛ/0!	0	0,238856	273,2389	0,037745	115,1157	0,002454	0	20,9	2,485571	21,63004	0	0,296352	
8	V	0,5		0,666667	1,239619	-0,00794	-79,3569	-0,07936	-0,34562	0	#ДЕЛ/0!	0	0,250712	273,2507	0,049601	151,2677	0,003225	0	20,9	2,483121	22,27531	0	0,295594	
9	Коэффициент:	2,5		0,833333	1,318976	-0,0077	-76,9622	-0,07696	-0,42498	0	#ДЕЛ/0!	0	0,262069	273,2621	0,060958	185,8966	0,003964	0	20,9	2,481399	22,91235	0	0,294849	
10	ϕ	0,7		1	1,395938	-0,00744	-74,3638	-0,07436	-0,50194	0	#ДЕЛ/0!	0	0,272827	273,2728	0,071716	218,6958	0,004663	0	20,9	2,48015	23,57629	0	0,294078	
11	Dm	500	Нп м ² /кг	1,66667	1,470301	-0,00714	-71,4341	-0,07143	-0,5763	0	#ДЕЛ/0!	0	0,282834	273,2828	0,081723	249,2001	0,005313	0	20,9	2,479345	24,23294	0	0,293319	
12	η	0,7		1,333333	1,541736	-0,00678	-67,7749	-0,06777	-0,64774	0	#ДЕЛ/0!	0	0,291918	273,2919	0,090807	276,8939	0,005904	0	20,9	2,478553	24,85762	0	0,292601	
13	Qm	33500	кДж/кг	1,5	1,609511	-0,00634	-63,3617	-0,06336	-0,71551	0	#ДЕЛ/0!	0	0,29997	273,3	0,098859	301,4369	0,006427	0	20,9	2,478529	25,46783	0	0,291904	
14				1,66667	1,672872	-0,00584	-58,4161	-0,05842	-0,77887	0	#ДЕЛ/0!	0	0,306942	273,3069	0,105831	322,6854	0,00688	0	20,9	2,478392	26,05822	0	0,291233	
15				1,833333	1,731288	-0,00525	-52,5331	-0,05253	-0,83729	0	#ДЕЛ/0!	0	0,312831	273,3128	0,11172	340,6341	0,007263	0	20,9	2,478462	26,6119	0	0,290608	
16				2	1,783821	-0,00455	-45,5419	-0,04554	-0,88982	0	#ДЕЛ/0!	0	0,317722	273,3177	0,116611	355,541	0,007581	0	20,9	2,478555	27,11776	0	0,290039	
17				2,16667	1,829363	-0,00383	-38,2606	-0,03826	-0,93536	0	#ДЕЛ/0!	0	0,321774	273,3218	0,120663	367,8894	0,007844	0	20,9	2,478406	27,61132	0	0,289487	
18				2,333333	1,867624	-0,00312	-31,2033	-0,0312	-0,97362	0	#ДЕЛ/0!	0	0,32516	273,3252	0,124049	378,209	0,008064	0	20,9	2,477729	28,08284	0	0,288963	
19				2,5	1,898827	-0,00243	-24,2819	-0,02428	-1,00483	0	#ДЕЛ/0!	0	0,328034	273,328	0,126923	386,9676	0,008251	0	20,89963	2,476234	28,52261	0	0,288471	
20				2,66667	1,923109	-0,00181	-18,0955	-0,0181	-1,02911	0	#ДЕЛ/0!	0	0,330533	273,3305	0,129422	394,5841	0,008413	0	20,89551	2,473451	28,92086	0	0,287979	
21				2,833333	1,941205	-0,00133	-13,2684	-0,01327	-1,04721	0	#ДЕЛ/0!	0	0,332755	273,3328	0,131644	401,3551	0,008558	2,52E-09	20,8826	2,46885	29,28022	5,44E-11	0,287416	
22				3	1,954473	-0,00098	-9,81831	-0,00982	-1,06047	0	#ДЕЛ/0!	0	0,334761	273,3348	0,133665	407,4682	0,008688	2,43E-06	20,85776	2,462112	29,60831	5,25E-08	0,286734	
23				3,16667	1,964291	-0,00075	-7,4759	-0,00748	-1,07029	0	#ДЕЛ/0!	0	0,336596	273,3366	0,135485	413,0599	0,008807	2,07E-05	20,81922	2,452961	29,88757	4,48E-07	0,285929	
24				3,333333	1,971767	-0,00059	-5,94584	-0,00595	-1,07777	0	#ДЕЛ/0!	0	0,338299	273,3383	0,137188	418,2474	0,008918	7,08E-05	20,76596	2,44094	30,12986	1,53E-06	0,284975	
25				3,5	1,977713	-0,00051	-5,08408	-0,00508	-1,08371	0	#ДЕЛ/0!	0	0,339897	273,3399	0,138786	423,1188	0,009022	0,000158	20,70174	2,425726	30,34911	3,4E-06	0,283906	
26				3,66667	1,982797	-0,00046	-4,63103	-0,00463	-1,0888	0	#ДЕЛ/0!	0	0,341413	273,3414	0,140302	427,7364	0,00912	0,000282	20,63509	2,407151	30,5616	6,06E-06	0,282815	
27				3,833333	1,987428	-0,00041	-4,08772	-0,00409	-1,09343	0	#ДЕЛ/0!	0	0,342849	273,3428	0,141738	432,1124	0,009213	0,00044	20,57202	2,384953	30,7426	9,47E-06	0,281808	
28				4	1,991516	-0,00036	-3,55935	-0,00356	-1,09752	0	#ДЕЛ/0!	0	0,344203	273,3442	0,143092	436,2383	0,009301	0,000612	20,5146	2,358957	30,92012	1,32E-05	0,280881	
29				4,16667	1,995075	-0,00038	-3,8411	-0,00384	-1,10108	0	#ДЕЛ/0!	0	0,345478	273,3455	0,144367	440,1232	0,009384	0,000777	20,46458	2,329245	31,09763	1,67E-05	0,280084	
30				4,333333	1,998916	-0,00048	-4,82623	-0,00483	-1,10492	0	#ДЕЛ/0!	0	0,346682	273,3467	0,145571	443,7911	0,009462	0,000936	20,42219	2,296162	31,27515	2,01E-05	0,279329	
31				4,5	2,003743	-0,0006	-5,96005	-0,00596	-1,10974	0	#ДЕЛ/0!	0	0,347821	273,3478	0,14671	447,2639	0,009537	0,001095	20,3842	2,260273	31,45372	2,35E-05	0,278663	

Рисунок 4.5 – Лист формирования базы параметров пожарной нагрузки [107]

Данная программа прошла государственную регистрацию, в ходе которой было получено свидетельство [106].

На рисунках 4.6-4.7 представлены зависимости оптической плотности дыма и коэффициента дымообразования от времени экспозиции на примере данных, полученных при термическом разложении кабеля ВВГнг.

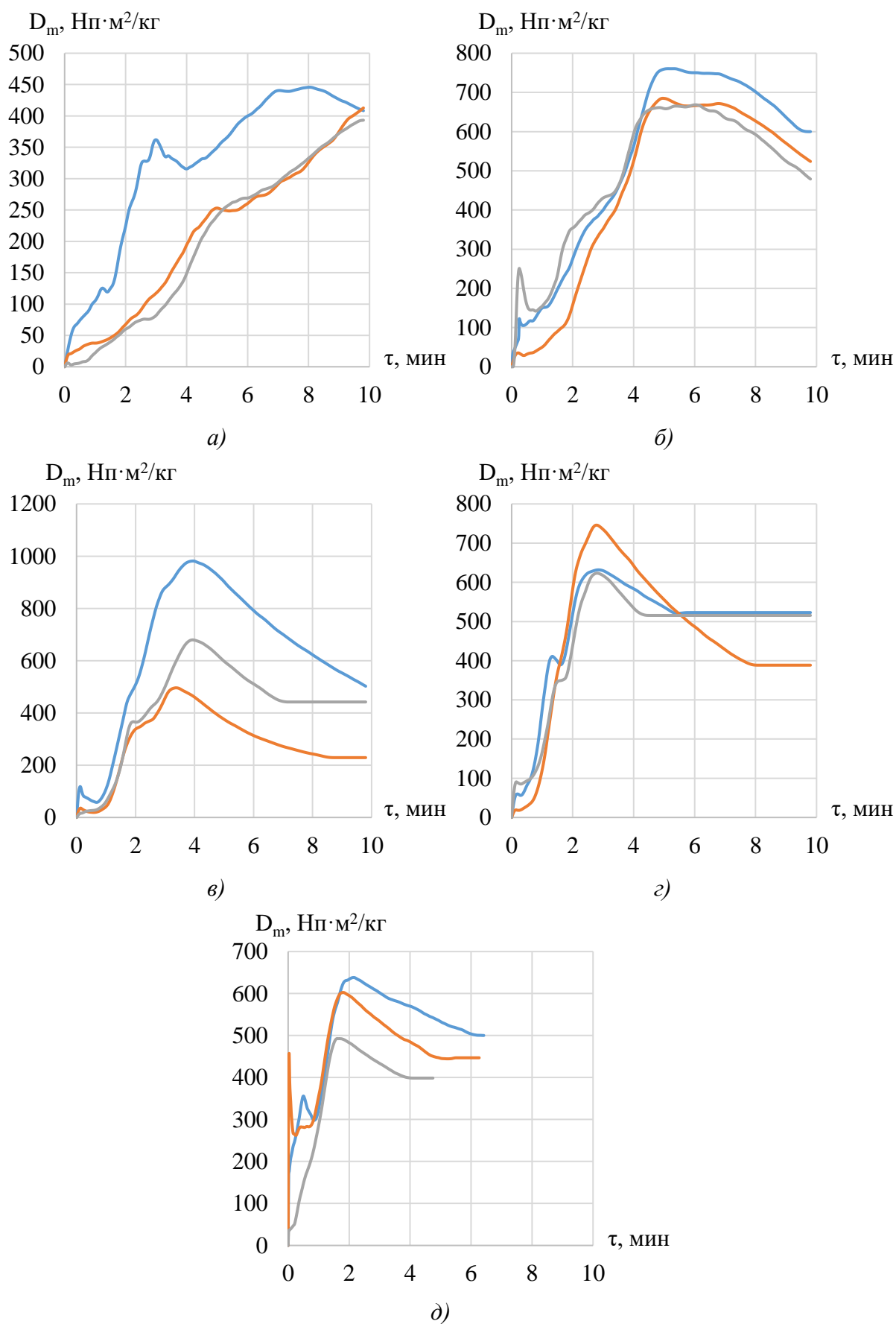


Рисунок 4.6 – Зависимости удельного коэффициента дымообразования от времени проведения экспериментов при плотности теплового потока [73]: а - $20 \text{ кВт}/\text{м}^2$, б - $25 \text{ кВт}/\text{м}^2$, в - $35 \text{ кВт}/\text{м}^2$; г - $50 \text{ кВт}/\text{м}^2$; д - $65 \text{ кВт}/\text{м}^2$

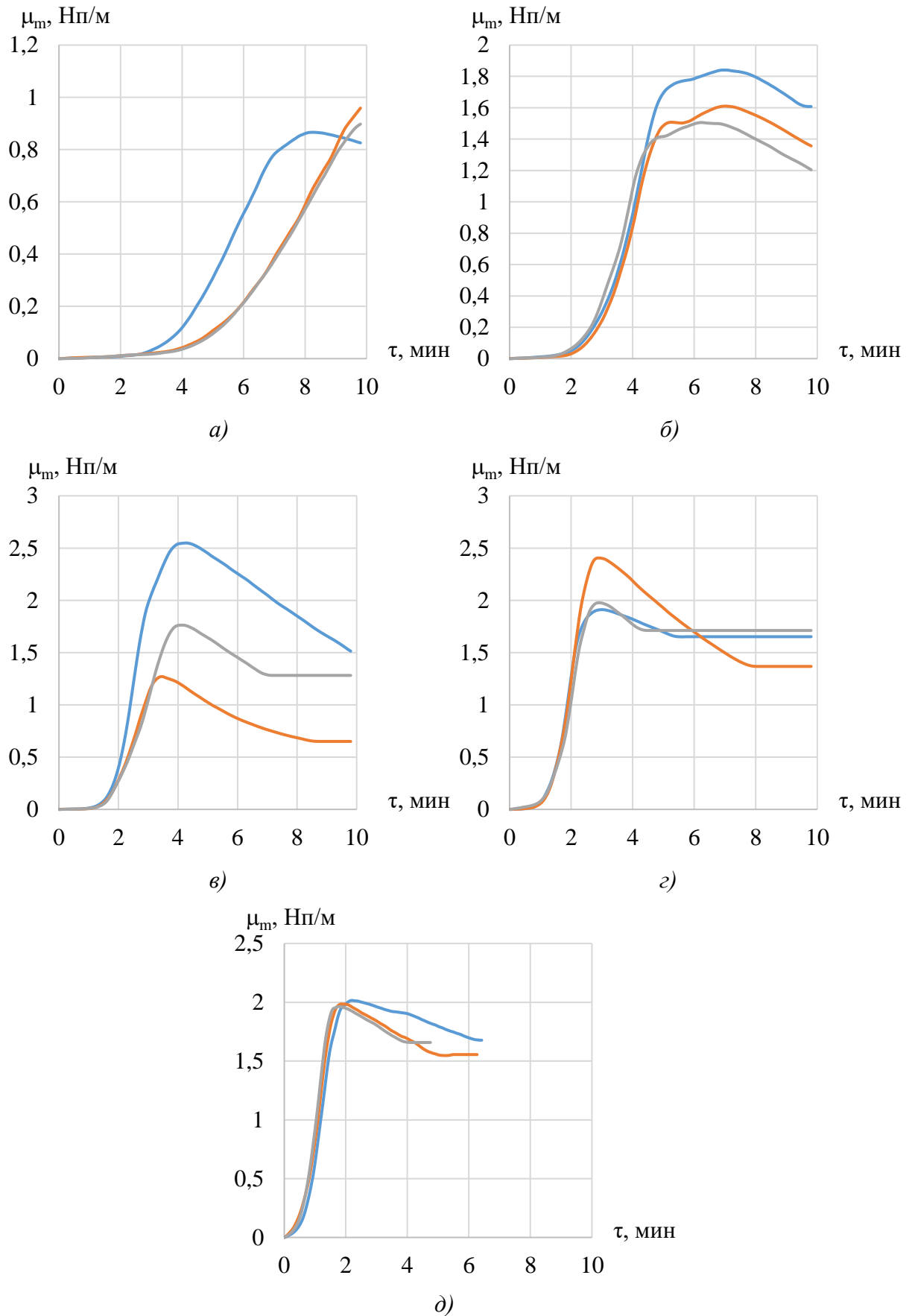


Рисунок 4.7 – Зависимости оптической плотности дыма от времени проведения экспериментов при плотности теплового потока [73]: а - 20 кВт/м^2 , б - 25 кВт/м^2 , в - 35 кВт/м^2 ; г - 50 кВт/м^2 ; д - 65 кВт/м^2

Для оценки адекватности использования уравнения (2.10) интегральной модели на рисунке 4.8 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 (2.10) использовались экспериментальные значения удельного коэффициента дымообразования и массовой скорости выгорания горючего материала.

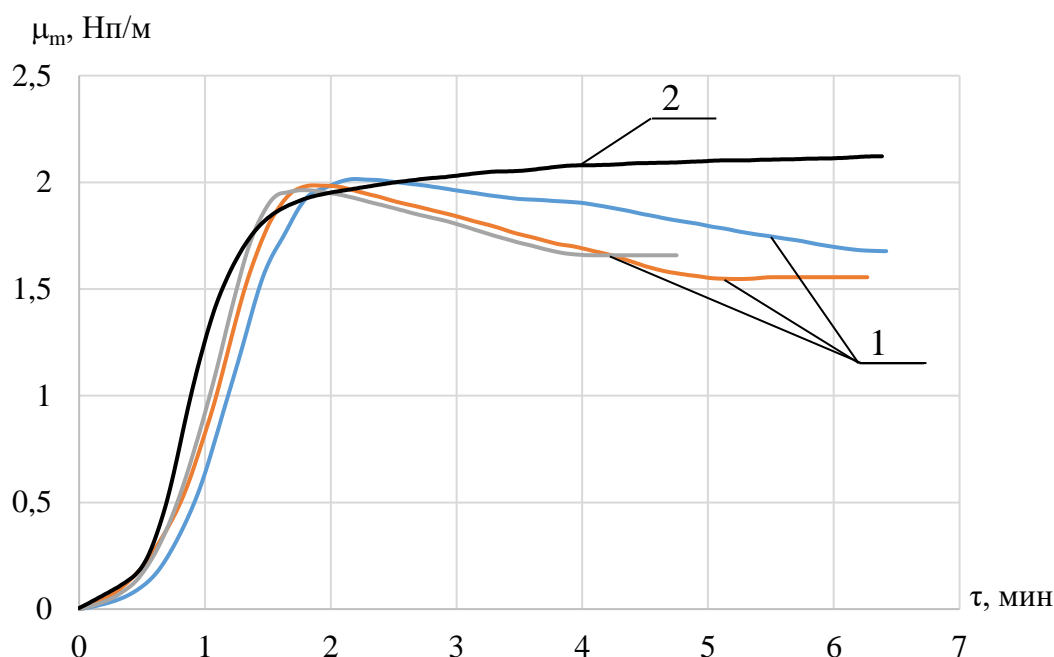


Рисунок 4.8 – Зависимости оптической плотности дыма от времени проведения огневых испытаний кабеля ВВГнг при плотности теплового потока 65 кВт/м^2 [73]:

1 – эксперимент; 2 – расчет (уравнение 2.10)

Из рисунка 4.8 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 (2.12) зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры при различных плотностях теплового потока представлены на рисунке 4.9.

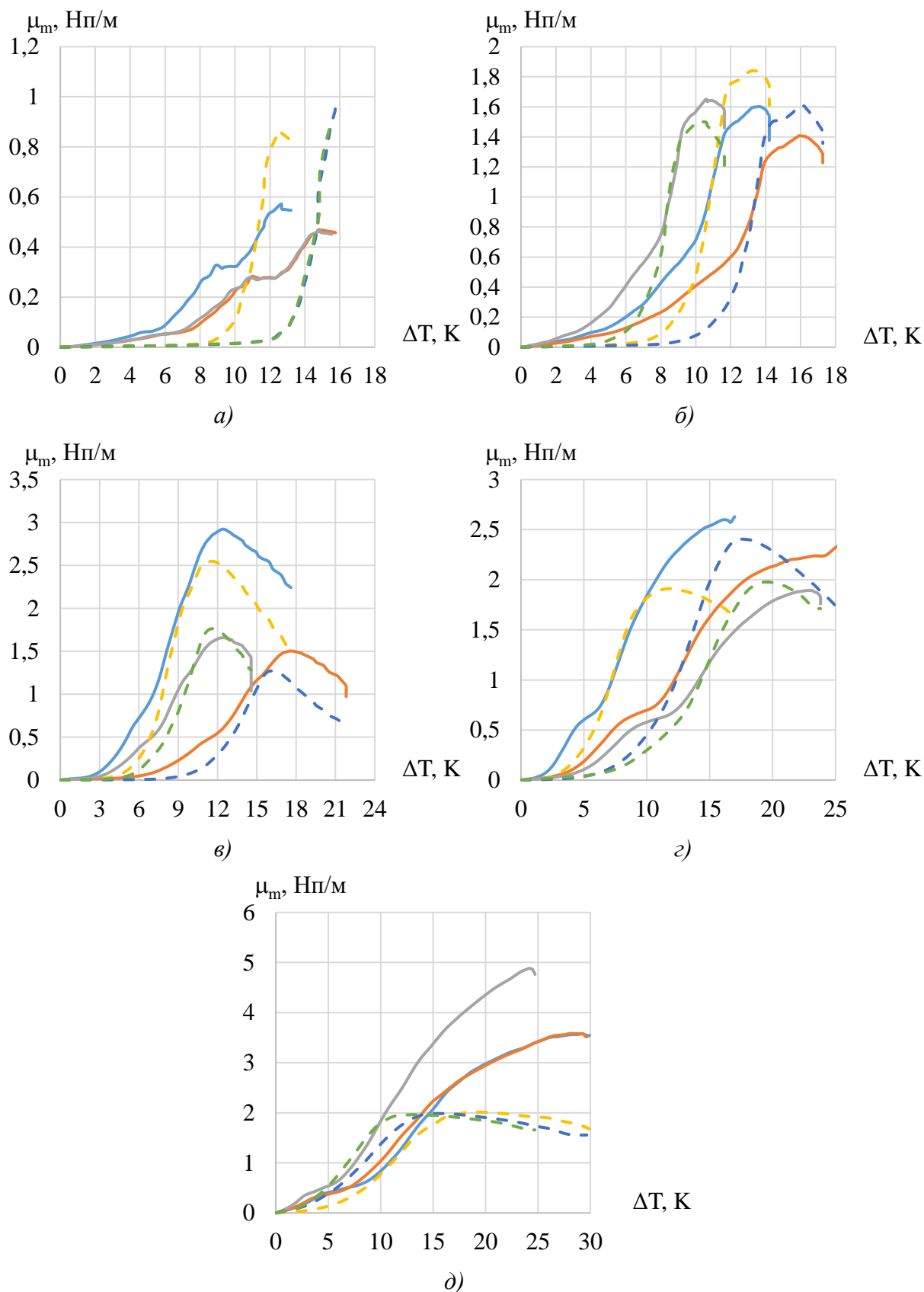


Рисунок 4.9 – Зависимости оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры при плотности теплового потока [73]: а - 20 кВт/м², б - 25 кВт/м², в - 35 кВт/м²; г - 50 кВт/м²; д - 65 кВт/м²; штриховая линия – эксперимент; сплошная линия – расчет с использованием выражения (2.12)

Из рисунка 4.9 видно, что расчетные зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры качественно и количественно соответствуют экспериментальным зависимостям. Существенное расхождение после $\Delta T > 10-15^\circ\text{C}$ 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.

Расчет времени блокирования путей эвакуации по потере видимости при пожаре в полномасштабном помещении без использования уравнений закона сохранения оптической плотности дыма (2.10) и (2.15) можно проводить следующим образом:

- находятся зависимости от времени среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода;
- определяются величины среднеобъемной оптической плотности дыма по величине среднеобъемной температуры или среднеобъемной парциальной плотности кислорода в каждый момент времени.

Сравнительный анализ результатов огневых испытаний оболочек кабелей ВВГнг (кабельной галереи), представленных на рисунке 4.9 и значений, полученных с использованием формулы (2.12), показал, что они совпадают друг с другом с достаточно высокой точностью для инженерных расчетов.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что результаты огневых испытаний в маломасштабном объеме установки (для рассмотренных исходных данных) показали, что аналитическое выражение (2.12) позволяет проводить расчет среднеобъемной оптической плотности дыма в крупномасштабном помещении с учетом поправки на коэффициент теплопотерь.

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 [109, 110], древесина хвойных пород. Полученные данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – 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 4.1 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.

4.3 Общий анализ результатов экспериментов

Огневые испытания, проведенные на модифицированной установке, послужили основой для получения следующих результатов:

- была произведена модификация установки по определению пожарной опасности конденсированных веществ и материалов при их термическом разложении;

- были получены эмпирические зависимости оптической плотности дыма от температуры продуктов горения, при термическом разложении оболочек кабеля и древесины хвойных пород;

- определены значения удельных коэффициентов дымообразования и удельных массовых скоростей выгорания для каждого момента времени на протяжении всего процесса термического разложения образцов;

- получена достаточно хорошая сопоставимость результатов огневых испытаний с аналитическим решением интегральной модели пожара в помещении, приведена аналитическая зависимость для расчета среднеобъемной оптической плотности дыма;

- анализ результатов огневых испытаний показал, что выбор режима проведения испытаний, временного промежутка, на котором берется среднее значение, и продолжительности проведения огневых испытаний оказывают существенное влияние на определении удельных коэффициентов дымообразования.

4.4 Уточнение методики расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики

Потеря видимости в дыму – это следствие достижения критического значения для человека опасного фактора пожара такого, как снижение видимости в дыму. Для среднестатистического человека пределом является потеря видимости на уровне 1,7 м от уровня пола по горизонтали на расстоянии 20 м от наблюдателя [51-52]. Для небольшого помещения, линейные размеры которого не превышают 20 м, предельной дальностью видимости принимается наибольший горизонтальный линейный размер помещения.

При проведении расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики необходимо выполнить следующий порядок действий:

- определить наиболее опасный участок в объеме здания или помещения по количеству задействованного рабочего персонала, среднего времени нахождения в том или ином месте, наличия пожароопасной горючей нагрузки;
- определить вид пожарной нагрузки, взять образцы для огневых испытаний, провести серию огневых испытаний на определение зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от температуры продуктов сгорания, либо на определение коэффициента дымообразования;
- выбрать наиболее подходящую математическую модель расчета динамики распространения опасных факторов пожара, исходя из геометрических особенностей здания или помещения, где будет задан расчетный очаг горения;
- согласно выбранной модели определить зависимость среднеобъемной температуры или парциальной плотности кислорода от времени горения;
- по полученной зависимости (с учетом коэффициента теплопотерь φ в случае среднеобъемной температуры) определить среднеобъемную оптическую плотность дыма μ_{cp} ;

– определить время наступления критического значения для человека по оптической плотности дыма.

4.5 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 производственных зданий теплоэлектростанции

Проведение расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на производственных зданиях ТЭЦ подразумевает под собой ряд мероприятий, описанных в расчетной методике п. 4.6, и в порядке проведения огневых испытаний п. 3.3 данной научно-исследовательской работы.

Согласно данной методике необходимо определить основной вид пожарной нагрузки, провести серию огневых испытаний на модифицированной установке и определить зависимость оптической плотности дыма от температуры продуктов горения. Данная методика в отличие от нормативных опирается на эмпирические зависимости для фактически используемой на объекте пожарной нагрузки.

С учетом коэффициента теплопотерь, не решая уравнение (2.10) закона сохранения оптической плотности дыма, на основе эмпирических зависимостей, полученных в ходе проведения серии огневых испытаний, данная методика позволяет рассчитать время блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму в полномасштабных помещениях производственного здания ТЭЦ.

При выборе материала для проведения серии огневых испытаний необходимо провести анализ всех горючих конденсированных веществ и материалов, обращающихся на территории производственного здания ТЭЦ. Оценить степень их пожарной опасности, массу, занимаемый объем и площадь. Далее согласно п. 3.3 провести серию огневых испытаний и определить

зависимость среднеобъемной оптической плотности дыма от температуры продуктов горения при использовании интегральной математической модели, а при использовании зонной математической модели от среднеобъемной температуры припотолочного слоя.

Далее согласно методике, описанной в п. 4.6, определить время блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму.

Для примера приведем расчет по предложенной методике в главном корпусе типовой ТЭЦ и сравним результаты с расчетом по действующей методике. План и поперечный разрез которого представлен на рисунках 4.10-4.11.

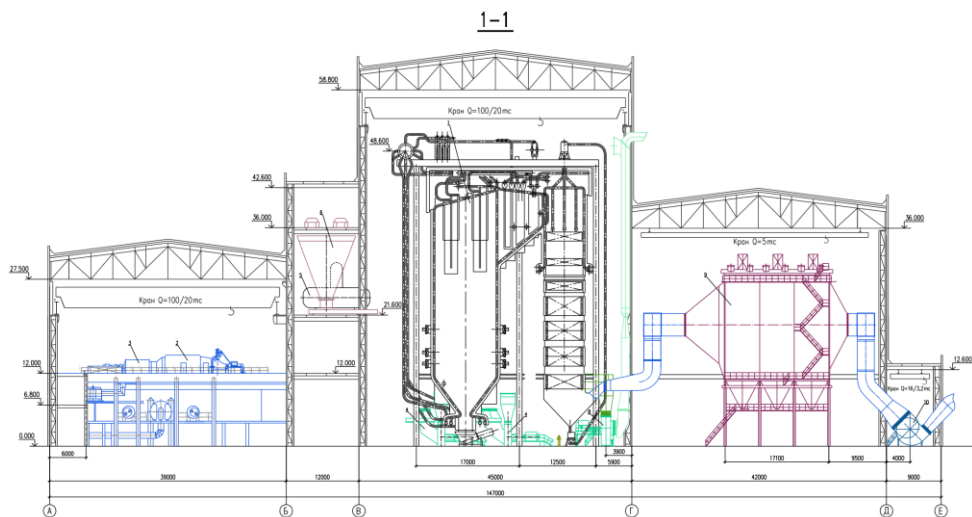


Рисунок 4.10 – Поперечный разрез главного корпуса типовой ТЭЦ [34]

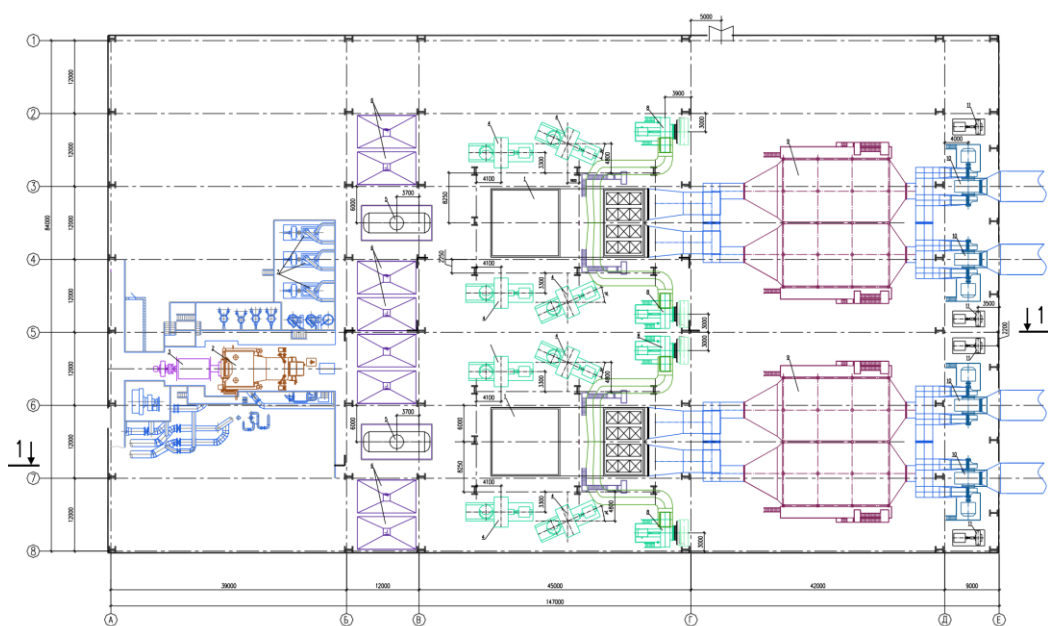


Рисунок 4.11 – План главного корпуса типовой ТЭЦ [34]

В качестве пожарной нагрузки рассмотрим кабель-канал с оболочками изоляции из поливинилхлорида. Общая протяженность которого составляет 12 м. Для расчета по стандартной методике в качестве исходных данных примем следующие значения:

- температура в помещении $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- давление в помещении (равно атмосферному) $p_0 = 101300 \text{ Па}$;
- скорость движения воздуха $w_B = 0 \text{ м/с}$;
- низшая рабочая теплота сгорания $Q_H^p = 25 \text{ МДж/кг}$;
- удельная массовая скорость выгорания горючего материала $\Psi_{yd} = 0,0244 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$;
- коэффициент дымообразования $D_m = 635 \text{ Нп/м}^2 \cdot \text{кг}$;
- коэффициент теплопотерь $\varphi = 0,6$.

Автоматику систем пожаротушения, механической вентиляции и дымоудаления не учитываем.

Предполагается, что наиболее опасный тип пожара - пожар, регулируемый нагрузкой. Эвакуационные выходы считаем открытыми с небольшой величиной проемности, т. е. дым не покидает пространство помещений.

Для расчетов согласно предложенной методике расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики были использованы, полученные ранее зависимости оптической плотности дыма от температуры продуктов горения для оболочек кабеля из поливинилхлорида марки ВВГнг.

Результаты расчетов представлены на рисунке 4.12 в виде графической зависимости оптической плотности дыма от продолжительности пожара.

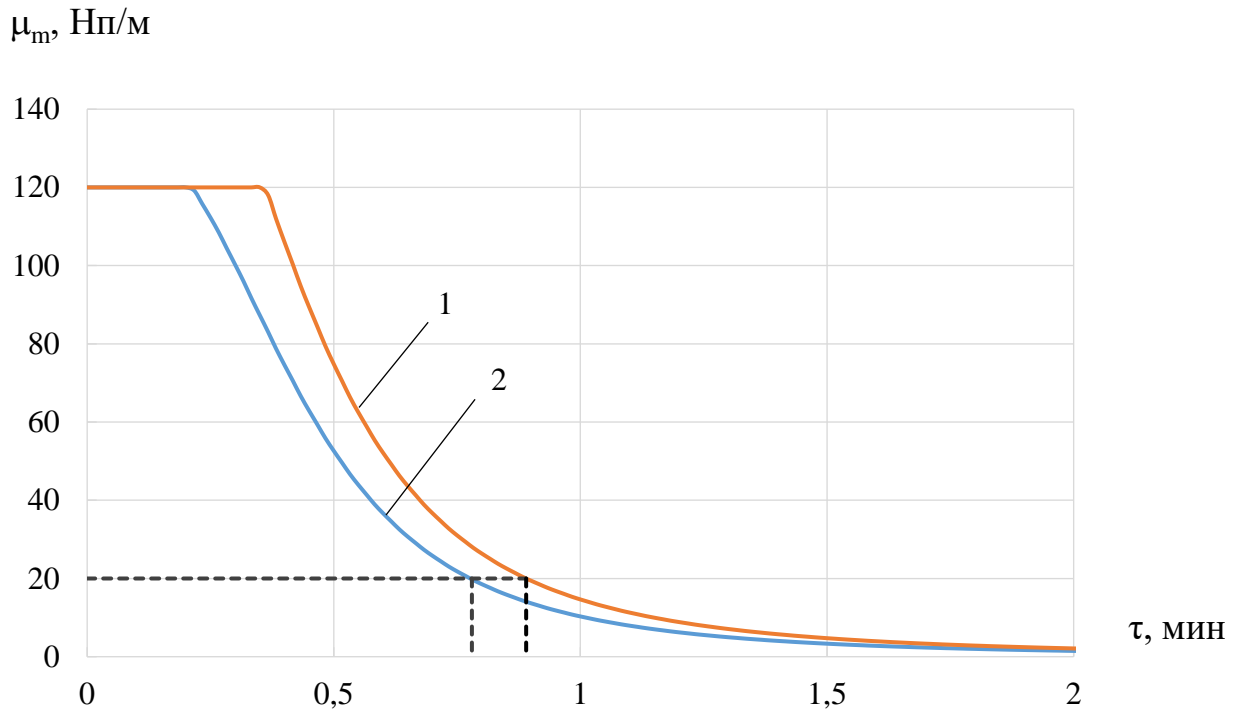


Рисунок 4.12 – График зависимости оптической плотности дыма:
1 – модифицированный метод расчета; 2 – стандартный метод расчета

Из графика видно, что при расчете времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при горении оболочек кабеля ВВГнг значения, полученные по предложенной модифицированной методике соразмерны со значениями, полученными при расчете по действующей методике.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что результаты экспериментальных исследований в маломасштабном объеме установки (для рассмотренных исходных данных) позволяют проводить расчет среднеобъемной оптической плотности дыма и распространять их на крупномасштабное помещение с учетом поправки на коэффициент теплопотерь.

4.6 Выводы по четвертой главе

В ходе проведения огневых испытаний и численных исследований были получены следующие результаты:

1. Проведен сравнительный анализ полученных эмпирических значений удельных коэффициентов дымообразования с данными литературных источников и аналитическим решением интегральной математической модели.

2. Получены экспериментальные зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от среднеобъемной температуры продуктов горения, а также коэффициент дымообразования и удельная массовая скорость выгорания от времени испытаний при терморазложении оболочки современной кабельной продукции на примере кабеля ВВГнг.

3. Для оценки адекватности использования уравнения (2.10) интегральной модели на рисунке 4.8 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 (2.10) использовались экспериментальные значения удельного коэффициента дымообразования и массовой скорости выгорания горючего материала. Проведенное сопоставление показало достаточно высокую точность предложенного метода расчета.

4. Полученные экспериментальные и теоретические (2.12) зависимости среднеобъемной оптической плотности дыма от изменения среднеобъемной температуры при различных плотностях теплового потока показали существенное влияние плотности теплового потока на параметры исследуемого процесса.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пузач, С. В. Модифицированная зонная модель расчета термогазодинамики пожара в атриуме [Текст] / С. В. Пузач, Е. С. Абакумов. // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80, – № 2. – С. 84-89.
2. Пузач, С. В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении [Текст] / С. В. Пузач, Е. В. Сулейкин. // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, – № 2. – С. 13-20.
3. Пузач, С. В. Трехмерное математическое моделирование начальной стадии пожара в помещении [Текст] / С. В. Пузач. // Инженерно-физический журнал. – 2000. – Т. 73, – № 3. – С. 621-626.
4. Кошмаров, Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учебное пособие [Текст] / Ю. А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
5. Пузач, С. В. Временной механизм воздействия опасных факторов пожара на персонал АЭС и комплексная защита от них [Текст] / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, А. Д. Ищенко [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – № 8. – С. 15-26. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.08.15-24.
6. Пузач, С. В. Новые представления о расчете необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах. [Текст] / С. В. Пузач, А. В. Смагин, О. С. Лебедченко [и др.]. - М.: Академия ГПС МЧС России. – 2007. – 222 с.
7. Пузач, С. В. Математическое моделирование тепломассообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности [Текст] / С. В. Пузач – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – 150 с.
8. Пузач, С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности: монография. [Текст] / С. В. Пузач – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

9. Пузач, С. В. Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении: монография. [Текст] / С. В. Пузач, В. М. Доан, Т. Д. Нгуен, Е. В. Сулейкин, Р. Г. Акперов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – 130 с.
10. Драздейл, Д. Введение в динамику пожаров [Текст] / Д. Драздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.
11. Tanaka, T. BRI 2002: Two-layer zone smoke transport model. Chapter 1. Outline of the model [Текст] / T. Tanaka, S. Yamada. // Fire Science and Technology. 2004. Vol. 23, № 1. P. 1-44.
12. Исаева, Л. К. Пожары и окружающая среда [Текст] / Л. К. Исаева. – М.: 2001. – 222 с.
13. Покровская, Е. Н. Влияние структуры поверхностного слоя, образующегося при термическом разложении древесины, на её дымообразующую способность [Текст] / Е. Н. Покровская, Ф. А. Портнов, А. А. Кобелев [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24. – № 6. – С. 16-22.
14. Покровская, Е. Н. Дымообразующая способность древесных материалов при поверхностном модифицировании элементоорганическими соединениями [Текст] / Е. Н. Покровская, А. А. Кобелев, Ф. А. Портнов [и др.]. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – Т. 145. – № 8. – С. 149-155.
15. Покровская, Е. Н. Кинетические параметры аэрозолей дыма при горении модифицированной древесины [Текст] / Е. Н. Покровская, Ф. А. Портнов. // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – № 12. – С. 6-13.
16. Покровская, Е. Н. Термодинамическая оптимизация модификаторов поверхностного слоя древесины [Текст] / Е. Н. Покровская, Ф. А. Портнов. // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – № 5. – С. 29-36.
17. Ушков, В. А. Воспламеняемость и дымообразующая способность полимерных композиционных материалов [Текст] / В. А. Ушков. // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 107. – № 8. – С. 897-903.

18. Ушков, В. А. Воспламеняемость и дымообразующая способность полимерных материалов, содержащих производные ферроцена [Текст] / В. А. Ушков, Д. И. Невзоров, А. В. Копытин [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 7. – С. 27-35.

19. Ушков, В. А. Горючесть и дымообразующая способность композиционных материалов на основе эпоксидных олигомеров [Текст] / В. А. Ушков, А. В. Копытин, Е. А. Шувалова [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26. – № 6. – С. 31-42.

20. Ушков, В. А. Горючесть и дымообразующая способность полимерных композиционных материалов с разлагающимися минеральными наполнителями [Текст] / В. А. Ушков, В. М. Лалаян, С. М. Ломакин [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22. – № 8. – С. 15-24.

21. Ушков, В. А. О влиянии неразлагающихся наполнителей на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов [Текст] / В. А. Ушков, В. М. Лалаян, С. М. Ломакин [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22. – № 6. – С. 32-39.

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

23. Трушкин, Д. В. Проблемы классификации строительных материалов по пожарной опасности. Часть 2. Сравнительный анализ экспериментальных методов по оценке пожарной опасности строительных материалов, принятых в России и странах Евросоюза [1]. Определение воспламеняемости, дымообразующей способности, способности к распространению пламени по поверхности и токсичности продуктов сгорания строительных материалов [Текст] / Д. В. Трушкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 6. – С. 31-37.

24. Трушкин, Д. В. Проблемы классификации строительных материалов по пожарной опасности. Часть 2. Сравнительный анализ экспериментальных методов

по оценке пожарной опасности строительных материалов, принятых в России и странах Евросоюза [1]. Определение горючести строительных материалов [Текст] / Д. В. Трушкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 4. – С. 24-32.

25. Барботько, С. Л. Влияние длительного теплового воздействия на пожаробезопасность полимерных материалов [Текст] / С. Л. Барботько, М. С. Барботько, О. С. Вольный [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 1. – С. 12-20.

26. Барботько, С. Л. Исследование влияния толщины микросферотекстолитов на характеристики тепловыделения при горении [Текст] / С. Л. Барботько, В. Н. Воробьев, Н. С. Кавун [и др.]. // Авиационные материалы и технологии. – 2008. – Т. 7. – № 2. – С. 24-26.

27. Барботько, С. Л. Исследование влияния толщины стеклопластиков на характеристики тепловыделения при горении [Текст] / С. Л. Барботько, Н. И. Швец, О. Б. Застрогина [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22. – № 7. – С. 30-36.

28. Барботько, С. Л. Особенности испытаний авиационных материалов на пожароопасность. Часть 3. Испытания на дымообразование. Влияние толщины монолитного образца полимерного композиционного материала [Текст] / С. Л. Барботько, О. С. Вольный, О. А. Кириенко [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24. – № 4. – С. 7-22.

29. Барботько, С. Л. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов авиационного назначения [Текст] / С. Л. Барботько, В. Н. Кириллов, Е. Н. Шуркова. // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – Т. 24. – № 3. – С. 56-63.

30. Барботько, С. Л. Оценка тепловыделения при горении электрических кабелей [Текст] / С. Л. Барботько, О. С. Вольный. // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25. – № 11. – С. 35-44. DOI:10.18322/PVB.2016.25.11.35-44.

31. Российская Федерация. Законы. Об электроэнергетике: Федеральный закон № 35-ФЗ [Текст]: [принят Государственной думой 21 февраля 2003 года; одобрен Советом Федерации 12 марта 2003 года]. // Собрание законодательства российской федерации №13 от 31 марта 2003 года, ст. 1177.

32. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон № 123-ФЗ [Текст]: [принят Государственной думой 4 июля 2008 года: одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 года]. // Собрание законодательства Российской Федерации от 28 июля 2008 г. N 30 (часть I) ст. 3579.

33. Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий: РД 153-34.0-03.301-00 (ВППБ 01-02-95*): официальное издание: утверждены РАО «ЕЭС России» 09.03.2000: введены в действие 01.06.2000 – М.: ЗАО «Энергетические технологии», 2000 г.

34. Яндекс. Картинки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://m.yandex.ru/images> (дата обращения 13.02.2019).

35. Пожары и пожарная безопасность в 2015 году: статистический сборник [Текст] / М. А. Чебуханов, А. А. Козлов и др.; под общ. ред. А. В. Матюшина. // – М.: ВНИИПО, 2016. – 124 с.

36. Пожары и пожарная безопасность в 2016 году: статистический сборник [Текст] / П. В. Полехин, Ю. А. Матюшин и др.; под общ. ред. Д. М. Гордиенко. // – М.: ВНИИПО, 2017. – 124 с.

37. Пожары и пожарная безопасность в 2017 году: статистический сборник [Текст] / П. В. Полехин, А. А. Козлов и др.; под общ. ред. Д. М. Гордиенко. // – М.: ВНИИПО, 2018. – 125 с.

38. Пожары и пожарная безопасность в 2018 году: статистический сборник [Текст] / П. В. Полехин, М. А. Чебуханов и др.; под общ. ред. Д. М. Гордиенко. // – М.: ВНИИПО, 2019. – 125 с.

39. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году: статистический сборник [Текст] / П. В. Полехин, М. А. Чебуханов и др.; под общ. ред. Д. М. Гордиенко. // – М.: ВНИИПО, 2020. – 80 с.

40. Костерин, И. В. Описание методики сбора исходных данных для определения вероятности эвакуации людей из зданий с многосветными

пространствами [Текст] / И. В. Костерин, В. И. Присадков. // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 8. – С. 53-56.

41. Самошин, Д. А. Состав людских потоков и параметры их движения при эвакуации: монография [Текст] / Д. А. Самошин. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – 210 с.

42. Холщевников, В. В. Эвакуация и поведение людей при пожарах: монография [Текст] / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин [и др.]. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 262 с.

43. Грачев, В. А. Газодымозащитная служба [Текст] / В. А. Грачев, Д. В. Поповский. – М.: Пожкнига, 2004. – 380 с.

44. 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.

45. Польшко, С. В. Безопасность добровольной пожарной дружины при ликвидации чрезвычайной ситуации в начальной стадии развития [Текст] / С. В. Польшко, Д. Ф. Кожевин, А. А. Бондарь. // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2017. – № 4. – С. 1-7.

46. Боландина, Е. С. Влияние опасных факторов пожара на организм человека [Текст] / Е. С. Боландина. // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 2. – С. 36-36.

47. Ворогушин, О. О. Анализ влияния различных факторов на динамику развития ОФП в атриуме [Текст] / О. О. Ворогушин, А. Я. Корольченко. // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. – № 9. – С. 23-30.

48. Corches, A-M. FDS Modeling of the Sensitivity of the Smoke Potential Values used in Fire Safety Strategies. [Текст] / A-M. Corches, L. Ulriksen, G. Jomaas. // the 10th

International Conference on PerformanceBased Codes and Fire Safety Design Methods 2014. – 2015. – pp.346-358.

49. Gyppaz, F. Smoke and Safety in case of fire. [Текст] / F. Gyppaz. // Nexans Research Center – Lyon France. – 2014. – pp. 2-15.

50. Husted, B.P. Visibility Through Inhomogeneous smoke using CFD Proceedings of Interflam 2004. [Текст] / B. P. Husted, J. Carlsson, U. Goransson. // – Edinburgh. – 2004. – pp. 697-702.

51. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [Электронный ресурс]: приказ МЧС Российской Федерации от 30 июня 2009 г. № 382 // Российская газета - Федеральный выпуск № 161 от 28 августа 2009 г. (4985).

52. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: приказ МЧС Российской Федерации от 10 июля 2009 г. № 404 // URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91229/40c660565de6934e4c947642c1b098e3c03bf2cc/ (дата обращения: 27.03.2019).

53. ГОСТ 12.1.004-91* Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования – М.: Стандартинформ, 2006. – 68 с.

54. Мустафин, В. М. Влияние начальной освещенности и дымообразующей способности на расчетное время блокирования путей эвакуации по потере видимости [Текст] / В. М. Мустафин, С. В. Пузач // Безопасность жизнедеятельности. – 2020. – Т. 230. – №2. – С. 17-22.

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

56. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения – М.: Стандартинформ, 2006. – 100 с.

57. Сивенков, А. Б. Влияние срока эксплуатации жилых и нежилых деревянных строений на пожароопасные свойства древесины [Текст] / А. Б. Сивенков, Н. И. Тарасов, Т. С. Алексеева. // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2011. – № 3. – С. 7-15.

58. Асеева, Р. М. Влияние естественного старения на физико-химические и пожароопасные свойства древесины [Текст] / Р. М. Асеева, Б. Б. Серков, А. Б. Сивенков. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 9 (158). – С. 206-217.

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

60. Асеева, Р. М. Эффективность и механизм действия двух огнезащитных систем для древесины [Текст] / Р. М. Асеева, Б. Б. Серков, А. Б. Сивенков [и др.]. // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16. – № 5. – С. 23-30.

61. 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.

62. 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.

63. Афанасьев, С. В. Азотфосфорсодержащие антипирены пропитывающего действия для древесины [Текст] / С. В. Афанасьев, Р. В. Коротков. // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 17. – № 6. – С. 38-42.
64. ASTM D2843-19, Standard Test Method for Density of Smoke from the Burning or Decomposition of Plastics ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. – 9 p.
65. ASTM E662-21a, Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021. – 26 p.
66. NFPA 92B. Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas Quincy, National Fire Protection Association, 2000. – 57 p.
67. ISO 9705-1:2016. Reaction to fire tests – Room corner test for wall and ceiling lining products – Part 1: Test method for a small room configuration. Stockholm: Swedish Institute for Standards, 2016. – 42 p.
68. IEC 61034-2:2005+AMD1:2013+AMD2:2019 Measurement of smoke density of cables burning under defined conditions - Part 2: Test procedure and requirements, 2019. – 69 p.
69. 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.
70. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение Минрегион России. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 70 с.
71. ГОСТ 31565-2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.
72. Доан, В. М. Методика расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре в производственных зданиях ГЭС Вьетнама: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 [Текст] / Доан Вьет Мань. – М., 2011. – 185 с.

73. Мустафин, В. М. Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении [Текст] / В. М. Мустафин, С. В. Пузач, Р. Г. Акперов // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30. – №3. – С. 76-87. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.03.

74. Суриков, А. В. Методика расчета видимости при пожаре [Текст] / А. В. Суриков, Н. С. Лешенюк. // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. – Т. 3. – № 4. – С. 412-419.

75. Rasbash, D. J. Fundamentals of smoke production. [Текст] / D. J. Rasbash, D. D. Drysdale. // Fire Safety Journal. – 1982. – Issue 5 – pp. 77-86.

76. Mouritz, A. P. Fire properties of polymer composite materials. [Текст] / A. P. Mouritz, A. G. Gibson. // Dordrecht, Netherlands: Springer. – 2006. – 398 p.

77. Orzel, R. A. Toxicological aspects of firesmoke: polymer pyrolysis and combustion. [Текст] / R. A. Orzel. // Occup Med. – 1993. – Issue 8(3). – pp. 414-429.

78. Gross, D. Method for Measuring Smoke from Burning Materials. [Текст] / D. Gross, J. J. Loftus, A. F. Robertson. // Symposium on Fire Test Methods-Restraint & Smoke 1966. West Conshohocken, PA: ASTM International, – 1967. – pp. 166-204.

79. Shusterman, D.J. Clinical smoke inhalation injury: systemic effects. [Текст] / D. J. Shusterman. // Occupational Medicine. – 1993. – Issue 8(3). – pp. 469-502.

80. Tamura, G.T. Smoke Movement and Control in High Rise Buildings [Текст] / G. T. Tamura // Quincy, National Fire Protection Association, 1994. – 280 p.

81. Young, C.J. Smoke inhalation: Diagnosis and treatment. [Текст] / C. J. Young, J. Moss. // Journal of Clinical Anesthesia. – 1989. – Vol. 1, Issue 5. – pp. 377-386. DOI: 10.1016/0952-8180(89)90079-2.

82. Колодяжный, С. А. Математическое моделирование динамики основных опасных факторов в начальной стадии пожара [Текст] / С. А. Колодяжный, И. И. Переславцева. // Известия КазГАСУ. – 2014. – Т. 30. – № 4. – С. 403-412.

83. Александренко, М. В. Математическое моделирование пожара [Текст] / М. В. Александренко, М. В. Акулова, А. М. Ибрагимов. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – Т. 35. – № 4-1. – С. 28-29.

84. Абашкин, А. А. Методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: пособие по применению [Текст] / А. А. Абашкин, А. В. Карпов, Д. В. Ушаков, М. В. Фомин, А. Н. Гилетич, П. М. Комков. – М.: ВНИИПО, 2014. – 247 с.

85. Суриков, А. В. Определение значений параметров моделирования и интерпретация выходных данных в программном комплексе FDS при расчете видимости в условиях задымления [Текст] / А. В. Суриков, Н. С. Лешенюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2. – № 3. – С. 308-319.

86. Суриков, А. В. Расчет видимости в помещениях в условиях пожара с применением программного комплекса FDS [Текст] / А. В. Суриков, Н. С. Лешенюк // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2. – № 2. – С. 147-160.

87. Ярош, А. С. Анализ математических моделей развития опасных факторов пожара в системе зданий и сооружений [Текст] / А. С. Ярош, М. Н. Чалаташвили, А. Н. Кроль [и др.]. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2019. – № 1. – С.50-56.

88. Зотов, Ю. С. Процесс задымления помещений при пожаре и разработка метода необходимого времени эвакуации людей: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Зотов Юрий Сергеевич. – М., 1989. – 273 с.

89. Строительные нормы. Указания по проектированию цветовой отделки интерьеров производственных зданий промышленных предприятий: СН 181-70. – Введ. 01.10.1970. – М.: Стройиздат, 1972. – 76 с.

90. Сивухин, Д. В. Поглощение света и уширение спектральных линий § 89. [Текст] / Д. В. Сивухин. // Общий курс физики. – М., 2005. – Т. IV. Оптика. – С. 582-583.

91. Брюханов, А. В. Исследование дымообразующей способности основных древесных пород Сибири [Текст] / А. В. Брюханов, П. А. Осавелюк, Е. В. Гуляева. //

Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2011. – № 1. – С. 25-31.

92. Григорьева, М. П. К вопросу об оценке дымообразующей способности напольных покрытий [Текст] / М. П. Григорьева, Т. Ю. Еремина, Н. И. Константинова. // Пожаровзрывобезопасность. – 2015. – Т. 24. – № 8. – С. 34-42. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.08.34-42.

93. Патент на полезную модель № 174688 Российская Федерация. Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении: № 2017113747: заявл. 20.04.2017: опубл. 26.10.2017 [Текст] / Е. В. Сулейкин, Р. Г. Акперов, С. В. Пузач.

94. Мустафин, В. М. 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.

95. 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.

96. 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.

97. 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.

98. 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.

99. 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.

100. 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.

101. 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.

102. Тарханов, Д. А. Влияние размеров образцов одинаковой массы на дымообразующую способность материалов [Текст] / Д. А. Тарханов, Г. А. Анохин. // Актуальные проблемы транспортной медицины. – 2007. – Т. 8. – № 2. – С. 134-138.

103. 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.

104. 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.

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

106. 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.

107. 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.

108. 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.

109. 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.

110. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

Акты внедрения

Результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ



Начальник технического управления

Акционерное общество «Атомэнергoproект»

А.В. Овчинников

» сентября 2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационных исследований, выполненных Мустафиным Валиханом Мухтаровичем на тему: «Методика определения времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Мустафина Валихана Мухтаровича использованы при:

- выполнении расчетов пожарного риска 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»;

- при 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».

Разработанная Мустафиным В.М. методика расчета времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму на объектах энергетики позволила учесть снижения видимости в дыму при термическом разложении современных горючих веществ и материалов, используемых на объектах энергетики, но не включенных в базу типовой пожарной нагрузки.

Главный инженер по пожарной безопасности
АО «Атомэнергoproект»



В.И. Захаров

Главный специалист
технического управления



Д.С. Никонов

Главный специалист
технического управления



А.В. Шульгин

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по научной работе
доктор технических наук, профессор


Алешков М.В.
« 15 » 09 2021 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание степени кандидата технических наук адъюнкта 3-го курса специального факультета по работе с иностранными гражданами института подготовки иностранных граждан Академии ГПС МЧС России, капитана гражданской защиты Мустафина Валихана Мухтаровича при выполнении научно-исследовательской работы

Комиссия в составе: начальника учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, д.т.н., профессора Самошина Дмитрия Александровича (председатель), профессора кафедры процессов горения, к.т.н., Комракова Петра Владимировича, доцента кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, к.т.н., доцента Лимонова Вячеслава Григорьевича, заместителя начальника центра - начальника отдела организации научных исследований центра организации научных исследований и научной информации, к.т.н., Федяева Владислава Дмитриевича, подтверждает, что результаты диссертационного исследования Мустафина Валихана Мухтаровича были использованы при выполнении научно-исследовательской работы на тему «Исследование дымообразующей способности современных веществ и материалов для моделирования пожаров» (п. 48 плана научной работы Академии ГПС МЧС России на 2020 г.).

Председатель комиссии:

Начальник учебно-научного комплекса
пожарной безопасности объектов защиты
д.т.н., профессор



Самошин Д.А.

Члены комиссии:

Профессор кафедры
процессов горения, к.т.н.



Комраков П.В.

Доцент кафедры инженерной
теплофизики и гидравлики
к.т.н., доцент



Лимонов В.Г.

Заместитель начальника центра - начальник
отдела организации научных исследований
центра организации научных исследований и
научной информации
к.т.н



Федяев В.Д.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по учебной работе
кандидат военных наук, доцент


« 28 » 08 2021 г. М.В. Бедило

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук адъюнкта очного обучения кафедры инженерной теплофизики и гидравлики Академии ГПС МЧС России, старшего лейтенанта гражданской защиты Мустафина Валихана Мухтаровича

Комиссия в составе: заместителя начальника УМЦ - начальника учебного отдела полковника внутренней службы Колесникова В.В., заместителя заведующего кафедрой инженерной теплофизики и гидравлики полковника внутренней службы Болдырева Е.Н., доцента кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, к.т.н., доцента Лимонова В.Г., профессора кафедры процессов горения в составе УНК процессов горения и экологической безопасности, д.т.н., профессора Бегишева И.Р. подтверждает, что результаты диссертационного исследования Мустафина Валихана Мухтаровича внедрены в учебный процесс кафедры инженерной теплофизики и гидравлики при подготовке фондовых лекций и практических занятий:


- на факультете техносферной безопасности по дисциплине «Теплотехника и прогнозирование опасных факторов пожара» по теме «Зонная математическая модель пожара»;

- на факультете пожарной безопасности по дисциплине «Прогнозирование опасных факторов пожара» по теме «Дополнительные соотношения зонной математической модели пожара».

Заместитель начальника УМЦ - начальник
учебного отдела
полковник внутренней службы

 Колесников В.В.

Заместитель заведующего кафедрой
инженерной теплофизики и гидравлики
полковник внутренней службы

 Болдырев Е.Н.

Профессор кафедры процессов горения
в составе УНК процессов горения
и экологической безопасности
д.т.н., профессор

 Бегишев И.Р.

Доцент кафедры инженерной
теплофизики и гидравлики,
к.т.н., доцент

 Лимонов В.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Свидетельство о государственной регистрации программы для
электронно-вычислительной машины**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021664548

Программа для обработки и формирования базы параметров пожарной нагрузки

Правообладатели: *Болдрушкиев Очир Баатрович (RU), Пузач Сергей Викторович (RU), Акперов Руслан Гянджавиевич (RU), Мустафин Валихан Мухтарович (KZ)*

Авторы: *Болдрушкиев Очир Баатрович (RU), Пузач Сергей Викторович (RU), Акперов Руслан Гянджавиевич (RU), Мустафин Валихан Мухтарович (KZ)*

Заявка № **2021619872**

Дата поступления **12 июня 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **08 сентября 2021 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 8x02A5CF8C0087ACF59A40A2F08092E9A118
Владелец **Ильев Григорий Петрович**
Действителен с 18.09.2021 по 18.05.2026

Г.П. Ильев