

Министерство Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий

Академия Государственной противопожарной службы

На правах рукописи



Акперов Руслан Гянджавиевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД
К РАСЧЕТУ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ
ТОКСИЧНЫМИ ПРОДУКТАМИ ГОРЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ
В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

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 РФ,
доктор технических наук, профессор
Пузач Сергей Викторович

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ ПРИ ПОЖАРЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ ГЭС	14
1.1 Особенности пожарной опасности производственных зданий ГЭС	14
1.2 Строительные материалы и горючая нагрузка ГЭС	21
1.3 Анализ опасности токсичных газов при пожаре в производственных зданиях ГЭС	27
1.4 Современные методы оценки токсичности продуктов горения	38
1.5 Упрощенный метод расчета необходимого времени эвакуации людей при пожаре	43
1.6 Методы расчета динамики распространения опасных факторов пожара	47
1.7 Выводы по первой главе	50
ГЛАВА 2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИЙ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ НА ПУТЯХ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ ГЭС	51
2.1 Интегральная модель пожара в помещении	51
2.2 Интегральная модель развития пожара в условно герметичном помещении	56
2.3 Зонная модель пожара в помещении	58
2.3.1 Особенности и упрощения термогазодинамической картины пожара	58
2.3.2 Зона конвективной колонки	61
2.3.3 Зона нагретого задымленного припотолочного слоя	63
2.3.4 Условия однозначности и метод численного решения	65
2.4 Возможность применения результатов маломасштабных экспериментов к полномасштабному помещению	67
2.5 Методика расчета распространения токсичных газов при пожаре в производственных зданиях ГЭС	73
2.6 Выводы по второй главе	76

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ	77
3.1 Постановка задачи экспериментального определения зависимости плотности токсичного газа от температуры в маломасштабной экспериментальной установке	77
3.2 Совершенствование стандартного метода испытаний на токсичность продуктов горения	79
3.3 Описание экспериментальной установки	93
3.4 Методика проведения экспериментов	95
3.5 Экспериментальное обоснование точки отбора газовой смеси в объеме камеры	96
3.6 Выводы по третьей главе	99
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ТОКСИЧНЫМИ ПРОДУКТАМИ ГОРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ ГЭС НА ПРИМЕРЕ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА	101
4.1 Исходные данные для математического моделирования распространения токсичных газов при пожаре в производственных зданиях ГЭС	101
4.2 Результаты экспериментальных исследований по определению основных характеристик образования и распространения монооксида углерода и их анализ	102
4.2.1 Удельный коэффициент образования монооксида углерода	102
4.2.2 Удельная массовая скорость газификации горючих материалов	106
4.2.3 Зависимость среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры	108
4.3 Общий анализ результатов экспериментов	110
4.4 Постановка задачи и исходные данные для проведения численных экспериментов по исследованию зависимости среднеобъемной плотности	

монооксида углерода от среднеобъемной температуры при пожаре в производственном здании ГЭС	111
4.5 Результаты численных и натурных экспериментов по исследованию зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры при пожаре в производственном здании ГЭС и их анализ	116
4.6 Методика расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения	130
4.7 Практические рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре для людей без средств индивидуальной защиты с учетом объемно-планировочных и конструктивных особенностей производственных зданий ГЭС	131
4.8 Выводы по четвертой главе	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты внедрения результатов диссертационной работы	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент Российской Федерации на полезную модель «Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении»	155

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В экономике России задача развития энергетики является стратегической, а пожарная безопасность объектов энергетики и работающего на них персонала – актуальной и жизненно необходимой.

За период с 2009 по 2015 гг. на предприятиях энергетики зарегистрировано 2762 пожара, из которых 61 пожар в зданиях энергоблока тепловой и гидравлической электростанции (ГЭС). В результате пожаров погибло 32 человека, а также 100 человек было травмировано. При этом прямой материальный ущерб составил 420377 тыс. руб.

Более чем в 70 % случаев, согласно статистике [95, 109–115], причинами гибели людей на пожарах является отравление продуктами горения. Поэтому в связи с расширением области использования материалов на основе полимеров, горение и тление которых сопровождается выделением большого количества токсичных продуктов горения, математическое моделирование распространения токсичных продуктов горения при пожаре на ГЭС и разработка эффективных противопожарных профилактических мероприятий становится всё более актуальной задачей.

Объемно-планировочные и конструктивные решения производственных зданий ГЭС должны обеспечивать безопасную эвакуацию людей при пожаре. Для решения данной задачи необходимо уметь достоверно рассчитывать динамику изменения концентраций токсичных продуктов горения при пожаре в помещениях ГЭС и на путях эвакуации.

Моделирование распространения токсичных продуктов горения при пожаре на ГЭС опирается на прогнозирование динамики опасных факторов пожара (ОФП). В настоящее время математические модели расчета динамики ОФП (в том числе и концентраций токсичных продуктов горения) в помещении достаточно развиты для решения практических задач пожарной безопасности [26].

Однако исходные данные (база типовой пожарной нагрузки) по выделению токсичных продуктов горения, используемые при расчете ОФП, получены в 1970–2000 гг. и не учитывают новые вещества и материалы (в особенности полимерные), активно используемые для отделки путей эвакуации.

Объем выделяющихся продуктов горения определяется химическим составом твердых и жидких горючих веществ и материалов, а также термогазодинамическими условиями пожара.

Удельные коэффициенты выделения токсичных газов приняты постоянными и не зависящими от термогазодинамической картины развития пожара (концентрация кислорода, температура и т. д.). Кроме того, в различных базах данных вышеуказанные коэффициенты значительно отличаются друг от друга, а сведения о теплофизических и химических показателях для многих современных материалов отсутствуют.

Величины удельных коэффициентов выделения получены в маломасштабных экспериментальных установках. Однако из-за невозможности полного выполнения положений теории подобия при переходе от маломасштабной модели к натурному помещению отсутствует научное обоснование равенства удельных коэффициентов выделения в помещениях с существенно отличающимися размерами.

Таким образом, разработка экспериментально-теоретической модели расчета распространения токсичных продуктов горения, учитывающей масштабный фактор и позволяющей определить время блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения в целях обеспечения безопасной эвакуации людей из производственных зданий ГЭС, является **актуальной научной и практической задачей**.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в понимание термогазодинамической картины пожара и обеспечение безопасной эвакуации людей из помещений внесли Ю.А. Кошмаров,

Ю.А. Поляков, С.В. Пузач, В.И. Присадков, В.М. Есин, W. K. Chow, T. Tanaka, S. Yamada, K. Matsuyama, G.D. Loughed и др.

В разработку научных основ теории горения полимеров, токсического воздействия продуктов горения на организм человека, методов испытаний и контроля пожароопасных и токсических свойств веществ и материалов внесли А.А. Берлин, П.Г. Демидов, В.С. Иличкин, А.Я. Корольченко, Д.В. Трушкин, Н.Н. Семенов, В.А. Симонов, Л.М. Шафран, П.П. Щеглов и др.

Однако в настоящее время эти проблемы полностью не решены с теоретической и экспериментальной точек зрения из-за сложности физико-химических условий протекания процессов газификации и горения, а также неопределенности химического состава современных строительных материалов.

Научно-обоснованные методики расчета удельных коэффициентов выделения токсичных газов с учетом конкретных термогазодинамических условий пожара (температура, концентрация кислорода и т. д.) отсутствуют.

Таким образом, необходимы теоретические и экспериментальные исследования величин концентраций токсичных газов и температуры в смесях продуктов горения и воздуха, образующихся в маломасштабной экспериментальной установке, и рассмотрения возможности распространения полученных результатов на реальное полномасштабное помещение.

Объектом исследования в диссертации являются тепломассообменные процессы, протекающие при пожаре в производственных зданиях ГЭС, которые являются основой для выполнения расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения.

Предметом исследования является время блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре в производственных зданиях ГЭС.

Целью исследования является разработка экспериментально-теоретической модели расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения в производственных зданиях ГЭС,

учитывающей масштабный фактор, на основе совершенствования стандартной методики определения токсичности продуктов горения.

Для достижения постановленной цели в работе необходимо решить следующие **основные задачи**:

– провести анализ литературных источников по прогнозированию концентраций продуктов горения на пожарах в зданиях ГЭС, по воздействию токсичных газов на организм человека, по методам испытаний веществ и материалов на токсичность продуктов горения;

– создать усовершенствованную по сравнению со стандартным методом оценки токсичности продуктов горения маломасштабную экспериментальную установку для определения пожарной опасности веществ и материалов при их термическом разложении, используемых в ГЭС, по условно герметичной схеме;

– разработать модификации интегральной и зонной математических моделей, учитывающие масштабный фактор и использующие экспериментальные зависимости плотности токсичных газов от температуры в условно герметичной схеме, для расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения на пожаре в производственных зданиях ГЭС;

– разработать методику расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения с использованием модифицированных интегральных и зонных моделей;

– разработать научно обоснованные рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения с учетом реальной пожарной нагрузки, объемно-планировочных и конструктивных особенностей производственных зданий ГЭС.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– предложено усовершенствование стандартной схемы испытаний на токсичность, позволяющее в дополнение к измерениям концентраций токсичных газов и кислорода измерять скорость газификации горючего материала и удельный коэффициент образования токсичных газов,

необходимые при расчете времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения;

- разработаны модификации интегральной и зонной моделей, используемых при расчете времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения, в которых с учетом масштабного фактора используются экспериментальные зависимости плотности токсичного газа от температуры без решения дифференциального уравнения закона сохранения массы токсичного газа;

- получены новые экспериментальные и теоретические данные по зависимости плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры, величинам удельной скорости газификации и удельного коэффициента образования монооксида углерода для древесины (сосна), трансформаторного масла и оболочек кабелей в условно герметичном объеме, необходимые при расчете времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в:

- научном обосновании использования в математической модели расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения в производственных зданиях ГЭС экспериментальных зависимостей плотности токсичного газа от температуры, полученных в маломасштабной установке, с учетом масштабного фактора и особенностей термогазодинамической картины пожара в полномасштабном помещении;

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

- создании экспериментальной установки для определения пожарной опасности веществ и материалов при их термическом разложении, применяющихся в строительстве, на основе оценки по данным химического анализа с использованием усовершенствованной методики проведения испытаний, что позволит расширить базу данных горючей нагрузки по свойствам современных строительных материалов;

– создании методики расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения на основе модифицированных интегральной и зонной моделей, используемых для расчета пожарных рисков.

Методология и методы исследования. Методологическую и теоретическую основы диссертационных исследований составили труды ученых в области тепломассообмена и прогнозирования ОФП, а также научные разработки, посвященные методам испытаний на токсичность продуктов горения.

Основными методами исследования являются методы газодинамики и тепломассообмена, экспериментальные методы тепломассообмена, численные методы решения систем дифференциальных уравнений, методы обработки и анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Реализация работы. Материалы диссертации реализованы при:

– расчете пожарных рисков и разработке плана безопасной эвакуации людей при пожаре в главном корпусе филиала ОАО «РусГидро» - «Нижегородская ГЭС», расположенного по адресу Нижегородская область, Городецкий район, г. Заволжье;

– расчете пожарных рисков, разработке плана безопасной эвакуации людей при пожаре и проектировании системы дымоудаления в машинном зале на Нововоронежской АЭС, расположенной по адресу Воронежская обл., г. Нововоронеж, промзона, и на Курской АЭС-2, расположенной по адресу Курская обл., площадка «Макаровка»;

– проведении научных исследований по развитию и совершенствованию испытаний веществ и материалов на токсичность продуктов горения (п. 86 плана научной работы Академии ГПС МЧС России на 2015 г.);

– разработке фондовых лекций, проведении лекционных, лабораторных и практических занятий со слушателями, курсантами и студентами Академии ГПС МЧС России по дисциплине «Прогнозирование опасных факторов

пожара» по темам «Основы интегрального метода прогнозирования ОФП» и «Основные положения зонного моделирования пожара».

Положения, выносимые на защиту:

– усовершенствованная стандартная схема испытаний на токсичность продуктов горения, позволяющая в дополнение к измерениям концентраций токсичных газов и кислорода измерять скорость газификации горючего материала и удельный коэффициент образования токсичных газов;

– разработанная установка для определения пожарной опасности веществ и материалов при их термическом разложении, применяющихся в строительстве, на основе оценки данных химического анализа с использованием усовершенствованной методики проведения испытаний;

– модифицированная зонная и интегральная модели, в которых используется экспериментальная зависимость плотности токсичного газа от температуры без решения дифференциального уравнения закона сохранения массы токсичного газа;

– результаты сопоставления экспериментальных и теоретических данных по зависимости плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры, экспериментальные данные по удельной скорости газификации и удельному коэффициенту образования монооксида углерода для древесины (сосна), трансформаторного масла и оболочек кабелей в условно герметичном объеме;

– методика расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения, разработанная на основе модифицированных интегральной и зонной моделей с учетом масштабного фактора;

– результаты численных экспериментов по сравнению концентраций токсичных продуктов горения в полномасштабных производственных зданиях ГЭС и маломасштабной экспериментальной установке;

– научно-обоснованные рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре для людей без

средств индивидуальной защиты с учетом объемно-планировочных и конструктивных особенностей производственных зданий ГЭС.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается использованием при проведении экспериментов поверенных средств измерений, апробированных методов обработки результатов экспериментов, апробированных физико-математических методов анализа, а также численного решения дифференциальных уравнений в частных производных. Полученные экспериментальные данные имеют достаточно точное для инженерных методов расчета совпадение с теоретическими данными, приведенными в литературных источниках.

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве в изданиях, рекомендованных ВАК, все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично.

Апробация результатов. Основные результаты были доложены на:

- II Международной научно-практической конференции «Пожарная безопасность: теория и практика – 2012» (Черкаси, Академия пожарной безопасности им. героев Чернобыля, 2012);
- XXI Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2012» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2012);
- Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2012» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2012);
- Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Академии ГПС МЧС России «Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области обеспечения пожарной безопасности» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2013);
- VII Международной научно-практической конференции «Полимерные материалы пониженной горючести – 2013» (Южный федеральный университет, Таганрог, 2013);

– Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2014» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2014);

– Шестой российской национальной конференции по тепломассообмену (Москва, МЭИ, 2014);

– Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2015» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2015);

– XXV Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2016» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016);

– V Международной научно-практической конференции «Ройтмановские чтения – 2017» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017);

– VIII международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести» памяти академика Б.А. Жубанова (Алма-Ата, Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, 2017);

– Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики – 2017» (Москва, МЭИ, 2017).

Публикации: по результатам диссертационного исследования автором опубликовано 22 научные работы, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований, 1 статья в международном рецензируемом журнале из перечня Scopus, 1 монография и 1 патент.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 156 страницах машинописного текста, включает в себя 37 рисунков, 11 таблиц. Список литературы включает 124 наименования.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ ПРИ ПОЖАРЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ ГЭС

1.1 Особенности пожарной опасности производственных зданий ГЭС

Гидроэлектростанция (ГЭС) – комплекс сооружений и оборудования, посредством которых энергия потока воды преобразуется в электрическую энергию [36].

Системы противопожарной защиты проектируются с учетом положений стандарта организации НП «ИНВЭЛ» СТО 70238424.27.140.011-2010 «Гидроэлектростанции. Условия создания. Нормы и требования» [116], а общие требования к организации работы по обеспечению пожарной безопасности на гидроэлектростанциях при эксплуатации содержатся в стандарте организации НП «ИНВЭЛ» СТО 70238424.27.140.015-2010 «Гидроэлектростанции. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования» [117].

ГЭС представляет собой последовательно расположенные гидротехнические сооружения, необходимых для обеспечения напора воды, а также оборудования, предназначенного для преобразования энергии воды. Сооружением ГЭС, имеющим основную пожарную нагрузку, является производственное здание, достаточно развитое по вертикали и горизонтали (признаки атриума) и имеющее следующую пожарную нагрузку: турбинное масло, этиловый спирт, бензин, ацетилен, водород, древесина, кабели.

Для целей технического обслуживания и ремонта в здании ГЭС (или рядом от него) находится монтажная площадка, составляющая потенциальную опасность при проведении работ и требующая соблюдения всех требований по безопасности.

Кроме того, необходимо отметить, что в машинном зале производственного здания ГЭС располагаются гидравлические агрегаты, оборудование для вспомогательных работ, автоматика и пульта для ручного

управления инженером-оператором, также могут быть расположены трансформаторы.

Оборудование ГЭС по функциональному назначению делятся на следующие группы [36]:

- гидросиловое (турбинные агрегаты, генераторы);
- вспомогательное (водоснабжение, масло и пневмохозяйство и др.);
- механическое (клапаны, механизмы для подъема грузов в том числе турбин и генераторов при их техническом обслуживании, устройства удержания мусора и др.);
- электротехническое (трансформаторы, коммутаторы, защитная автоматика, автоматика систем управления и связи, кабельное хозяйство и др.);
- системы жизнеобеспечения (водоснабжение, отопление, канализация, системы дымоудаления и пожаротушения и др.).

В работе [104] рассмотрены особенности производственных зданий ГЭС, значительно влияющих на пожарную безопасность и являющихся существенными для обеспечения пожарной безопасности. К ним можно отнести развитое по вертикали и горизонтали многосветное пространство машинного зала, объединяющее различные уровни машинного зала в общий объем, поэтажные галереи, балконы, на которые могут выходить помещения различного функционального назначения, наличие развитой системы помещений (например, помещения производственного назначения, кабельные галереи, подагрегатные пространства и помещения силовых турбин), расположенных ниже уровня пола машинного зала [104].

На рисунках 1.1 и 1.2 показан характерный внешний вид производственного здания ГЭС на реке Вуокса в городе Светогорске Выборгского района Ленинградской области и Волжской ГЭС на реке Волга.



Рисунок 1.1 – Характерный вид производственного здания ГЭС (Ленинградская обл.) [124]



Рисунок 1.2 – Характерный вид производственного здания ГЭС (р. Волга) [124]

Вид машинного зала производственного здания Волжской ГЭС приведен на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Характерный вид машинного зала производственного здания ГЭС [124]

Характеристика по пожарной нагрузке основных помещений производственных зданий ГЭС представлена в таблице 1.1 [104].

Таблица 1.1 – Характеристика по пожарной нагрузке основных помещений производственных зданий ГЭС [104]

№	Основные помещения	Характеристика помещения	Горючие материалы
1	Машинный зал	Протяженное пространство, развитое по вертикали и горизонтали: объем 8000–100000 м ³ , высота 15–35 м (атриумное пространство)	– горючие жидкости (турбинное масло, этиловый спирт, бензин и т.д.); – горючие газы (ацетилен, водород); – твердые горючие материалы упаковка, древесина и т.д.).
2	Кабельные тоннели	Протяженное пространство, развитое по горизонтали: длина 50–250 м	– горючая жидкость (турбинное масло); – твердые горючие материалы (кабели)

Окончание таблицы 1.1

3	Турбинные агрегаты	–	– горючая жидкость (турбинное масло)
4	Подагрегатное пространство	Протяженное пространство, развитое по горизонтали: длина 50–250 м	– горючая жидкость (турбинное масло); – твердые горючие материалы (кабели)

Основной пожарной нагрузкой на ГЭС является достаточно большой объем трансформаторного и турбинного масел, используемых совместно в трансформаторах и выключателях, турбинных масел для регулирования, в подшипниках (смазка и охлаждение).

Масляное хозяйство, размещенное в здании ГЭС, представляет существенную потенциальную опасность, так как расположено под монтажной площадкой или может быть размещено отдельно от него. Масляное хозяйство состоит из баков чистого и эксплуатационного масел, масло очистительных устройств (центрифуги, фильтр-прессы и т.п.), системы перекачки масла, маслопроводов и предназначено для хранения и очистки масла, используемого на ГЭС.

В случае разгерметизации и нарушении работы систем масляного хозяйства выброс наружу масла (турбинного и трансформаторного) может достигнуть нескольких тонн. Кроме того, в силу объемно-планировочных и конструктивных особенностей производственных зданий ГЭС масло может стекать на нижние отметки, на которых расположены кабельные галереи и полуэтажи, что служит источником возгорания оболочек кабелей.

Следует отметить, что выброс масла, как правило, сопровождается образованием масловоздушной смеси, что создает дополнительно угрозу взрыва.

Для препятствия растекания масла ниже нулевого уровня машинный зал оборудуется специальными бортиками.

В случае горения масла выше нулевого уровня появляется угроза повреждения с последующим обрушением незащищенных металлических конструкций.

Из проведенного анализа аварий на ГЭС были выявлены основные причины возникновения пожара:

- повреждения масляного выключателя;
- разрушение бандажного кольца ротора генератора со стороны контактных колец, с разрушением маслоочистительного цилиндра и частей обмотки статора, ведущее к внутреннему короткому замыканию в турбогенераторе;
- короткое замыкание в трансформаторе, ведущее к разрушению его корпуса;
- повреждение изоляционной части корпуса трансформатора, приводящее к короткому замыканию и возможному выбросу масла;
- повреждение трубопровода жидкого топлива и попадание его на горячую поверхность с образованием взрывоопасной воздушно-масляной смеси;
- перегрев соединительных муфт, приводящий к воспламенению оболочек кабелей.

Таким образом, наибольший риск возникновения и распространения пожара возникает при эксплуатации трансформаторов и масляного хозяйства с последующим выбросом масла и его воспламенением.

Кроме масел в производственных зданиях ГЭС пожарную нагрузку составляют кабельные сети (силовые, слаботочные: контрольные, сигнализации, связи). При возрастании мощности ГЭС увеличивается и количество вспомогательного оборудования и кабельного хозяйства, а количество кабелей различного назначения может составлять до сотен километров.

Прокладка и крепление кабелей осуществляется на специальных кронштейнах по стенам или подвесным способом. Сгруппированные в потоки

кабели прокладываются в кабельных каналах или лотках, далее переходящих в кабельные туннели. В случае их вертикальной прокладки образуют кабельные шахты.

Из-за прокладки кабелей вблизи технологического оборудования (в том числе возле горячих частей оборудования) вероятность возгорания кабелей возрастает. В целях снижения потенциальной опасности и нераспространения горения используются кабели, не распространяющие горение (индекс – НГ). Использование данных кабелей в дополнение с огнестойкими заделками проходов кабелей из помещения в помещение позволяет снизить их пожарную опасность.

Таким образом, анализ аварий и пожаров произошедших в зданиях ГЭС свидетельствует, что объектами пожаров чаще всего становятся генераторы, кабельные каналы, электрооборудование в том числе трансформаторы различного назначения, насосные установки.

В силу наличия достаточно значительного количества электрооборудования, необходимо отметить и угрозу поражения электрическим током персонала ГЭС.

Немедленный аварийный останов гидроагрегата в целях предотвращения возникновения и развития пожара производится в случаях [117]:

- появления внезапной вибрации гидроагрегата, маслопроводов или гидроударов, могущих привести к разрушению гидроагрегата или маслосистемы и к последующему пожару;
- появления дыма или искр из подшипников и кольцевых уплотнений;
- сильной течи масла из корпуса маслованн и маслопроводов с угрозой его растекания и воспламенения;
- воспламенения масла или промасленной изоляции на гидроагрегате;
- возникновения пожара на вспомогательном оборудовании, если огонь или высокая температура угрожают повреждением гидроагрегата, а применяемые меры по немедленной ликвидации пожара оказались малоэффективными;

– пожара в машинном зале, если факторы пожара (дым, высокая температура, продукты горения) угрожают обслуживающему персоналу и делают невозможной нормальную эксплуатацию гидроагрегата.

Исследования и анализ пожарной опасности производственных зданий ГЭС позволили определить наиболее опасные участки – кабельные галереи, полуэтажи, масляное хозяйство, электрооборудование.

1.2 Строительные материалы и горючая нагрузка ГЭС

Основной характеристикой ГЭС является высокая энергоемкость находящегося на ней электрооборудования. Во взаимосвязи с электродвигателями, трансформаторами и другими электрическими машинами находится большое количество понижающих подстанций, питающихся электроэнергией ГЭС. Соответственно, для их коммуникации имеется большая протяженность кабельных туннелей, галерей, и полуэтажей по протяженности достигающих десятки километров.

Согласно статистике [109–115], основной причиной возникновения пожаров является неисправность в электротехнической продукции, в частности для ГЭС – электрических кабелей, трансформаторов, соединительных муфт и др. Для таких пожаров, как правило, характерен высокий ущерб и/или большое количество погибших.

К основным горючим веществам и материалам, встречающихся на электростанциях, можно отнести:

- трансформаторное и турбинное масла;
- гидравлическое и смазочные масла (предназначенные для охлаждения и смазки подшипников турбин);
- дизельное топливо (для аварийных силовых установок);
- водород (для охлаждения ротора генератора);
- горючие фильтрующие материалы (древесный уголь);
- горючая изоляция электрических кабелей;
- отделочные и конструкционные материалы на основе полимеров и др.

Большую опасность представляют силовые водородные батареи, предназначенные для охлаждения генераторов. При аварии и поступлении водорода в зал с турбинным агрегатом возможен взрыв с последующим воспламенением турбинного масла. Необходимо отметить, что для горения жидкой горючей нагрузки характерно быстрое распространение ОФП по всему машинному залу ГЭС. Помимо этого, горение углеводородов приводит к интенсивному увеличению температуры в помещении и значительному прогреву металлоконструкций до температур, критических для конструкций и как следствие возможному их обрушению. Нарушение целостности конструкций и их обрушение может повредить дорогостоящее оборудование ГЭС, в том числе закрытия ГЭС вследствие отсутствия возможности ее ремонта.

Распространенной твердой пожарной нагрузкой в ГЭС являются оболочки кабелей. На ГЭС используются кабели следующего назначения:

- силовые;
- контрольные;
- управления.

Оболочки кабелей, как правило, состоят из герметизирующего и армирующего слоя. В качестве материалов используются: поливинилхлорид, полиэтилен, металл, ткань, резина, а также более сложные полимерные композиции.

Наиболее распространенными на ГЭС являются кабели на основе ПВХ, при горении которых выделяется помимо монооксида углерода хлороводород. При нагревании оболочек ПВХ кабелей происходит их размягчение с последующим выделением хлороводорода ($t > 100$ °C).

Кабельные изделия подразделяются по показателям пожарной безопасности на следующие типы исполнения [9]:

- кабельные изделия, не распространяющие горение при одиночной прокладке (без обозначения);
- кабельные изделия, не распространяющие горение при групповой прокладке [исполнение – нг (...)*-];

- кабельные изделия, не распространяющие горение при групповой прокладке, с пониженным дымо- и газовыделением [исполнение – нг (...)*-LS];
- кабельные изделия, не распространяющие горение при групповой прокладке и не выделяющие коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении [исполнение – нг (...)*-HF];
- кабельные изделия огнестойкие, не распространяющие горение при групповой прокладке, с пониженным дымо- и газовыделением [исполнение – нг (...)*-FRLS];
- кабельные изделия огнестойкие, не распространяющие горение при групповой прокладке и не выделяющие коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении [исполнение – нг (...)*-FRHF];
- кабельные изделия, не распространяющие горение при групповой прокладке, с пониженным дымо- и газовыделением и с низкой токсичностью продуктов горения [исполнение – нг (...)*-LSLTx];
- кабельные изделия, не распространяющие горение при групповой прокладке, не выделяющие коррозионно-активные газообразные продукты при горении и тлении и с низкой токсичностью продуктов горения [исполнение – нг(...)*-HFLTx].
- кабельные изделия огнестойкие, не распространяющие горение при групповой прокладке, с пониженным дымо- и газовыделением и с низкой токсичностью продуктов горения [исполнение – нг(...)*-FRLSLTx];
- кабельные изделия огнестойкие, не распространяющие горение при групповой прокладке, не выделяющие коррозионно-активных газообразных продуктов при горении и тлении и с низкой токсичностью продуктов горения (исполнение – нг(...)*-FRHFLTx).

Примечание: * – указывают соответствующую категорию: A F/R, A, B, C или D [9].

Классификация кабелей приведена на рисунке 1.4.

В связи с увеличением мощностей электростанций, количества вспомогательного оборудования, а также устройств автоматизации и регулирования процессов на ГЭС значительно возросло количество кабелей и усложнилось кабельное хозяйство.

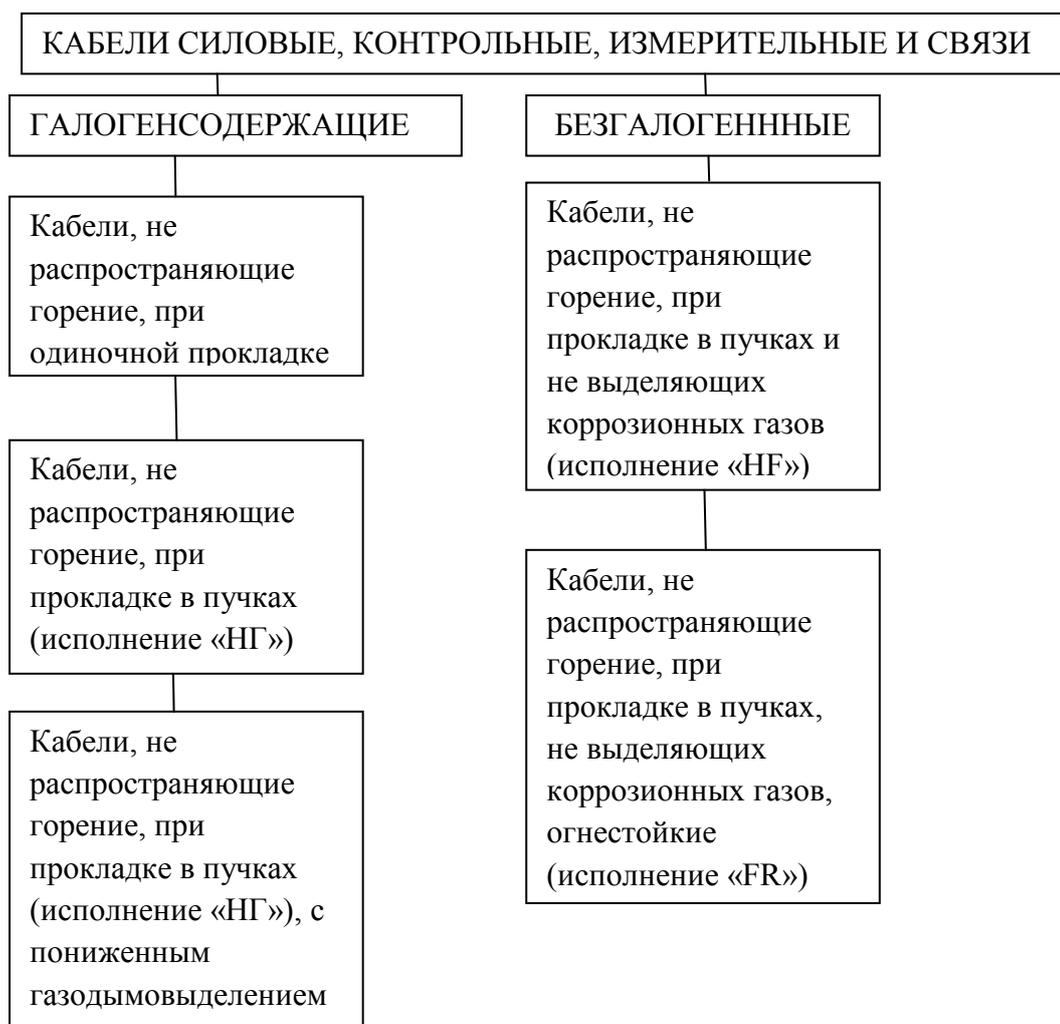


Рисунок 1.4 – Классификация кабелей в зависимости от применения и показателя пожарной безопасности

Основным условием безопасного применения при открытой прокладке кабелей является нераспространение горения. Большое количество эксплуатируемых кабельных изделий являются горючими в силу того, что изоляция и защитная оболочки выполнены из горючих материалов. Однако современная промышленность разрабатывает специальные составы (композиты) пластикатов оболочек ПВХ, делая акцент на кабелях исполнения НГ, LS и HF.

Одиночные кабели собираются в кабельные туннели и полуэтажи на специальных негорючих конструкциях (как правило, металлических). Группируются и располагаются кабели в зависимости от их количества и от напряжения. Так, в туннеле общее количество кабелей может достигать 100 единиц, а в местах пересечения кабельных потоков это значение

существенно возрастает, что повышает удельную горючую нагрузку на данном участке, создавая зоны повышенной опасности.

Характерной особенностью начальной стадии пожара в кабельной галереях и туннелях является его достаточно медленное распространение в начале и более активное горение в дальнейшем, вследствие нахождения кабелей под нагрузкой, приводящей к прогреву их изоляции. Кроме того, прогрев кабелей и достижение температур самовоспламенения может приводить к воспламенению оболочек с последующим его горением. При пожаре температура в кабельном туннеле превышает 600 °С.

Анализ статистики пожаров в кабельных туннелях и галереях выявил основные причины: короткое замыкание, пробой изоляции, перегрев оболочки кабелей.

Нагрев оболочек кабелей высокими токами нагрузки усложняет ситуацию вследствие увеличения скорости распространения пожара, также существенное влияние оказывает скопление горячего воздуха в кабельных туннелях и галереях.

Опасность представляют и контрольные кабели без устройств защитного отключения (УЗО), горение которых может происходить из нескольких очагов, что способствует активному распространению пламени. Еще более опасными являются кабели в маслонаполненных тубах, так как при повреждении трубы происходит растекание горящего масла, что увеличивает площадь горения, поджигая собой и другую горючую нагрузку. Кроме того, резко возрастает температура в помещении.

Согласно статистике пожаров, при пожаре и горении оболочек кабелей появляются короткие замыкания, в других местах приводящие к новым очагам пожара. Большую опасность создают и кабели с пропитками, в состав которых входит мастика, битум, смола. Образование и стекание горящего расплава приводит к повторным загораниям ниже расположенных кабелей. Кроме того, образование оголенных участков кабелей, приводящих к коротким замыканиям,

приводит к появлению новых очагов пожара и способствует его быстрому распространению.

Высокую опасность создают муфтовые соединения кабелей. Перегрев муфт с последующим воспламенением достаточно частая причина пожаров на объектах энергетики.

Активное распространение пожара в машинных залах ГЭС происходит при взрывах. При этом появляется несколько очагов горения вследствие растекания масла и короткого замыкания. В течение небольшого промежутка времени может выйти из строя генераторы, турбины, трансформаторы и другое дорогостоящее оборудование ГЭС.

Кроме твердой горючей нагрузки на ГЭС используется и жидкая – турбинное и трансформаторные масла, являющаяся более опасной. Авария в масляном хозяйстве и горение масла создает угрозу его быстрого распространения, вследствие стекания его на нижние отметки с расположенными там кабельными туннелями, каналами и галереями, и приводит к появлению новых очагов пожара.

Развитие пожара при аварии трансформатора существенно зависит от причин возникновения пожара. Так, перегрев сердечника может приводить к тлению и выделению газов достаточно длительный период времени. Переход тления в горение происходит из-за возможного короткого замыкания в обмотке. При срабатывании автоматики защиты происходит лишь локальное выгорание частей трансформатора. При достаточно больших токах короткого замыкания и неполадок в работе автоматики защиты происходит разрушение корпуса трансформатора с выбросом масла наружу и его растеканием. Необходимо отметить, что нагретые пары масла, перемешиваясь с воздухом, создают взрывоопасную смесь.

В отличие от твердой горючей нагрузки (оболочки кабелей) турбинные и трансформаторные масла обладают высокой дымообразующей способностью. Частицы дыма, осевшие на изоляционные части трансформатора, снижают

диэлектрическую способность и, как следствие, способствуют появлению короткого замыкания и дальнейшему развитию пожара.

Аварии в кабельном и масляном хозяйствах могут приводить и к неполадкам в работе в распределительных устройствах (трансформаторы силовые и измерительные, конденсаторы, масляные выключатели и др.). Распределительные устройства располагаются в помещениях малого объема, в том числе внутри здания ГЭС, поэтому предельные значения дымообразующей способности достаточно быстро достигают критических значений, что ухудшает видимость и мешает работе пожарных по ликвидации чрезвычайной ситуации.

1.3 Анализ опасности токсичных газов при пожаре в производственных зданиях ГЭС

Под токсичностью понимается степень вредного воздействия химических веществ на живой организм [18]. В количественном плане ее определяют как меру несовместимости веществ с жизнью организма (определяют как величину, обратную величине средней смертельной дозы (LD_{50}) или концентрации (LC_{50})) [18]. Под дозой обычно понимается количество вещества, которое воздействует на организм, при этом уровнем дозы является доза, отнесенная в единицу времени [18].

С возрастанием номенклатуры и увеличением масштабов применения современных полимерных материалов угроза отравлений при пожаре становится всё более актуальной. Образующиеся смеси продуктов горения современных веществ и материалов, сложны по своему химическому составу и неоднородны по агрегатному состоянию компонентов [18]. Кроме того, опасное воздействие токсичных продуктов горения усугубляется повышенной температурой среды и снижением концентрации кислорода.

Обзор данных статистически гибели и отравления людей при пожаре показывает, что основной (более 70 %) причиной гибели людей при пожаре является отравление токсичными продуктами горения и асфиксия,

а не термические ожоги [18, 95, 109–115]. Кроме того, с увеличением объема строительных и отделочных материалов (пожарной нагрузки) и всё большего внедрения полимеров этот процент только растет.

Основной токсикант на пожаре, являющийся причиной гибели людей, – это монооксид углерода [18], но также есть и другие газы, которые, воздействуя совместно, могут приводить к летальному исходу. Кроме этого, еще одним немаловажным фактором является наличие в полученной газовой смеси сажи и других продуктов горения, раздражающих дыхательные пути человека, воздействующие на его зрение и мешающие эвакуации.

При оценке степени опасности воздействия токсичных продуктов горения на человека должны учитываться наиболее опасные составляющие смеси продуктов горения как образующихся в достаточно больших объемах и концентрациях, так и обладающие высокой опасностью (биологической активностью) в небольших концентрациях.

Рассмотрим влияние на организм человека основного токсиканта – монооксида углерода, выделяющегося при пожаре в наибольшем объеме и играющим главную роль в токсическом действии продуктов горения.

Монооксид углерода (угарный газ, CO) является одним из опаснейших токсичных газов. Это бесцветный, не имеющий запаха газ, с плотностью 1,25 (при 0 °С и давлении 760 мм рт. ст.). Слабо растворим в воде (23,2 см³ л⁻¹), лучше – в органических растворителях [18]. Диффундирует через пористые поверхности материала.

Токсикологической характеристике монооксида углерода посвящено большое количество трудов [18–20, 34, 45, 72, 76, 78, 80].

Механизм биологического воздействия заключается в том, что, поступая с воздухом в легкие, монооксид углерода быстро проникает в кровь, и, соединяясь с гемоглобином, образуется карбоксигемоглобин (HbCO). Таким образом, замещение кислорода приводит к нарушению транспортировки и поступлению кислорода тканям, как следствие – кислородная недостаточность организма, влияющая на работу нервной и сердечно-сосудистой систем.

Химическая связь СО к гемоглобину в 200–300 раз сильнее, чем связь кислорода к гемоглобину.

Симптомами отравления являются головная боль, тошнота, головокружение, слабость, замедление реакций, помрачение сознания и пр. При физической нагрузке интоксикация организма наступает гораздо быстрее.

Взаимосвязь концентрации монооксида углерода и времени его воздействия на тяжесть отравления организма приведена в таблице 1.2 [24, 104].

Таблица 1.2 – Концентрации и симптомы при отравлении людей оксидом углерода [24, 104]

Концентрация, кг/м ³	Длительность воздействия	Содержание НbСО, %	Симптомы отравления
0,000006	25 мин	–	Снижение цветовой и световой чувствительности глаз
$(11-12) \cdot 10^{-6}$	5 ч	3,8	Нарушение точности оценки временных интервалов
0,000013	7–8 мин	1,6	Изменение биохимических и физиологических показателей
0,000031	3 ч	–	Снижение точности зрительного восприятия пространства и ночного зрения
0,000033	6–8 ч	3,5–4	Уменьшение содержания O ₂ в крови
$(50-60) \cdot 10^{-6}$	2 ч	–	Снижение слуха. Изменения ЭЭГ.
	5 ч	–	Ухудшение выполнения психологических тестов
0,000055	1-3 ч	2,1–3,8	–
	5 ч	–	Увеличение латентности периода при восприятии сигналов
	6 ч	5	Уменьшение содержания O ₂ в крови
	8 ч	5-9	Увеличение порога зрительного восприятия
0,000057	–	2,5–3	Приступы стенокардии при физической нагрузке у больных ишемической болезнью сердца
0,00006	5 ч	4,7	–
	6 ч	–	Изменение ЭЭГ и частоты сердечных сокращений
$(80-110) \cdot 10^{-6}$	3,5–5 ч	7–10	Снижение скорости зрительного восприятия, ухудшение выполнения психологических и психомоторных тестов, координации мелких точных движений и аналитического мышления

Продолжение таблицы 1.2

0,00022	1–3 ч	6–10	Легкая боль в области лба
	3 ч	14	Нарушение работоспособности
0,00023	6 ч	16–20	Боль в области лба, ощущения давления на лоб, быстро исчезающие на свежем воздухе; расширение кожных кровеносных сосудов, снижение физической работоспособности
$(230–340) \cdot 10^{-6}$	5–6 ч	23–30	Головная боль. Ощущение пульсации в висках.
0,00034	4 ч	22–24	
	5 ч	26–27	Головокружение.
0,000345	30 мин	11,9	Головная боль у отдельных лиц
0,00044	1 ч	12	-
	2 ч	20	Явные признаки отравления
0,00044	4 ч	30	Тошнота, головная боль, сердцебиение
$(440–460) \cdot 10^{-6}$	1 ч	15–19	Боли в области лба и затылка, сердцебиение
	2 ч	21–28	
	2,5–3 ч	–	
$(460–690) \cdot 10^{-6}$	4–5 ч	36–40	Сильная головная боль, слабость, головокружение, туман перед глазами, тошнота и рвота, коллапс
0,00055	1 ч	14	Головная боль, сердцебиение
$(600–700) \cdot 10^{-6}$	15 мин	–	Снижение умственной и физической работоспособности
0,00066	1 ч	16	Первые симптомы отравления. Возможно выполнение лишь легкой физической работы
	2 ч	27	Тошнота, появление явных симптомов отравления
	4 ч	40	Тошнота, рвота, возможна потеря сознания
$(800–1000) \cdot 10^{-6}$	5 мин	–	Головная боль, первые признаки интоксикации, снижение работоспособности
	20–30 мин	–	Головная боль, общая мышечная слабость, тошнота; потери трудоспособности не было
$(800–1150) \cdot 10^{-6}$	3–4 ч	47–53	Сильная головная боль, слабость, головокружение, туман перед глазами, тошнота, рвота, учащение пульса, коллапс

Окончание таблицы 1.2

0,00088	45 мин	–	Головная боль, головокружение, тошнота
	1 ч	22	Появление симптомов интоксикации
	2 ч	35	Тошнота, рвота, полная потеря трудоспособности, возможна потеря сознания, коллапс
	4 ч	50	Судороги, кома, возможна смерть
0,0011	2 ч	40	Выраженная картина отравления
0,00126	1,5-3 ч	55-60	Учащение дыхания и пульса; кома, прерываемая судорогами; чейнстоксово дыхание
0,0013	1 ч	28	Тошнота, сердцебиение, головная боль
	2 ч	45	Тяжелое отравление
0,00135	33 мин – 1,5 ч	–	Сердцебиение. Легкое пошатывание, одышка при легкой мышечной работе, расстройства зрения и слуха
	2 ч	–	Пульсирующая головная боль, спутанность в мыслях
1760·10 ⁻⁶	20 мин	–	Головная боль, головокружение, тошнота
	2 ч	–	Потеря сознания, коллапс
(1800–2300)·10 ⁻⁶	1–1,5 ч	61–64	То же. Ослабление дыхания и сердечной деятельности. Может наступить смерть
0,002	12–35 мин	50	Кома, судороги
0,003	1 ч	–	Смерть
(2300–3400)·10 ⁻⁶	30–45 мин	64–68	Потеря сознания, коллапс. Может наступить смерть
0,00352	5–10 мин	–	Головная боль, головокружение.
	30 мин	–	Рвота, потеря сознания
(3400–5700)·10 ⁻⁶	20–30 мин	68–73	Слабый пульс, замедление и остановка дыхания. Смерть
0,005	17 мин	–	Потеря сознания, судороги
0,0057	5–10 мин	–	Смерть
(5700–11500)·10 ⁻⁶	2–5 мин	73-76	
0,01408	1–3 мин	–	Потеря сознания, рвота, смерть

Примечание: – нет данных

В таблице 1.3 [101, 104] представлены основные токсичные газы, выделяющиеся при горении различных веществ и материалов, и их воздействие на организм человека.

Таблица 1.3 – Влияние токсичных газов на организм человека при пожаре [101, 104]

Токсичный продукт	Материал, из которого выделяется токсичный продукт	ПДК _{сс} , кг/м ³	Реакция организма человека
Монооксид углерода	Органические материалы искусственного и природного происхождения. Выделению способствует медленное горение и недостаток кислорода	$1 \cdot 10^{-6}$	В крови образуется карбоксигемоглобин: головокружение, рвота, поражает нервную и сердечно-сосудистую системы; смерть
Цианистый водород	Азотсодержащие вещества: шерсть, шелк, пенополиуретан, полиакрилонитрил, бумажно-слоистые пластики, полиамиды и т.д.	$0,01 \cdot 10^{-6}$	Препятствует внутриклеточному переносу кислорода
Диоксид азота	Древесина, рентгеновская пленка, шерсть, фетр, кожа, лен, полистирол, ПВХ, полисульфон, резиновые изделия	$0,04 \cdot 10^{-6}$	При вдыхании вызывает респираторные заболевания
Сероводород	Серосодержащие материалы	$0,05 \cdot 10^{-6}$	Парализует органы дыхания
Толуолендиизоцианат	Эластичные полиуретаны	Нет данных	Оказывает сильное раздражающее действие, нарушает биологическую структуру тканей, поражает глаза, приводит к отеку легких
Ацетонитрил	ППУ	$0,01 \cdot 10^{-6}$	Механизм действия не установлен
Бензонитрил	ППУ	Нет данных	Менее токсичен, чем цианистый водород
Ацетон	Полиизобутилен, ПВХ, полиметилметакрилат, полиамид, поликарбонат, твердые полиуретановые пластики	$0,35 \cdot 10^{-6}$	Пары вещества способствуют слезоточению, кашлю, раздражающее и наркотическое действие
Алифатические углеводороды	Природные и синтетические материалы	Нет данных	Обладает наркотическим действием

Окончание таблицы 1.3

Хлористый водород	ПВХ, древесина, ДСП, фанера, бумага, ППУ, хлорсодержащие полимеры	$0,2 \cdot 10^{-6}$	Раздражающий газ, отравление HCl, и химические ожоги
Фтористый водород	Вещества, содержащие фторированные углеводороды, фторсодержащие полимерные материалы	$0,05 \cdot 10^{-6}$	Поражение верхних дыхательных путей
Аммиак	Шерсть, шелк, полиакронитрил, полиамид, полиуретан	$0,04 \cdot 10^{-6}$	Сенсорные раздражения, вызывает рефлекторные реакции верхних дыхательных путей
Алифатические альдегиды	Искусственные и естественные материалы	Нет данных	Приводит к некрозу слизистых и дыхательных путей при вдыхании
Акролеин	Древесина, полиэтилен, полипропилен, бумага, нефтепродукты	$0,03 \cdot 10^{-6}$	Замедление пульса. Вызывает рвоту, отек легких, возможна смерть
Формальдегид	Древесина, ДСП, фанера, бумага, нейлон	$0,03 \cdot 10^{-6}$	Обладает раздражающим действием
Ароматические углеводороды: бензол, толуол	ПВХ, полистирол	Нет данных	Обладают наркотическим действием

Описание воздействия на организм человека и смертельные концентрации летучих токсичных веществ, образующихся при пожаре, представлены в таблице 1.4 [24, 104].

Таблица 1.4 – Данные по смертельной концентрации летучих токсичных веществ, выделяющихся при пожаре, и их воздействие [24, 104]

Токсичный продукт	Описание воздействия	Концентрация	Реакция организма человека
Монооксид углерода	В результате соединения с гемоглобином крови, образуется неактивный комплекс – карбоксигемоглобин, вызывающий нарушение доставки кислорода к тканям организма	0,2–1 % об.	Гибель человека за период от 3 до 60 мин

Продолжение таблицы 1.4

Цианистый водород	Вызывает нарушение тканевого дыхания вследствие подавления деятельности железосодержащих ферментов, ответственных за использование кислорода в окислительных процессах. Вызывает паралич нервных центров	240–360 мг/м ³	Смерть в течение 5–10 мин
		420–500 мг/м ³	Быстрая смерть
Диоксид азота	При попадании в кровь, образуются нитриты и нитраты, которые переводят оксигемоглобин в метгемоглобин, что вызывает кислородную недостаточность организма, обусловленную поражением дыхательных путей	510–760 мг/м ³	При вдыхании в течение 5 мин развивается бронхопневмония
		950 мг/м ³	Отек легких
Сероводород	Раздражение глаз и дыхательных путей. Появление судорог, потеря сознания	700 мг/м ³	Тяжелое отравление
		1000 мг/м ³	Смерть в течение нескольких минут
Хлористый водород	Снижает возможность ориентации человека: соприкасаясь с влажным глазным яблоком, превращается в соляную кислоту. Вызывает спазмы дыхания, воспалительные отеки и, как следствие, нарушение функции дыхания	2000–3000 мг/м ³	Летальная концентрация при действии в течение нескольких минут
Фтористый водород	Вызывает образование язв на слизистых оболочках глаз и дыхательных путей, носовые кровотечения, спазм гортани и бронхов, поражение ЦНС, печени. Наблюдается сердечно-сосудистая недостаточность	45–135 мг/м ³	Опасен для жизни после несколько минут воздействия

Продолжение таблицы 1.4

Аммиак	Оказывает сильное раздражающее и прижигающее действие на слизистые оболочки. Вызывает обильное слезотечение и боль в глазах, удушье, сильные приступы кашля, головокружение, рвоту, отеки голосовых связок и легких	375 мг/м ³	Допустимая в течение 10 мин
		1400 мг/м ³	Летальная концентрация
Акролеин	Легкое головокружение, приливы крови к голове, тошнота, рвота, замедление пульса, потеря сознания, отек легких. Иногда отмечается сильное головокружение и дезориентация	13 мг/м ³	Переносимая не более 1 мин
		75–350 мг/м ³	Летальная концентрация
Сернистый ангидрид	На влажной поверхности слизистых оболочек последовательно превращаются в сернистую и серную кислоту. Вызывает кашель, носовые кровотечения, спазм бронхов, нарушает обменные процессы, способствует образованию метгемоглобина в крови, действует на кроветворные органы	250–500 мг/м ³	Опасная концентрация
		1500–2000 мг/м ³	Смертельная концентрация при воздействии в течение нескольких минут
Диоксид углерода	Вызывает учащение дыхания и увеличение легочной вентиляции, оказывает сосудорасширяющее действие, вызывает сдвиг рН крови, также вызывает повышение уровня адреналина	12 % об.	Потеря сознания, смерть в течение нескольких минут
		20 % об.	Немедленная потеря сознания и смерть

Окончание таблицы 1.4

<p>Дым, парогазоаэрозольный комплекс</p>	<p>В его составе находятся твердые частицы сажи, жидкие частицы смолы, влаги, аэрозолей конденсации, выполняющих транспортную функцию для токсичных веществ при дыхании. Кроме того, частицы дыма сорбируют на своей поверхности кислород, уменьшая его содержание в газовой фазе. Крупные частицы (> 2,5 мкм) оседают в верхних дыхательных путях, вызывая механическое и химическое раздражение слизистой оболочки. Мелкие частицы проникают в бронхиолы и альвеолы. При поступлении в большом количестве возможна закупорка дыхательных путей</p>
--	---

Снижение концентрации кислорода до уровня 16–17 % приводит к учащенному дыханию, снижению концентрации и внимания, нарушению деятельности мышечной активности и т. п. [18]. При дальнейшем снижении концентрации до 12–15 % у человека наблюдается учащение пульса, появляется одышка, снижение активности умственной деятельности, головокружение и скорая утомляемость. При концентрации кислорода 8 % происходит потеря сознания. При 6 % – наблюдается смерть при длительности воздействия 7 минут [18].

Кроме того, следует помнить, что в составе продуктов горения современных веществ и материалов обнаруживаются и другие газообразные соединения, потенциальная опасность которых при пожаре в полном объеме не изучена, а измерение концентраций затруднительно, в связи с несовершенством средств измерений и достаточной сложностью задач исследования [18–21].

При комбинированном воздействии различных токсичных газов и снижении концентрации кислорода, а также воздействия повышенной температуры (усиливает чувствительность организма к токсическому действию отравляющих веществ) на живые организмы, наблюдается сложный эффект совместного воздействия [18]. Комбинированное воздействие токсичных газов исследовано в работах [18, 33, 35, 80].

Комбинированное воздействие токсичных газов при пожаре на организм человека достаточно сложно и неоднозначно и зависит от концентраций токсичных газов, температуры газообразной смеси и др. Комбинированное воздействие может иметь различные эффекты [18]:

– аддитивность влияния токсичных газов – суммирование эффектов от воздействия каждого из токсичных газов отдельно;

– синергизм – итоговый результат получается больше, чем простая арифметическая сумма отдельных эффектов от воздействия каждого из токсичных газов отдельно;

– антагонизм – наблюдается снижение ожидаемого эффекта от совместного действия токсичных газов по сравнению с суммой от воздействия каждого из токсичных газов отдельно.

Значительное влияние на период интоксикации оказывает одновременный рост температуры и снижение концентрации кислорода [23, 25, 26], что сопровождается кислородным «голоданием» органов и тканей [18].

Изменение временного показателя токсичности продуктов горения при комбинированном действии газов, образующихся при пожаре, представлены в таблице 1.5 [24, 104].

Таблица 1.5– Изменение временного показателя токсичности продуктов горения при комбинированном действии газов [24, 104]

Состав смеси	Номер смеси	Изменение временного показателя токсичности
CO + недостаток O ₂ (15 %)	1	Без изменения по сравнению с чистым CO
CO + недостаток O ₂ (10 %)	2	Уменьшается
CO + CO ₂ (от 2 до 8 %)	3	Увеличивается по мере увеличения концентрации CO ₂
CO + CO ₂ + недостаток O ₂ (15 %)	4	Без изменения по сравнению со смесью 3
CO + CO ₂ + недостаток O ₂ (10 %)	5	Уменьшается по сравнению со смесью 3
CO + HCl	6	Увеличивается по сравнению с чистыми газами
CO + CO ₂ + HCl	7	Уменьшается по сравнению со смесью 6
CO + HCN	8	По типу суммирования эффектов или независимого действия
CO + HCN + CO ₂ + недостаток O ₂	9	Уменьшается под влиянием CO ₂
CO + NH ₃	10	Без изменения по сравнению с CO и NH ₃
CO + CO ₂ + NH ₃	11	Уменьшается по сравнению со смесью 10

Математические методы прогнозирования ОФП [23, 25, 26], применяемые для нахождения времени критической продолжительности пожара по токсичным продуктам горения, а также необходимого времени эвакуации людей при пожаре, не учитывают комбинированного воздействия на организм человека токсичных газов при пожаре, используя только аддитивный подход (каждый из рассматриваемых газов оказывает действие независимо от других). Отметим, что данное упрощение из-за недостаточной степени изучения и проработки данного вопроса в настоящий момент и малого количества сведений о физико-химических процессах взаимодействия газов в условиях пожара, не отражает реальной термогазодинамической картины при пожаре и требует проведения дальнейших исследований в части определения величин парциальных критических плотностей отдельных выделяемых при пожаре токсичных газов, как в случае их независимого воздействия, так и совместно с другими газами.

1.4 Современные методы оценки токсичности продуктов горения

В зависимости от масштаба и условий формирования газообразной среды в моделируемом объеме, современные экспериментальные методы определения показателя токсичности продуктов горения веществ и материалов можно разделить на маломасштабные, среднемасштабные и крупномасштабные испытания.

От целей испытаний зависит выбор масштаба. Наиболее применимыми для целей определения степени потенциальной опасности веществ и материалов и возможности ранжирования (классификации) их между собой являются маломасштабные испытания. Однако отметим, что маломасштабные испытания имеют как преимущества – экономичность, возможность изменения режимов испытаний образцов (горение, тление, недожог [71] (горение с пониженной концентрацией кислорода)), небольшие размеры образцов, достаточная сходимость результатов при повторных испытаниях, так и недостатки – термогазодинамический процесс внутри

экспериментального объема является существенно нестационарным и неоднородным, сложность получения исследуемой смеси газов, близкой к реальному поведению исследуемых материалов при пожаре, и переноса полученных результатов на реальное помещение. Целью маломасштабных испытаний является получение численных данных о токсичности продуктов горения веществ и материалов для дальнейшего использования полученных данных для определения возможности их применения в различных помещениях, в том числе на путях эвакуации. Как правило, это испытания, проведенные для ранжирования материалов по степени их потенциальной опасности (классификация), получение исходных данных для математического моделирования пожара, исследование газов выделяющихся при терморазложении современных веществ и материалов, исследовательские испытания и т.д.

Современные методы оценки токсичности продуктов горения можно разделить на группы [18]:

1. Методы биологической оценки (токсикометрия) продуктов горения, использующие при испытаниях подопытных животных, как правило, белых крыс и белых мышей, кроликов, морских свинок и др. [50] (могут использоваться как модель человека), с одновременной регистрацией количественных параметров газовой среды – концентраций выделяемых при горении наиболее опасных газов в объеме затравочной камеры, температуры.

2. Методы оценки по данным химического анализа, основанные на расчетном определении предполагаемого токсического воздействия (коэффициента токсичности) и использующие результаты экспериментальных измерений концентраций наиболее опасных газов.

3. Экспериментально-расчетные методы, использующие как основу для получения данных (концентрации основных токсичных газов, выделяемых при терморазложении веществ и материалов) методы оценки по данным химического анализа и расчета на их базе показателя токсичности продуктов

горения с последующим контрольным экспериментом – проверкой методом биологической оценки с экспозицией животных [64].

Применение методов биологической оценки предполагает использование лабораторных животных для определения токсического действия продуктов горения [7].

Реализация метода биологической оценки осуществляется посредством использования метода экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов по ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.20 [7]. Данный метод предусматривает испытания веществ и материалов в камере в одном из двух режимов – термоокислительного разложения или пламенного горения (выбирается наиболее способствующий выделению более токсичных смесей летучих веществ) [7].

В процессе испытаний в протоколе регистрируют показания значений концентрации монооксида углерода, оксида углерода и кислорода в экспозиционной камере. После достижения наивысших концентраций газовой смеси внутри камеры перемешивают вентилятором. Регистрируют число погибших и выживших белых мышей после испытаний, а также в течение последующих 14 суток. Затравку животных (не менее 8 белых мышей массой (20 ± 2) г. проводят статическим способом. Длительность экспозиции составляет 30 мин, при этом температура воздуха в предкамере за время экспозиции животных не должна превышать $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а концентрация кислорода должна быть не менее 16 % об. [7].

Показатель токсичности продуктов горения определяется как отношение количества испытуемого материала к единице объема замкнутого пространства, в объеме которого образующиеся при их термическом разложении газообразные продукты вызывают гибель 50 % подопытных животных [7].

В зависимости от полученного показателя N_{CL50} вещества и материалы могут быть классифицированы следующим образом: чрезвычайно опасные, высоко опасные, умеренно опасные и малоопасные по токсичности продуктов горения [1, 7].

Существенным преимуществом данного метода является учет влияния не только отдельных аддитивных составляющих выделяемых токсичных газов, но и их комбинированного воздействия на животных.

Методы оценки токсичности продуктов горения по данным химического анализа и экспериментально-расчетные методы [11, 13, 14, 15, 104] более применимы для исследовательских целей и получения параметров (исходных данных) для моделирования пожаров в помещении и имеют существенно меньшие трудовые и временные затраты [18]. Однако данные методы требуют большого количества систематизированной информации о свойствах продуктов терморазложения, взаимосвязи токсических эффектов и концентрациями выделяемых токсичных газов, а также временем экспозиции и др. [18].

Достоверность и надежность метода может быть определена двумя условиями [18]:

- параметры терморазложения веществ и материалов должны соответствовать пожару в крупномасштабном помещении и метод должен быть апробирован на крупномасштабных экспериментах;
- возможность средств измерений проводить измерения достаточного, для поставленной задачи, числа параметров газовой смеси.

Методика стандартных испытаний для целей сертификации веществ и материалов по ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.20 имеет ряд недостатков [24]. Достоверность и надежность данной методики не отвечает вышеприведенным условиям (не воспроизводятся условия реального полномасштабного помещения и не производятся измерения концентраций всех токсичных газов выделяемых при терморазложении материалов) [24]. В соответствии с п. 4.20.3.5 [7] необходимо определять количественный выход не только оксида углерода и диоксида углерода, но и оксидов азота, цианистого водорода, альдегидов и других веществ выделяющихся при терморазложении веществ и материалов, а для оценки вклада оксида углерода в суммарный токсический эффект необходимо предусмотреть измерения содержания карбоксигемоглобина в крови подопытных животных. Отметим, что данным нормативным

документом [7] не предложено метода определения следов других токсичных газов в организме подопытных животных, а предложенный в п. 4.20.1.5 газоанализатор ГИАМ-5М, не позволяет измерять концентрации вышеприведенных газов, кроме CO, CO₂ и O₂, что не соответствует реальной токсикологической картине пожара. Комбинированное воздействие токсичных газов на организм животных определяется путем подсчета количества выживших и погибших животных по истечению 14 суток, что не дает возможность отслеживать в процессе испытаний поэтапно симптоматику при отравлении токсичными продуктами горения [24].

Выявленные недостатки приведенного метода при сертификационных испытаниях могут приводить к занижению степени потенциальной опасности испытуемых веществ и материалов, что может послужить причиной отравления и гибели людей на реальном пожаре.

Таким образом:

1. Методы биологической оценки продуктов горения, с учетом определения и регистрации количественных значений концентраций выделяемых при терморазложении газов, как правило, не дают адекватной (реальной) токсикологической картины при пожаре из-за неосуществимости воспроизведения при проведении экспериментов термогазодинамических условий, протекающих при пожаре в полномасштабных помещениях.

2. Методы оценки по данным химического анализа, основанные на расчетном определении предполагаемого токсического воздействия (коэффициента токсичности) и использующие результаты экспериментальных измерений концентраций выделяемых при горении наиболее опасных газов являются наиболее подходящими для использования в математических моделях для целей моделирования пожаров и определения критических значений продолжительности пожара по токсичным продуктам горения для обеспечения безопасной эвакуации людей из зданий и сооружений.

1.5 Упрощенный метод расчета необходимого времени эвакуации людей при пожаре

Упрощенный метод расчета необходимого времени эвакуации людей при пожаре приведен в работах [6, 23]. Как отмечается во многих работах [24, 26, 57, 86], этот метод достаточно упрощенный и неадекватный реальной термогазодинамической картине пожара.

Время блокирования путей эвакуации в результате распространения на них ОФП определяется как время, когда достигается хотя бы одно предельно допустимое для людей значение ОФП на высоте рабочей зоны.

Необходимое время эвакуации рассчитывается как произведение критической для человека продолжительности пожара (или времени блокирования путей эвакуации) на коэффициент безопасности [6]. При этом предполагается, что каждый ОФП воздействует на человека независимо от других.

Для определения критической продолжительности пожара для людей, которые находятся на этаже очага пожара, необходимо найти момент достижения любым из существующих ОФП (повышенная температура, потеря видимости, повышенная концентрация токсичных продуктов горения, пониженная концентрация кислорода и др.) предельно допустимого значения. В случае нахождения людей на этажах выше очага, в качестве критерия необходимо найти момент достижения любым из существующих ОФП предельно допустимого значения в лестничной клетке на этом этаже.

Численные значения температуры, оптической плотности дыма, концентрации токсичных продуктов горения определяются посредством решения системы уравнений теплогазообмена для данных помещений.

Расчет необходимого времени эвакуации из зальных помещений, проводится для наихудшего сценария развития пожара, при котором скорость нарастания ОФП для данного помещения является максимальной.

Вначале для мест нахождения людей (рабочая зона) рассчитывают

значения критической продолжительности пожара ($t_{кр}$) по условию достижения каждым из ОФП своего предельно допустимого значения [6, 23]:

– по повышенной температуре:

$$t_{кр}^T = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[\frac{70 - t_0}{(273 + t_0)z} \right] \right\}^{1/n}, \quad B = \frac{353C_p V}{(1 - \phi)\eta Q}, \quad (1.5.1)$$

– по потере видимости:

$$t_{кр}^{п.в} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[1 - \frac{V \ln(1,05\alpha E)}{l_{пв} B D_m z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}, \quad (1.5.2)$$

– по пониженному содержанию кислорода:

$$t_{кр}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[1 - \frac{0,044}{\left(\frac{B L_{O_2}}{V} + 0,27 \right)} \right]^{-1} \right\}^{1/n}, \quad (1.5.3)$$

– по каждому из газообразных токсичных продуктов горения

$$t_{кр}^{т.г} = \left\{ \frac{B}{A} \ln \left[1 - \frac{V X}{B L z} \right]^{-1} \right\}^{1/n}, \quad (1.5.4)$$

где B – размерный комплекс, зависящий от теплоты сгорания материала и свободного объема помещения, кг;

t_0 – начальная температура воздуха в помещении, °С;

n – показатель степени, учитывающий изменение массы выгорающего материала во времени;

A – размерный параметр, учитывающий удельную массовую скорость выгорания горючего материала и площадь пожара, кг·с⁻ⁿ;

z – безразмерный параметр, учитывающий неравномерность распределения ОФП по высоте помещения;

Q – низшая теплота сгорания материала, МДж·кг⁻¹;

C_p – удельная изобарная теплоемкость газа МДж·(кг К)⁻¹;

ϕ – коэффициент теплопотерь;

η – коэффициент полноты горения;

V – свободный объем помещения, м³,

α – коэффициент отражения предметов на путях эвакуации;

E – начальная освещенность, лк;

$l_{пр}$ – предельная дальность видимости в дыму, м;

D_m –дымообразующая способность горящего материала, $\text{Нп}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$.

L – удельный выход токсичных газов при сгорании 1 кг материала, $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$,

X – предельно допустимое содержание токсичного газа в помещении, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$
 ($X_{\text{CO}_2} = 0,11 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; $X_{\text{CO}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; $X_{\text{HCL}} = 23 \cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$);

L_{O_2} – удельный расход кислорода, $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$.

В случае получения под знаком логарифма отрицательного значения, то считается что, данный ОФП не опасен для человека.

Параметр z вычисляется по формуле

$$Z = \frac{h}{H} \exp\left(1,4 \frac{h}{H}\right), \text{ при } H \leq 6 \text{ м}, \quad (1.5.5)$$

где h – высота рабочей зоны, м;

H – высота помещения, м.

Далее рассчитывают высоту рабочей зоны:

$$h = h_{\text{пл}} + 1,7 - 0,5\delta, \quad (1.5.6)$$

где $h_{\text{пл}}$ – высота площадки, на которой находятся люди, под полом помещения, м;

δ – разность высот пола, равная нулю при горизонтальном его расположении, м.

Наибольшему риску подвергаются люди при пожаре, находящиеся на верхних отметках. Вследствие этого, при определении необходимого времени эвакуации людей из машинного зала значение h находится с учетом наиболее удаленных и высоко расположенных потенциальных мест нахождения людей.

Значения A и n определяют:

– для горения жидкости с установившейся скоростью:

$$A = \psi_F F, \quad n = 1,$$

где ψ_F – удельная массовая скорость выгорания жидкости, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

– для кругового распространения пожара:

$$A = 1,05\psi_F v^2, \quad n = 2,$$

где v – линейная скорость распространения пламени, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$;

– для вертикальной или горизонтальной поверхности горения в форме прямоугольника, с увеличивающейся стороной (из-за распространения пламени) в двух направлениях:

$$A = \psi_F v b, \quad n = 2,$$

где b – размер зоны горения перпендикулярный к направлению движения пламени, м.

В случае если специально не оговорены значения α и E . При этом $t_{\text{пр}} = 20$ м, $\alpha = 0,3$, $E = 50$ лк.

Для проведения расчетов исходные данные берутся из справочной литературы.

Из полученных в результате расчетов значений критической продолжительности пожара выбирается минимальное:

$$t_{\text{кр}} = \min \{ t_{\text{кр}}^{\text{т}}, t_{\text{кр}}^{\text{п.в}}, t_{\text{кр}}^{\text{O}_2}, t_{\text{кр}}^{\text{т.г}} \}. \quad (1.5.7)$$

Необходимое время эвакуации людей ($t_{\text{нб}}$, мин) рассчитывается по формуле

$$t_{\text{нб}} = \frac{0,8t_{\text{кр}}}{60}. \quad (1.5.8)$$

В случае возможного нахождения людей на различных отметках по высоте (площадки) необходимое время эвакуации людей определяется для каждой отметки (площадки) отдельно.

Разница геометрического объема и объема оборудования, которое находится внутри помещения, определяет свободный объем данного помещения. При невозможности определения свободного объема принимается равным 80 % геометрического объема.

Приведенные выражения (1.5.1)–(1.5.4) являются аналитическим решением интегральной модели [23, 26]. При этом допущены следующие существенные упрощения термогазодинамики пожара [26]:

- проемы помещения оказывают работу только на «выброс» наружу газовой смеси;
- коэффициент теплопотерь постоянен в течение времени пожара;
- удельный выход газов неизменен в течение времени пожара и не зависит от изменения концентрации кислорода.

1.6 Методы расчета динамики распространения опасных факторов пожара

Распространение ОФП, в частности токсичных газов, может быть вызвано множеством параметров: естественной конвекцией, наличием систем дымоудаления, приточной вентиляции и пожаротушения. Кроме того, данный процесс протекает в сложных термогазодинамических условиях с воздействием различных факторов: сжимаемость, неизотермичность, излучение, турбулентность, химические реакции, продольный и поперечный градиенты давления, вдув-отсос на стенке, шероховатость стенки, кривизна поверхности, а также переход ламинарного режима течения в турбулентный [26].

Математическое моделирование конвективного турбулентного теплообмена при пожаре в помещении, которое позволит находить поля концентраций токсичных продуктов горения, требует подробного выбора модели расчета.

В настоящий момент существуют три группы моделей расчета теплообмена при пожаре в помещении [23, 26]: интегральные, зонные и полевые (дифференциальные). Основные различия данных моделей связаны с различными уровнями детализации физико-математической картины пожара.

Наиболее простыми в математическом описании являются интегральные математические модели [23, 26]. Они оперируют среднеобъемными величинами температуры, плотности, массовых концентраций кислорода и токсичных продуктов горения, давления, оптической плотности дыма.

Интегральные модели состоят из системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Основные уравнения состоят из нестационарных дифференциальных уравнений, основанных на фундаментальных законах сохранения массы и энергии для газовой среды в помещении.

Несмотря на относительную простоту интегральных моделей, они обладают и недостатками, существенно уменьшающими их область использования [26]:

- отсутствует учет локальности элементов и параметров задачи;
- для определения локальных значений по длине и высоте помещения величин ОФП необходимы дополнительные соотношения, которые могут быть получены экспериментально или расчетным путем с использованием более сложных моделей (зонной или полевой).

Использование зонных моделей [23] предусматривает разбиение помещения на отдельные зоны. В целях вычисления характеристик теплообмена в каждой из этих зон применяются, также как и при использовании интегральных моделей, уравнения законов сохранения массы и энергии.

Число зон и их геометрические размеры выбираются, как правило, из условия, чтобы обеспечивалась однородность температурных и других полей параметров газовой среды в помещении, а расхождения в рамках каждой из выбранных зон были как можно минимальными [26].

Основные недостатки зонных математических моделей [26]:

- зонные модели более трудоемки, в математическом плане, чем интегральные, так как требуют решения большего количества обыкновенных дифференциальных уравнений;
- при выделении в отдельную зону конвективной колонки, расположенной над очагом горения, требуется дополнительная информация и соответствующие допущения, так как она не является свободной струей, которая распространяется в неограниченной и неподвижной газовой среде;

– для каждой из зон, для задания распределения параметров газа вдоль различных направлений, требуются дополнительные экспериментальные или теоретические данные, зависящие от геометрии (объемно-планировочных решений) помещения.

Полевые (дифференциальные) математические модели наиболее подробным образом описывают процессы тепломассообмена при пожаре в помещении [23, 26].

Существенным достоинством полевых (дифференциальных) моделей является то, что они оперируют такими параметрами, как поля температур, давлений, скоростей, концентраций компонентов газовой среды (кислорода, токсичных газов) и частиц дыма для всего объема помещения.

Математическое описание полевых (дифференциальных) моделей наиболее сложное, так как включает в себя систему трехмерных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, состоящих из уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии. Дополнительные соотношения используются для замыкания системы уравнений.

Отметим основные недостатки полевых (дифференциальных) моделей [26]:

- достаточно большая сложность решения замкнутой системы дифференциальных уравнений в частных производных;
- достаточно большая сложность в разработке программы для расчета на ЭВМ;
- по причине ограниченных мощностных возможностей современных ЭВМ происходит уменьшение числа точек конечно-разностной сетки, что приводит к снижению возможности исследований течения в пристеночных областях и непосредственно в зоне горения;
- трудоемки, требуют производительных ЭВМ и достаточно большого количества времени для проведения расчетов.

В настоящий момент рассмотренные модели реализуются в программных комплексах для ЭВМ – PHOENICS [121], SOFIE [122], FDS [123] и др.

1.7 Выводы по первой главе

Из анализа литературных источников можно сделать следующие основные выводы:

1. При эксплуатации ГЭС проблемы безопасной эвакуации людей из производственных зданий ГЭС при пожаре являются достаточно острыми, поэтому при проектировании или реконструкции необходимо проводить расчет динамики опасных факторов пожара в вышеуказанных зданиях с целью соответствия их объемно-планировочных и конструктивных решений требованиям безопасности и условию возможности безопасной эвакуации людей.

2. Выявленные недостатки существующих экспериментальных методов оценки токсичности продуктов горения и теоретических методов расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре в зданиях и сооружениях свидетельствуют о необходимости их совершенствования для повышения точности расчетов концентраций токсичных газов с учетом масштабного фактора при их образовании и распространении в производственных зданиях ГЭС.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИЙ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ НА ПУТЯХ ЭВАКУАЦИИ ПРИ ПОЖАРЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ ГЭС

2.1 Интегральная модель пожара в помещении

Интегральная математическая модель пожара описывает состояние газовой среды в помещении при пожаре в каждый момент времени и изменение ее параметров во времени. При использовании интегральной математической модели оперируют интегральными характеристиками термодинамической системы. Термодинамика рассматривает газовую среду, заполняющую помещение с проемами (окна, двери и т. п.) при пожаре, как открытую термодинамическую систему. Внешней средой по отношению к этой термодинамической системе являются ограждающие конструкции, такие как пол, потолок, стены и наружный воздух. Данная система посредством тепло- и массообмена взаимодействует с внешней средой, а также с ограждающими конструкциями путем теплообмена. В систему с поверхности терморазлагающегося материала поступают газообразные продукты горения. При взаимодействии с окружающей средой состояние данной термодинамической системы может изменяться. Для описания процесса развития пожара используют уравнения пожара (обыкновенные дифференциальные уравнения), описывающие в самом общем виде изменение среднеобъемных параметров состояния газовой среды в помещении в течение времени. Эти уравнения были сформулированы в 1976 году профессором Ю.А. Кошмаровым. Данные дифференциальные уравнения основаны на фундаментальных законах природы (первого закона термодинамики для открытой термодинамической системы и закона сохранения массы).

Для решения поставленных задач в работе используется модифицированная интегральная модель [26], учитывающая более полно неоднородность температурного поля по высоте помещения, отличающейся от модели, представленной в учебном пособии [23] и реализуемой

с использованием решения двухмерных нестационарных уравнений теплопроводности.

Уравнения законов сохранения массы и энергии для газовой среды в помещении, а также законов сохранения массы кислорода и i -го токсичного газа имеют, соответственно, вид [27]:

$$V \frac{d\rho_{cp}}{d\tau} = \Psi_{\Gamma} - G_{cp}, \quad (2.1.1)$$

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{p_{cp} V}{k_{cp} - 1} \right) = \Psi_{\Gamma} \eta Q_{H}^p + c_{p,v} T_{в} G_{в} - c_{p,cp} T_{cp,пр} G_{cp} - Q_s - Q_{пр}, \quad (2.1.2)$$

$$V \frac{d(X_{O_2 cp} \rho_{cp})}{d\tau} = -\eta L_{O_2} \Psi_{\Gamma} + X_{O_2 в} G_{в} - X_{O_2 cp,пр} G_{cp}, \quad (2.1.3)$$

$$V \frac{d(X_{i cp} \rho_{cp})}{d\tau} = \eta L_i \Psi_{\Gamma} - X_{i cp,пр} G_{cp}, \quad (2.1.4)$$

где V – объем помещения, τ – время, с; m^3 ; Ψ_{Γ} – скорость газификации горючего материала, кг/с; $G_{в}$, G_{cp} – массовые расходы поступающего воздуха и вытекающих наружу газов при естественном газообмене, кг/с; ρ_{cp} – среднеобъемная плотность газовой среды помещения, kg/m^3 ; p_{cp} – среднеобъемное давление, Па; k_{cp} – среднеобъемный показатель адиабаты газовой среды помещения; Q_{H}^p – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; Q_s – суммарный тепловой поток, отводимый в ограждающие конструкции, Вт; $Q_{пр}$ – тепловой поток, излучаемый через проемы, Вт; η – полнота сгорания; $T_{в}$ – температура наружного воздуха, К; $T_{cp,пр} = a_T T_{cp}$ – средняя температура газов, выходящих через проемы, К; a_T – коэффициент, учитывающий отличие среднемассовой температуры выходящих газов от среднеобъемной температуры газовой среды помещения; $c_{p,v}$, $c_{p,cp}$ – удельные изобарные теплоемкости воздуха и газовой среды, Дж/(кг·К); $X_{i cp}$ – среднеобъемная массовая концентрация i -го токсичного газа в помещении; $X_{i cp,пр}$ – среднеобъемная массовая концентрация i -го токсичного газа в газах, выходящих через проемы; L_i – удельный массовый коэффициент образования

i -го токсичного газа, кг/кг; $X_{O_2, \text{cp}}$ – среднеобъемная массовая концентрация кислорода в помещении; $X_{O_2, \text{в}}$ – массовая концентрация кислорода в наружном воздухе; $X_{O_2, \text{cp, пр}} = a_{O_2} X_{O_2, \text{cp}}$ – средняя массовая концентрация кислорода в газах, выходящих через проемы; a_{O_2} – коэффициент, учитывающий отличие среднемассовой концентрации кислорода в выходящих газах от его среднеобъемной концентрации в газовой среде помещения; L_{O_2} – потребление кислорода, кг/кг.

Скорость тепловыделения находится по формуле [23]:

$$Q_{\text{пож}} = \eta \psi_{\text{уд}} Q_{\text{н}}^{\text{п}} F_{\text{г}}, \quad (2.1.5)$$

где $Q_{\text{пож}}$ – скорость тепловыделения, Вт; $F_{\text{г}}$ – площадь открытой поверхности горючего материала, м²; $\psi_{\text{уд}}$ – удельная скорость выгорания, кг/(м²·с).

Полнота сгорания зависит от массовой концентрации кислорода [23] и определяется в первом приближении по формуле [26]

$$\eta = \eta_0 (2\bar{X} - \bar{X}^2), \quad (2.1.6)$$

где η_0 – полнота сгорания на открытом воздухе; \bar{X} – относительная массовая концентрация, $\bar{X} = (X_{O_2, \text{м}} - X_{O_2, \text{min}}) / (X_{O_2, \text{а}} - X_{O_2, \text{min}})$; $X_{O_2, \text{min}} = 0,14$ – массовая концентрация кислорода после прекращения горения.

При высоте нейтральной плоскости $z_{\text{н}} < z^* < z_{\text{в}}$ (смешанный режим газообмена), формула для массового расхода газов, выходящих через проем наружу, имеет вид [28]:

$$G_{\text{cp}} = 2/3 \sqrt{2g\rho_{\text{cp}}(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{cp}})} \xi b_{\text{пр}} (z_{\text{в}} - z^*)^{1,5}. \quad (2.1.7)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления проема; z – координата по высоте, отсчитываемая от уровня пола, м; $z_{\text{н}}$, $z_{\text{в}}$ – координаты нижнего и верхнего краев открытого проема, м; z^* – высота нейтральной плоскости, м; $b_{\text{пр}}$ – ширина проема, м.

При других режимах газообмена на открытых проемах используются аналогичные формулы, приведенные в учебном пособии [23].

Условия однозначности рассматриваемой задачи можно разделить на геометрические, физические, граничные условия (таблицы 2.1–2.4) и начальные [104].

Таблица 2.1 – Геометрические условия

№	Параметры помещения	Геометрические параметры
1.	Размеры помещения (по внутренним поверхностям ограждающих строительных конструкций)	Длина, ширина и высота
2.	Размеры открытых и вскрывающихся (под действием повышенной температуры) проемов	Высоты от уровня пола до нижнего z_n и верхнего z_b краев проема; ширина проема $b_{пр}$
3.	Размеры открытой поверхности горючего материала	Площадь F_T (или длина l_T и ширина b_T при прямоугольной форме и т. п.)
4.	Толщины ограждающих строительных конструкций	В том числе каждого слоя при многослойных конструкциях

Таблица 2.2 – Физические условия

№	Параметры и свойства	Коэффициенты и постоянные величины
1.	Теплофизические свойства газовой среды в помещении, воздуха и огнетушащего вещества	Удельные массовые изобарные теплоемкости $c_{p,ср}$, $c_{p,в}$, $c_{p,ов}$, газовые постоянные $R_{ср}$, R_B
2.	Теплофизические свойства материалов ограждающих конструкций (для каждого слоя при многослойных конструкциях)	Плотности, теплоемкости и коэффициенты теплопроводности (средние или в зависимости от температуры) ρ_w , c_w , λ_w , ρ_c , c_c , λ_c , ρ_f , c_f и λ_f
3.	Параметры горючего материала	Удельная массовая скорость газификации $\Psi_{уд}$, низшая рабочая теплота сгорания Q_n^p , удельный выход продуктов горения L_i , удельное потребление кислорода L_{O_2} , линейная скорость распространения пламени w_T в случае твердого горючего материала или время стабилизации горения $\tau_{ст}$ для горючей жидкости, удельное дымовыделение D_s .
4.	Разрушение (потеря целостности) стеклянных проемов под воздействием повышенной температуры	Задается температурой вскрытия $T_{вп}$

Таблица 2.3 – Граничные условия (на границах открытой термодинамической системы, совпадающих с внутренними поверхностями ограждающих конструкций и открытой поверхностью горючего материала)

№	Определяемые физической величины	Размерность физической величины
1.	Массовая скорость газификации горючего вещества Ψ_{Γ}	кг с ⁻¹
2.	Величина суммарного теплового потока Q_s , отводимого в ограждающие конструкции от газовой среды	Вт
3.	Температура наружного воздуха $T_{\text{в}}$	К
4.	Массовый расход подачи огнетушащего вещества $G_{\text{ов}}$	кг/с
5.	Температура $T_{\text{ов}}$ огнетушащего вещества	К

Таблица 2.4 – Граничные условия (на границах открытой термодинамической системы, совпадающих с внутренними поверхностями открытых проемов)

№	Определяемые (задаваемые) физической величины	Размерность физической величины
1.	Величины массовых расходов вытекающей наружу газовой смеси $G_{\text{ср}}$ и притока наружного воздуха $G_{\text{в}}$	кг/с
2.	Величина теплового потока $Q_{\text{пр}}$, излучаемого через проемы наружу	Вт
3.	Температура наружного воздуха $T_{\text{в}}$	К

Для системы уравнений (2.1.1)–(2.1.4) начальные условия (при $\tau = 0$):

$$T_{\text{ср}0} = T_0; p_{\text{ср}} = p_0; X_{\text{O}_2, \text{ср}} = X_{\text{O}_2, \text{в}} = 0,23; X_{\text{N}_2, \text{ср}} = X_{\text{N}_2, \text{в}} = 0,77;$$

$$X_{i, \text{ср}} = 0; M = M_0,$$

где T_0, p_0 – значения температуры и давления в помещении в начальный момент времени (перед пожаром), К, Па; M_0 – начальная масса горючего материала, кг; $X_{\text{O}_2, \text{ср}}, X_{\text{N}_2, \text{ср}}, X_{i, \text{ср}}$ – соответственно, среднеобъемные массовые концентрации кислорода, азота, i -го токсичного газа в помещении; $X_{\text{O}_2, \text{в}}, X_{\text{N}_2, \text{в}}$ – массовые концентрации кислорода и азота в атмосферном воздухе.

Для решения замкнутой системы уравнений интегральной модели метод численного решения рассмотрен в [26].

2.2 Интегральная модель развития пожара в условно герметичном помещении

В настоящее время математические модели расчета динамики ОФП (в том числе и концентраций токсичных продуктов горения) в помещении достаточно развиты для решения практических задач пожарной безопасности, в частности, расчета пожарных рисков (работы [10, 11]).

В данной исследовательской работе была поставлена задача на созданной опытной маломасштабной установке провести эксперименты и их анализ по определению изменения величин удельных коэффициентов выделения СО от времени с начала горения и зависимостей средних величин этих коэффициентов от периода осреднения по времени.

Рассмотрим математические модели расчета плотности токсичного газа и кислорода. Схема тепломассообмена в замкнутом объеме представлена на рисунке 2.1 [104].

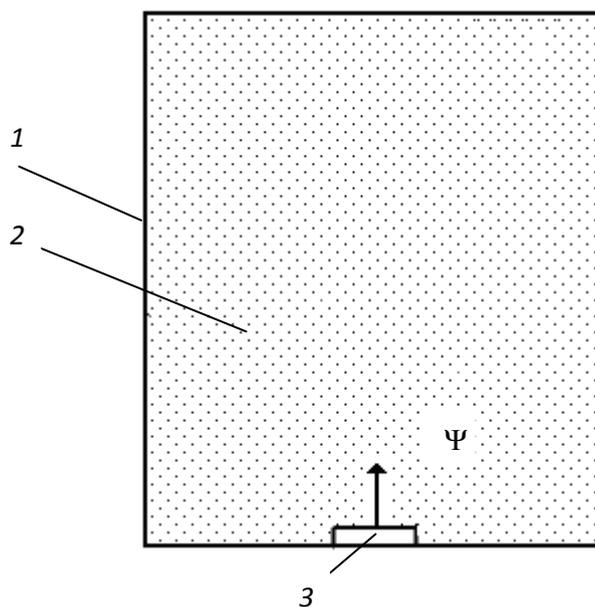


Рисунок 2.1 – Схема тепломассообмена в маломасштабной камере в замкнутом объеме [104]:

1 – стенки камеры (помещения); 2 – смесь продуктов горения и воздуха;

3 – горючий материал

Законы сохранения массы и энергии газовой среды, а также массы токсичного газа и кислорода внутри герметичного объема рассчитываются по формулам [23]:

$$V \frac{d\rho_{\text{cp}}}{d\tau} = \Psi_{\text{r}}, \quad (2.2.1)$$

$$\rho_{\text{cp}} c_v V \frac{dT_{\text{cp}}}{d\tau} = \eta \Psi_{\text{r}} Q_{\text{H}}^{\text{p}} (1 - \varphi), \quad (2.2.2)$$

$$V \frac{d\rho_{\text{r,cp}}}{d\tau} = \eta \Psi_{\text{r}} L, \quad (2.2.3)$$

$$V \frac{d\rho_{\text{O}_2\text{cp}}}{d\tau} = -\eta \Psi_{\text{r}} L_{\text{O}_2}, \quad (2.2.4)$$

где T_{cp} – среднеобъемная температура газовой среды, К; V – объем помещения, м³; τ – время, с; c_v – удельная изохорная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); ρ_{cp} – среднеобъемная плотность газовой среды, кг/м³; $\rho_{\text{r,cp}}$ – среднеобъемная плотность токсичного газа, кг/м³; $\rho_{\text{O}_2\text{cp}}$ – среднеобъемная плотность кислорода, кг/м³; Ψ_{r} – скорость газификации горючего материала, кг/с; L_{O_2} – удельный коэффициент потребления кислорода; Q_{H}^{p} – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; η – полнота сгорания; φ – коэффициент теплопотерь, равный доле теплоты, выделившейся в очаге горения и поступающей в ограждающие конструкции помещения из всего объема помещения.

Удельную изохорную теплоемкость принимаем одинаковой для газовой смеси и воздуха [23, 26]: $c_v = 714$ Дж/(кг·К).

Среднеобъемная плотность токсичного газа через промежуток времени τ от начала горения, полученная после интегрирования уравнения (2.2.3), составляет:

$$\rho_{\text{r,cp}} = \rho_{\text{r,в}} + \frac{\eta L}{V} \int_0^{\tau} \Psi d\tau, \quad (2.2.5)$$

где $\rho_{\text{r,в}}$ – среднеобъемная плотность токсичного газа в чистом воздухе, кг/м³.

Токсичный газ в воздухе перед пожаром отсутствует: $\rho_{\text{r,в}} = 0$.

2.3 Зонная модель пожара в помещении

2.3.1 Особенности и упрощения термогазодинамической картины пожара

Зонные математические модели расчета динамики ОФП [23, 25, 26] основаны на законах сохранения массы, импульса и энергии, т. е. на фундаментальных законах природы, и используются для исследования динамики распространения ОФП на начальной стадии пожара. Начальная стадия пожара характеризуется достаточно большой неоднородностью распределения параметров состояния газовой среды по объему помещения. При использовании зонной математической модели пространство внутри помещения (газовый объем) разбивается на характерные зоны с существенно отличающимися температурами и составами газовых сред. Границы зон по мере развития пожара также изменяются. Геометрические размеры и количество зон выбираются исходя из принципа однородности параметров газовой среды в рамках границ каждой из выбранных зон, а также какими-либо другими предположениями (задачами исследований, расположением горючего материала) [23].

Газовая среда помещения рассматривается как открытая термодинамическая система. Через открытые проемы и ограждающие конструкции она осуществляет обмен массой и энергией с внешней средой.

Данная среда, состоящая из смеси газов, таких как кислород, азот, продуктов горения и газификации горючих материалов, содержит в себе и мелкодисперсные дымовые частицы как твердые, так и жидкие.

Наиболее часто используемым является деление объема помещения на три характерные зоны: конвективную колонку над очагом пожара (зона 1), припотолочный слой нагретой газовой смеси (зона 2) и воздушную зону с неизменными параметрами (начальным значениям) – зона холодного воздуха (зона 3) [23].

Данная математическая модель, основанная на разбиении пространства на характерные области, получила название трехзонной модели.

Схема тепломассообмена в помещении для данной модели приведена на рисунке 2.2. Тепловые потоки и течения смеси газов показаны стрелками.

Обозначения на данной схеме (рисунок 2.2):

– G_b – массовый расход поступающего воздуха (поступающий в колонку из зоны 3), кг/с;

– G_{cp} – массовый расход вытекающих наружу газов при естественном газообмене через открытые проемы (поток вытесняемого газа из помещения), кг/с;

– Ψ_r – массовая скорость газификации горючего материала, кг/с;

– $Q_{пр}$ – тепловой поток, излучаемый через открытые проемы наружу, Вт;

– Q_{w1}, Q_{w2}, Q_c, Q_f – суммарные тепловые потоки (конвекция и излучение), поступающие в ограждающие конструкции (стены (выше и ниже нижней границы припотолочного слоя), потолок и пол), Вт.

Необходимо сделать допущение, что зоны припотолочного слоя и холодного воздуха разделяет граница бесконечно малой толщины. Переход из одной зоны в другую вызовет скачкообразное изменение термогазодинамических параметров.

Кроме того, следует помнить, что полученная смесь газов является смесью идеальных газов, т. к. свойства реальных газов (O_2 , N, CO, CO_2 и др.) близки к идеальным.

В силу того, что разница между термодинамическими свойствами продуктов горения и воздуха в диапазоне температур, наблюдаемом при пожаре, пренебрежимо мала, параметры: газовая постоянная, удельная изобарная теплоемкость и показатель адиабаты принимаются равными соответствующим численным значениям для сухого воздуха.

Наличием дыма при расчете термогазодинамических параметров газовой смеси можно пренебречь, так как доля тепловой энергии и доля массы, приходящейся на частицы дыма, в сравнении со значениями для газовой фазы

пренебрежимо мала. Влияние образующихся мелкодисперсных частиц дыма и частиц огнетушащего вещества на оптические свойства среды в помещении можно учесть, используя следующий параметр – оптическую плотность дыма [23].

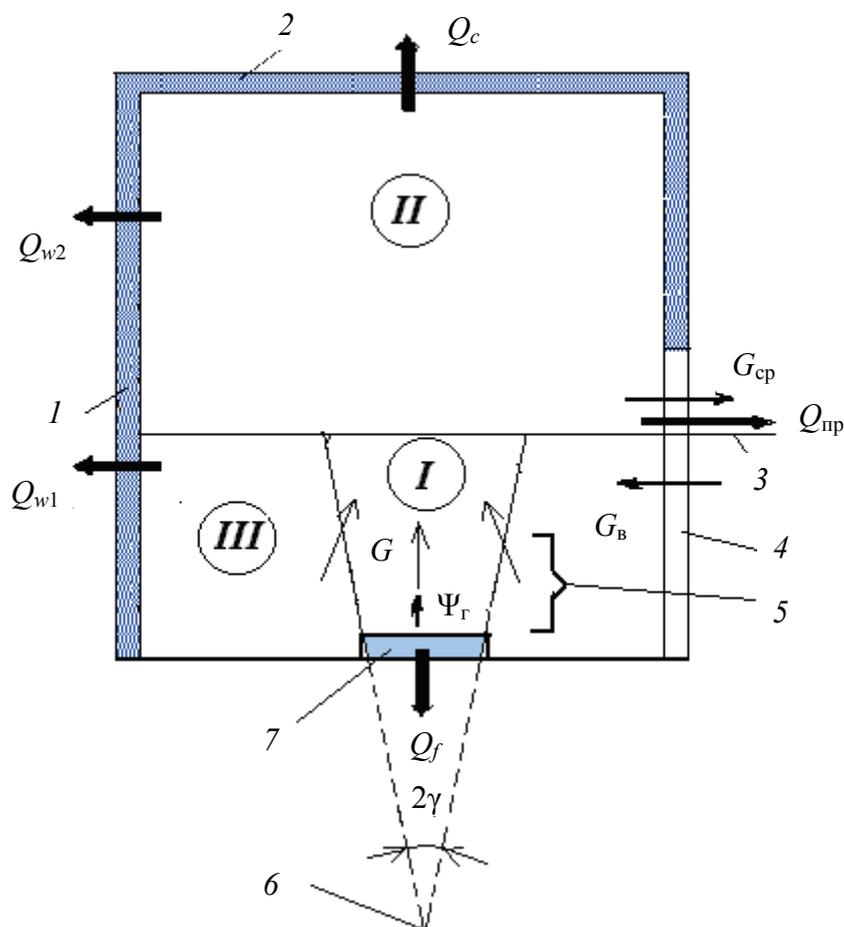


Рисунок 2.2– Схема расчета тепломассообмена в помещении [104]:

1 – стены; 2 – перекрытие; 3 – нейтральная плоскость (нижняя граница припотолочного слоя); 4 – открытый проем; 5 – высота пламенной зоны; 6 – точечный «фиктивный» источник теплоты; 7 – горючий материал; I – зона конвективной колонки; II – зона нагретого задымленного припотолочного слоя; III – зона холодного воздуха

При исследовании допускается, что геометрическое расположение пожарной нагрузки в помещении не оказывает влияния на теплоотвод в ограждающие конструкции и характеристики теплообмена через открытые проемы с окружающей средой.

Зонная модель включает в себя [23]:

1. Основные уравнения для зоны конвективной колонки.
2. Основные уравнения для зоны припотолочного слоя.

3. Дополнительные соотношения зонной модели:
- модель прогрева ограждающих строительных конструкций;
 - модель горения;
 - модель газификации горючего материала;
 - модель теплообмена через открытые проемы.

2.3.2 Зона конвективной колонки

В объеме конвективной колонки определяются распределенные по высоте колонки осредненные по поперечному сечению колонки такие параметры, как: массовый расход смеси продуктов терморазложения и газификации горючего вещества и воздуха в помещении, температуры газовой смеси включая дымовые частицы, эффективная степень черноты газовой смеси и дымовых частиц.

Делаются следующие предположения [26]:

- горящий образец материала образует над своей поверхностью конвективную колонку конической формы (угол полураскрытия γ переменный);
- термогазодинамические параметры газовой смеси средние вдоль поперечного сечения колонки меняются во времени лишь по высоте колонки.

Рассматриваются два подхода, определяющие, как распределяются по высоте термогазодинамические параметры газовой смеси: средних температур газовой смеси и массовых расходов в поперечных сечениях конвективной колонки.

В первом подходе точечный источник выделения тепла располагается ниже поверхности горючего вещества, таким образом используется полуэмпирический метод расчета [23, 31], не учитывающий реального местоположения источника выделения тепла, а поверхность горючего вещества рассматривается как условно проницаемая.

Массовый расход и средняя температура в сечении конвективной колонки при использовании полуэмпирического метода расчета определяется [23, 31]:

$$G = 0,21 \left[\frac{g\rho_0^2 Q_{\text{пож}} (1-\chi)}{c_p T_0} \right]^{\frac{1}{3}} (z + z_0)^{\frac{5}{3}}, \quad (2.3.2.1)$$

$$T = T_0 + \frac{Q_{\text{пож}} (1-\chi)}{c_p G}, \quad (2.3.2.2)$$

где T – средняя температура в сечении конвективной колонки, К; T_0 – температура воздуха в помещении, К; G – расход газов через сечение струи, отстоящее по высоте от поверхности горючего материала на расстояние z , кг/с; ρ_0 – плотность холодного воздуха в помещении, кг/м³; c_p – изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг К); $\chi = Q_{wI} / Q_{\text{пож}}$ – доля, приходящаяся на поступающую в ограждение теплоту от выделившейся в очаге горения; z – координата поперечного сечения колонки, отсчитываемая от открытой поверхности горючего материала, м; $z_0 = 1,5\sqrt{F_{\Gamma}}$ – расстояние от фиктивного источника тепла до поверхности горючего материала, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $Q_{\text{пож}} = \eta\psi_{\text{уд}} Q_{\text{н}}^p F_{\Gamma}$ – мощность тепловыделения, Вт; η – полнота сгорания; $\psi_{\text{уд}}$ – удельная скорость выгорания, кг/(м²·с); F_{Γ} – площадь открытой поверхности горючего материала, м².

Второй подход предусматривает, что распределенный источник выделения тепла располагается выше поверхности горючего материала, т.е. используются эмпирический [12] и полуэмпирический методы [56, 103].

Массовый расход в сечении конвективной колонки при использовании эмпирического метода [12]:

$$\text{при } z > z_{\text{пл}}: G = 0,071 \left(\frac{Q_{\text{пож}} (1-\chi)}{1000} \right)^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}} + 1,8 \cdot 10^{-6} Q_{\text{пож}} (1-\chi), \quad (2.3.2.3)$$

$$\text{при } z \leq z_{\text{пл}}: G = 0,032 \left(\frac{Q_{\text{пож}} (1-\chi)}{1000} \right)^{\frac{3}{5}} z, \quad (2.3.2.4)$$

где $z_{\text{пл}} = 0,166 \left(\frac{Q_{\text{пож}} (1-\chi)}{1000} \right)^{\frac{2}{5}}$ – высота пламенной зоны, м.

Используя полуэмпирический метод [56, 103] для данного подхода, массовый расход находят из решения дифференциального уравнения:

$$\frac{dG}{dz} = \frac{Bz(r + ztg\gamma)^4}{T_0 A G (G T_0 + Bz)} + \frac{2Gtg\gamma}{r + ztg\gamma} - \frac{B}{T_0} \left(1 - \frac{2ztg\gamma}{r + ztg\gamma} \right), \quad (2.3.2.5)$$

где $A = \frac{T_0 R^2}{g p_0^2 \pi^2}$ – размерный параметр, $\text{с}^2 \cdot \text{м}^5 / (\text{кг}^2 \cdot \text{К})$; $B = \frac{Q_{\text{пож}}(1-\chi)}{z_f c_p}$ –

размерный параметр, $\text{кг} \cdot \text{К} / (\text{м} \cdot \text{с})$; r – радиус поверхности горючего материала, м; R – газовая постоянная воздуха, $\text{Дж} / \text{кг} \cdot \text{К}$; γ – угол полураскрытия конвективной колонки, рад.

В сечении конвективной колонки средняя температура определяется так же, как и в первом подходе при использовании полуэмпирического метода при расчете по формуле (2.3.2.2).

2.3.3 Зона нагретого задымленного припотолочного слоя

Рассмотрим зону задымленного нагретого припотолочного слоя и упрощения реальной термогазодинамической картины пожара вводимые при расчете параметров припотолочного слоя. Во-первых, в каждый момент рассматриваемого времени припотолочный слой является плоскопараллельным перекрытием и, во-вторых, тепло- и массообмен между зоной холодного воздуха (помещения) и припотолочным слоем отсутствует.

Используя закон сохранения энергии для припотолочного слоя, составим обыкновенное дифференциальное уравнение, решая которое определяется высота нижней границы припотолочного слоя [103]:

$$\frac{dz_k}{d\tau} = - \frac{G_k}{\rho_0 F_{\Pi}} - \frac{Q_{\text{пож}}(1-\varphi)}{c_p \rho_0 T_0 F_{\Pi}} + \frac{T_2 G_m}{\rho_0 T_0 F_{\Pi}}, \quad (2.3.3.1)$$

где z_k – высота до нижней границы припотолочного слоя от открытой поверхности горючего вещества, м; F_{Π} – площадь потолка в помещении, м^2 ;

G_k – массовый расход газовой смеси, поступающей из конвективной колонки в припотолочную зону, кг/с; T_2 – среднеобъемная температура в припотолочном слое, К; ρ_2 – среднеобъемная плотность в припотолочном слое, кг/м³;

$$\varphi = \frac{Q_{w1} + Q_{w2} + Q_c + Q_f}{Q_{\text{пож}}} - \text{коэффициент теплопотерь.}$$

Решения дифференциального уравнения закона сохранения массы припотолочного слоя и уравнения состояния идеального газа позволяют определить среднеобъемную температуру и плотность в припотолочном слое:

$$V_2 \frac{d\rho_2}{d\tau} = G_k - G_m, \quad (2.3.3.2)$$

$$p_2 \approx p_0 = \rho_2 R T_2, \quad (2.3.3.3)$$

где p_2 – давление в зоне нагретого задымленного припотолочного слоя, Па; p_0 – давление наружного воздуха при $z = 0$, Па; R – газовая постоянная газовой смеси, Дж/(кг·К); $V_2 = F_n (H - z_k - \delta)$ – объем припотолочного слоя, м³; H – высота помещения, м; δ – толщина горючего вещества, м.

Закон сохранения массы i -го токсичного газа в зоне припотолочного слоя описывается уравнением следующего вида:

$$\frac{d(\rho_i V_2)}{d\tau} = \Psi_r L_i, \quad (2.3.3.4)$$

где ρ_i – парциальная плотность i -го токсичного газа, кг/м³; Ψ_r – массовая скорость газификации горючего материала, кг/с; L_i – удельный массовый коэффициент образования i -го токсичного газа, кг/кг.

Рассмотрим частный случай при $L_i = \text{const}$. Интегрируя уравнение (2.3.3.4), получаем формулу для определения парциальной плотности i -го токсичного газа в припотолочном слое в момент времени τ от начала пожара:

$$\rho_i = \frac{1}{V_2} \int_0^\tau \Psi_r L_i d\tau = \frac{L_i}{V_2} \int_0^\tau \Psi_r d\tau = \frac{L_i M_\tau}{V_2}, \quad (2.3.3.5)$$

где M_τ – масса горючего материала, выгоревшего к моменту времени τ .

В зависимости от типа пожарной нагрузки и условий распространения пламени по ее поверхности (или времени стабилизации ее горения) масса горючего материала, выгоревшего к моменту времени τ , определяется по формулам, рассмотренным в пособии [23].

2.3.4 Условия однозначности и метод численного решения

При использовании зонной математической модели задаются геометрические, физические, граничные и начальные условия, аналогичные рассмотренным при описании интегральной математической модели в главе 2 (п. 2.1). Условия однозначности представлены на рисунке 2.3.

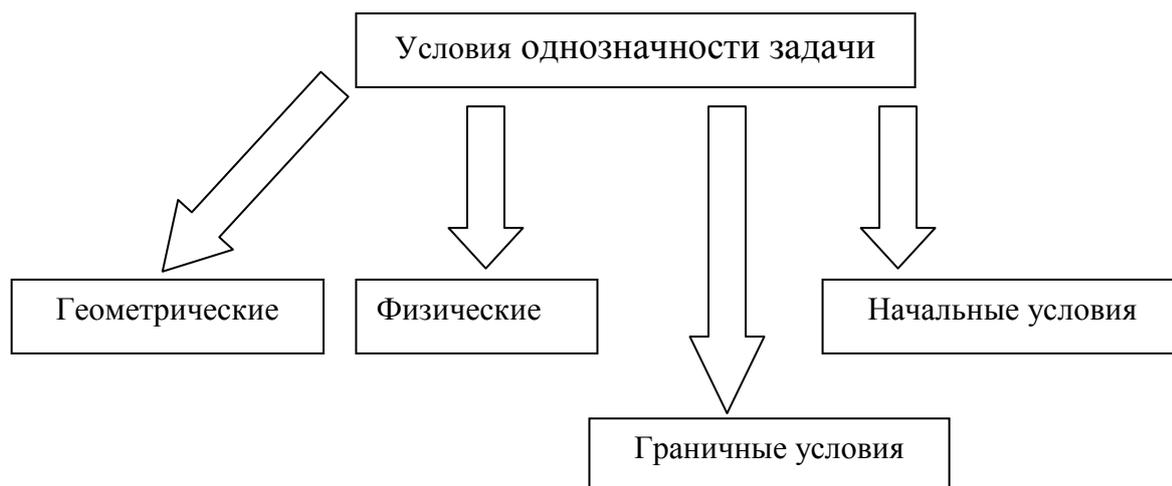


Рисунок 2.3 – Условия однозначности

При применении зонной математической модели задаются геометрические условия (подробно см. п. 2.1) [23]:

- размеры помещения (длина, ширина и высота);
- размеры открытых и вскрывающихся проемов;
- размеры открытой поверхности горючего материала;
- толщины ограждающих строительных конструкций.

К физическим условиям задачи относятся (подробно см. п. 2.1) [23]:

- теплофизические свойства газовой среды помещения, воздуха и огнетушащего вещества;

- теплофизические свойства материалов ограждающих конструкций (для каждого слоя при многослойных конструкциях);

- параметры горючего материала;

- температуры вскрытия $T_{в.п}$ разрушающихся под воздействием повышенной температуры проемов.

Для задания граничных условий для границ открытой термодинамической системы, при совпадении с внутренними поверхностями ограждающих конструкций и открытой поверхностью горючего вещества, определяются следующим образом [23]:

- находится величина массовой скорости газификации горючего вещества Ψ_r ;

- задается температура наружного воздуха T_B .

Для задания граничных условий на поверхностях открытой термодинамической системы, при совпадении границ с внутренними поверхностями открытых проемов, определяются [23]:

- величины массовых расходов вытекающей наружу газовой смеси $G_{ср}$ и притока наружного воздуха G_B ;

- величина теплового потока $Q_{пр}$, излучаемого через проемы наружу;

- температура наружного воздуха T_B .

Начальные условия (при $\tau = 0$) имеют вид [23]:

- к дифференциальному уравнению (2.3.3.1): $z_k = H - \delta$; $T_2 = T_0$;

- к дифференциальному уравнению (2.3.3.2): $\rho_2 = \rho_0$;

- к дифференциальному уравнению (2.3.3.4): $\rho_i = 0$.

Уравнения (2.3.3.1), (2.3.3.2) и (2.3.3.4) решаются численным методом Рунге – Кутта 4-го порядка точности.

При использовании зонной модели определяются следующие параметры теплообмена в зависимости от времени [23]:

- среднеобъемные значения давления, температуры, массовых концентраций продуктов горения, кислорода, азота и огнетушащего газа, а также оптической плотности дыма и дальности видимости в припотолочном слое помещения;
- нижнюю границу нагретого задымленного припотолочного слоя;
- массового расхода, средней температуры по поперечному сечению колонки и эффективной степени черноты всей газовой смеси;
- массового расхода истечения газов наружу через проемы в конструкции здания;
- тепловые потоки, отводящиеся в потолок, пол, стены и излучаемые через проемы в конструкциях здания.

2.4 Возможность применения результатов маломасштабных экспериментов к полномасштабному помещению

Найденные экспериментально показатели токсичности продуктов горения и величины удельных коэффициентов выделения токсичных газов при пожаре значительно отличающиеся друг от друга в различных базах данных (например, в работах [23, 24]), определяющиеся величинами плотностей токсичных газов и кислорода, а также температуры, получены, как правило, из результатов маломасштабных экспериментов [13, 18], которые не воспроизводят полномасштабных термогазодинамических условий протекания пожара в реальных помещениях. Поэтому определение данных параметров необходимо проводить в таких термогазодинамических условиях, чтобы величины опасных факторов пожара, такие как повышенная концентрация токсичных газов, пониженная концентрация кислорода и повышенная температура, были

идентичны смесям продуктов горения и воздуха, полученных в маломасштабной экспериментальной установке и полномасштабном помещении.

В силу того, что невозможно полностью выполнить положения теории подобия при переходе от маломасштабной установки (модели) к натурному помещению [26] необходимо установить связь между плотностями токсичных газов, выделяемых при горении веществ и материалов, и удельными коэффициентами их образования, а также с плотностью кислорода и температурой при сгорании одного и того же горючего материала в разных термогазодинамических условиях в помещениях с существенно отличающимися размерами.

Количественные характеристики выделяющихся при горении токсичных продуктов горения определяются химическим составом и концентрацией газообразных продуктов газификации твердых и жидких горючих веществ и материалов, а также термогазодинамическими условиями пожара [24, 68]. В настоящий момент данная проблема не решена ни теоретически, ни экспериментально из-за достаточно сложного химического состава современных строительных и отделочных веществ и материалов, а также сложности описания процесса физико-химических реакций, горения и газификации. Отсутствуют научно-обоснованные методики определения удельных коэффициентов выделения токсичных газов с учетом конкретных термогазодинамических условий пожара, таких как температура, концентрация кислорода и т. д.

В настоящей исследовательской работе поставлена задача теоретического и экспериментального исследования величин концентраций (парциальных плотностей) токсичных газов (на примере монооксида углерода) и температуры в смесях продуктов горения и воздуха, образующихся в маломасштабной экспериментальной установке, а также рассмотрения возможности переноса

экспериментально полученных результатов на реальное полномасштабное помещение.

Для решения данной задачи проанализируем термогазодинамические условия пожара при его свободном развитии в герметичном маломасштабном объеме. Схема пожара в герметичном маломасштабном объеме, используемая для определения показателя токсичности продуктов горения при стандартных испытаниях [7, 13, 18] рассмотрена и показана в п.2.2 на рисунке 2.1.

Рассмотрим математическую модель определения плотности токсичного газа для условно герметичного маломасштабного объема.

Законы сохранения массы и энергии газовой среды, а также массы токсичного газа и кислорода внутри герметичного объема имеют вид [23]:

$$V \frac{d\rho_{\text{cp}}}{d\tau} = \Psi_{\Gamma}, \quad (2.4.1)$$

$$\rho_{\text{cp}} c_v V \frac{dT_{\text{cp}}}{d\tau} = \eta \Psi_{\Gamma} Q_{\text{H}}^{\text{p}} (1 - \varphi), \quad (2.4.2)$$

$$V \frac{d\rho_{\Gamma, \text{cp}}}{d\tau} = \eta \Psi_{\Gamma} L, \quad (2.4.3)$$

$$V \frac{d\rho_{\text{O}_2, \text{cp}}}{d\tau} = -\eta \Psi_{\Gamma} L_{\text{O}_2}, \quad (2.4.4)$$

где T_{cp} – среднеобъемная температура газовой среды, К; V – объем помещения, м³; τ – время, с; c_v – удельная изохорная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); ρ_{cp} – среднеобъемная плотность газовой среды, кг/м³; $\rho_{\Gamma, \text{cp}}$ – среднеобъемная плотность токсичного газа, кг/м³; $\rho_{\text{O}_2, \text{cp}}$ – среднеобъемная плотность кислорода, кг/м³; Ψ_{Γ} – скорость газификации горючего материала, кг/с; L_{O_2} – удельный коэффициент потребления кислорода; Q_{H}^{p} – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; η – полнота сгорания; φ – коэффициент теплопотерь, равный доле теплоты, выделившейся в очаге горения

и поступающей в ограждающие конструкции помещения из всего объема помещения.

Удельную изохорную теплоемкость принимаем одинаковой для газовой смеси и воздуха [24, 26]: $c_v = 714$ Дж/(кг·К).

Среднеобъемная плотность токсичного газа через промежуток времени τ от начала горения, полученная после интегрирования уравнения (2.4.3), составляет:

$$\rho_{г.ср} = \rho_{г.в} + \frac{\eta L}{V} \int_0^{\tau} \Psi d\tau, \quad (2.4.5)$$

где $\rho_{г.в}$ – среднеобъемная плотность токсичного газа в воздухе, кг/м³.

Токсичный газ в воздухе перед пожаром отсутствует: $\rho_{г.в} = 0$.

Коэффициент пропорциональности между плотностью токсичного газа и отношением L/Q_H^p равен (в выражении (2.4.5) правую часть делим и умножаем на Q_H^p):

$$K = \frac{\eta Q_H^p}{V} \int_0^{\tau} \Psi d\tau. \quad (2.4.6)$$

Пренебрегаем суммарной массой продуктов газификации за полное время горения по сравнению с массой воздуха, находящегося внутри герметичного объема. Тогда $\eta \Psi \tau \ll \rho_{ср} V$, $\rho_{ср} = \rho_v$ (изохорный процесс), из решения уравнение (2.4.2) получаем:

$$T_{ср} = T_v + \frac{\eta Q_H^p (1 - \varphi)}{\rho_v c_v V} \int_0^{\tau} \Psi d\tau, \quad (2.4.7)$$

где ρ_v – плотность воздуха, кг/м³.

Учитывая уравнение (2.4.7) в (2.4.6), получаем величину коэффициента пропорциональности:

$$K = \frac{\rho_v c_v (T_{ср} - T_v)}{RT_v (1 - \varphi)} \quad (2.4.8)$$

ИЛИ

$$K = \frac{2,5 \cdot 10^5 (T_{\text{cp}} - T_{\text{B}})}{(1 - \varphi) T_{\text{B}}} \quad (2.4.9)$$

Среднеобъемная плотность кислорода из решения уравнения (2.4.4) равна:

$$\rho_{\text{O}_2\text{cp}} = \rho_{\text{O}_2\text{B}} - \frac{\eta L_{\text{O}_2}}{V} \int_0^{\tau} \Psi d\tau, \quad (2.4.10)$$

где $\rho_{\text{O}_2\text{B}}$ – плотность кислорода в воздухе, кг/м³.

Уравнение (2.4.10), используя выражение (2.4.7), можно привести к виду:

$$\rho_{\text{O}_2\text{cp}} = \rho_{\text{O}_2\text{B}} - \frac{p_{\text{B}} c_{\text{v}} (T_{\text{cp}} - T_{\text{B}}) L_{\text{O}_2}}{R(1 - \varphi) T_{\text{B}} Q_{\text{H}}^{\text{p}}} \quad (2.4.11)$$

Таким образом, в рассмотренной схеме (в работе [104] – получено для пяти схем) характерная плотность токсичного газа может быть описана следующей зависимостью:

$$\rho_{\text{CO}} = K \frac{L_{\text{CO}}}{Q_{\text{H}}^{\text{p}}}, \quad (2.4.12)$$

где ρ_{CO} – среднеобъемная плотность CO, кг/м³; K – коэффициент пропорциональности, Дж/м³; Q_{H}^{p} – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; φ – коэффициент теплопотерь; L_{CO} – удельный коэффициент выделения CO.

Выражение (2.4.12) преобразуем к виду:

$$\rho_{\text{CO}} = \rho^* L_{\text{CO}}, \quad (2.4.13)$$

где $\rho^* = K / Q_{\text{H}}^{\text{p}}$ – характерная плотность, зависящая только от схемы термогазодинамической картины пожара, теплофизических параметров пожара и горючего материала, кг/м³.

Полученные формулы показывают, что коэффициент пропорциональности не зависит от свойств горючего материала, размеров помещения и открытой поверхности горючего материала и является функцией

только трех параметров, характеризующих термодинамическую картину пожара:

$$K = f(T_{\text{cp}}, T_{\text{в}}, \varphi) \quad (2.4.14)$$

Полученная формула (2.4.13) не содержит геометрических размеров помещения и поверхностей горючих материалов и, следовательно, является справедливой в условиях пожара, как в маломасштабном, так и полномасштабном помещении.

Таким образом, становится возможным применение результатов маломасштабных экспериментов к полномасштабному помещению.

Кроме того, следует отметить, что в качестве характерных величин принимались такие показатели, как среднеобъемная температура и среднеобъемная плотность газовой среды помещения, а величина коэффициента теплопотерь является необходимым критерием равенства характерных концентраций токсичных газов в маломасштабной экспериментальной установке и реальном помещении.

Коэффициент теплопотерь в общем случае изменяется по времени [69], но не является постоянным.

Стандартные маломасштабные экспериментальные установки из-за существенных неоднородностей температурных и концентрационных полей необходимо модернизировать с тем, чтобы достоверно определять среднеобъемные температуры и концентрации токсичных газов с выходом на стационарный режим термогазодинамической картины.

Таким образом, использование выражения (2.4.13) и результатов маломасштабных экспериментов позволяет проводить расчет среднеобъемной плотности токсичного газа (на примере монооксида углерода) в полномасштабном помещении с учетом поправки на коэффициент теплопотерь.

2.5 Методика расчета распространения токсичных газов при пожаре в производственных зданиях ГЭС

Токсичные продукты горения при пожаре в зданиях и сооружениях распространяются довольно сложно, и процесс протекает в термогазодинамических условиях при одновременном воздействии большого количества возмущающих течение факторов (неизотермичность, турбулентность, излучение, протекание химических реакций, сжимаемость, продольный и поперечный градиенты давления, вдув/отсос на стенке, шероховатость стенки, кривизна поверхности, а также переход ламинарного режима течения в турбулентный) [26, 104].

При моделировании распространения токсичных газов необходимо учитывать такие параметры, как:

- естественная конвекция;
- работа систем дымоудаления и приточной вентиляции;
- работа систем пожаротушения.

Блок-схема методики расчета распространения токсичных газов при пожаре представлена на рисунке 2.4.

Для сбора исходных данных необходимо:

- проанализировав объемно-планировочные и конструктивных решения производственного здания ГЭС определить геометрию помещения;
- выявить пожарную нагрузку (горючие вещества и материалы), находящуюся в производственном здании и определить их параметры по базе типовой пожарной нагрузки;
- установить токсичные газы, с наибольшей вероятностью выделяемые при пожаре в производственном здании ГЭС;
- провести анализ особенностей технических систем, находящихся в производственном здании и обеспечивающих пожарную безопасность;
- определить численность и места нахождения обслуживающего персонала ГЭС.



Рисунок 2.4 – Блок-схема методики расчета распространения токсичных газов при пожаре

Исходя из результатов анализа различных вариантов развития пожара, выбирается наиболее неблагоприятный сценарий его развития (минимальная критическая продолжительность пожара). Построение дерева событий [11] в данной исследовательской работе не рассматривается.

После анализа особенностей объемно-планировочных и конструктивных решений производственных зданий ГЭС проводится выбор математической модели с учетом сферы использования математических моделей [10, 11, 26].

Для реализации выбранной математической модели устанавливается метод численного решения. При этом необходимо отметить, что данный метод

должен удовлетворять следующим критериям: применение полностью консервативных конечно-разностных схем, а также минимизация времени процесса вычислений и расчетов на ЭВМ.

Удельные массовые коэффициенты образования токсичных газов и потребления кислорода в данной работе находятся по разработанной методике испытаний, изложенной далее в главе 3 (п. 3.4) с последующей обработкой экспериментально полученных данных с использованием формулы для каждого момента времени:

$$L_{\text{CO}, \text{O}_2} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{CO}, \text{O}_2}}{d\tau}, \quad (2.5.1)$$

где V – внутренний объем установки, м³; Ψ – массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с; $\rho_{\text{CO}, \text{O}_2}$ – среднеобъемная плотность CO, O₂ кг/м³; τ – время, с.

Собранные исходные данные включают в разработанную программу для ЭВМ и проводят необходимые расчеты.

После проведения анализа полученных в результате расчетов результатов, необходимо определить время блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения в производственном здании ГЭС.

Таким образом, при практическом использовании предложенной методики расчета необходимо экспериментально определить зависимости среднеобъемных плотностей токсичных газов от температуры для конкретной пожарной нагрузки. После этого выполнить расчет зависимости среднеобъемной температуры (интегральная модель) или среднеобъемной температуры припотолочного слоя (зонная модель) от времени, в котором используются вышеуказанные зависимости с учетом поправки на коэффициент теплопотерь в полномасштабном помещении.

В случае применения стандартного подхода [23] экспериментально полученные величины удельных массовых коэффициентов образования токсичных газов L_i использовать при решении системы дифференциальных уравнений.

2.6 Выводы по второй главе

1. Исходя из поставленных задач исследования, необходимо правильно определить тип математической модели в целях более достоверного расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения. Кроме того, для поставленной задачи необходимо определиться с эмпирическими коэффициентами с использованием данных полученных экспериментально.

2. Обоснована возможность применения результатов маломасштабных экспериментов к полномасштабному помещению. Результаты маломасштабных экспериментов позволяют проводить расчет среднеобъемной плотности токсичного газа (на примере монооксида углерода) в полномасштабном помещении. В качестве масштабного фактора используется коэффициент теплопотерь в формуле (2.4.8) и (2.4.9).

3. Получена аналитическая зависимость для расчета среднеобъемной плотности монооксида углерода; показано, что вышеуказанная плотность не зависит от свойств горючего материала, размеров помещения и площади открытой поверхности горючего материала;

4. Предложенная методика расчета распространения токсичных продуктов горения с учетом экспериментально полученных зависимостей плотностей токсичных газов от среднеобъемной температуры позволяет более точно, чем существующие в настоящий момент времени методики, учесть реальные свойства процесса выгорания горючего материала при прогнозировании распространения токсичных продуктов горения в помещении.

Экспериментально полученные величины удельных массовых коэффициентов образования токсичных газов L_i можно использовать при применении стандартного подхода [23].

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИХ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ

3.1 Постановка задачи экспериментального определения зависимости плотности токсичного газа от температуры в маломасштабной экспериментальной установке

Схема процесса горения в условно герметичном маломасштабном объеме представлена в главе 2 п. 2.2 на рисунке 2.1.

В качестве токсичного газа будет рассматриваться монооксид углерода.

Необходимо в рассматриваемой маломасштабной экспериментальной установке получить экспериментальные и теоретические зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры газовой среды, экспериментальные зависимости от времени удельного коэффициента образования монооксида углерода и удельных массовых скоростей газификации горючего материала и провести анализ полученных соотношений.

Удельный коэффициент выделения монооксида углерода в каждый момент времени определяется по формуле

$$L_{\text{CO}} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{CO}}}{d\tau}, \quad (3.1.1)$$

где V – внутренний объем установки, м^3 ; Ψ – массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с ; ρ_{CO} – среднеобъемная плотность CO , кг/м^3 ; τ – время, с .

Для эксперимента используется интегральная модель расчета тепломассообмена.

Полученная формула (2.4.13), выражающая зависимость среднеобъемной плотности CO от среднеобъемной температуры, не содержит геометрических размеров помещения и поверхностей горючих материалов и, следовательно, является справедливой в условиях как маломасштабного, так и

крупномасштабного пожара в помещении. Этот вывод подтвержден в работе [68] на основе сопоставления результатов расчетов среднеобъемной плотности монооксида углерода, полученных для полномасштабного помещения с использованием аналитического решения интегральной модели и полной системы уравнений зонной математической модели, с экспериментальными данными по проточной схеме термогазодинамики пожара [68].

Исходные данные по выделению токсичных продуктов горения представлены, например, в учебном пособии [23] и в монографии [24]. Удельные коэффициенты выделения токсичных газов приняты постоянными, не зависящими от термогазодинамической картины развития пожара (концентрация кислорода, температура и т. д.).

Исходные данные принимаем из пособия [23]. Рассматриваются следующие горючие материалы [23]:

– *твердая горючая нагрузка:*

хвойные древесные стройматериалы: $Q_n^p = 13,8$ МДж/кг, $\psi_{уд} = 0,0063$ кг/(м²·с), $L_{CO} = 0,024$;

оболочка кабелей ПВХ: $Q_n^p = 25$ МДж/кг, $\psi_{уд} = 0,0244$ кг/(м²·с), $L_{CO} = 0,109$;

– *жидкая горючая нагрузка* (масло трансформаторное):

$Q_n^p = 41,9$ МДж/кг, $\psi_{уд} = 0,03$ кг/(м²·с), $L_{CO} = 0,122$,

где $\psi_{уд}$ – удельная массовая скорость выгорания горючего материала, кг/(м²·с), L_{CO} – удельный коэффициент образования окиси углерода; Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала. Критическое значение плотности монооксида углерода равно $\rho_{COкр} = 1,16 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ [23].

Средняя величина коэффициента теплопотерь ϕ определялась из расчета с использованием формулы (2.4.13), в которой $\rho_{CO} = \rho_{COкр}$, $T_{ср}$ равна температуре, при которой $\rho_{CO} = \rho_{COкр}$, Q_n^p принималась по работе [23], а L_{CO} находилась из результатов эксперимента осреднением по времени выражения (3.1.1).

3.2 Совершенствование стандартного метода испытаний на токсичность продуктов горения

Экспериментально найденные показатели токсичности продуктов горения, определяющиеся величинами плотностей токсичных газов и кислорода, а также температуры, получены, как правило, из результатов маломасштабных экспериментов [7, 13, 18], которые не воспроизводят полномасштабных термогазодинамических условий протекания пожара в реальных помещениях.

Полное выполнение положений теории подобия при переходе от маломасштабной модели к реальному полномасштабному помещению невозможно [26]. Однако можно определить условия частичного подобия, когда величины опасных факторов пожара (концентрации токсичных газов, пониженная концентрация кислорода и повышенная температура) были бы одинаковыми в смесях продуктов горения и воздуха, полученных в маломасштабной экспериментальной установке и полномасштабном реальном помещении.

Для нахождения условий частичного подобия необходимо установить связь между плотностями токсичных газов и удельными коэффициентами их образования, а также с плотностью кислорода и температурой при сгорании одного и того же горючего материала в разных термогазодинамических условиях в помещениях с существенно отличающимися размерами.

Количество выделяющихся токсичных газов определяется химическим составом и концентрацией газообразных продуктов газификации твердых и жидких горючих веществ и материалов, а также термогазодинамическими условиями пожара [24, 68]. В настоящее время эта проблема не решена с теоретической и с экспериментальной точек зрения из-за сложности физико-химических условий протекания процессов газификации и горения, а также неопределенности химического состава современных строительных материалов.

Научно-обоснованные методики расчета удельных коэффициентов выделения токсичных газов с учетом конкретных термогазодинамических условий пожара (температуры, концентрации кислорода и т.д.) отсутствуют.

Величины удельных коэффициентов выделения токсичных газов при пожаре значительно отличаются друг от друга в различных базах данных (например, в работах [23] и [24]), а сведения о теплофизических и химических показателях для многих современных материалов отсутствуют.

Рассмотрим результаты теоретического и экспериментального исследования величин концентраций токсичных газов (на примере монооксида углерода) и температуры в смесях продуктов горения и воздуха, образующихся в маломасштабной экспериментальной установке [7], модифицированной расположением на трех уровнях девяти термоэлектрических преобразователей в экспозиционной камере, и оценим возможность распространения полученных результатов на реальное полномасштабное помещение, т.е. определение условий частичного подобия.

Принимаем свободное развитие пожара в помещениях с существенно различающимися размерами при горении твердых и жидких горючих веществ и материалов.

Схема пожара в герметичном маломасштабном объеме, используемая для определения показателя токсичности продуктов горения при стандартных испытаниях [7] была рассмотрена в главе 2 (п. 2.2).

Необходимо определить:

– зависимость среднеобъемной плотности монооксида углерода от температуры;

– коэффициент пропорциональности между плотностью СО и отношением L/Q_n^p для различных значений коэффициента φ ,

где L – удельный коэффициент выделения токсичного газа; Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; φ – коэффициент теплопотерь.

Экспериментальная установка для определения показателя токсичности продуктов горения по ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.20 (рисунок 3.1) включает в себя камеру сгорания (1) вместимостью 3×10^{-3} м³, которая соединена с экспозиционной камерой (6) переходными рукавами (5, 18). В камере установлен экранированный электронагревательный излучатель (3) размерами 120×120 мм и держатель образца (2) размерами 120×120×25 мм [7].

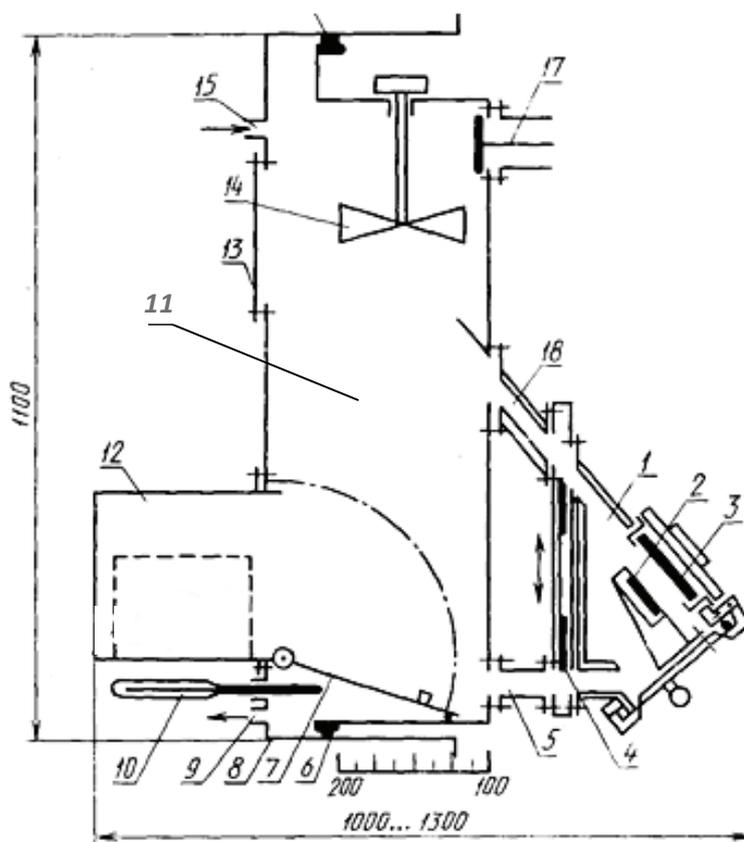


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки (модифицированная) [7]:

1 – камера сгорания, 2 – держатель образца, 3 – электронагревательный излучатель;
 4 – заслонки, 5, 18 – переходные рукава, 6 – стационарная секция экспозиционной камеры,
 7 – дверца предкамеры, 8 – подвижная секция экспозиционной камеры, 9, 15 – штуцеры,
 10 – термометр, 11 – экспозиционная камера с расположенными по объему на трех уровнях
 девяти термоэлектрических преобразователей; 12 – предкамера, 13 – предохранительная
 мембрана, 14 – вентилятор, 16 – резиновая прокладка, 17 – клапан продувки

Камера сгорания выполнена из листовой нержавеющей стали толщиной $2,0 \pm 0,1$ мм. Излучатель представляет собой нагревательную спираль,

размещенную в трубках из кварцевого стекла и расположенную перед стальным полированным отражателем с водяным охлаждением. Он закреплен на верхней стенке камеры под углом 45° к горизонтали. На боковой стенке камеры сгорания имеется окно из кварцевого стекла для наблюдения за образцом при испытаниях. На выходе из камеры сгорания размещены заслонки верхнего и нижнего переходных рукавов [7].

Экспозиционная камера состоит из стационарной и подвижной секций. По периметру стационарной секции имеется паз для надувной резиновой прокладки с рабочим давлением не менее 6 МПа. В верхней части камеры находится четырехлопастный вентилятор перемешивания диаметром 150 мм с частотой вращения 5 с^{-1} . На боковой стенке установлен клапан продувки. На торцевой стенке подвижной секции закреплены предохранительная мембрана, предкамера, штуцеры для подключения газоанализаторов, термометр для измерения температуры в нижней части камеры. Перемещение подвижной секции позволяет изменять объем экспозиционной камеры от 0,1 до 0,2 м³ [7].

Водоохлаждаемый датчик типа Гордона и регистрирующий прибор типа с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ для контроля плотности теплового потока с погрешность измерения не превышающей $\pm 8 \%$ [7].

Для непрерывного контроля состава газовой среды в экспозиционной камере используют газоанализаторы оксида углерода (ГИАМ-5М с диапазоном измерений от 0 до 1 %, допустимой погрешностью $\pm 2 \%$), диоксида углерода (ГИАМ-5М с диапазоном измерений от 0 до 5 %, допустимой погрешностью $\pm 2 \%$) и кислорода (МН 5130-1 с диапазоном измерений от 0 до 21 %, допустимой погрешностью $\pm 2 \%$) [7].

Для непрерывного контроля температуры в экспозиционной камере использовались девять термоэлектрических преобразователей с диапазоном измерений от -40 до $+1000$ °С и с погрешностью 6 % .

Термопары располагались на трех уровнях: 50 мм от пола установки, в середине камеры и 50 мм от потолка по три термопреобразователя, находящихся в одной плоскости.

Материалы испытывались в режиме пламенного горения при температуре испытания 650 °С (плотность падающего теплового потока составляла 55 кВт/м²).

Предварительно взвешенный образец материала, имеющий комнатную температуру, помещают в держатель образца (вкладыш).

Когда электронагревательный излучатель выходит на стабилизированный режим, тогда открываются заслонки переходных рукавов и дверца камеры сгорания. Вкладыш с образцом без задержки помещают в держатель образца, после чего дверцу камеры сгорания закрывают. С периодичностью 60 секунд от начала экспозиции материала фиксируются показания концентраций СО.

В качестве характерных величин принимались среднеобъемная температура и среднеобъемная плотность газовой среды в объеме камеры.

Исходные данные для численных экспериментов принимались следующие. Коэффициент теплопотерь принимался равным $\varphi = 0,3, 0,6$ и $0,9$. Начальные условия задавались следующими: $T_{\text{в}} = 293$ К; $p_{\text{в}} = 101300$ Па. Свойства рассматриваемых горючих материалов приведены в главе 3 (п. 3.1). Приведем результаты экспериментов и проведем их анализ.

Необходимо отметить, что величина коэффициента теплопотерь является необходимым критерием равенства характерных концентраций токсичных газов в маломасштабной экспериментальной установке и реальном помещении (как показано далее), т. е. критерием частичного подобия.

Коэффициент теплопотерь в общем случае изменяется по времени [54], а не является постоянным.

Практический интерес для задачи обеспечения безопасной эвакуации людей представляет область температур газовой смеси в диапазоне

от начальной до критической, равной для человека $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [23]. При температуре выше $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ человек гибнет, как правило, от теплового ожога.

Плотности оксида углерода в экспериментах получены для температур, близких к критической температуре. При стандартных испытаниях на биологических объектах температура не превышает $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако в условиях эвакуации людей температура может находиться в диапазоне от начальной до критической. Поэтому необходимо получить зависимость плотности CO от температуры в вышеуказанном диапазоне температур, что будет выполнено далее.

Тестирование полученных теоретических зависимостей на полученных опытных данных является оценочным, так как в данной исследовательской работе измерялась плотность CO только в одной точке.

Экспериментальные значения коэффициента K определялся из формулы (2.4.13) с использованием экспериментальных величин локальных плотностей и температур, а также оценочных величин L_{CO} и $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ из базы данных [23].

Зависимости от среднеобъемной температуры газовой среды коэффициентов пропорциональности K_i между среднеобъемной плотностью оксида углерода и отношением $L/Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ (уравнение (2.4.13)) и среднеобъемной плотности монооксида углерода, полученные для рассмотренной схемы, при горении изоляции силовых кабелей и промышленного масла приведены на рисунках 3.2–3.6.

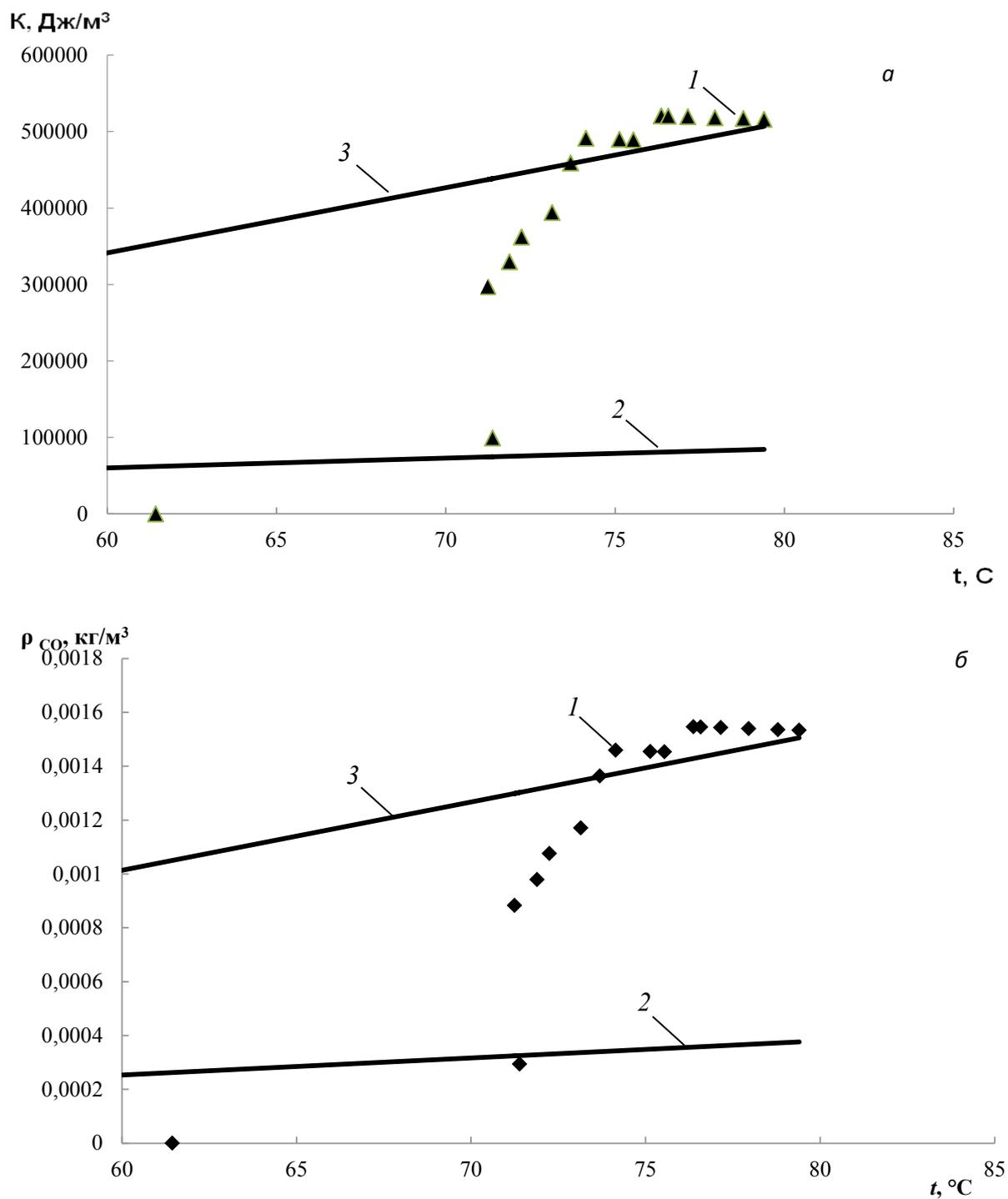


Рисунок 3.2 – Зависимость коэффициента пропорциональности K (а) и среднеобъемной плотности оксида углерода (б) от среднеобъемной температуры при горении кабеля ВВГНГ(А)-LSLTX-1 3×1,5 ОК (N.PE):

1 – экспериментальные значения; расчет по формуле (2.4.13); 2 – $\varphi = 0,6$; 3 – $\varphi = 0,9$

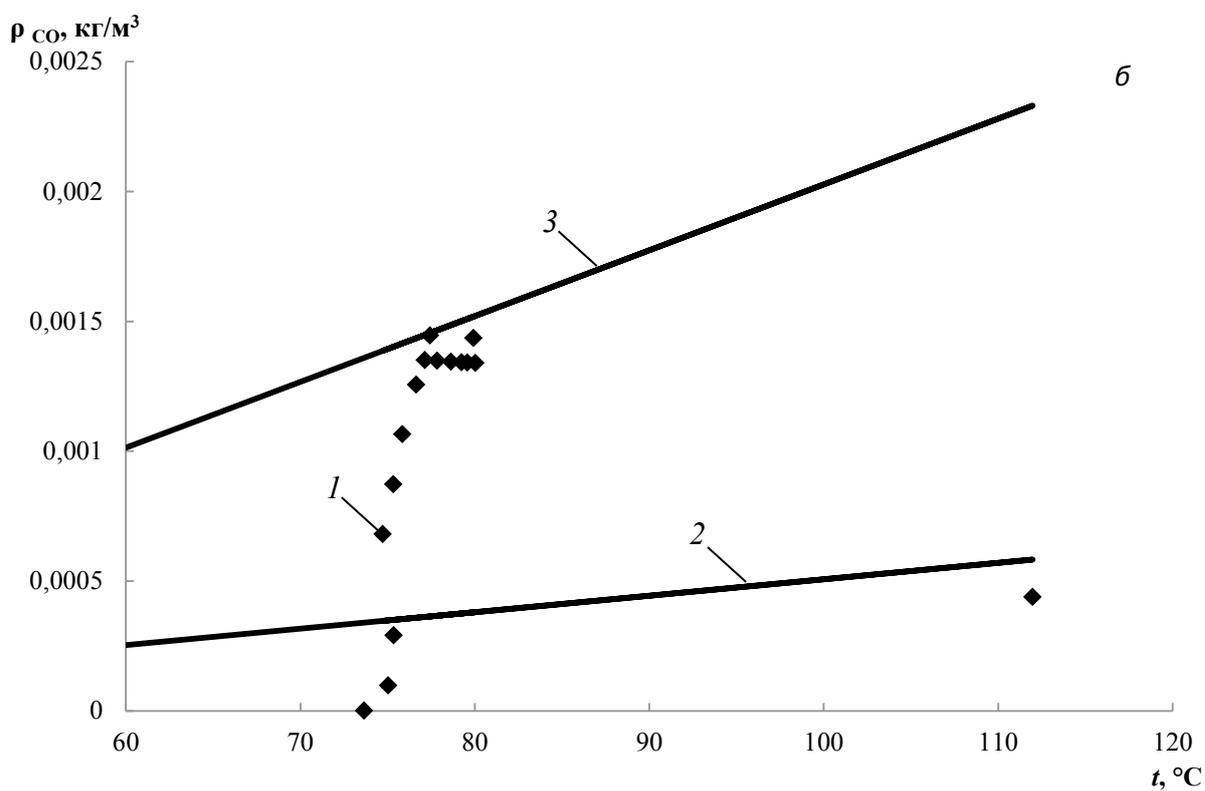
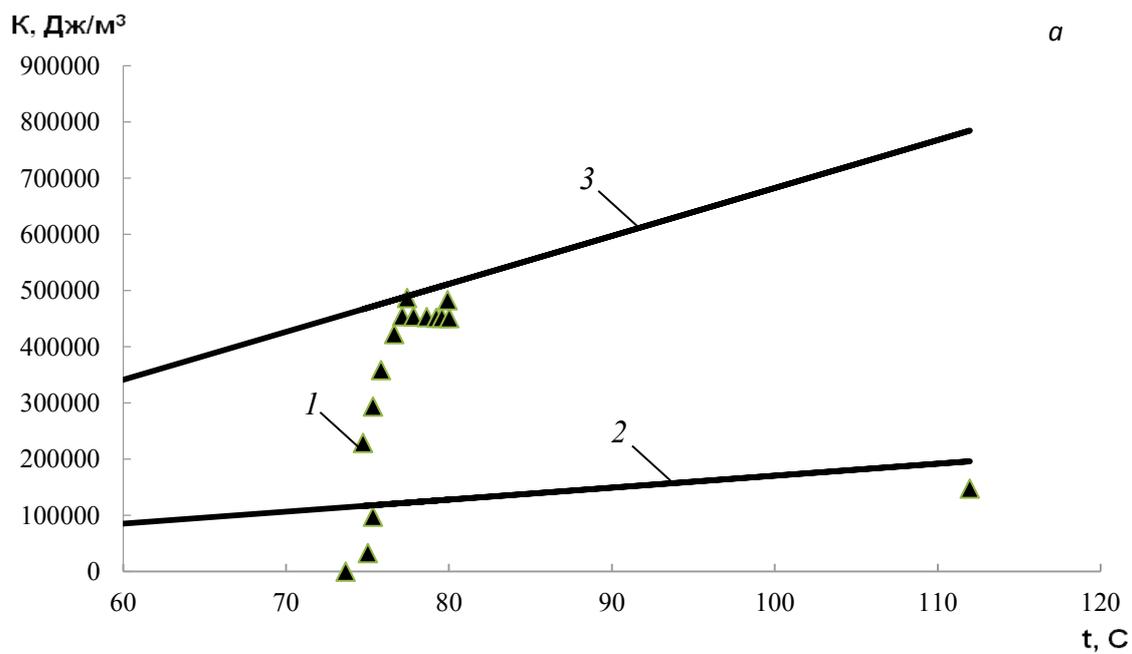


Рисунок 3.3 – Зависимость коэффициента пропорциональности K (а) и среднеобъемной плотности оксида углерода (б) от среднеобъемной температуры при горении кабеля

КПСНГ(А)FRLSLTX1×2×1:

I – экспериментальные значения; расчет по формуле (2.4.13);

2 – $\varphi = 0,6$; 3 – $\varphi = 0,9$

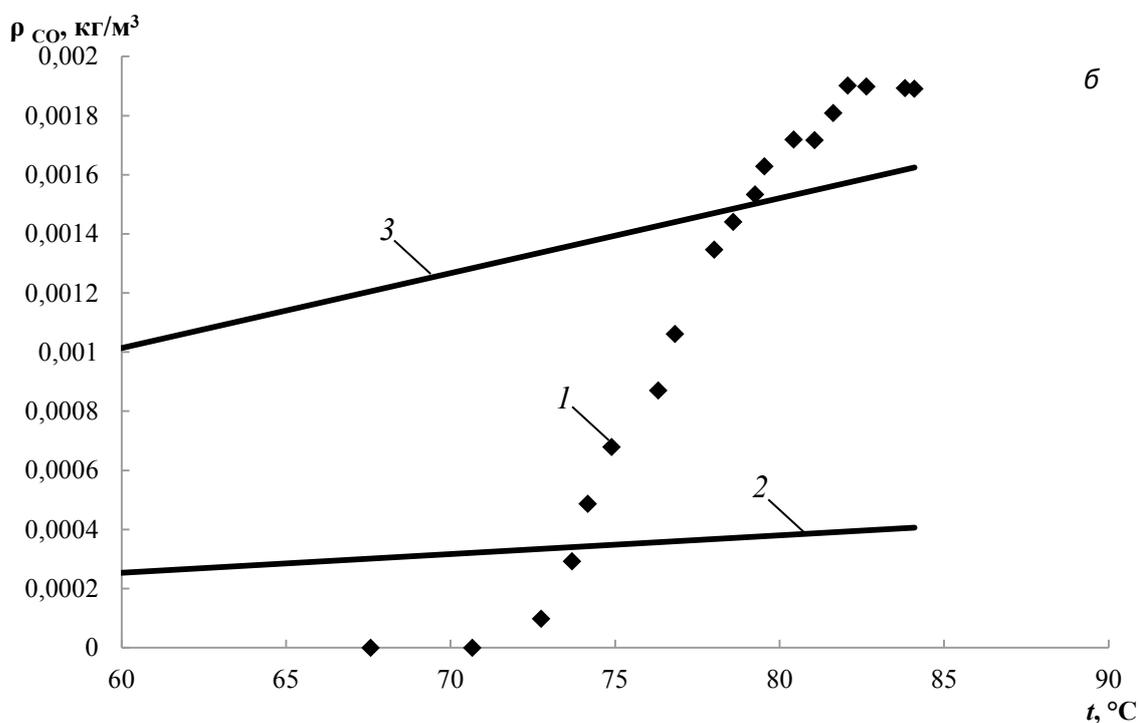
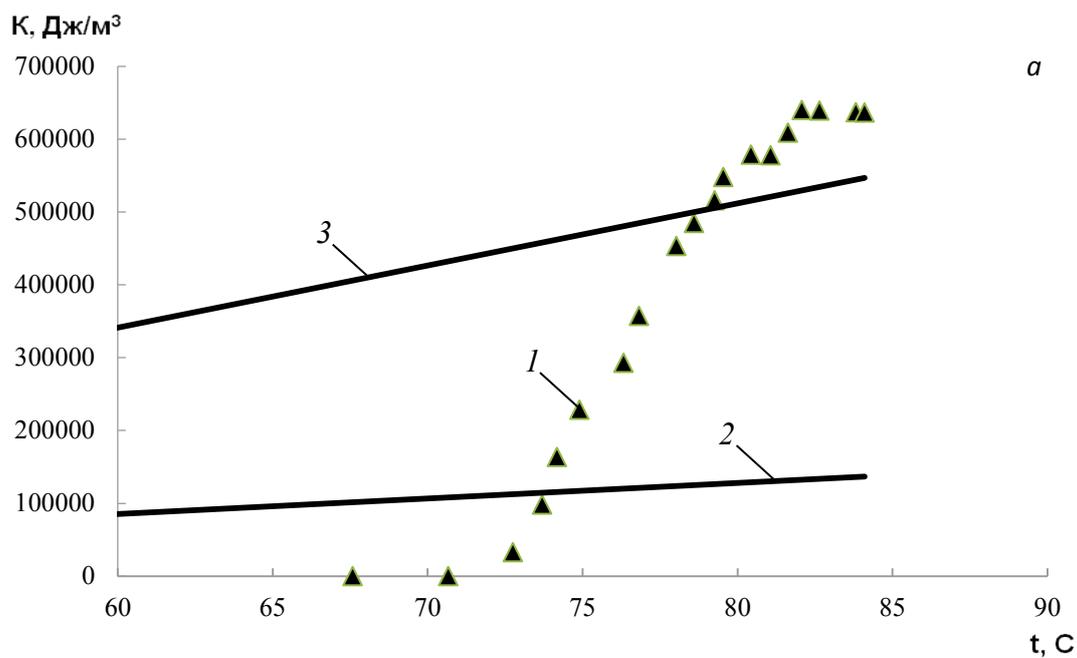


Рисунок 3.4 – Зависимость коэффициента пропорциональности K (а) и среднеобъемной плотности оксида углерода (б) от среднеобъемной температуры при горении кабеля ВВГНГ(А)-LSLTX-1 3×16МК (N.PE):

I – экспериментальные значения; расчет по формуле (2.4.13); 2 – $\varphi = 0,6$; 3 – $\varphi = 0,9$

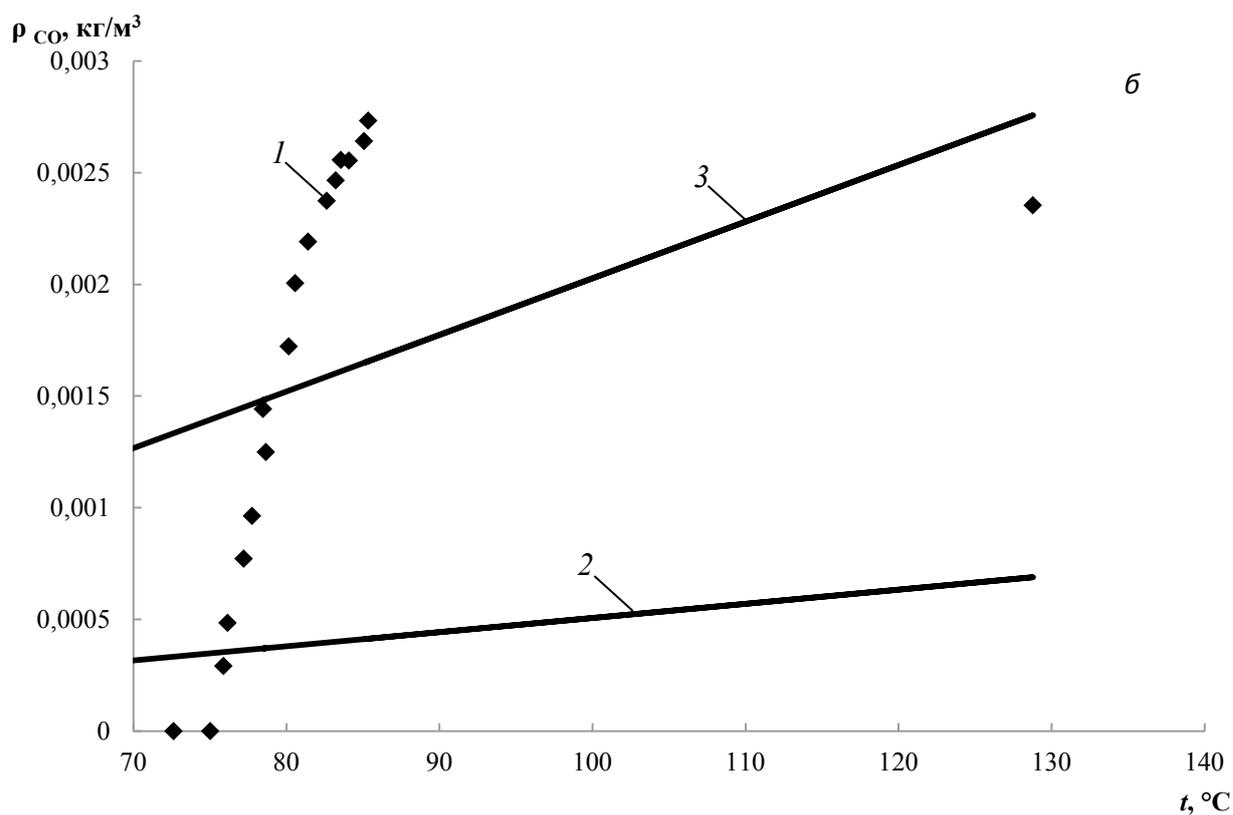
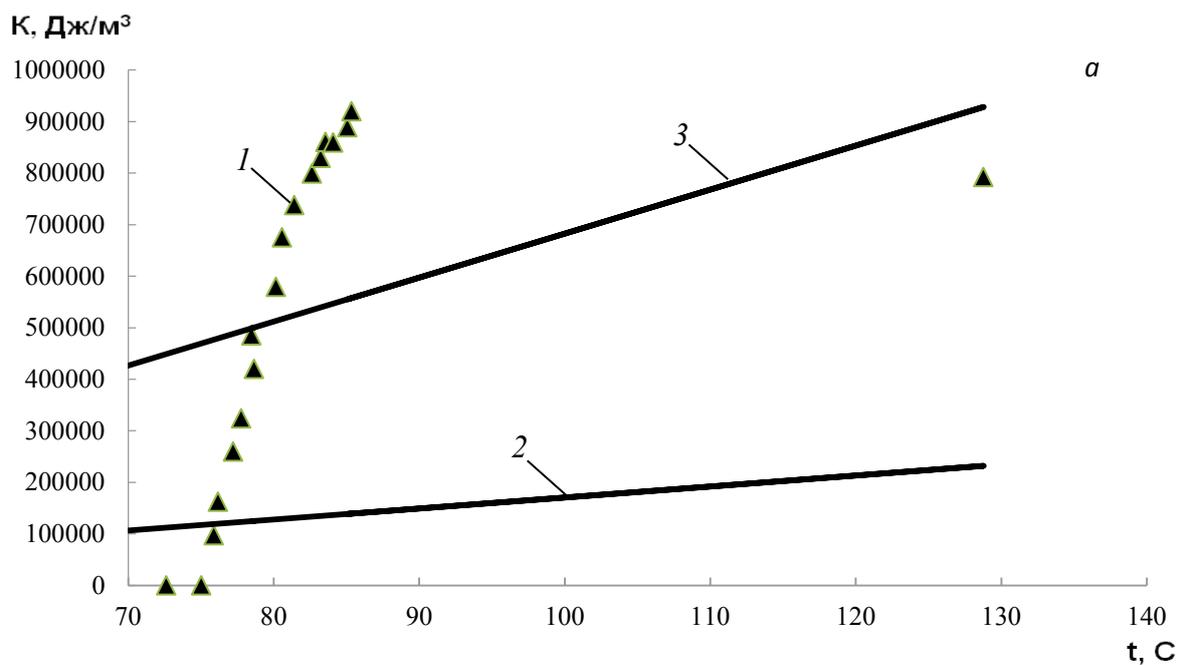


Рисунок 3.5 – Зависимость коэффициента пропорциональности K (а) и среднеобъемной плотности оксида углерода (б) от среднеобъемной температуры при горении кабеля ВВГНГ(А)-LSLTX-0.66 5×4ОК (N.PE):

I – экспериментальные значения; расчет по формуле (2.4.13); 2 – $\varphi = 0,6$; 3 – $\varphi = 0,9$

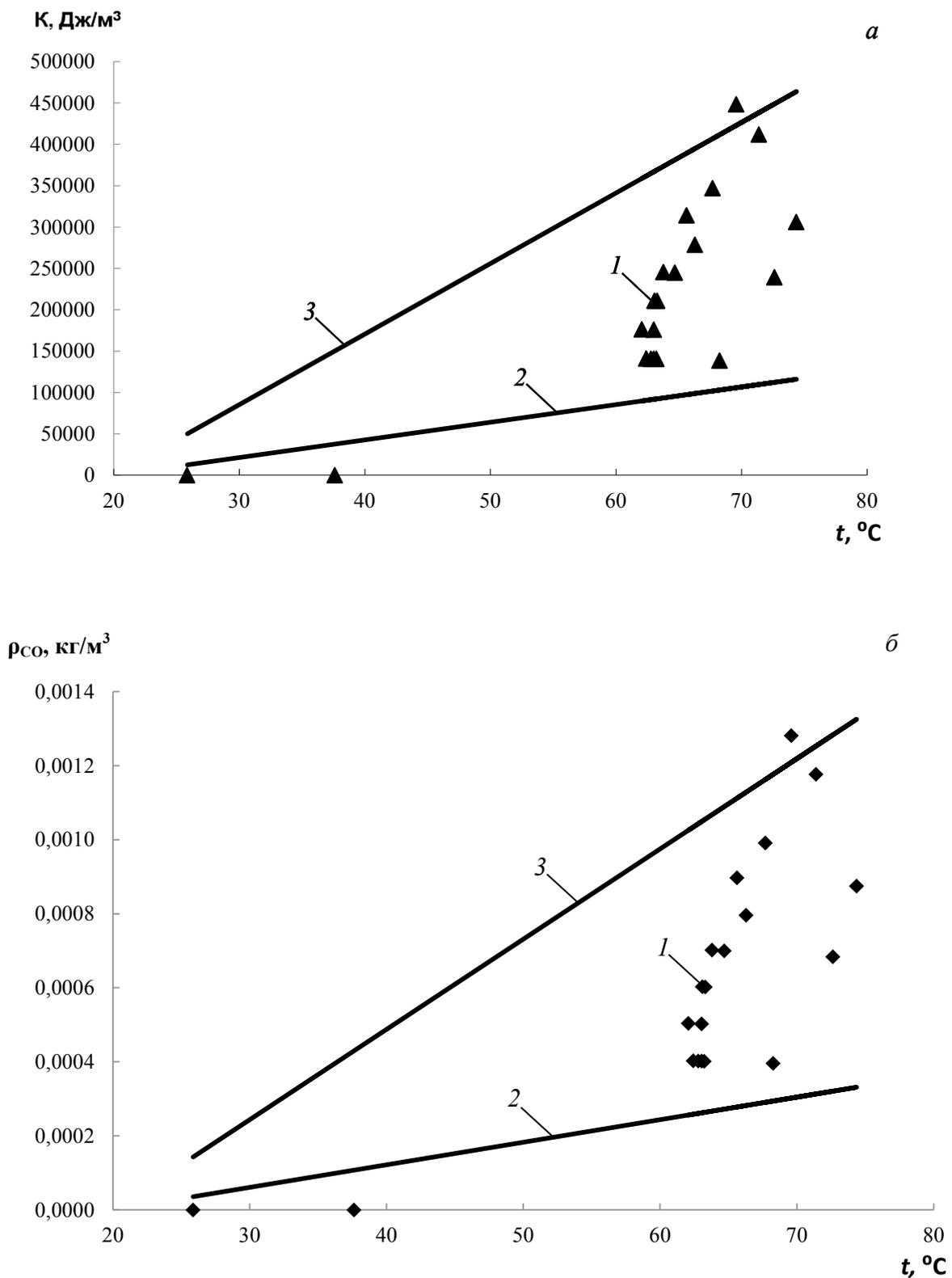


Рисунок 3.6 – Зависимость коэффициента пропорциональности K (а) и среднеобъемной плотности оксида углерода (б) от среднеобъемной температуры при горении масла трансформаторного (450 °С):

1 – экспериментальные значения; расчет по формуле (2.4.13); 2 – $\phi = 0,6$; 3 – $\phi = 0,9$

Из рисунков 3.2–3.6 видно, что теоретическое значение среднеобъемной плотности оксида углерода в крупномасштабном помещении при рассмотренных величинах коэффициента теплопотерь ($\varphi = 0,3$ и $\varphi = 0,6$) отличается от значения среднеобъемной плотности оксида углерода в маломасштабном объеме не более чем на 35%.

При одинаковых значениях $\varphi = 0,6$ среднеобъемная плотность оксида углерода в полномасштабном помещении больше примерно на 35 % плотности СО в испытательном стенде при одной и той же среднеобъемной температуре.

Однако из-за существенной неоднородности полей концентраций СО в полномасштабном помещении локальные концентрации СО будут существенно больше, чем среднеобъемные концентрации в экспериментальном объеме.

Результаты экспериментов показали существенную неоднородность температурного поля по объему газовой смеси при перемешивании с помощью вентилятора. Например, локальная температура через 3 мин от начала горения изоляции силового кабеля ВВГНГ(А)-LSLTX-1 3×1,5 ОК (N.PE) составляла:

- уровень 50 мм от пола установки: $t = 27,4$ °С;
- уровень середины камеры: $t = 143,1$ °С;
- уровень 50 мм от потолка: $t = 46,4$ °С.

Поэтому в качестве определяющей температуры для показателя токсичности необходимо брать некоторое характерное значение. В качестве характерной температуры необходимо взять среднеобъемную температуру. В этом случае можно будет использовать вышеприведенные математические модели, позволяющие оценить адекватность показателя токсичности в маломасштабной установке к соответствующему показателю в реальном полномасштабном помещении.

Результаты экспериментов показали существенный разброс экспериментальных данных по концентрациям СО при одинаковой средней температуре (рисунок 3.2–3.6). Например, при $t = 71,4$ °С за время измерений в случае горения изоляции силового кабеля ВВГНГ(А)-LSLTX-1 3×1,5 ОК (N.PE)

минимальная плотность CO равна $\rho_{CO} = 0,00029 \text{ кг/м}^3$, максимальная плотность составляет $\rho_{CO} = 0,00155 \text{ кг/м}^3$ (превышает минимальное значение в 5,34 раза). Это означает существенную нестационарность процесса.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что в стандартных маломасштабных экспериментальных установках даже при перемешивании образующейся смеси продуктов горения и воздуха с помощью вентилятора нестационарное температурное поле (следовательно, и поля концентраций токсичных газов из-за гидрогазодинамического подобия) является существенно неоднородным. Поэтому необходимо обосновать, какие величины температур и концентраций токсичных газов и в какие моменты времени необходимо использовать для определения показателя токсичности продуктов горения.

В стандартных герметичных маломасштабных экспериментальных установках измеренные величины концентраций токсичных газов и температур, используемые при определении показателя токсичности продуктов горения, не являются среднеобъемными и определены в недостаточном количестве произвольно расположенных точек внутри экспериментального объема. При этом термогазодинамический процесс внутри экспериментального объема является существенно нестационарным и неоднородным. Поэтому найденные значения показателя токсичности продуктов горения не могут достоверно характеризовать токсичные свойства продуктов горения.

В качестве определяющих величин температуры, концентраций токсичных газов и кислорода необходимо принимать соответствующие среднеобъемные значения.

Стандартные маломасштабные экспериментальные установки из-за существенных неоднородностей температурных и концентрационных полей необходимо модернизировать с тем, чтобы достоверно определять зависимости плотностей токсичных газов от среднеобъемных температур в диапазоне от начальной до критической.

Определение показателя токсичности продуктов горения на маломасштабных экспериментальных установках по данным химического анализа требует для получения газовой смеси, адекватной соответствующей смеси в полномасштабном помещении, дополнительных измерений коэффициента теплопотерь от газовой среды экспериментального объема к его ограждающим конструкциям.

При проведении экспериментального определения зависимости плотности токсичного газа от температуры в маломасштабной экспериментальной установке были проведены работы:

- выполнен анализ условий проведения экспериментов по определению токсичности продуктов горения при пожаре в помещении;
- получены аналитические решения для расчета среднеобъемной плотности токсичного газа и кислорода в характерных маломасштабных и полномасштабных помещениях;
- представлены результаты экспериментов в маломасштабной стандартной установке;
- проведено сопоставление результатов расчетов плотности монооксида углерода с экспериментальными данными;
- предложены методы повышения достоверности определения показателя токсичности продуктов горения веществ и материалов.

На основе анализа результатов выполненных исследований (в том числе и по работе [68, 101, 104]) необходимо совершенствование стандартного метода испытаний и переработка методики проведения в ней экспериментов.

Стандартные маломасштабные экспериментальные установки из-за существенных неоднородностей температурных и концентрационных полей необходимо модернизировать с тем, чтобы достоверно определять среднеобъемные температуры и концентрации токсичных газов с выходом на стационарный режим термогазодинамической картины.

3.3 Описание экспериментальной установки

В экспериментальной установке реализуется схема пожара в герметичном маломасштабном объеме, использующаяся при определении показателя токсичности продуктов горения при стандартных испытаниях [7] (см. схему на рисунке 2.1). Рассматриваем термогазодинамические условия пожара при его свободном развитии в помещениях с существенно различающимися размерами для твердых и жидких горючих веществ и материалов. В качестве токсичного газа будем рассматривать монооксид углерода.

Экспериментальная установка для определения пожарной опасности веществ и материалов при их термическом разложении представлена на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Общий вид установки для определения пожарной опасности веществ и материалов при их термическом разложении

Рассмотрим схему экспериментальной установки и методику проведения экспериментов (рисунок 3.8).

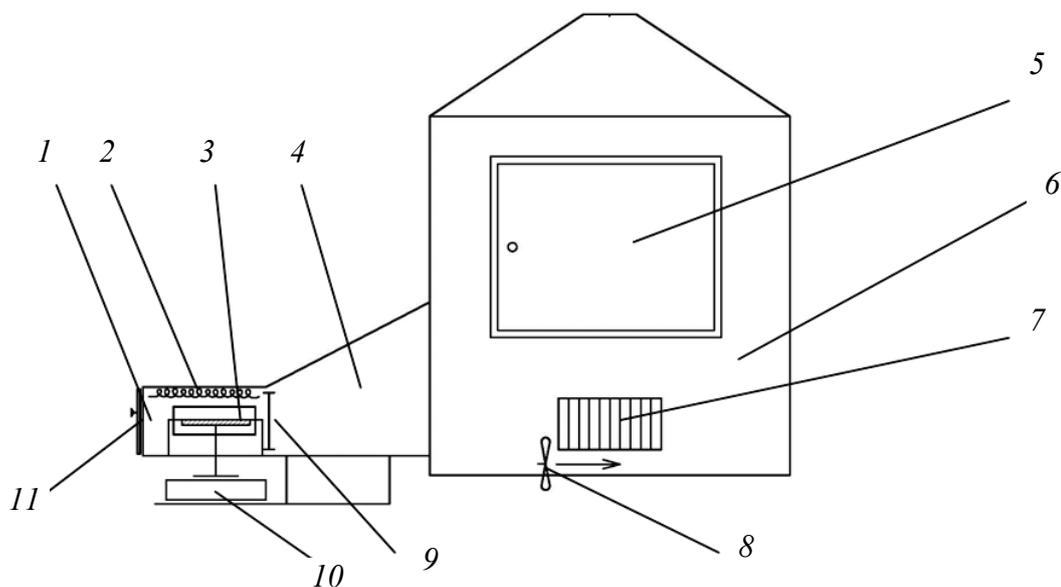


Рисунок 3.8 – Схема экспериментальной установки: 1 – камера сгорания, 2 – электронагревательный излучатель; 3 – держатель образца; 4 – переходной рукав; 5 – дверца экспозиционной камеры; 6 – экспозиционная камера; 7 – шибберные отверстия; 8 – вентилятор; 9 – заслонка (перегородка) переходного рукава; 10 – весы; 11 – дверца камеры сгорания

Камера сгорания (1) соединена с экспозиционной камерой (6) переходным рукавом (4), оснащенным устройством теплового блокирования. В камере (1) установлен экранированный электронагревательный излучатель (2) и держатель образца (3) на подвижной основе.

Камера сгорания (1) выполнена из нержавеющей стали толщиной $2,0 \pm 0,1$ мм объемом 7×10^{-3} м³. На боковой стенке камеры имеются оконное отверстие из кварцевого стекла предназначенное для визуального наблюдения за поведением образца при испытаниях, а также шибберные отверстия, для изменения режимов испытания.

Экспозиционная камера (6) представляет собой кубический объем ($0,5887$ м³) с конусообразной верхней частью. На двух боковых стенках установлены шибберные отверстия.

Держатель образцов (3) размещен на электронных весах с погрешностью не более ± 1 мг, расположенных на специальном подвижном столе.

Для непрерывного контроля температуры в экспозиционной камере использовались низко инерционные термопары в количестве 27 штук с диапазоном измерений от -40 до $+1100$ °С и погрешностью не более $\pm 1,1$ °С.

Для измерения плотности теплового потока, падающего на образец, подвергшийся испытаниям, используется водоохлаждаемый датчик типа Гордона и регистрирующий прибор с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ. Плотность теплового потока измеряется с погрешностью не превышающей $\pm 8\%$.

Для постоянного измерения состава газовой смеси в экспозиционной камере используется многоканальный газоанализатор, измеряющий концентрацию оксида углерода с диапазоном измерений от 0 до 1% об. и допустимой погрешностью $\pm 10\%$, диоксида углерода с диапазоном измерений от 0 до 5 % об. и допустимой погрешностью $\pm 10\%$, кислорода с диапазоном измерений от 0 до 21 % об. и допустимой погрешностью $\pm 10\%$ об.

3.4 Методика проведения экспериментов

Горючие материалы (твердая горючая нагрузка – хвойные древесные строительные материалы, оболочка кабелей ПВХ; жидкая горючая нагрузка – масло трансформаторное) испытывались в режиме пламенного горения. Пламенное горение образца при испытаниях обеспечивалось при температуре в камере 750 °С. При этом плотность падающего теплового потока составила 60 кВт/м².

Был выбран режим пламенного горения, так как при нем в отличие от режима тления происходит более быстрое распространение ОФП по помещению.

Предварительно кондиционированный и взвешенный образец материала помещался в специальный держатель образца (вкладыш).

После выхода электронагревательного излучателя на стабилизированный режим открывают дверцу камеры сгорания и помещают без задержки вкладыш с образцом в держатель образца в установке, после чего дверцу камеры сгорания закрывают, открывают заслонку переходного рукава и подвергают образец термическому разложению.

В процессе испытаний регистрируют показания концентраций CO (% об.), CO₂ (% об.), O₂ (% об.) с периодичностью 3 секунды, среднеобъемной температуры в экспозиционной камере T (°C), изменение массы образца при испытаниях Δm (г).

3.5 Экспериментальное обоснование точки отбора газовой смеси в объеме камеры

Для обоснования точки отбора газовой смеси в герметичном объеме камеры при моделировании распространения токсичных продуктов горения, исходя из теории частичного подобия, необходимо определить точку в объеме камеры, в которой температура в течение всего времени эксперимента совпадает с среднеобъемной. То есть экспериментально обосновать нахождения места отбора газовой смеси в герметичном объеме камеры, в которой плотность CO равна ее среднеобъемному значению. При этом предполагается, что в этом месте локальные значения всех параметров равны их среднеобъемным значениям.

Материалы испытывались в режиме пламенного горения. Пламенное горение образца при испытаниях обеспечивалось при температуре в камере 650 °C. При этом плотность падающего теплового потока составила 55 кВт/м². Предварительно взвешенный образец материала (древесина – сосна), имеющий комнатную температуру, помещают в держатель образца (вкладыш).

При достижении требуемой температуры в камере сгорания и выведения электронагревателя на стабилизированный режим открывают заслонку переходного рукава и дверцу камеры сгорания. Вкладыш с образцом без задержки помещают в держатель образца, после чего дверцу камеры сгорания закрывают. С периодичностью 30 секунд от начала экспозиции материала фиксируются показания концентраций CO (%), температуры в экспонируемой камере (27 термопар) T (°C), изменение массы образца при испытаниях Δm (кг).

Зависимость локальных температур (27 точек измерения) при горении древесины (сосна) в объеме экспонируемой камеры в зависимости от времени представлены на рисунке 3.9.

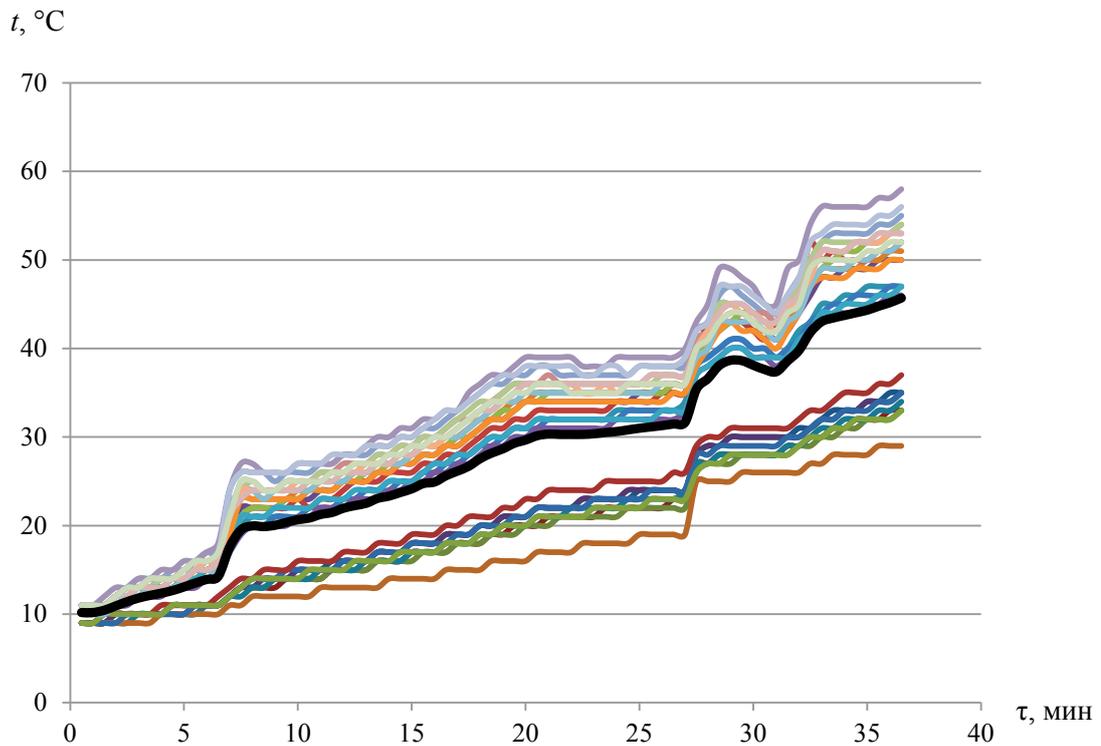


Рисунок 3.9 – Зависимость температуры от времени в экспозиционной камере экспериментальной установки при замкнутой схеме

Из полученных данных видно, что точка в объеме камеры, в которой температура в течение всего времени эксперимента совпадает с среднеобъемной, является термопара № 16 (на рисунке 3.9 представлена жирной черной линией). Из теории частичного подобия можем сделать вывод о том, что в данной точке плотность оксида углерода CO так же будет среднеобъемной. Следовательно, данная локальная точка при дальнейших исследованиях является точкой отбора газовой смеси в герметичном объеме камеры при моделировании распространения токсичных продуктов горения.

Испытания проводились как с перемешиванием, так и без него. Из рисунка 3.9 видно, что результаты экспериментов показали существенную неоднородность температурного поля по объему газовой смеси как при перемешивании с помощью вентилятора, так и без него.

Однако из-за существенной неоднородности полей концентраций CO в полномасштабном помещении локальные концентрации CO будут существенно больше, чем среднеобъемные концентрации в экспериментальном объеме.

Поэтому в качестве определяющей температуры для показателя токсичности продуктов горения необходимо брать некоторое характерное значение. В качестве характерной температуры необходимо взять среднеобъемную температуру. В этом случае можно будет использовать вышеупомянутые математические модели, позволяющие оценить адекватность показателя токсичности в маломасштабной установке к соответствующему показателю в реальном полномасштабном помещении.

По полученным зависимостям локальных и среднеобъемных температур от времени горения древесины (сосна), определено место расположения термопары с локальной температурой, совпадающей со среднеобъемной температурой в каждый момент времени. Оказалось, что место отбора проб газовой среды должно находиться на половине высоты экспериментальной камеры напротив переходного рукава установки.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что в стандартных маломасштабных экспериментальных установках даже при условии перемешивания образующейся смеси продуктов горения и воздуха с помощью вентилятора нестационарное температурное поле (следовательно, и поля концентраций токсичных газов из-за гидрогазодинамического подобия) является существенно неоднородным. Поэтому необходимо обосновать, какие величины температур и концентраций токсичных газов и в какие моменты времени необходимо использовать для определения показателя токсичности.

В качестве определяющих величин температуры, концентраций токсичных газов и кислорода следует принимать соответствующие среднеобъемные значения.

Определение показателя токсичности продуктов горения на маломасштабных экспериментальных установках по данным химического анализа требует для получения газовой смеси, адекватной соответствующей смеси в полномасштабном помещении, дополнительных измерений коэффициента теплотерь от газовой среды экспериментального объема к его ограждающим конструкциям.

3.6 Выводы по третьей главе

1. Результаты экспериментов проведенных по стандартному методу [7] показали существенную неоднородность температурного поля по объему газовой смеси при перемешивании с помощью вентилятора, т. е. температурное поле нестационарное (следовательно, и поля концентраций токсичных газов из-за гидрогазодинамического подобия). Кроме того, эксперименты показали существенный разброс экспериментальных данных по концентрациям СО при одинаковой средней температуре, что означает существенную нестационарность процесса. Таким образом, в качестве определяющих величин температуры, концентраций токсичных газов и кислорода необходимо принимать соответствующие среднеобъемные значения.

2. Показано, что стандартные маломасштабные экспериментальные установки из-за существенных неоднородностей температурных и концентрационных полей необходимо модернизировать с тем, чтобы достоверно определять зависимости плотностей токсичных газов от среднеобъемных температур в диапазоне от начальной до критической и использовать их для целей прогнозирования распространения токсичных продуктов горения при пожаре в помещении.

Выполненная постановка задачи экспериментального определения зависимости среднеобъемной плотности токсичного газа от среднеобъемной температуры в маломасштабной экспериментальной установке подтвердила справедливость предложенной методики.

3. Разработанная экспериментальная установка, реализующая схему пожара в условно герметичном маломасштабном объеме, позволяет усовершенствовать стандартный метод испытаний на токсичность продуктов горения по ГОСТ 12.1.044–89 п. 4.20 и устранить его основные недостатки. Полученные зависимости локальных и среднеобъемных температур от времени горения древесины (сосна), по которым определено место расположения термопары с локальной температурой, совпадающей со среднеобъемной температурой в каждый момент времени позволили

обосновать место отбора проб газовой среды в объеме камеры находящееся на половине высоты экспериментальной камеры напротив переходного рукава экспериментальной установки.

4. Разработанная маломасштабная экспериментальная установка для определения пожарной опасности веществ и материалов при их термическом разложении в условно герметичном объеме при горении твердой и жидкой горючей нагрузки устраняет выявленные существенные недостатки стандартного метода испытаний и позволяет определять параметры процесса горения веществ и материалов, необходимые для разработки предложенного метода расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ТОКСИЧНЫМИ ПРОДУКТАМИ ГОРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ ГЭС НА ПРИМЕРЕ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА

4.1 Исходные данные для математического моделирования распространения токсичных газов при пожаре в производственных зданиях ГЭС

Анализ пожарной нагрузки и различных сценариев развития пожара в производственных зданиях ГЭС показывает, что наиболее характерными и опасными являются (свойства горючих материалов определялись по типовой базе пожарной нагрузки [23]):

– *твердая горючая нагрузка:*

хвойные древесные стройматериалы: $Q_n^p = 13,8$ МДж/кг, $\psi_{уд} = 0,0063$ кг/(м²·с), $L_{CO} = 0,024$;

оболочка кабелей ПВХ: $Q_n^p = 25$ МДж/кг, $\psi_{уд} = 0,0244$ кг/(м²·с), $L_{CO} = 0,109$;

– *жидкая горючая нагрузка* (масло трансформаторное):

$Q_n^p = 41,9$ МДж/кг, $\psi_{уд} = 0,03$ кг/(м²·с), $L_{CO} = 0,122$;

где $\psi_{уд}$ – удельная массовая скорость выгорания горючего материала, кг/(м²·с); Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания МДж/кг; $\psi_{уд}$ – удельная скорость газификации горючего материала, кг/(м²·с); L_{CO} – удельный коэффициент образования оксида углерода.

При расчете полномасштабного помещения коэффициент теплопотерь ϕ принимался равным 0,6. В случае маломасштабного помещения (экспериментальная установка) значение ϕ определялось из расчета с использованием полной системы уравнений интегральной модели [23].

Начальные условия следующие: температура в помещении $T_0 = 20$ °С; давление в помещении (равно атмосферному) $p_0 = 101300$ Па; скорость движения воздуха $w_b = 0$ м/с.

Численные и натурные эксперименты проводились до температур газовой смеси внутри помещений, не достигающих значений критических для человека 70 °С [23].

В данной исследовательской работе на основе проведения экспериментов на созданной опытной маломасштабной установке выполнен анализ изменения величин удельных коэффициентов выделения CO по времени с начала горения и зависимостей средних величин этих коэффициентов от периода осреднения по времени.

В качестве токсичного газа будет рассматриваться монооксид углерода.

Критическое значение плотности монооксида углерода равно $\rho_{\text{CO-кр}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ [23].

Средняя величина коэффициента теплопотерь ϕ определялась из расчета с использованием формулы (2.4.13), в которой $\rho_{\text{CO}} = \rho_{\text{CO-кр}}$, $T_{\text{ср}}$ равна температуре, при которой $\rho_{\text{CO}} = \rho_{\text{CO-кр}}$, $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ принималась по работе [23], а L_{CO} находилась по результатам эксперимента путем осреднения по времени выражения (3.1.1).

4.2 Результаты экспериментальных исследований по определению основных характеристик образования и распространения монооксида углерода и их анализ

4.2.1 Удельный коэффициент образования монооксида углерода

Удельный коэффициент образования монооксида углерода в зависимости от времени с начала горения определяется по формуле

$$L_{\text{CO}} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{CO}}}{dt}, \quad (4.2.1.1)$$

где V – внутренний объем установки, м^3 ;

Ψ – массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с ;

ρ_{CO} – среднеобъемная плотность CO, кг/м^3 ;

τ – время, с.

На рисунке 4.1 показаны полученные зависимости от времени удельных коэффициентов образования монооксида углерода для различной пожарной нагрузки.

Зависимости среднеобъемной концентрации кислорода от времени приведены на рисунке 4.2 для горения хвойных древесных стройматериалов, трансформаторного масла и оболочки кабелей ПВХ.

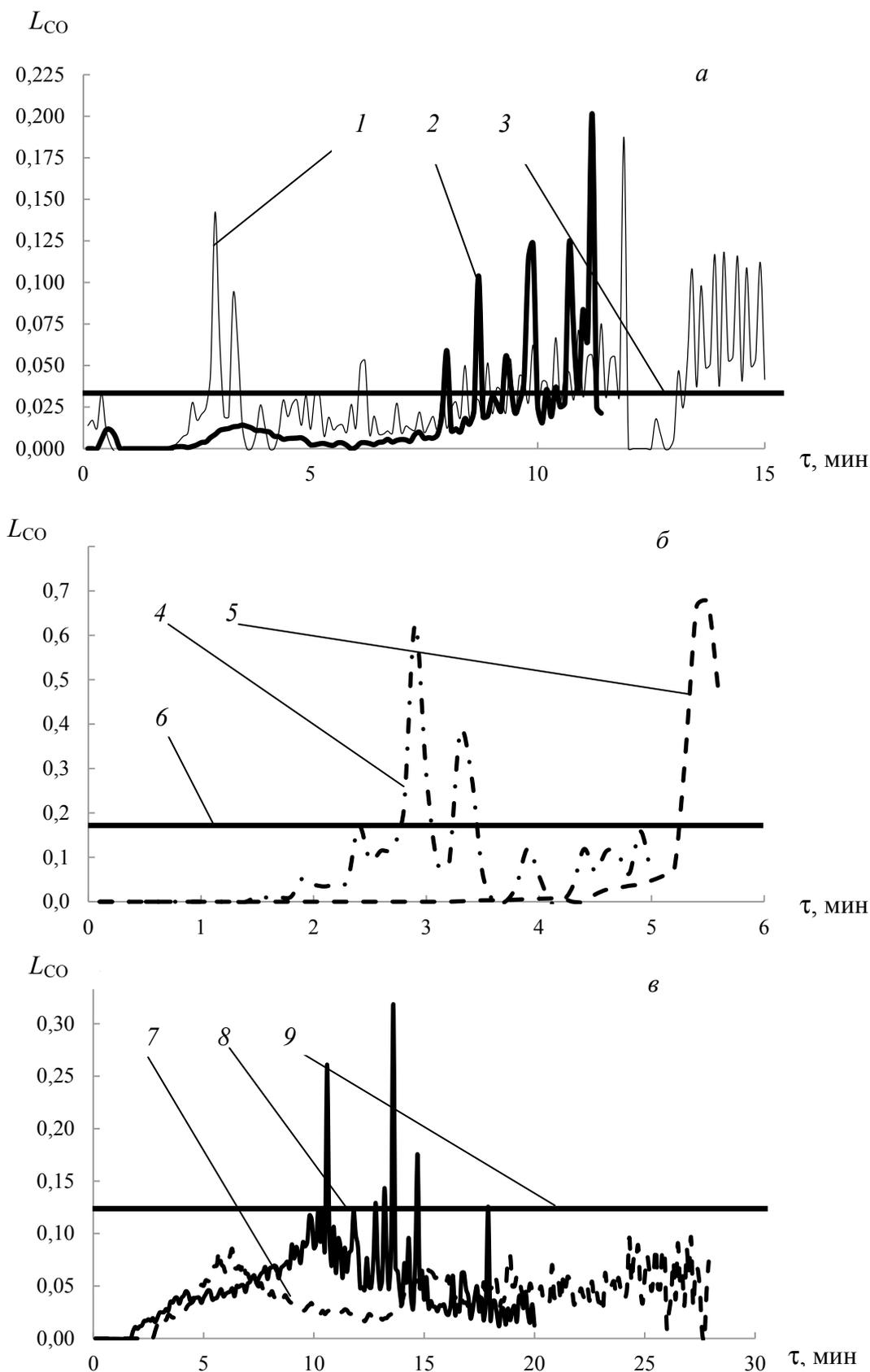


Рисунок 4.1 – Зависимости удельных коэффициентов образования СО от времени с начала горения: *a* – хвойные древесные строительные материалы: 1 – $F = 0,0072 \text{ м}^2$; 2 – $F = 0,0145 \text{ м}^2$; 3 – $L_{CO} = 0,024$ [23]; *б* – трансформаторное масло: 4 – $\delta = 1,15 \text{ мм}$; 5 – $\delta = 7,3 \text{ мм}$; 6 – $L_{CO} = 0,122$ [23]; *в* – оболочка кабелей ПВХ: 7 – $F = 0,0067 \text{ м}^2$; 8 – $F = 0,012 \text{ м}^2$; 9 – $L_{CO} = 0,109$ [23]

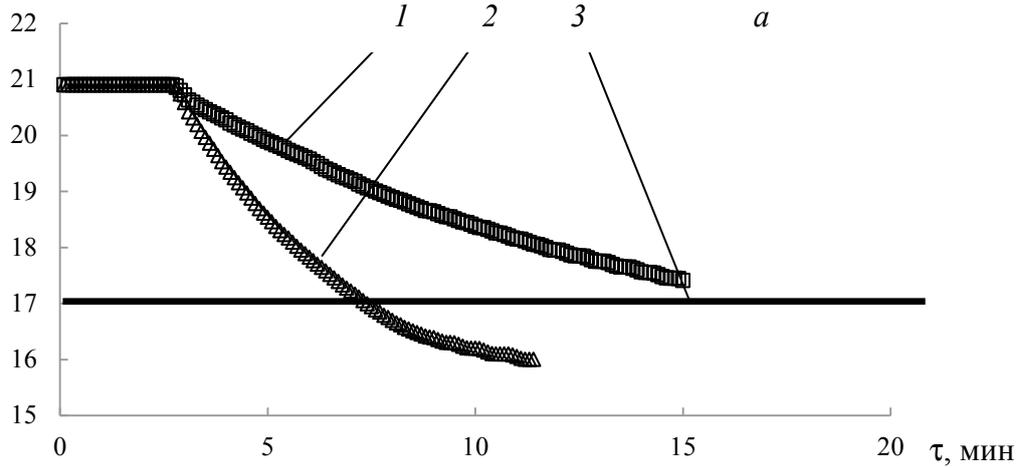
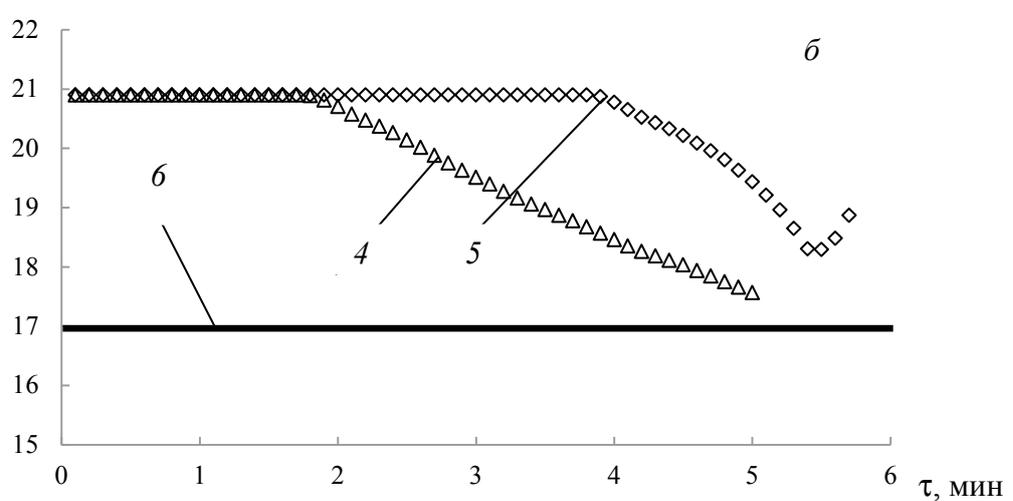
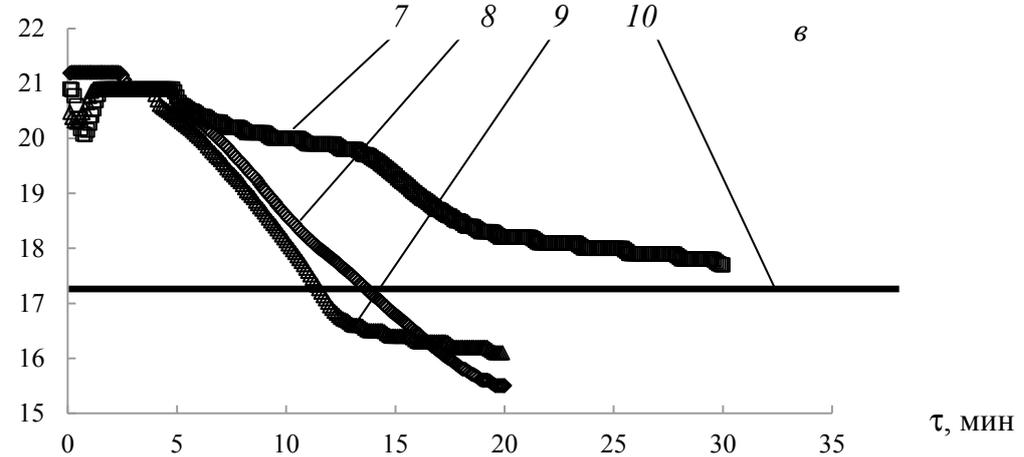
X_{O_2} % об. X_{O_2} % об. X_{O_2} % об.

Рисунок 4.2 – Экспериментальные зависимости среднеобъемной концентрации кислорода от времени: *a* – хвойные древесные стройматериалы:

1 – $F = 0,0072 \text{ м}^2$; 2 – $F = 0,0145 \text{ м}^2$; 3 – $X_{O_2, \text{кр}} = 17 \%$ [23];

б – трансформаторное масло: 4 – $\delta = 1,15 \text{ мм}$; 5 – $\delta = 7,3 \text{ мм}$; 6 – $X_{O_2, \text{кр}} = 17 \%$ [23];

в – оболочка кабелей ПВХ: 7 – $F = 0,0067 \text{ м}^2$; 8 – $F = 0,0059 \text{ м}^2$; 9 – $F = 0,012 \text{ м}^2$;

10 – $X_{O_2, \text{кр}} = 17 \%$ [23]; X_{O_2} – объемная концентрация кислорода;

$X_{O_2, \text{кр}}$ – критическое значение объемной концентрации кислорода, %

Средние по времени проведения экспериментов значения L_{CO} представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Средние по времени проведения экспериментов значения L_{CO}

Горючие материалы	Условия проведения эксперимента	Время осреднения L_{CO} , мин	ρ_{CO} в конце промежутка осреднения, кг/м ³	Средняя величина L_{CO}	L_{CO} из [23]
Хвойные древесные стройматериалы	$F = 0,0072 \text{ м}^2$	11,6	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,017	0,024
		15,0	$1,81 \cdot 10^{-3}$	0,029	
	$F = 0,0145 \text{ м}^2$	8,0	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0,006	
		10,9	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,011	
Оболочка кабелей ПВХ	$F = 0,0067 \text{ м}^2$	12,7	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,032	0,109
		27,9	$3,0 \cdot 10^{-3}$	0,028	
	$F = 0,012 \text{ м}^2$	7,6	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,035	
		20,0	$3,0 \cdot 10^{-3}$	0,05	
Масло трансформаторное	$F = 0,01 \text{ м}^2$ $\delta = 1,15 \text{ мм}$	3,5	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,042	0,122
		5,0	$2,0 \cdot 10^{-3}$	0,056	
	$F = 0,01 \text{ м}^2$ $\delta = 7,3 \text{ мм}$	5,4	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,012	
		5,7	$5,1 \cdot 10^{-3}$	0,061	

Анализ данных таблицы 4.1 показывает, что в зависимости от времени осреднения величина L_{CO} может изменяться в случае хвойных древесных стройматериалов в 2,63 раза, для оболочки кабелей ПВХ – в 1,8 раза и масла трансформаторного – в 5,1 раза.

Существенное отличие величин L_{CO} от представленных в работе [23] можно объяснить как в различии условий проведения экспериментов, так и тем, что химический состав оболочки кабелей ПВХ и масла трансформаторного в данной работе и в [23] может значительно отличаться друг от друга. Кроме того, в данных опытах не измерялась влажность хвойных древесных стройматериалов.

Необходимо отметить, что проведенные эксперименты на маломасштабной установке в условно герметичном объеме показали, что величины удельных коэффициентов выделения CO значительно изменяются во времени с начала горения и их средние величины существенно зависят от периода осреднения по времени испытаний.

Необходимо продолжение экспериментальных исследований в целях обоснования методики получения опытных значений удельных коэффициентов выделения монооксида углерода, являющихся исходными данными для математических моделей расчета динамики опасных факторов пожара в полномасштабном помещении. Испытания будут выполнены на маломасштабной установке как по условно герметичной, так и по проточной схемам течения [68].

4.2.2 Удельная массовая скорость газификации горючих материалов

Зависимости удельной массовой скорости газификации горючего материала от времени с начала горения приведены на рисунке 4.3.

Средние за время проведения экспериментов значения $\psi_{уд}$ составляли:

– *хвойные древесные стройматериалы:*

$$\psi_{уд} = 0,0072 \text{ и } 0,0068 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (\psi_{уд}=0,0063 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \text{ [23]});$$

– *оболочка кабелей ПВХ:*

данные не получены из-за неопределенности площади горения;

– *масло трансформаторное:*

$$\psi_{уд} = 0,022; 0,007 \text{ и } 0,018 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (\psi_{уд}=0,03 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \text{ [23]}).$$

Существенные различия в величинах $\psi_{уд}$ при горении трансформаторного масла в трех экспериментах объясняются разной толщиной слоя масла в кювете.

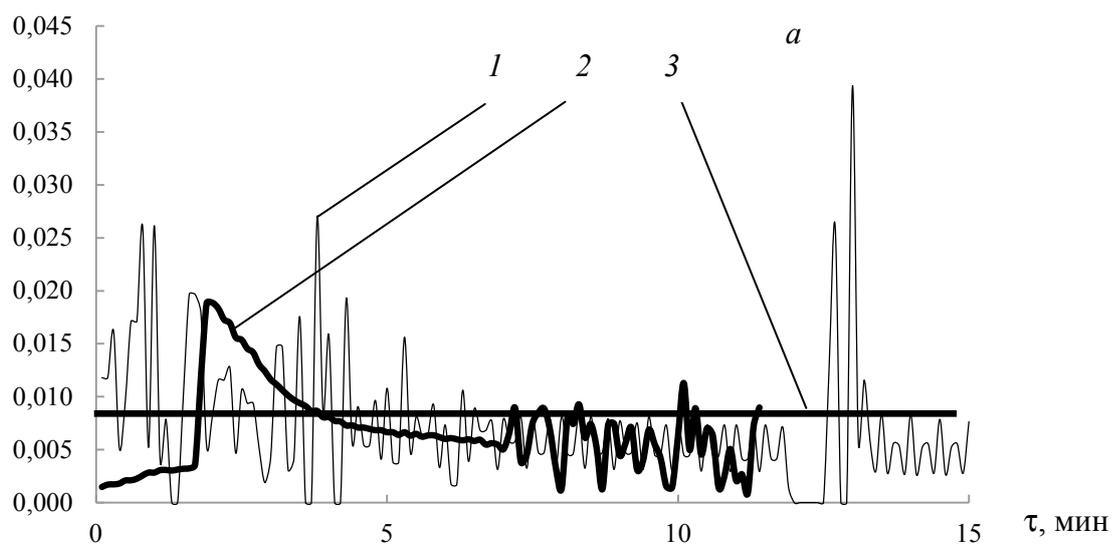
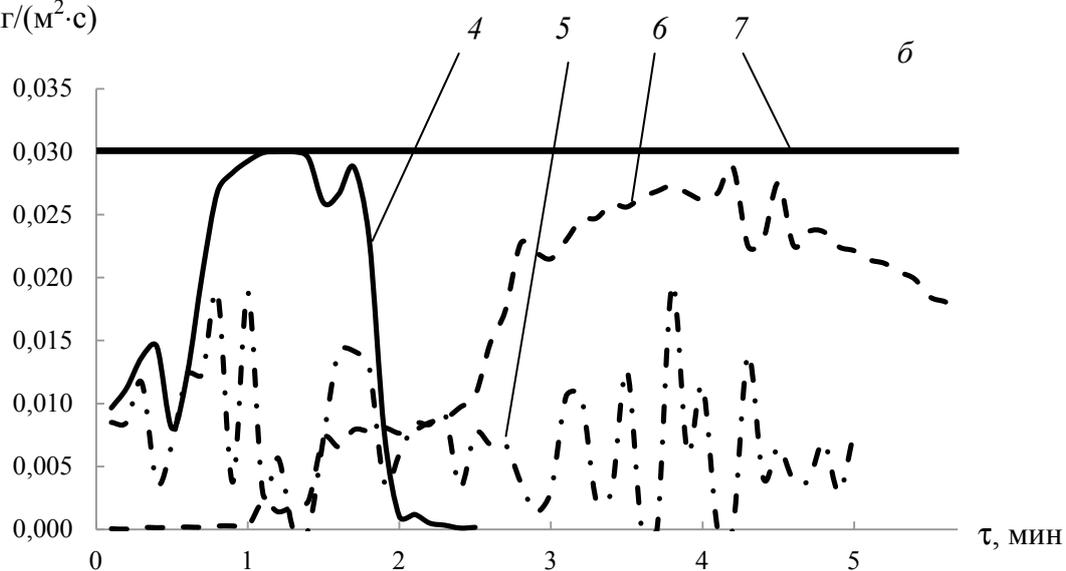
$\Psi_{уд}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

 $\Psi_{уд}, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$


Рисунок 4.3 – Зависимости удельной массовой скорости газификации горючего материала от времени с начала горения:

а – хвойные древесные стройматериалы: 1 – $F = 0,0072 \text{ м}^2$;

2 – $F = 0,0145 \text{ м}^2$; 3 – $\Psi_{уд} = 0,0063 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [23];

б – трансформаторное масло: 4 – $\delta = 2,85 \text{ мм}$;

5 – $\delta = 1,15 \text{ мм}$; 6 – $\delta = 7,3 \text{ мм}$; 7 – $\Psi_{уд} = 0,03 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [23]

4.2.3 Зависимость среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры

Зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от повышения среднеобъемной температуры представлены на рисунке 4.4 в случае горения хвойных древесных стройматериалов (сосна), на рисунке 4.5 – при горении трансформаторного масла и на рисунке 4.6 – оболочки кабелей ПВХ.

При расчете по формуле (2.4.13) величина Q_n^p принималась по данным работы [23], а среднее значение L_{CO} – по результатам проведенных экспериментов.

Результаты экспериментов показали, что величины удельных коэффициентов образования монооксида углерода (рисунок 4.1) и, соответственно, плотности CO (рисунки 4.4–4.6) незначительны на начальной стадии горения, когда концентрация кислорода практически не меняется (рисунок 4.2). При снижении концентрации O_2 выделение CO резко увеличивается и плотность CO быстро достигает ее критического значения (рисунки 4.4–4.6). Таким образом, допущение о постоянстве L_{CO} на начальной стадии пожара, не отражает реальной картины развития пожара, принятое в работах [23, 73–76].

Из рисунков 4.4–4.6 видно, что расчет по выражению (2.4.13) с использованием полученных из экспериментов средних значений L_{CO} и φ достаточно точно определяет среднеобъемную температуру в момент времени, когда $\rho_{CO} = \rho_{CO,кр}$.

Среднеобъемная плотность CO в начальный промежуток времени существенно меньше теоретического значения, полученного при допущении $L_{CO} = \text{const}$ (рисунок 4.4 (кривые 3 и 4), рисунок 4.5 (кривые 4–6), рисунок 4.6 (кривые 4–6)).

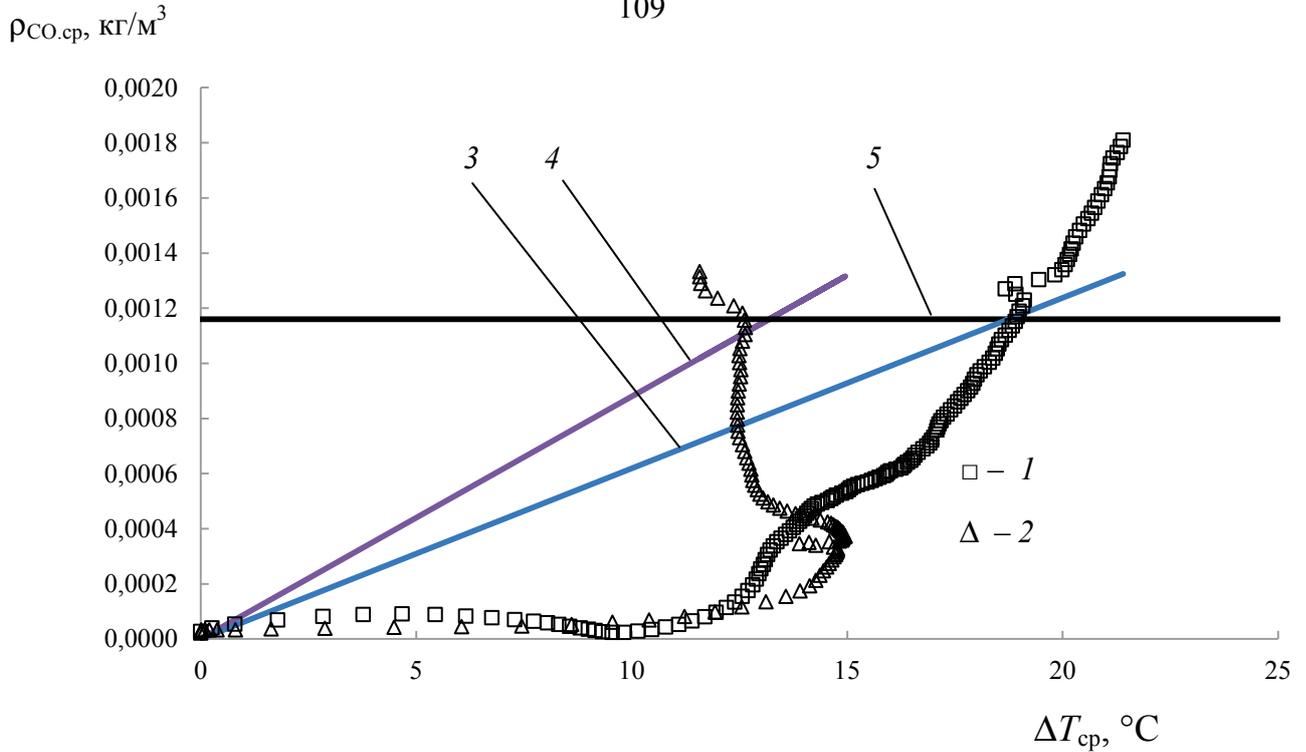


Рисунок 4.4 – Зависимости среднеобъемной плотности оксида углерода от повышения среднеобъемной температуры при горении хвойных древесных стройматериалов: экспериментальные значения: 1 – $F = 0,0072 \text{ м}^2$; 2 – $F = 0,0145 \text{ м}^2$; расчет по формуле (2.4.13):

$$3 - \varphi = 0,97, F = 0,0072 \text{ м}^2; 4 - \varphi = 0,98, F = 0,0145 \text{ м}^2; 5 - \rho_{\text{CO}_2, \text{кр}};$$

F – площадь поверхности образца, м^2

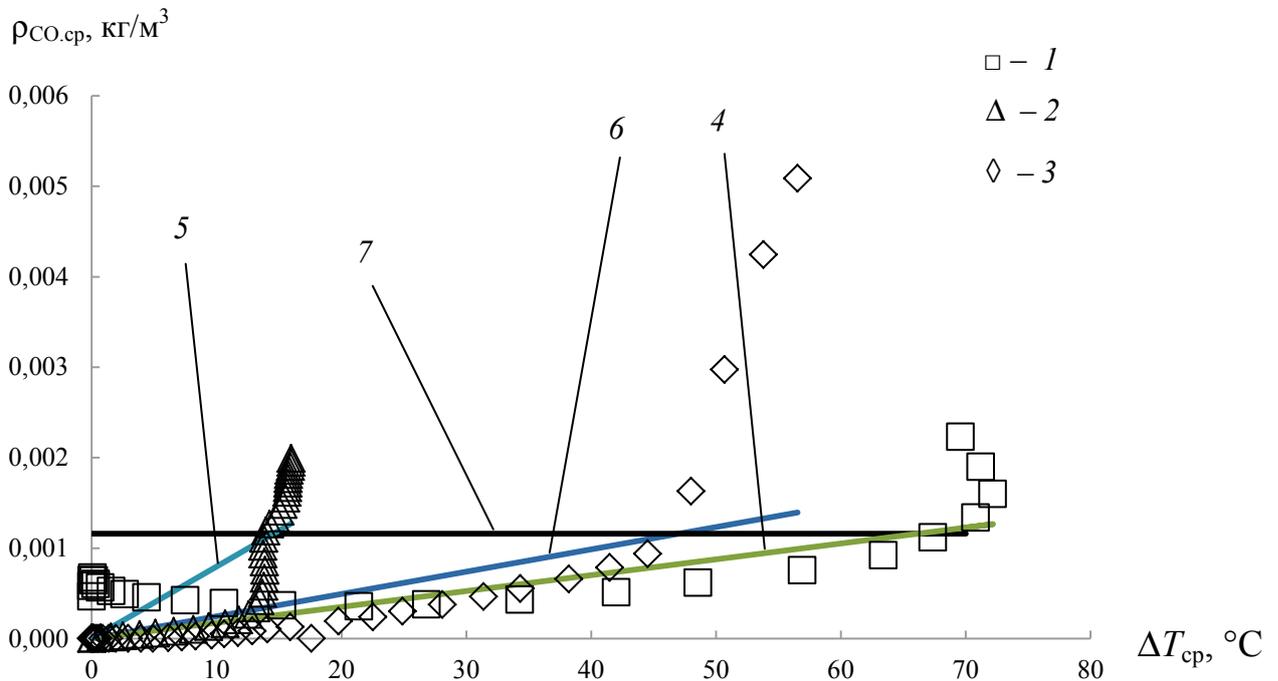


Рисунок 4.5 – Зависимости среднеобъемной плотности оксида углерода от повышения среднеобъемной температуры при горении трансформаторного масла ($F = 0,01 \text{ м}^2$): экспериментальные значения: 1 – $\delta = 2,85 \text{ мм}$; 2 – $\delta = 1,15 \text{ мм}$; 3 – $\delta = 7,3 \text{ мм}$; расчет по формуле (2.4.13): 4 – $\varphi = 0,88$; 5 – $\varphi = 0,97$; 6 – $\varphi = 0,90$; 7 – $\rho_{\text{CO}_2, \text{кр}}$; δ – толщина слоя трансформаторного масла в кювете, мм

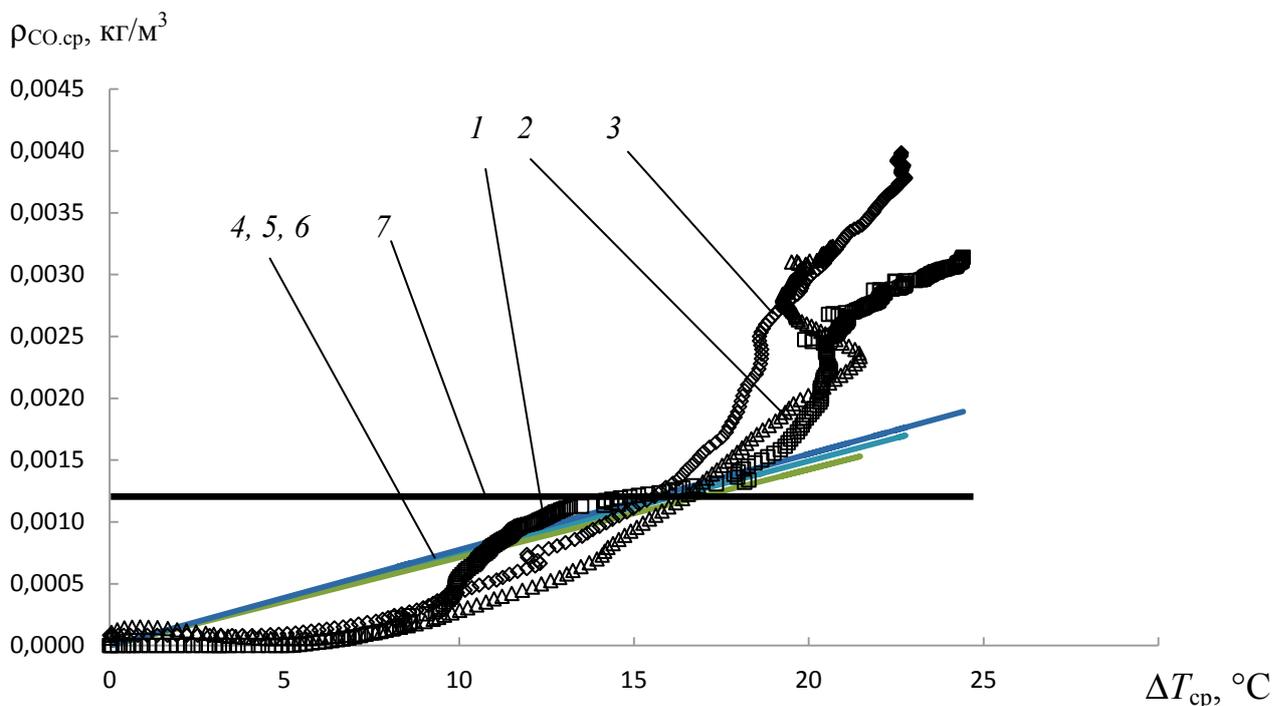


Рисунок 4.6 – Зависимости среднеобъемной плотности оксида углерода от повышения среднеобъемной температуры при горении оболочки кабелей ПВХ: экспериментальные значения: 1 – $\varphi = 0,97$, $F = 0,0067 \text{ м}^2$; 2 – $\varphi = 0,97$, $F = 0,0059 \text{ м}^2$; 3 – $\varphi = 0,98$, $F = 0,012 \text{ м}^2$;

расчет по формуле (2.4.13):

$$4 - F = 0,0067 \text{ м}^2; 5 - F = 0,0059 \text{ м}^2; 6 - F = 0,012 \text{ м}^2; 7 - \rho_{\text{CO,ср}}$$

4.3 Общий анализ результатов экспериментов

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены следующие результаты:

- разработана экспериментальная маломасштабная установка для определения пожарной опасности веществ и материалов при их термическом разложении при горении твердых и жидких горючих веществ и материалов;

- приведена аналитическая зависимость для расчета среднеобъемной плотности монооксида углерода. Показано, что вышеуказанная плотность не зависит от свойств горючего материала, площади открытой поверхности горючего материала и геометрических размеров помещения;

– экспериментально получены зависимости среднеобъемной плотности СО от среднеобъемной температуры, при горении древесины (сосна), масла трансформаторного и оболочки кабелей ПВХ;

– экспериментально получены зависимости удельных коэффициентов выделения монооксида углерода и удельных массовых скоростей газификации от времени испытаний при горении древесины (сосна), масла трансформаторного и оболочки кабелей ПВХ;

– сравнение результатов экспериментов с данными литературных источников, а также аналитическим решением интегральной модели показало достаточно хорошую сопоставимость;

– обнаружено, что на начальной стадии пожара, когда концентрация кислорода практически не меняется, величины удельных коэффициентов выделения и плотности СО незначительны, а далее при снижении концентрации O_2 выделение СО резко увеличивается и плотность монооксида углерода быстро достигает ее критического для человека значения;

– выявлено и показано, что при обработке экспериментально полученных данных, существенное влияние оказывает выбор периода осреднения по времени испытаний на значение величины удельного коэффициента выделения СО. При этом осредненная величина L_{CO} может изменяться в случае хвойных древесных стройматериалов в 2,63 раза, для оболочки кабелей ПВХ – в 1,8 раза и масла трансформаторного – в 5,1 раза.

4.4 Постановка задачи и исходные данные для проведения численных экспериментов по исследованию зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры при пожаре в производственном здании ГЭС

Численное исследование особенностей термогазодинамической и токсикологической картины пожара проведем для модельных взаимосвязанных помещений производственного здания филиала ОАО

«РусГидро» – «Нижегородская ГЭС» расположена по адресу: Нижегородская область, Городецкий район, г. Заволжье на территории общей площадью 8 гектар и на основании ее анализа проведем определение времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения. Для описания ГЭС и задания необходимых исходных данных используем отчет [118].

На территории расположено: основное здание (машинный зал) (рисунок 4.7), кабельный тоннель, кабельные галереи, масляное хозяйство, площадка силовых трансформаторов, административное здание.



Рисунок 4.7 – Общий вид машинного зала Нижегородской ГЭС [126]

Нижегородская ГЭС относится к Волжско-Камскому каскаду ГЭС (4-я ступень).

ГЭС находится вблизи г. Городец Нижегородской области, на расстоянии 434 км ниже по реке Волга от Рыбинской ГЭС.

Общий состав ГЭС состоит из [118]:

- здания гидроэлектростанции с ОРУ 110/220 кВ;
- бетонной водосливной плотины;

– семи земляных плотин и трех дамб общей длиной 18,6 км и максимальной высотой 40 м;

– судоходных однокамерных двухниточных шлюзов.

Связь гидроэлектростанции с энергосистемой осуществляется линиями электропередачи 220 и 110 кВ.

Здание машинного зала одноэтажное, но имеется технический этаж, в котором расположены помещения для обслуживания турбин. Здание I степени огнестойкости, стены железобетонные, перегородки железобетонные; перекрытия железобетонные; кровля рубероид по железобетону. Размеры в плане 264×63 метров. Из здания имеется 4 выхода (один – основной, один с тыльной стороны здания и два с торца здания на площадку силовых трансформаторов) [118].

В машинном зале расположены: гидроагрегаты (8 шт.), электрические двигатели, электрические силовые сборки, релейная аппаратура и вспомогательное оборудование (насосы, компрессора). Отопление: отсутствует. Вентиляция: естественная.

Электроснабжение: здание оборудовано электроснабжением, которое отбирает необходимую электроэнергию для собственных нужд. Отключение производит оперативный персонал.

Противопожарное водоснабжение: здание оборудовано стационарной системой пожаротушения из водохранилища через насосы и из отводящего канала.

Технологический процесс: выработка электроэнергии.

Здание машинного зала имеет сложную пространственную конструкцию, представляющую один пожарный отсек. Помещения расположены на нескольких уровнях: +82,5 м, +78,0 м, +74,0 м – и соединены между собой открытыми лестницами, технологическими и монтажными проемами.

Основное помещение машинного зала расположено на отметке +82,5 м. На данном уровне расположены верхние части турбинных агрегатов и маслonaполненные установки.

Геометрические размеры основных помещений здания ГЭС принимались в соответствии с проектно-конструкторской документацией (планы, продольные и поперечные разрезы здания).

Размещение пожарной нагрузки распределено по всему объему ГЭС и определено проектной документацией. Анализ пожарной нагрузки и вариантов развития пожара в основных помещениях здания ГЭС показывает, что наиболее опасными для людей типами горючей нагрузки являются (свойства горючих материалов определялись по типовой базе пожарной нагрузки [23]):

– *хвойные древесные стройматериалы:*

$$Q_n^p = 13,8 \text{ МДж/кг}, \psi_{уд} = 0,0063 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), w_n = 0,0585 \text{ м/с}, L_{CO} = 0,024;$$

– *кабельный подвал/лоток; кабели АВВГ+АПВГ:*

$$Q_n^p = 30,7 \text{ МДж/кг}, \psi_{уд} = 0,0244 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), w_n = 0,0071 \text{ м/с}, L_{CO} = 0,1295;$$

– *турбинное масло ТП-22:*

$$Q_n^p = 42,7 \text{ МДж/кг}, \psi_{уд} = 0,043 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), L_{CO} = 0,122;$$

где Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания МДж/кг; $\psi_{уд}$ – удельная скорость газификации горючего материала, кг/(м²·с); w_n – линейная скорость распространения пламени по поверхности твердого горючего материала, м/с; L_{CO} – удельный коэффициент образования оксида углерода.

При расчете полномасштабного помещения коэффициент теплопотерь ϕ принимался равным 0,6. В случае маломасштабного помещения (экспериментальная установка) значение ϕ определялось из расчета с использованием полной системы уравнений интегральной модели [23].

При определении необходимого времени эвакуации людей следует учитывать максимальные значения характеристик пожарной опасности веществ и материалов, находящихся в производственном здании ГЭС.

Размеры каждого из двух технологических отверстий, расположенных в перекрытии между машинным залом и кабельным тоннелем, равны 1×1 м.

Габаритные размеры основных помещений здания представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Габаритные размеры основных помещений здания ГЭС

№	Отметка	Наименование помещений	Размеры, м	Свободный объем, м ³
1.	+80,50 +82,50	Машинный зал	264×28×20	118272,0
2.	+75,500	Кабельная галерея	46×4,3×2,4	379,8

При расчете с использованием полевой модели рассматривались следующие сценарии развития пожара:

- горение упаковки на отметке +80,50;
- горение разлива турбинного масла площадью 10 м².

Автоматику систем пожаротушения, механической вентиляции и дымоудаления не учитываем (свободное развитие пожара в соответствии с данными, изложенными в работе [6]).

Начальные условия следующие: температура в помещении $T_0 = 20$ °С; давление в помещении (равно атмосферному) $p_0 = 101300$ Па; скорость движения воздуха $w_b = 0$ м/с.

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

Величины опасных факторов пожара, определенные с использованием трехмерной полевой модели пожара [119] определялись на уровне рабочей зоны, отстоящей от пола на высоту 2,0 м. Приняты более «жесткие» условия по расчету необходимого времени по сравнению с [6, 23]: вместо средней высоты органов дыхания 1,7 м используем 2,0 м.

Используемые программы расчета на ЭВМ, реализующие методы расчета динамики ОФП, имеют свидетельство об официальной регистрации программы в Федеральной службе РФ по интеллектуальной собственности (Роспатент) [119].

4.5 Результаты численных и натуральных экспериментов по исследованию зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры при пожаре в производственном здании ГЭС и их анализ

Численные и натурные эксперименты проводились до температуры газовой смеси внутри помещений, не превышающей 70 °С (критического значения для человека [23]).

Результаты расчета динамики опасных факторов пожара: поля температур, оптической плотности дыма, скоростей, схемы течения, а также парциальной плотности оксида углерода в продольном сечении машинного зала, проходящем через место возгорания упаковки, в случае горения в машинного зале с использованием полевой модели [119] представлены на рисунках 4.8–4.16.

Поля температур, оптической плотности дыма, скоростей, схемы течения, а также парциальной плотности оксида углерода в продольном сечении машинного зала, проходящем через место возгорания турбинного масла, в случае горения в машинного зале с использованием полевой модели [119] представлены на рисунках 4.8–4.16.

Для иллюстрации полученных результатов на рисунках 4.17 и 4.18 приведены зависимости температуры задымленного нагретого припотолочного слоя газов (T) и парциальной плотности оксида углерода (ρ_{CO}) в этом слое от времени с начала пожара в машинном зале при различных пожарных нагрузках.

Зависимости высоты нижней границы задымленного нагретого припотолочного слоя газов и температуры задымленного нагретого припотолочного слоя газов от времени с начала пожара с использованием полевой модели развития пожара [119] при пожарной нагрузке – теплоноситель – турбинное масло ТП-22 – представлены на рисунке 4.19.

Зависимости среднеобъемной плотности СО от среднеобъемной температуры для случая горения оболочек кабелей ПВХ (кабельная галерея) и трансформаторного масла (машинный зал) в случае расчета по формуле (2.4.13) и использовании полевой модели [119] приведены на рисунке 4.20.

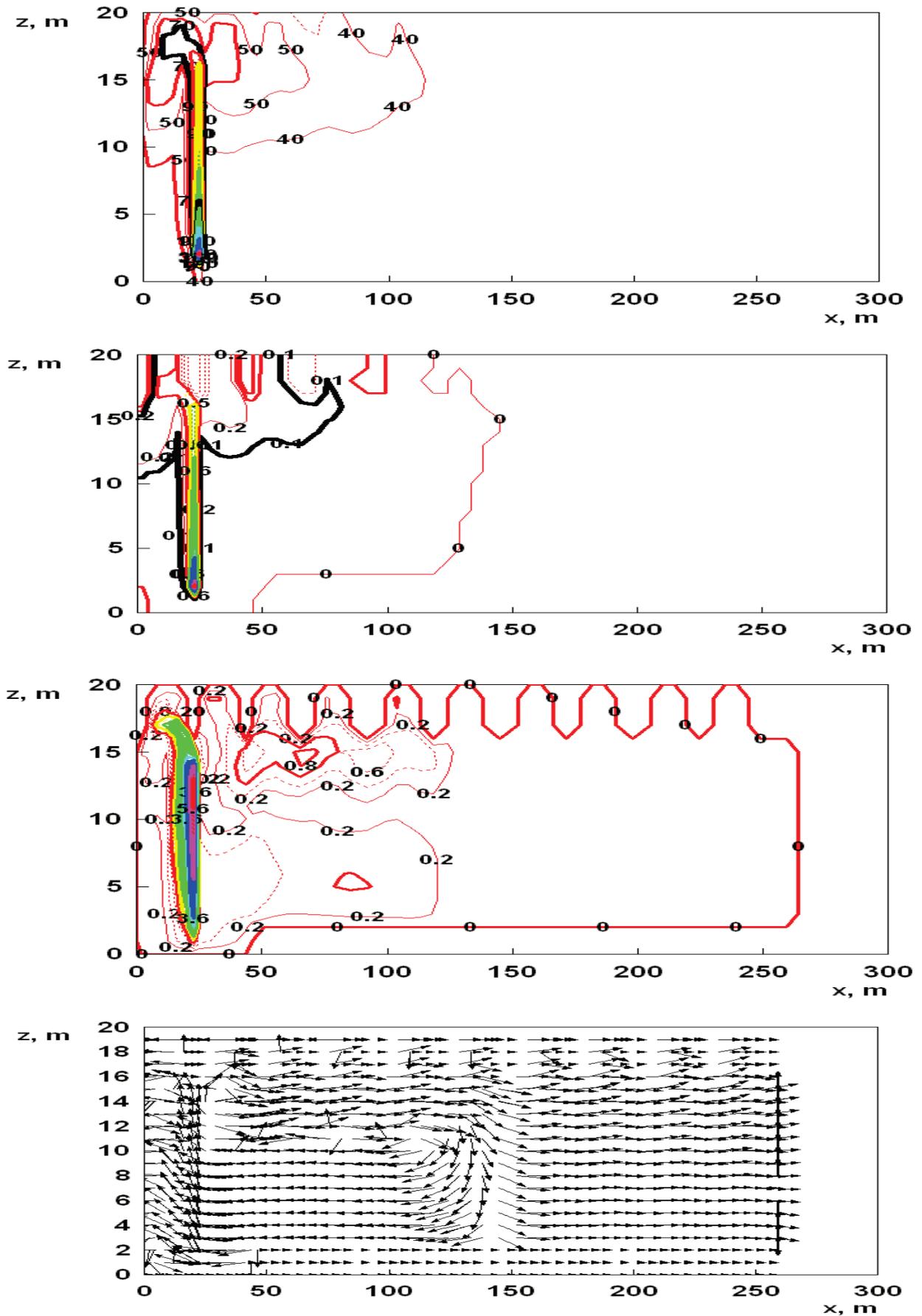


Рисунок 4.8 – Поля температур, оптической плотности дыма, скоростей и схемы течения в продольном сечении машинного зала, проходящем через место возгорания упаковки, через 10 мин от начала пожара

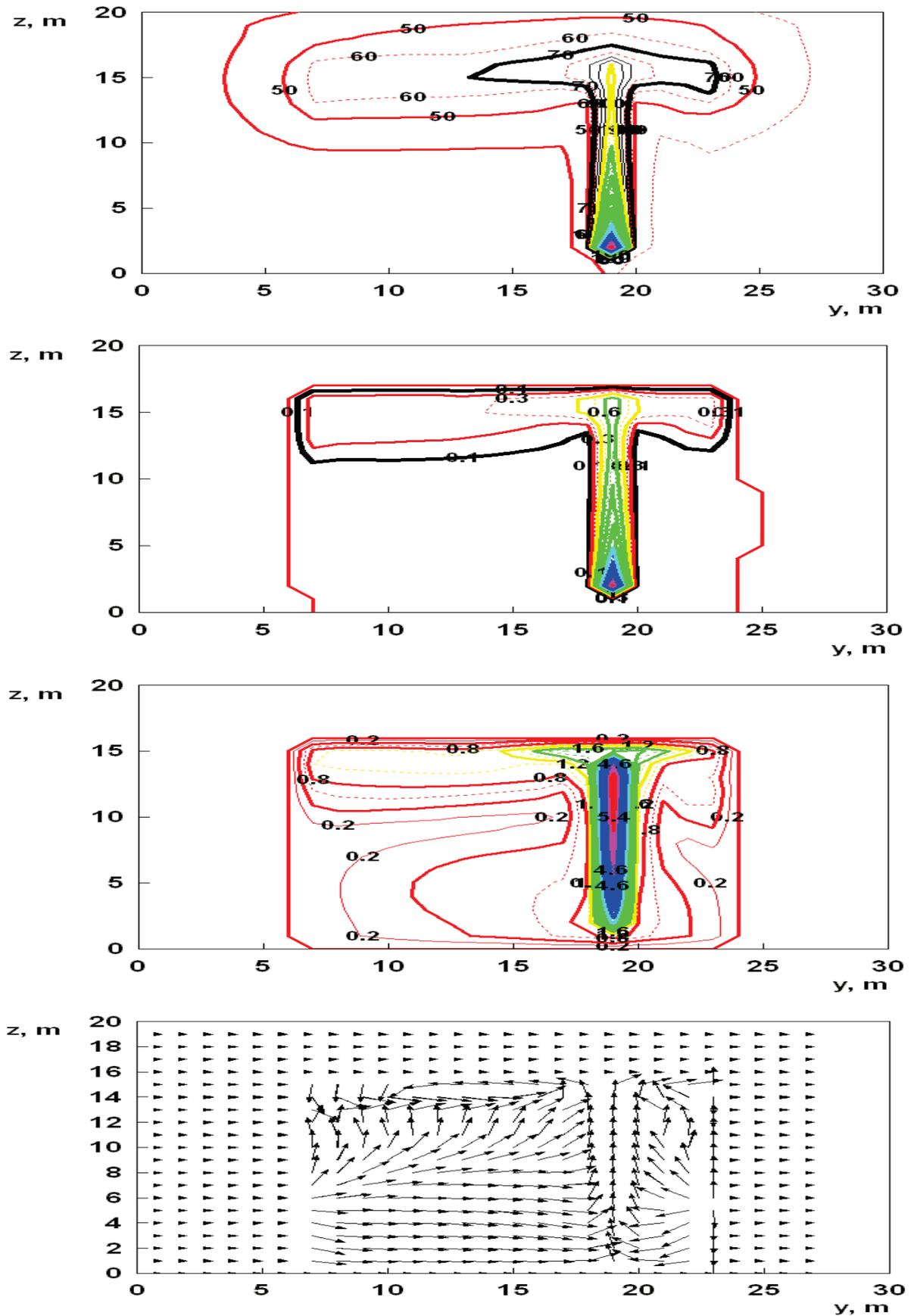


Рисунок 4.9 – Поля температур, оптической плотности дыма, скоростей и схемы течения в поперечном сечении машинного зала, проходящем через место возгорания упаковки, через 10 мин от начала пожара

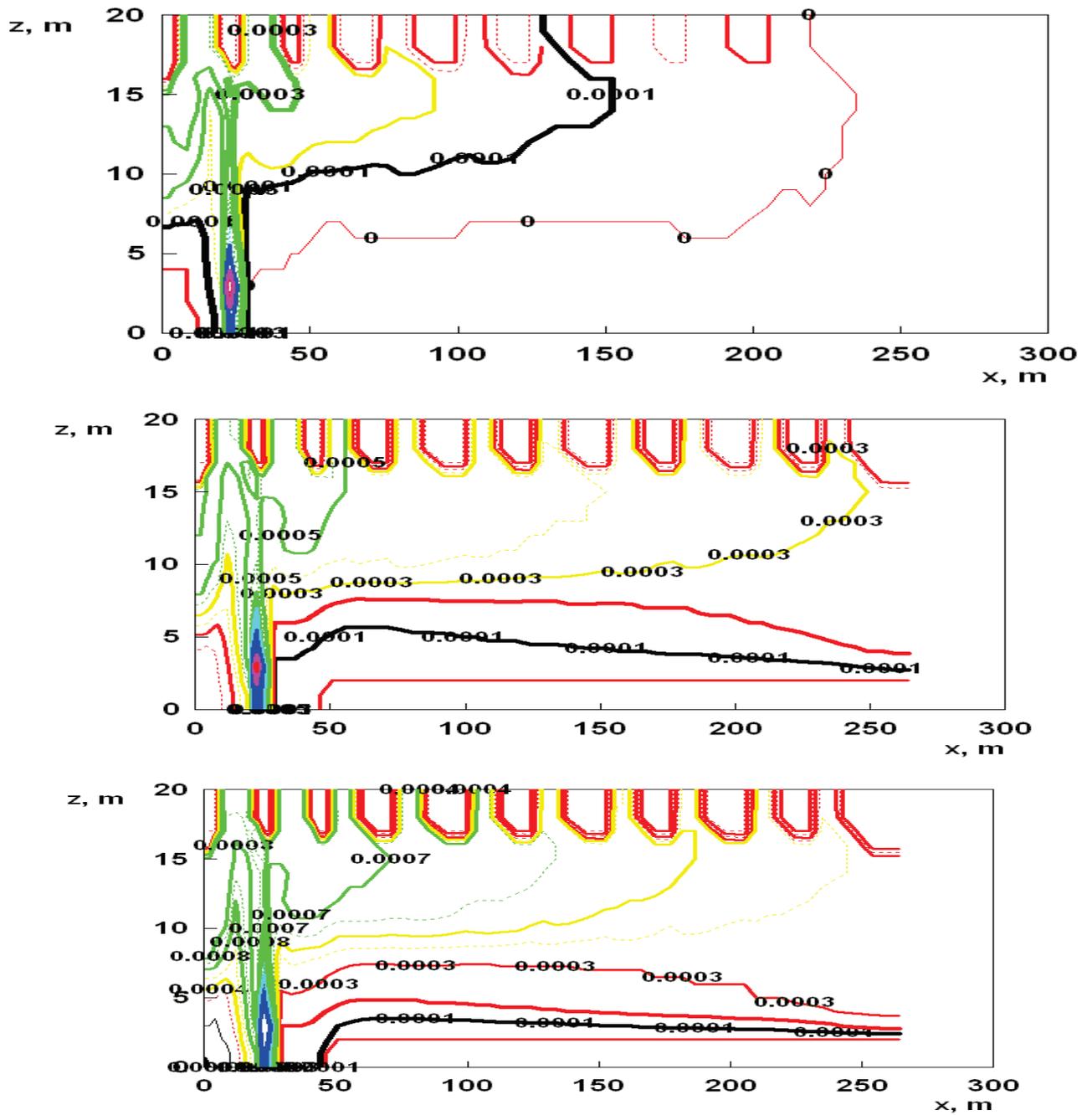
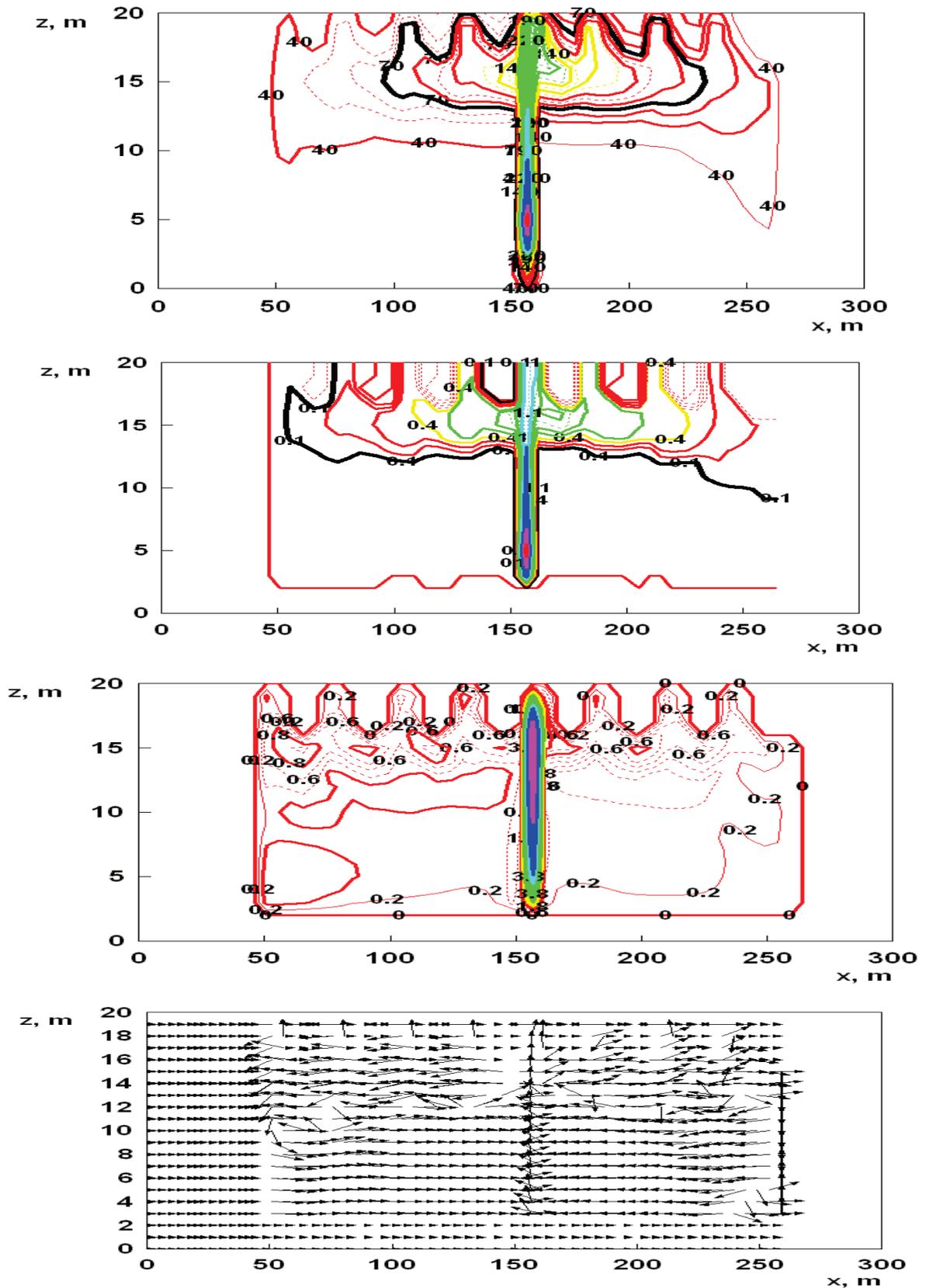


Рисунок 4.10 – Поля парциальной плотности окиси углерода в продольном сечении машинного зала, проходящем через место возгорания упаковки, через 15, 20 и 22 мин от начала пожара



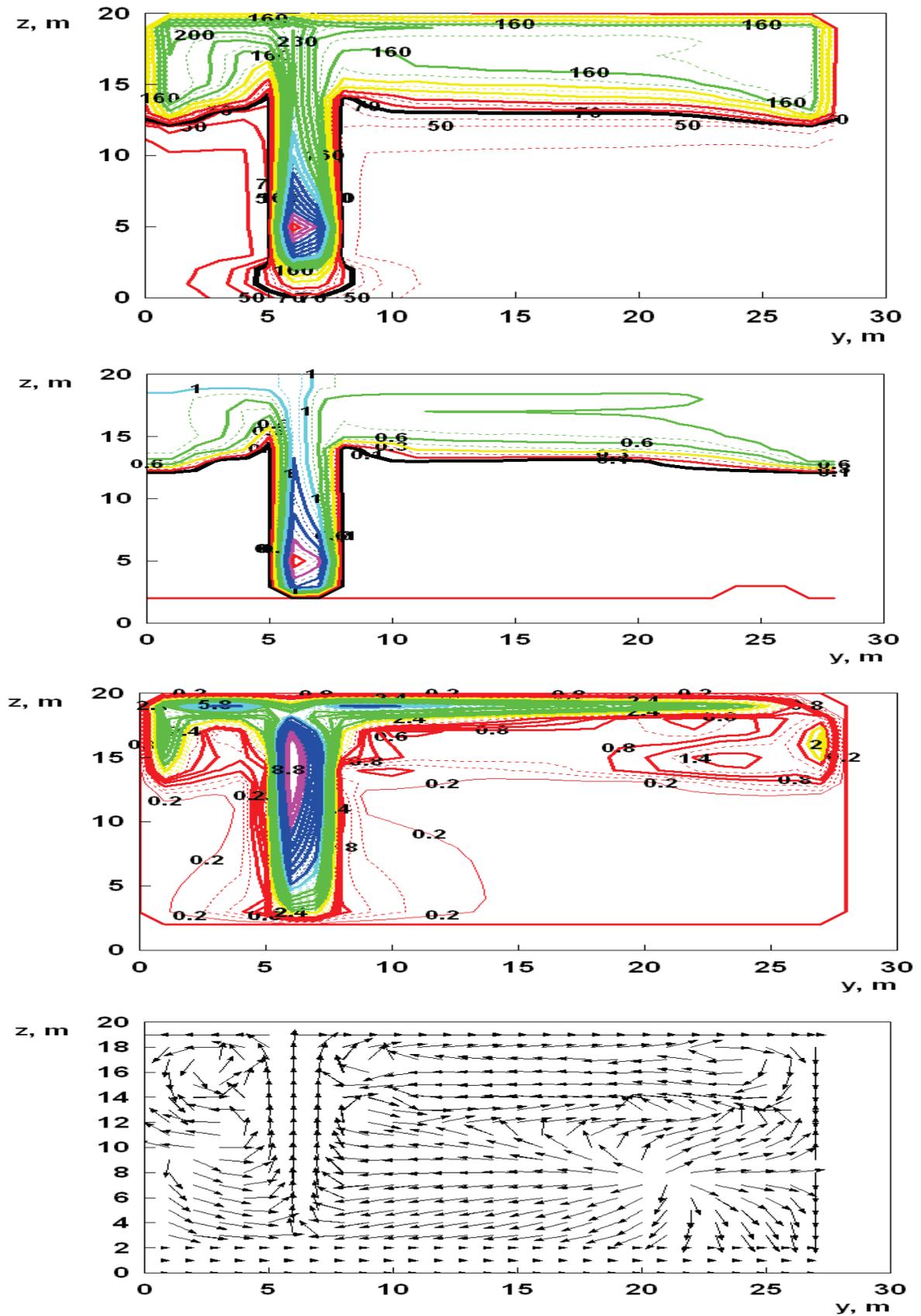


Рисунок 4.12 – Поля температур, оптической плотности дыма, скоростей и схемы течения в поперечном сечении машинного зала, проходящем через место возгорания турбинного масла, через 3 мин от начала пожара

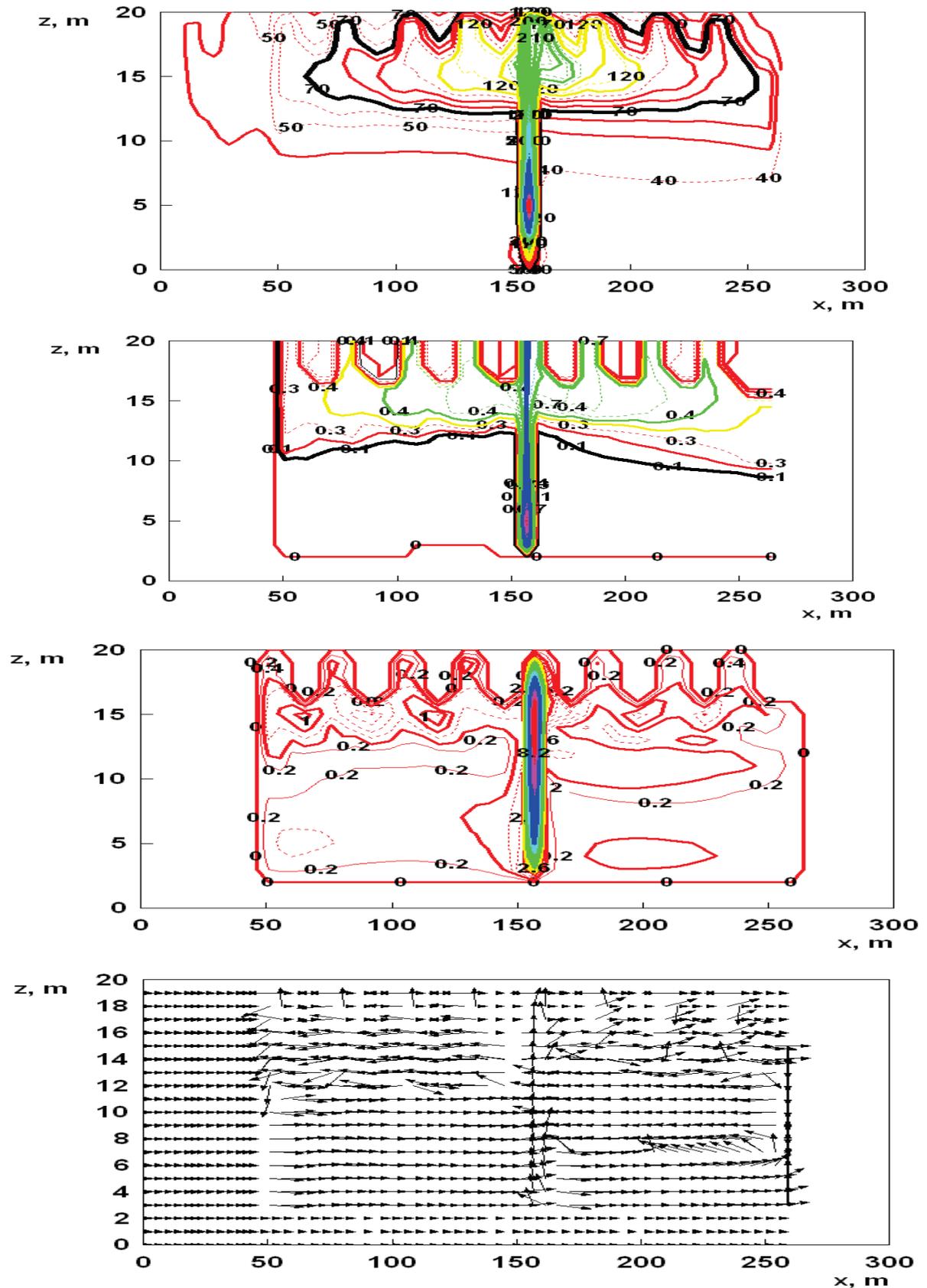


Рисунок 4.13 – Поля температур, оптической плотности дыма, скоростей и схемы течения в продольном сечении машинного зала, проходящем через место возгорания турбинного масла, через 5 мин от начала пожара

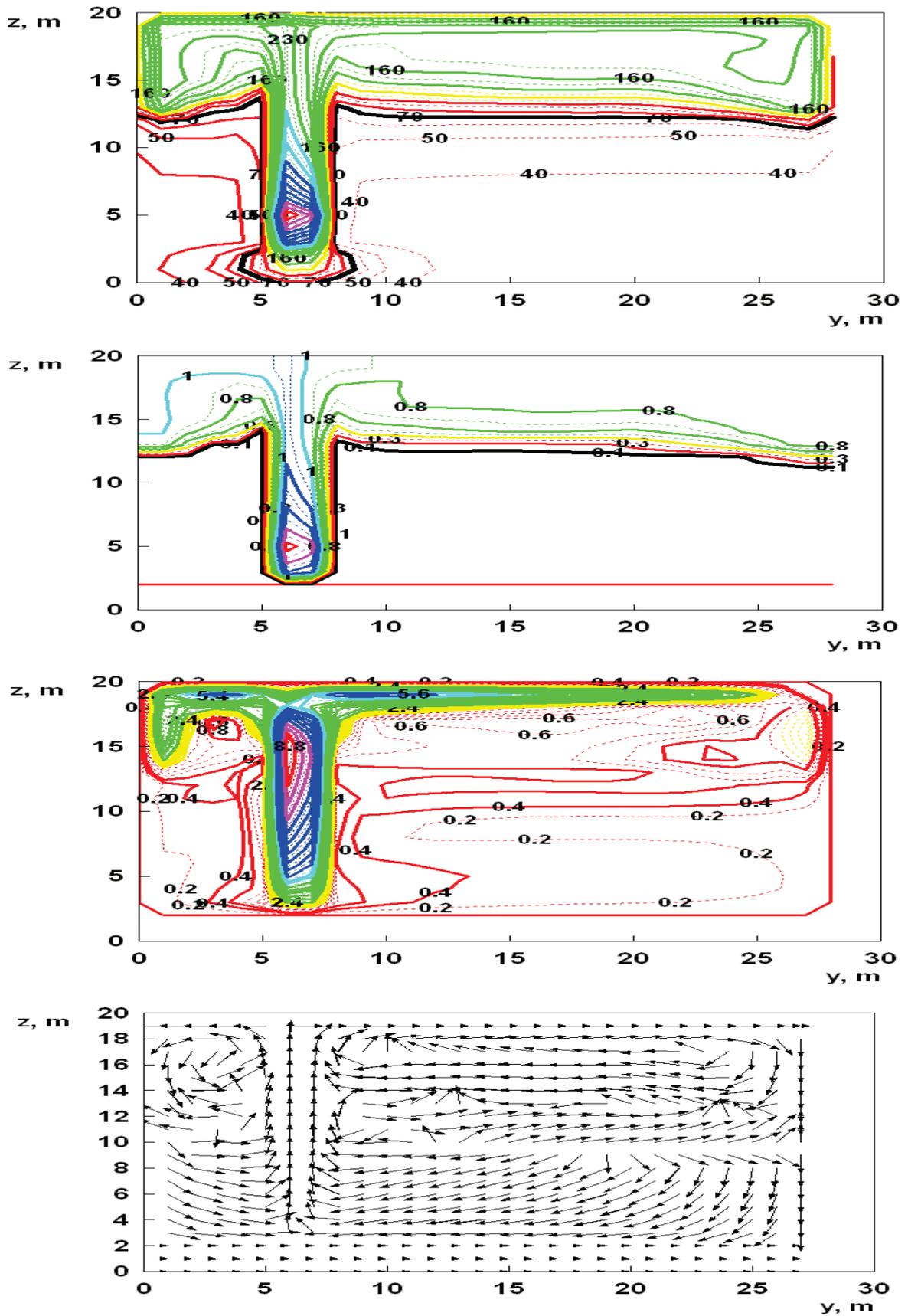


Рисунок 4.14 – Поля температур, оптической плотности дыма, скоростей и схемы течения в поперечном сечении машинного зала, проходящем через место возгорания турбинного масла, через 5 мин от начала пожара

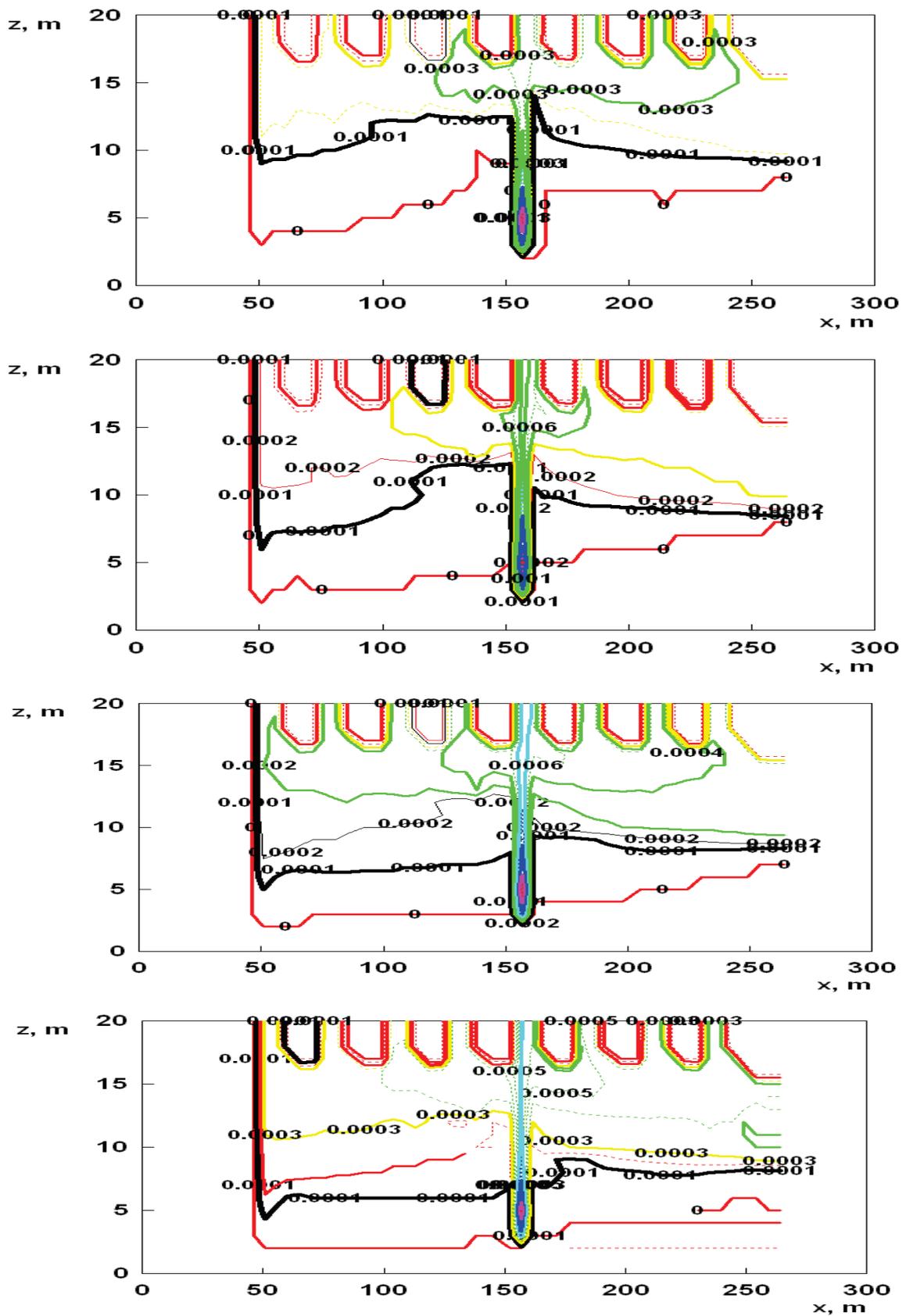


Рисунок 4.15 – Поля парциальной плотности окиси углерода в продольном сечении машинного зала, проходящем через место возгорания турбинного масла, через 7, 9, 12 и 14 мин от начала пожара

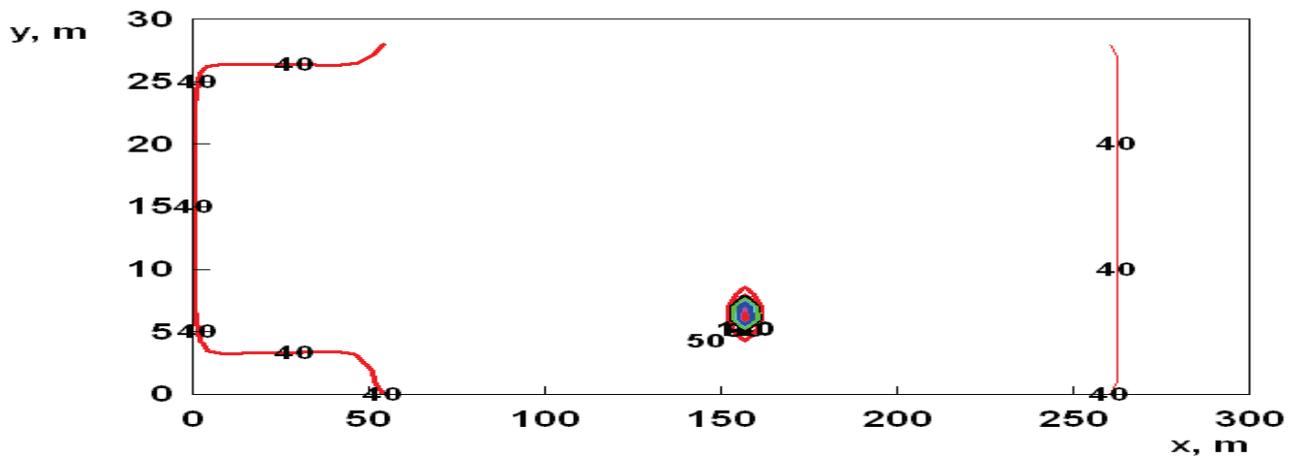
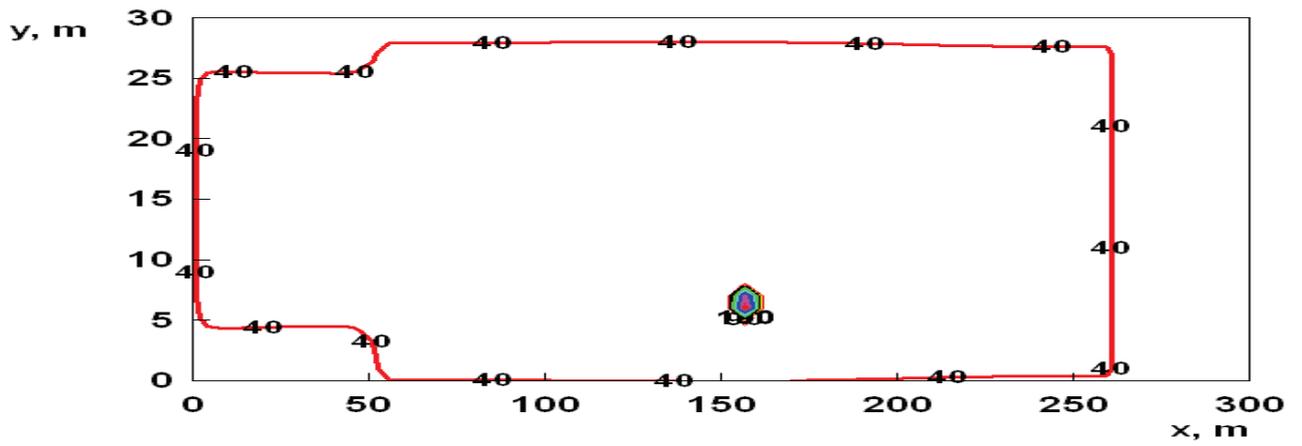
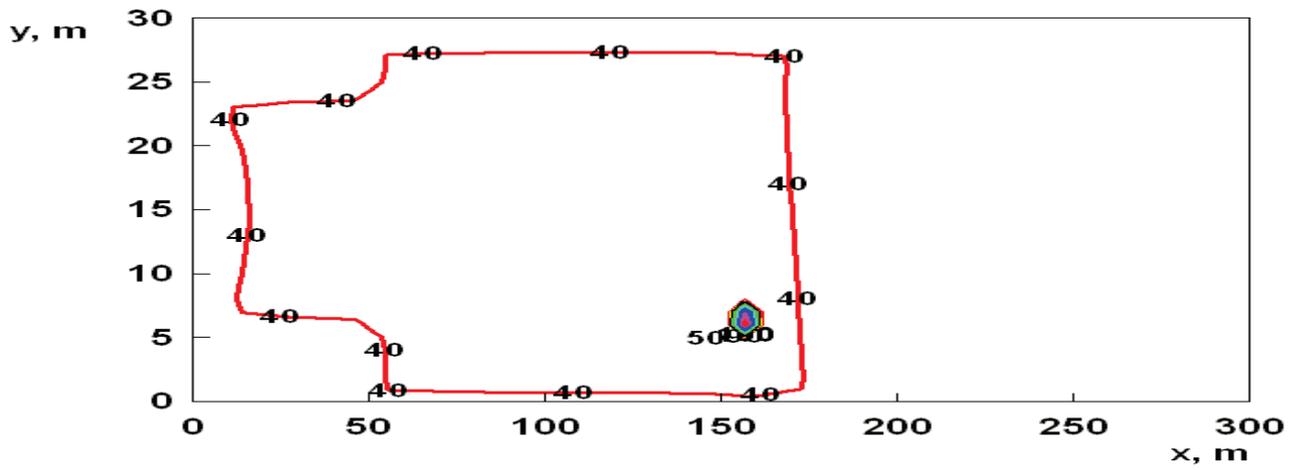


Рисунок 4.16 – Поля температур в газовой среде машинного зала в плоскости, параллельной полу атриума, на отметке +84,50 (высота рабочей зоны) через 9, 12 и 14 мин от начала пожара

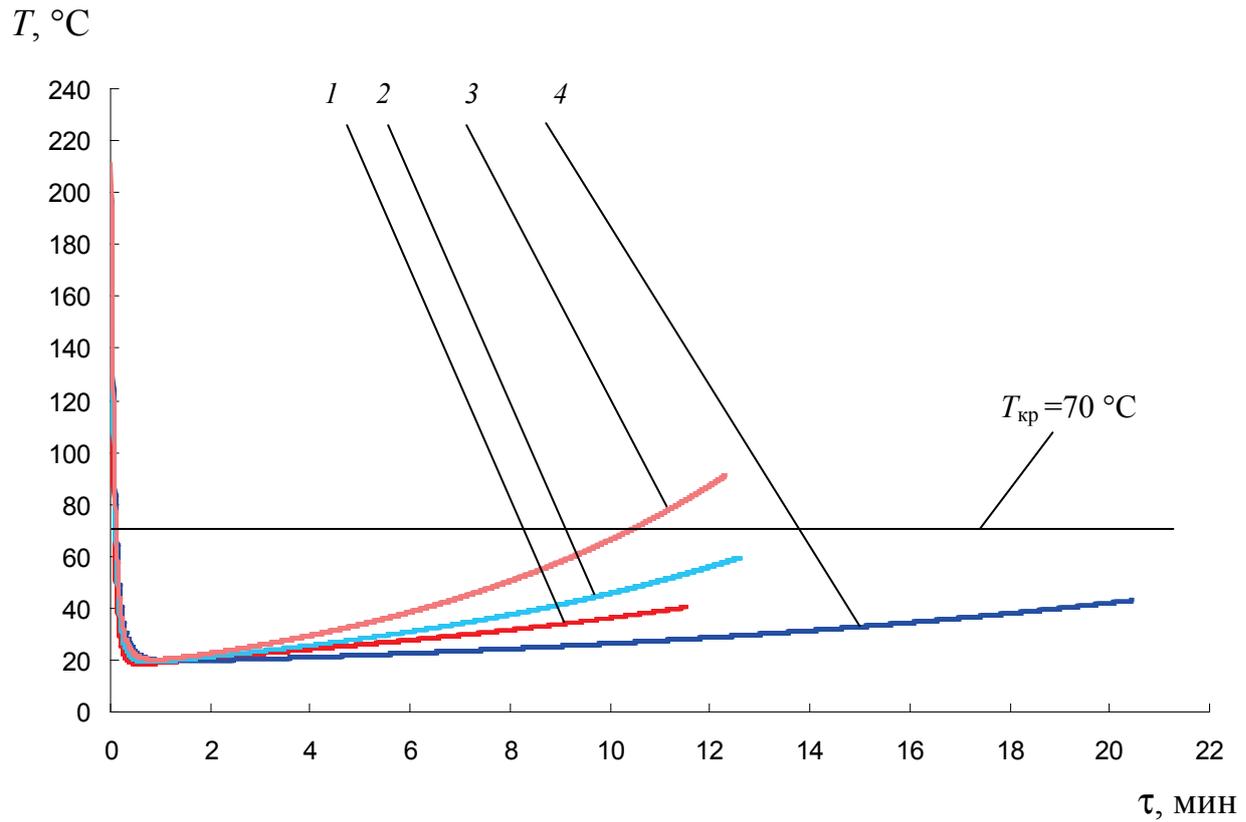


Рисунок 4.17 – Зависимость температуры задымленного нагретого припотолочного слоя газов от времени начала пожара с использованием полевой модели развития пожара при различных пожарных нагрузках:

1 – здания I степень огнестойкости (красный цвет); 2 – кабельный подвал/лоток (голубой); 3 – кабели + провода (розовый); 4 – упаковка (синий)

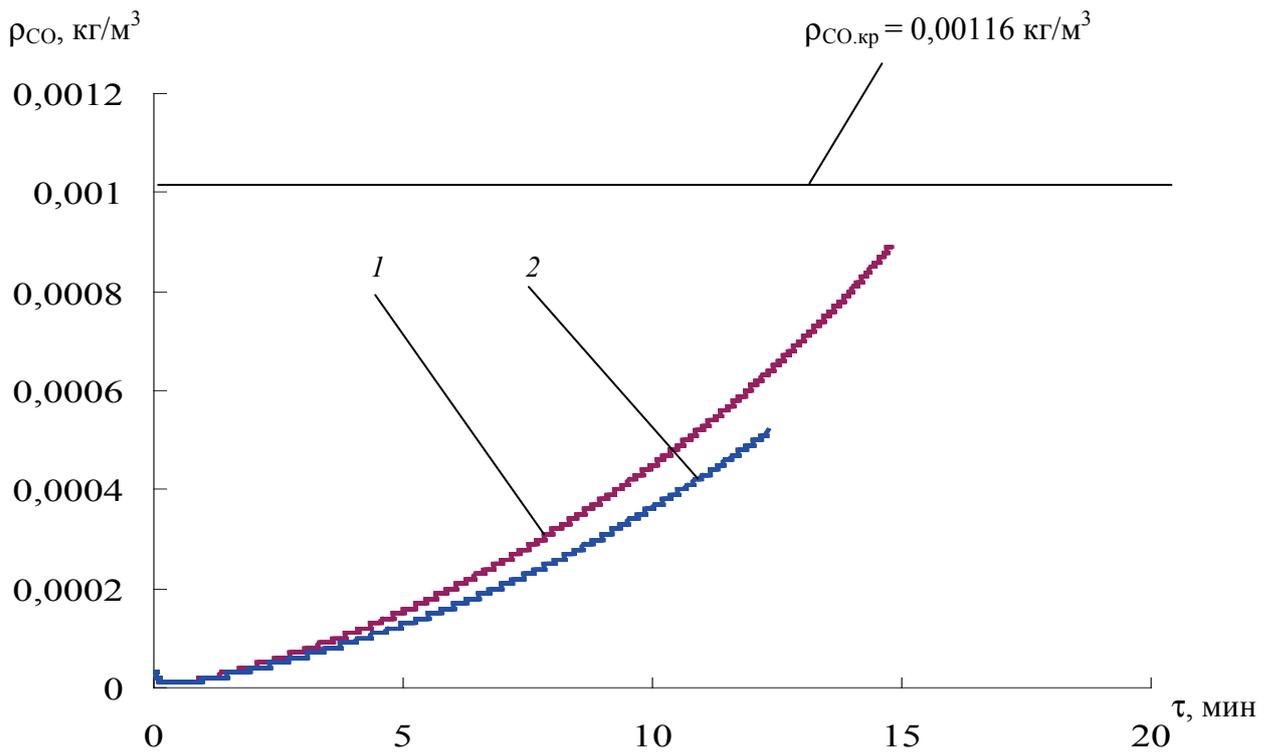


Рисунок 4.18 – Зависимость величины парциальной плотности оксида углерода (ρ_{CO}) в задымленном нагретом припотолочном слое газов с использованием зонной модели развития пожара при пожарной нагрузке «кабели + провода»:

- 1 – расход конвективной колонки определялся по формулам (2.3.2.3) и (2.3.2.4);
 2 – расход конвективной колонки определялся по формуле (2.3.2.1)

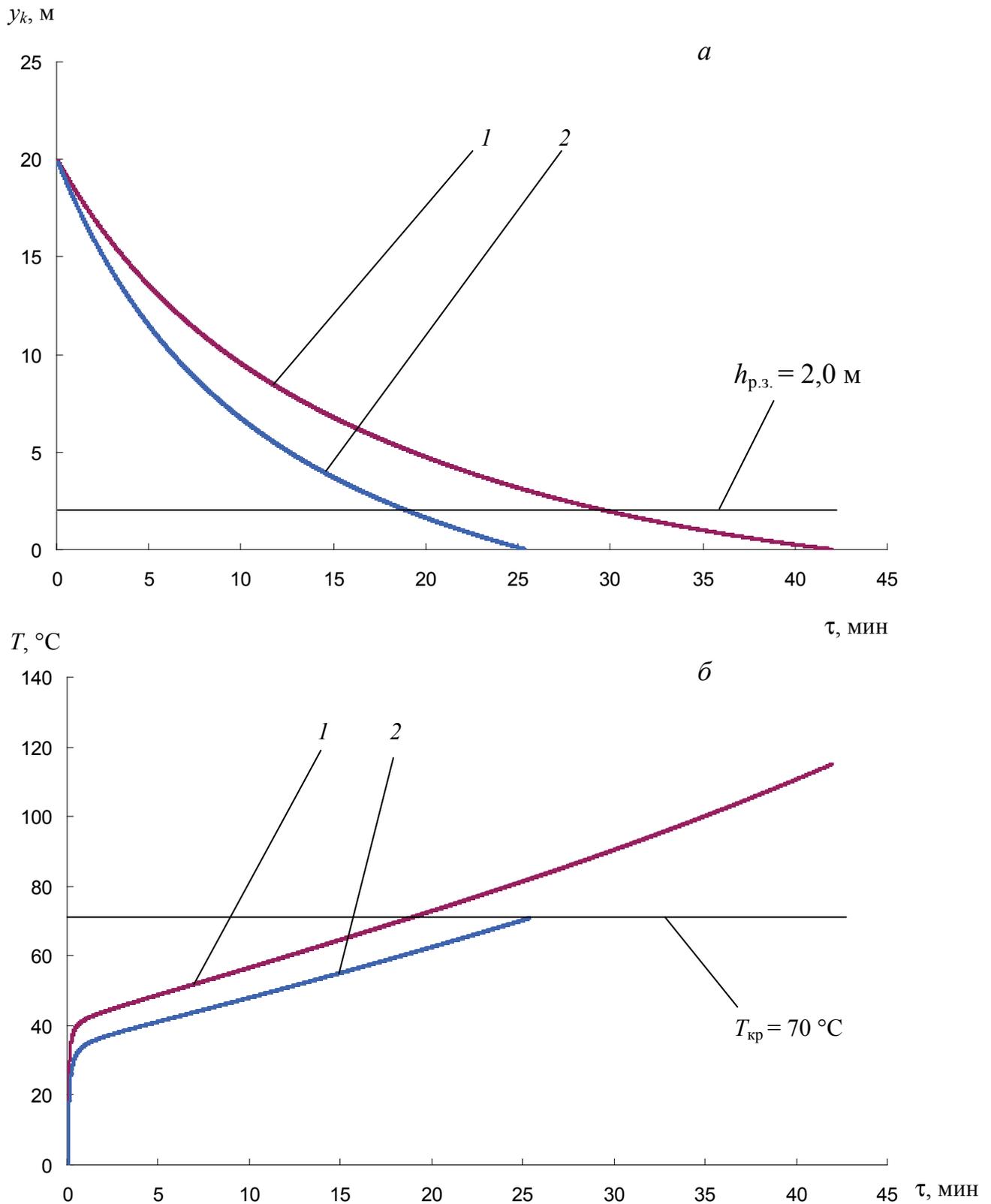


Рисунок 4.19 – Зависимость высоты нижней границы (y_k) задымленного нагретого припотолочного слоя газов (а) и температуры (T) задымленного нагретого припотолочного слоя газов (б) от времени с начала пожара с использованием зонной модели развития пожара при пожарной нагрузке «теплоноситель - турбинное масло ТП-22» (площадь разлива 10 м^2):

1 – расход конвективной колонки определялся по формулам (2.3.2.3) и (2.3.2.4);

2 – расход конвективной колонки определялся по формуле (2.3.2.1)

Сопоставление результатов расчета среднеобъемной плотности монооксида углерода, полученных с использованием уравнения (2.4.13) и полевой модели расчета термогазодинамики пожара [119] для различной пожарной нагрузки, приведено на рисунке 4.20.

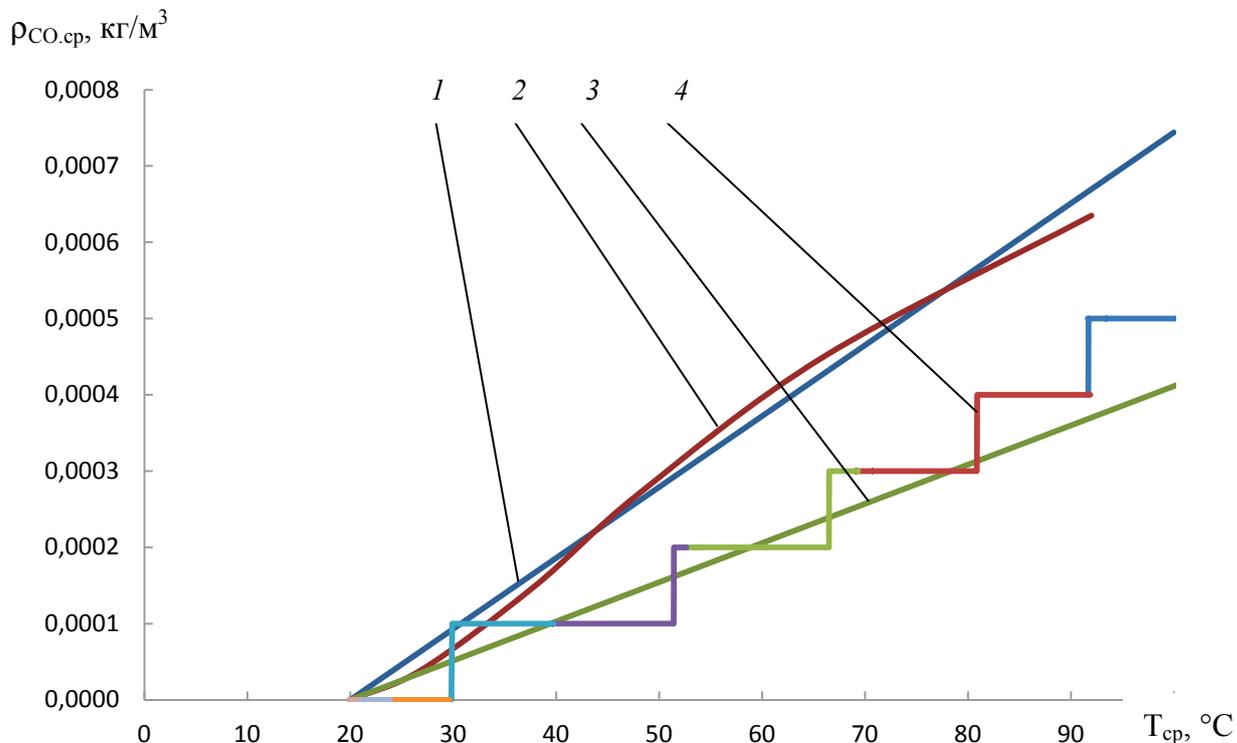


Рисунок 4.20 – Зависимость среднеобъемной плотности CO от среднеобъемной температуры:
кабельная галерея (оболочка кабелей ПВХ):

1 – формула (2.4.13); 2 – полевая модель; машинный зал (турбинное масло):

3 – формула (2.4.13); 4 – полевая модель

Из анализа данных рисунка 4.20 для случая горения оболочек кабелей ПВХ (кабельная галерея) и турбинного масла (машинный зал) видно, что плотности монооксида углерода, полученные с использованием формулы (2.4.13) и полевой модели, совпадают друг с другом с достаточно высокой точностью.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что результаты экспериментальных исследований в маломасштабном помещении (для рассмотренных исходных данных) – аналитическое выражение (2.4.13) позволяют проводить расчет среднеобъемной плотности монооксида углерода и распространять их на крупномасштабное помещение с учетом поправки на коэффициент теплопотерь.

4.6 Методика расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения

Временем блокирования путей эвакуации ОФП называется отрезок времени от начала пожара до момента достижения хотя бы одним из ОФП критического значения на уровне рабочей зоны человека на путях эвакуации [23].

Для определения времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения в производственном здании ГЭС необходимо собрать исходные данные для проведения расчетов, выбрать сценарий развития пожара в производственном здании ГЭС, определиться с математической моделью для расчетов (интегральная, зонная, полевая), выбрать один из методов численного решения, определить удельные массовые коэффициенты выделения токсичных газов, провести расчеты на ЭВМ, проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Подробно методика расчета распространения токсичных газов при пожаре в производственных зданиях ГЭС рассмотрена в главе 2 (п. 2.5).

Методика расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения (на примере монооксида углерода) при использовании интегральной модели расчета ОФП состоит из этапов:

- экспериментальным путем в маломасштабной установке находится зависимость среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры $\rho_{\text{CO}_{\text{cp}}} = f(T_{\text{cp}})$ или определяются удельные массовые коэффициенты выделения токсичных газов L_{CO} (при использовании стандартного подхода изложенного в [23]) для веществ и материалов используемых на ГЭС, по которым нет данных в существующих базах данных пожарной нагрузки;

- определяется расчетным путем зависимость среднеобъемной температуры от времени ($T_{\text{cp}} = f(\tau)$) в помещении ГЭС;

- по величине среднеобъемной температуры T_{cp} , не решая уравнение (2.4.3) закона сохранения массы токсичного газа, находится среднеобъемная плотность монооксида углерода $\rho_{\text{CO}_{\text{cp}}}$;

– по достижению среднеобъемной плотности монооксида углерода величины, критической для человека, для конкретной среднеобъемной температуры T_{cp} в помещении, определяется соответственно время блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения.

При использовании зонной модели среднеобъемные величины плотности токсичного газа и температуры относятся к зоне припотолочного слоя.

4.7 Практические рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре для людей без средств индивидуальной защиты с учетом объемно-планировочных и конструктивных особенностей производственных зданий ГЭС

Для определения времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения, необходимо использовать методику, приведенную в п.4.6 настоящей исследовательской работы. Данная методика в отличие от современных нормативных методик учитывает свойства реальной горючей нагрузки находящейся в помещении ГЭС и позволяет рассчитать время блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения в полномасштабных помещениях производственных зданий ГЭС, не решая уравнение (2.4.3) закона сохранения массы токсичного газа, используя результаты маломасштабных экспериментов с учетом поправки на коэффициент теплопотерь.

С целью учета свойств реальной фактической горючей нагрузки, необходимо провести экспериментальные исследования для различных горючих веществ и материалов, используемых в производственном здании ГЭС в маломасштабной установке, по методике, приведенной в главе 3 (п. 3.4) данной работы, по определению зависимости парциальной плотности токсичного газа (монооксида углерода) от среднеобъемной температуры в случае использования интегральной модели или среднеобъемной температуры припотолочного слоя для зонной модели $\rho_{CO_{cp}} = f(T_{cp})$.

После определения исходных данных по горючим веществам и материалам, используемым в производственном здании ГЭС, а также объемно-планировочным решениям, по методике, описанной в п. 4.6 настоящей исследовательской работы, определяется время блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения.

4.8 Выводы по четвертой главе

В результате проведенных численных и натурных экспериментальных исследований были получены следующие результаты:

- получены экспериментальные зависимости среднеобъемной плотности СО от среднеобъемной температуры, а также удельных коэффициентов выделения монооксида углерода и удельных массовых скоростей газификации от времени испытаний при горении древесины, масла трансформаторного и оболочки кабелей ПВХ;

- проведено сопоставление результатов экспериментов с данными литературных источников и аналитическим решением полевой модели;

- показано, что величины удельных коэффициентов выделения и плотности СО незначительны на начальной стадии горения, когда концентрация кислорода практически не меняется. При снижении концентрации O_2 выделение СО резко увеличивается и плотность монооксида углерода быстро достигает ее критического значения;

- показано, что удельные скорости выгорания материалов и удельные коэффициенты выделения токсичных газов существенно зависят от времени с начала горения в маломасштабной установке; при этом, средние величины вышеуказанных параметров существенно зависят от времени осреднения и значительно отличаются от значений, приведенных в современных базах данных пожарной нагрузки [23];

- существенное отличие величин L_{CO} от представленных в работе [23] можно объяснить как в различии условий проведения экспериментов, так и тем, что химический состав оболочки кабелей ПВХ и масла трансформаторного в данной работе и в [23] может значительно отличаться друг от друга (кроме

того, в данных испытаниях не измерялась влажность хвойных древесных стройматериалов);

– проведенные эксперименты на маломасштабной установке в условно герметичном объеме показали, что величины удельных коэффициентов выделения СО значительно изменяются в зависимости от времени и их средние величины существенно зависят от периода осреднения по времени испытаний;

– обнаружено, что средние величины удельных коэффициентов выделения СО существенно зависят от периода осреднения по времени испытаний. Осреднения величина L_{CO} может изменяться в случае хвойных древесных стройматериалов в 2,63 раза, для оболочки кабелей ПВХ – в 1,8 раза и масла трансформаторного – в 5,1 раза;

– сопоставление результатов расчета среднеобъемной плотности монооксида углерода, полученных с использованием уравнения (2.4.13) и полевой модели расчета термогазодинамики пожара [119] для различной пожарной нагрузки, показало достаточно высокое совпадение позволяющее сделать вывод о том, что результаты экспериментальных исследований в маломасштабном помещении позволяют проводить расчет среднеобъемной плотности монооксида углерода и распространять их на крупномасштабное помещение с учетом поправки на коэффициент теплопотерь;

– предложенная методика расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения с учетом экспериментально полученных зависимостей концентраций токсичных газов от среднеобъемной температуры позволяет более точно, чем существующие в настоящий момент времени методики, не решая дифференциальные уравнения законов сохранения массы токсичных газов, учесть реальные свойства веществ и материалов и процесса выгорания горючего материала при прогнозировании распространения токсичных продуктов горения в помещении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе проведения теоретических исследований:

– выявлены основные причины возникновения и дальнейшего распространения пожара в производственном здании ГЭС, а также наиболее опасные горючие материалы (трансформаторное и турбинное масло, оболочки кабелей, древесина);

– показаны существенные недостатки стандартного метода испытаний на токсичность продуктов горения, которые ограничивают использование его результатов при расчете концентраций токсичных газов при пожаре в полномасштабном помещении;

– выявлены недостатки современных методов расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения, которые не позволяют достаточно достоверно учитывать свойства горючих материалов и масштабный фактор (ограниченное количество горючих материалов в базе типовой пожарной нагрузки, постоянная величина коэффициентов образования токсичных газов, отсутствие обоснования переноса экспериментальных данных, полученных в маломасштабной установке, на полномасштабное помещение).

2. Разработана экспериментальная установка, реализующая условно герметичную схему термогазодинамики пожара и в отличие от «стандартного» метода испытаний на токсичность продуктов горения позволяет:

– более точно измерять среднеобъемные значения температуры (значительное увеличение количества точек измерений) и плотностей токсичных газов (обоснована точка отбора газовой смеси);

– измерить удельную скорость выгорания веществ и материалов;

– определить удельные коэффициенты образования токсичных газов;

– использовать полученные на ней экспериментальные данные для расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения.

3. Впервые получены экспериментальные зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры, а также удельных коэффициентов образования монооксида углерода и удельных массовых скоростей газификации от времени испытаний при горении веществ и материалов используемых на гидроэлектростанциях.

4. Предложены и обоснованы модификации интегральной и зонной математических моделей, использующие экспериментальные зависимости плотностей токсичных газов от температуры, а также удельных скоростей выгорания материалов и удельных коэффициентов образования токсичных газов от времени испытаний в маломасштабной установке.

Разработанные модификации позволяют рассчитать время блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения в полномасштабных помещениях производственных зданий ГЭС, используя результаты маломасштабных экспериментов с учетом поправки на коэффициент теплопотерь в полномасштабном помещении (формула (2.4.9)), не решая уравнение (2.4.3) закона сохранения массы токсичного газа.

4. Разработана методика расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения с использованием модифицированных интегральных и зонных моделей.

5. Экспериментальные исследования показали, что удельные скорости выгорания материалов и удельные коэффициенты выделения токсичных газов существенно зависят от времени горения в маломасштабной установке.

Установлено, что средние величины вышеуказанных параметров существенно зависят от времени осреднения и значительно отличаются от значений, приведенных в современных базах данных пожарной нагрузки. Так, например, осреднения величина L_{CO} может изменяться в случае хвойных древесных стройматериалов в 2,63 раза, для оболочки кабелей ПВХ – в 1,8 раза и трансформаторного масла – в 5,1 раза.

6. Разработаны научно обоснованные практические рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре для людей без средств индивидуальной защиты с учетом объемно-планировочных и конструктивных особенностей производственных зданий ГЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [Электронный ресурс]: федер. закон // Гарант.ру: информационно-правовой портал [сайт]. Режим доступа: <http://base.garant.ru/12161584/> (дата обращения 08.03.2018).
2. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» [Электронный ресурс] // Консультант Плюс: справочная правовая система [сайт]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (дата обращения 08.03.2018).
3. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [Электронный ресурс] // Гарант.ру: информационно-правовой портал [сайт]. Режим доступа: <http://base.garant.ru/12161093/> (дата обращения 08.03.2018).
4. Федеральный закон от 30 марта 1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [Электронный ресурс] // Гарант.ру: информационно-правовой портал [сайт]. Режим доступа: <http://base.garant.ru/12115118/> (дата обращения 08.03.2018).
5. СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. – 18 с.
6. ГОСТ 12.1.004–91* Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2006. – 68 с.
7. ГОСТ 12.1.044–89 (ИСО 4589–84). Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Стандартиформ, 2006. – 100 с.
8. ГОСТ 12.1.007–76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2007. – 7 с.

9. ГОСТ 31565–2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности. – М.: Стандартиформ, 2014. – 12 с.
10. 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 // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон дан. – М., 2015. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.
11. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: приказ МЧС Российской Федерации от 10 июля 2009 г. № 404 // Гарант: информ.-правовое обеспечение. – Электрон дан. – М., 2015. – Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.
12. NFPA 92B Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces [Текст]. Quincy, Massachusetts: NFPA, 2009. – 65 p.
13. NFPA 269-2017 Standard test method for developing toxic potency data for use in fire hazard modeling [Текст]. Quincy, Massachusetts: NFPA and National Fire Protection Association are registered trademarks of the National Fire Protection Association, 2017. – 29 p.
14. ISO 13344: 2015. Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents [Текст]. Geneva: International Organization for Standardization, 2015. – 20 p.
15. ASTM E1678–15. Standard test method for measuring smoke toxicity for use in fire hazard analysis [Текст]. West Conshohocken: ASTM International, 2015. – 15 p.
16. ASTM E176-15AE1 Standard Terminology of Fire Standards [Текст]. West Conshohocken: ASTM International, 2015. – 26 p.
17. Драздейл, Д. Введение в динамику пожаров [Текст] / Д. Драздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

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

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

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

21. Щеглов, П.П. Пожароопасность полимерных материалов [Текст]/ П.П. Щеглов, В.Л. Иванников. – М.: Стройиздат, 1992. – 110 с.

22. Исаева, Л. К. Пожары и окружающая среда [Текст]/ Л. К. Исаева. – М.: 2001. – 222 с.

23. Кошмаров, Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: учеб. пособие [Текст] / Ю. А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

24. 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, Е.С. Абакумов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 222 с.

25. Пузач, С.В. Математическое моделирование тепломассообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности [Текст] / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – 150 с.

26. 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.

27. Кошмаров, Ю.А. Теплотехника: учебник для вузов [Текст] / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академкнига, 2006. – 501 с.

28. Астапенко, В.М. Термогазодинамика пожаров в помещениях [Текст] / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков. – М.: Стройиздат, 1988. – 447 с.
29. Кошмаров, Ю.А. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле [Текст] / Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987. – 440 с.
30. Симоненко, В.Б. Острые отравления: неотложная помощь [Текст] / В.Б. Симоненко, Г.П. Простакишин, С.Х. Сарманаев. – М.: Экономика и информатика, 2008. – 269 с.
31. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров [Текст] / Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1988. – 340 с.
32. Измеров, Н.Ф. Параметры токсикометрии промышленных ядов при однократном воздействии [Текст] / Н.Ф. Измеров, И.В. Саноцкий, Н.Н. Сидоров. – М.: Медицина, 1975. – 278 с.
33. Кустов, В.В. Комбинированное действие промышленных ядов [Текст] / В.В. Кустов. – М.: Химия, 1975. – 276 с.
34. Тиунов, Л.А. Токсикология окиси углерода [Текст] / Л.А. Тиунов, В.В. Кустов. – М.: Медицина, 1980. – 288 с.
35. Кустов, В.В. Комбинированное действие промышленных ядов при однократном воздействии [Текст] / В.В. Кустов, Л.А. Тиунов, Г.А. Васильев. – М.: Медицина, 1977. – 240 с.
36. Ильиных, И.И. Гидроэлектростанции [Текст] / И.И. Ильиных. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
37. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена [Текст] / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
38. Есин, В.М. Пожарная профилактика в строительстве. Ч.1. Пожарная профилактика систем отопления и вентиляции: учебник [Текст] / В.М. Есин, В.И. Сидорук, В.Н. Токарев. – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1995. – 352 с.

39. Абдурагимов, И.М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров [Текст] / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 256 с.
40. Молчадский, И.С. Пожар в помещении [Текст] / И.С. Молчадский. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2005. – 456 с.
41. Ройтман, М.Я. Пожарная профилактика в строительном деле [Текст] / М.Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.
42. Абдурагимов, И.М. Процессы горения [Текст] / И.М. Абдурагимов, А.С. Андросов, Л.К. Исаева, Е.В. Крылов. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. – 268 с.
43. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
44. Петрунь, Н.М. Газообмен через кожу и его значение для организма человека [Текст] / Н.М. Петрунь. – М.: Медгиз, 1961. – 150 с.
45. Маркизова, Н.Ф. Токсичные компоненты пожаров [Текст] / Н.Ф. Маркизова, Т.Н. Преображенская, В.А. Башарин, А.Н. Гребенюк. – М.: Фолиант, 2008. – 203 с.
46. Баратов, А.Н. Пожарная опасность строительных материалов [Текст] / А.Н. Баратов, Р.А. Андрианов, А.Я. Корольченко [и др.]; под ред. А.Н. Баратова. – М.: Стройиздат, 1988. – 380 с.
47. Холщевников, В.В. Эвакуация и поведение людей при пожарах: монография [Текст] / В.В. Холщевников, Д.А. Самошин, А.П. Парфененко, И.С. Кудрин, Р.Н. Истратов, И.Р. Белосохов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 262 с.
48. 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.

49. Иличкин, В.С. Токсичность продуктов горения полимерных материалов: обзор. инф. [Текст] / В.С. Иличкин, А.А. Фукалова. – М.: ГИЦ МВД СССР, 1986, – 68 с.

50. Калинин, Б.Ю. Токсичность продуктов горения синтетических полимеров: обзор. инф. Сер.: Полимеризационные пластмассы [Текст] / Б.Ю. Калинин. – М.: НИИТЭХИМ, 1978. – 13 с.

51. Тараненко, Н.А. Оценка химического фактора при пожарах [Текст]/ Н.А. Тараненко, В.Б. Дорогова, И.В. Колычева, В.А. Верзунов. // Гигиена и санитария. 2004. – № 1. – С. 37–39.

52. Сухорукова, Е.И. Оценка токсичности продуктов горения полимерных материалов при пожарах на судах и кораблях [Текст] / Е.И. Сухорукова, Г.К. Ивахнюк, Д.А. Власов, Н.Н. Грабовецкая // Вестник СПб института ГПС МЧС России. 2005. – № 1(8). – С. 25–29.

53. Иличкин, В.С. Анализ и оценка комбинированного действия летучих продуктов горения образцов огнезащитной древесины [Текст]/ В.С. Иличкин, М.В. Яненко, П.А. Эварестов // Гигиена и санитария. 1989. – С. 76–78.

54. Пузач, С.В. Расчет коэффициента теплотерь при определении критической продолжительности пожара [Текст] / С.В. Пузач, М.Н. Горячева, В.В. Андреев // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16, № 6. – С. 21–24.

55. Пузач, С.В. Некоторые закономерности радиационного теплообмена при пожаре на объектах энергетики [Текст] / С.В. Пузач // Известия РАН. Энергетика. – 2003. – № 6. – С. 145–152.

56. Пузач, С.В. Модифицированная зонная модель расчета тепломассообмена при пожаре в атриуме [Текст] / С.В. Пузач, Е.С. Абакумов // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16, № 1. – С. 53–57.

57. Пузач, С.В. Некоторые особенности тепломассообмена при пожаре в атриуме [Текст] / С.В. Пузач, В.Г. Пузач // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79, № 5. – С. 135–146.

58. Пузач, С.В. Особенности разработки противопожарных мероприятий при строительстве зданий многофункционального назначения со сложной геометрией [Текст] / С.В. Пузач, А.Я. Базилевич, Е.С. Пузач, Д.Г. Карпенко, Е.В. Сулейкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – Т. 13, №1. – С. 20–29.

59. 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.

60. 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.

61. Пузач, С.В. К определению показателя токсичности продуктов горения горючих веществ и материалов в помещении [Текст] / С.В. Пузач, Доан Вьет Мань, В.Г. Пузач // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 4. – С. 4–13.

62. Дутов, В.И. О воздействии на людей опасных факторов пожара [Текст] / В.И. Дутов, В.Н. Тимошенко // Безопасность людей на пожарах: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1980. – С. 54–58.

63. Горячева, М.Н. К расчету концентраций окиси углерода в помещении при пожаре [Текст] / М.Н. Горячева, С.В. Пузач, С.А. Горячев // Вестник Академии Государственной противопожарной службы. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – № 4. – С. 209–213.

64. Иличкин, В.С. Определение показателя токсичности продуктов горения материалов экспериментально–расчетным методом [Текст] / В.С. Иличкин, Н.В. Смирнов, Ю.Н. Елисеев, Ю.Ю. Белоусов, А.А. Зайцев, М.А. Комова // Пожаровзрывобезопасность. – 2005. – № 3. – С. 29–34.

65. Шафран, Л.М. Токсикология горения: Основные задачи и перспективы развития [Текст] / Л.М. Шафран // Актуальные проблемы транспортной медицины. – 2006. – № 4 (6). – С. 23–32.

66. Иличкин, В.С. Экспериментальное обоснование метода определения токсичности продуктов горения жидких и порошкообразных веществ [Текст] / В.С. Иличкин, В.Г. Васильев, В.Л. Смирнов // Пожаровзрывобезопасность. – 1997. – № 4. – С. 11–15.

67. Пузач, С.В. Оценка токсикологической обстановки при возникновении пожара в салоне самолета и помещениях аэропортов [Текст] / С.В. Пузач, А.В. Смагин, Доан Вьет Мань, О.С. Лебедченко // Тепловые процессы в технике. – 2009. – Т. 1, № 12. – С. 531–535.

68. Пузач, С.В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении / С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 2. – С. 13–20.

69. Пузач, С.В. К определению показателя токсичности продуктов горения горючих веществ и материалов в помещении [Текст] / С.В. Пузач, Мань Доан Вьет, В.Г. Пузач // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, №4. – С. 4–13.

70. Гравит, М.В. Пожарно-технические характеристики строительных материалов в европейских и российских нормативных документах. Проблемы гармонизации методов исследования и классификации [Текст] / М.В. Гравит, О.В. Недрышкин, А.А. Вайтицкий, А.М. Шпакова, Д.Г. Нигматуллина // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 10. – С. 16–29.

71. Зайцев, А.А. Обоснование дополнительного теплового режима при испытаниях по определению показателя токсичности продуктов горения [Текст] / А.А. Зайцев, Н.И. Константинова // Пожарная безопасность. – 2017. – № 1. – С. 96–100.

72. McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J. Fire Dynamics Simulator (Version 6). NIST Special Publication 1018 [Текст]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2013. 149 p.

73. Welch, S., Rubini, P. SOFIE: Simulation of Fires in Enclosures. User Guide [Текст]. UK, Cranfield: Cranfield University, 1996. 340 p.

74. Tanaka, T., Yamada, S. BRI 2002: Two layer zone smoke transport model. Chapter 1. Outline of the model [Текст]. Fire Science and Technology. 2004. Vol. 23, № 1. P. 1–44.

75. Hansell, G.O., Morgan, H.P. Design approaches for smoke control in atrium buildings. Report BRE 258. Building Research Establishment, Garston, UK, 1994, 57 p.

76. Levin, B.C., Kuligowski, E.D. Toxicology of Fire and Smoke [Текст]. Inhalation Toxicology. 2nd Edition. Chapter 10, CRC Press (Taylor and Francis Group), Boca Raton, FL, 2005. P. 205–228.

77. Levin, B.C. New research avenues in toxicology: 7-gas N-gas model, toxicant suppressants and genetic toxicology [Текст]. Toxicology. 1996. Vol. 115. P. 89–106.

78. Levin, B.C., Paabo, M., Baily, C., Harris S.E., Gurman J.L. Toxicological effects of the interactions of fire gases and their use in toxic hazard assessment computer model [Текст]. The Toxicologist. 1985. Vol. 5. P. 127.

79. Halls J.R., Harwood B. Smoke or burns – which is deadlier? [Текст] NFPA Journal, January / February, 1995. P. 38–43.

80. Роберт Д. Трейтмент, Вильям А. Берджесс, Авраам Голд. Примеси вредных веществ в воздухе, с которыми встречаются пожарные [Текст]. Департамент научных исследований окружающей среды и здоровья. Гарвардская школа общественного здоровья. Бостон, МА 02115.

81. Kaplan, H.L., Hartzell, G.E. Modeling of Toxicological Effects of Fire Gases: I. Incapacitation Effects of Narcotic Fire Gases [Текст]. Journal of Fire Sciences. 1984. Vol. 2. P. 286–305.

82. Hartzell, G.E., Priest, D.N., Switzer, W.G. Modeling of Toxicological Effects of Fire Gases: Ii. Mathematical Modeling of Intoxication of Rats by Carbon Monoxide and Hydrogen Cyanide [Текст]. Journal of Fire Sciences. 1985. Vol. 3. P. 115–128.

83. Pauluhn, J.A. Retrospective Analysis of Predicted and Observed Smoke Lethal Toxic Potency Values [Текст]. *J. Fire Sciences*. 1993. Vol. 11, № 2. P. 109–130.
84. Morikawa, T. Toxic Hazards of Acrolein and Carbon Monoxide During Combustion [Текст]. *Journal of Fire Sciences*. 1984. Vol. 2. March-April. P. 142–152.
85. Purser, D.A. The application of exposure concentration and dose to evaluation of the effects of irritants as components of fire hazard [Текст]. *Interflam 2007*. Royal Holloway College, UK. Proceedings, 3–5 September 2007. P. 1033–1046.
86. Puzach, S.V., Puzach, V.G. Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer in Fire in a Compartment of Complex Geometry [Текст]. *Heat Transfer Research*. 2005. Issue 7. P. 585–600.
87. Kaplan, H.L., Grand, A.F., Hatzell, G.E. *Combustion Toxicology: Principles and Test Methods* [Текст]. Lancaster: Technomic Publishing Co. 1983. 174 p.
88. Hertzberg, N. Isocyanates in fire smoke can be more dangerous than carbon monoxide [Текст]. *BrandPosten*. 2003. № 28. P. 8–9.
89. *Carbon Monoxide (Sec. ed.)*. IPCS Environmental Health Criteria 213 [Текст]. Geneva: World Health Organization, 1999. 464 p.
90. Gad, S.C., Anderson R.C. *Combustion Toxicology* [Текст]. CRC Press. Boston. 1990. 205 p.
91. Щеглов, П.П. Исследование состава газообразных продуктов термоокислительного разложения некоторых полимерных строительных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / Щеглов Павел Петрович. – М., 1967. – 124 с.
92. Веселы, В. Исследование состава продуктов термоокислительного разложения и горения некоторых синтетических текстильных волокон с целью обоснования допустимого времени эвакуации людей из зданий при пожаре:

дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / Веселы Владимир. – М., 1978. – 213 с.

93. Матюшин, А.В. Исследование начальной стадии развития пожара в помещении с целью обоснования необходимого времени эвакуации людей из торговых залов универмагов: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / Матюшин, Александр Васильевич. – М., 1982. – 289 с.

94. Гуско, И.Д. Термогазодинамика пожара в замкнутых отсеках специальных фортификационных сооружений и разработка методики оценки его опасных факторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 [Текст] / Гуско Иван Дмитриевич. – М., 1988. – 156 с.

95. Белешников, И.Л. Судебно-медицинская оценка содержания цианидов в органах и тканях людей, погибших в условиях пожара: дис. ... канд. мед. наук: 14.00.24 [Текст] / Белешников Игорь Леонидович. – СПб., 1996. – 130 с.

96. Мурзаев, А.М. Судебно–медицинская характеристика отравлений продуктами горения азот содержащих полимерных материалов: дис. ... канд. мед. наук: 14.00.24 [Текст] / Мурзаев Атай Мурадович. – СПб., 1998. –124 с.

97. Бояркина, В.В. Комплексные санитарно–химические и токсикологические исследования полимерных материалов с учетом возрастной чувствительности организма: дис. ... канд. биол. наук: 14.00.07 [Текст] / Бояркина Вера Васильевна. – СПб. – 1999. – 103 с.

98. Исаева, Л.К. Экологические последствия пожаров: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 [Текст] / Исаева Людмила Карловна. – М., 2001. –107 с.

99. Смирнов, Н.В. Прогнозирование пожарной опасности строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 [Текст] / Смирнов Николай Васильевич. – М., 2002. – 273 с.

100. Трушкин, Д.В. Совершенствование методологии определения пожар-ной опасности строительных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 [Текст] / Трушкин Дмитрий Владимирович. – М., 2004. – 226 с.

101. Смагин, А.В. Моделирование выделения и распространения токсичных газов при пожарах в зданиях и сооружения для обоснования их объемно-планировочных решений с целью обеспечения безопасной эвакуации людей: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 [Текст] / Смагин Александр Владимирович. – М., 2008. – 268 с.

102. Грабовецкая, Н.Н. Разработка методов оценки и снижения токсичности полимерных конструкционных материалов при их эксплуатации и горении: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 [Текст] / Грабовецкая Наталья Николаевна. – СПб., 2006. – 103 с.

103. Нгуен, Тхань Хай Методика расчета необходимого времени эвакуации людей при пожаре в машинных залах ГЭС Вьетнама в условиях работы системы дымоудаления: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 [Текст]/ Нгуен Тхань Хай.– М., 2010. – 176 с.

104. Доан, Вьет Мань 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.

105. Уварова, В.А. Методологические основы контроля пожароопасных и токсических свойств шахтных полимерных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 [Текст] / Уварова Варвара Александровна. – М., 2016. – 300 с.

106. Гахнапетян, А.П. Судебно-медицинские аспекты отравлений продуктами горения полимерных материалов: дис. ... канд. мед. наук: 14.00.20 [Текст] / Гахнапетян Арам Петросович. – СПб., 1997. – 140 с.

107. Вредные вещества в окружающей среде. Элементы I–IV групп периодической системы и их неорганические соединения: справ.-энц. изд. под ред. В.А. Филова и др. [Текст]. – СПб.: НПО «Профессионал», 2005. – 462 с.

108. Джон, Г. Пери Справочник инженера-химика. Том 1: перевод с четвертого английского издания [Текст] / Джон Г. Пери; под общ. ред. акад. Жаворонкова Н.М. и чл.-корр. АН СССР Романкова П.Г. – М.: Химия, 1969. – 640 с.

109. Пожары и пожарная безопасность в 2008 году: статистический сборник [Текст] / С.А. Лупанов, А.Г. Фирсов и др.; под общ. ред. Н.П. Копылова. М.: ВНИИПО, 2009. – 137 с.

110. Пожары и пожарная безопасность в 2009 году: статистический сборник [Текст] / С.А. Лупанов, А.Г. Фирсов и др.; под общ. ред. Н.П. Копылова. М.: ВНИИПО, 2010. – 135 с.

111. Пожары и пожарная безопасность в 2010 году: статистический сборник [Текст] / С.А. Лупанов, А.Г. Фирсов и др.; под общ. ред. В.И. Климкина. М.: ВНИИПО, 2011. – 140 с.

112. Пожары и пожарная безопасность в 2011 году: статистический сборник [Текст] / И.Г. Андросова, Н.А. Зуева и др.; под общ. ред. В.И. Климкина. – М.: ВНИИПО, 2012. – 137 с.

113. Пожары и пожарная безопасность в 2013 году: статистический сборник [Текст] / С.А. Лупанов, Н.А. Зуева; под общ. ред. Н.П. Копылова. – М.: ВНИИПО, 2014. – 167 с.

114. Пожары и пожарная безопасность в 2014 году: статистический сборник [Текст] / И.Г. Андросова, Н.А. Зуева и др.; под общ. ред. А.В. Матюшина. – М.: ВНИИПО, 2015. – 124 с.

115. 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.

116. СТО 70238424.27.140.011-2010 «Гидроэлектростанции. Условия создания. Нормы и требования» [Текст]. – М.: Стандарт организации НП «ИНВЭЛ», 2010. – 87 с.

117. СТО 70238424.27.140.015-2010 «Гидроэлектростанции. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования» [Текст]. – М.: Стандарт организации НП «ИНВЭЛ», 2010. – 121 с.

118. Отчет по определению величин необходимого и фактического (расчетного) времени эвакуации людей, а также величины пожарного риска главного корпуса Нижегородской гидроэлектростанции (ГЭС), расположенной

по адресу: Нижегородская область, Городецкий район, г. Заволжье [Текст]. – Йошкар-Ола: ООО НПП «СКАТ», 2010. – 139 с.

119. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара [Текст] / патентообладатель: Пузач С.В.; автор: Пузач С.В от 08.12.2006 г.

120. Патент Российской Федерации на полезную модель № 174688. Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении [Текст]/ патентообладатели: Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г., Пузач С.В.; авторы: Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г., Пузач С.В.; заявка 20.04.2017; регистрация 26.10.2017; Бюллетень № 30-2017.

121. Spalding, D.B. Older and newer approaches to the numerical modelling of turbulent combustion [Текст]. 3-rd International Conference on Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines. London: IMochE. 1996. P. 25–37.

122. Welch, S., Rubini, P. SOFIE: Simulation of Fires in Enclosures [Текст]. User Guide. United Kingdom: Cranfield University. 1996. 340 p.

123. McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd J. Fire Dynamic Simulator (version 5) [Текст]. User's Guide. NIST Special Publication. 1019-5. 2007. 206 p.

124. Яндекс.Картинки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://m.yandex.ru/images> (дата обращения 23.02.2014).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Акты внедрения
результатов диссертационной работы**

УТВЕРЖДАЮ

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

_____ М.В. Алешков
« 10 » _____ 2016 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание степени кандидата технических наук преподавателя кафедры пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МЧС России, майора внутренней службы Акперова Руслана Гянджавиевича при выполнении научно-исследовательской работы

Комиссия в составе: начальника учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве, д.т.н., профессора Серкова Бориса Борисовича (председатель), начальника отдела организации научных исследований и научной информации, к.т.н., полковника внутренней службы Храмцова Сергея Петровича, начальника кафедры процессов горения, к.т.н., Комракова Петра Владимировича подтверждает, что результаты диссертационного исследования Акперова Руслана Гянджавиевича были использованы при выполнении научно-исследовательской работы на тему «Проведение научных исследований по развитию и совершенствованию испытаний веществ и материалов на токсичность» (п. 86 плана научной работы Академии ГПС МЧС России на 2015 г.).

Председатель комиссии:

Начальник УНЦ ППБС
д.т.н., профессор



Серков Б.Б.

Члены комиссии:

Начальник отдела организации
научных исследований и научной информации
к.т.н, доцент
полковник внутренней службы



Храмцов С.П.

Начальник кафедры процессов горения
к.т.н.
полковник внутренней службы



Комраков П.В.

“УТВЕРЖДАЮ”

Заместитель директора по проектированию -
начальник ГТУ АО «Атомэнергопроект»


С.А. Елфимов
« 23 » августа 2016 г.



АКТ

на внедрение результатов исследований, полученных при выполнении
диссертационной работы Акперовым Русланом Гянджавиевичем

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы
Акперова Руслана Гянджавиевича 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».

Главный инженер генерального проектировщика

по пожарной безопасности



В.И. Захаров

Главный специалист,
кандидат технических наук



К.Н. Орлов

Главный специалист



Д.С. Никонов

« 23 » августа 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ

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


_____ М.В. Бедило
« 19 » апреля 2017 г.


АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук преподавателя кафедры пожарной безопасности в строительстве Академии ГПС МЧС России, майора внутренней службы Акперова Руслана Гянджавиевича в учебном процессе Академии ГПС МЧС России

Комиссия в составе: начальника учебно-методического центра, к.и.н., полковника внутренней службы Шныпко Виталия Сергеевича (председатель), заместителя начальника учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве, полковника внутренней службы Злобнова Петра Викторовича, доцента кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, к.т.н., доцента Лимонова Вячеслава Григорьевича, доцента кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, к.т.н., доцента Андреева Владимира Викторовича подтверждает, что результаты диссертационного исследования Акперова Руслана Гянджавиевича внедрены в учебный процесс кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, а именно при разработке фондовых лекций, проведении лекционных, лабораторных и практических занятий со слушателями, курсантами и студентами Академии ГПС МЧС России по дисциплине «Прогнозирование опасных факторов пожара» по темам «Интегральная математическая модель прогнозирования пожара в помещении» и «Зонная математическая модель прогнозирования пожара в помещении».

Председатель комиссии:

Начальник учебно-методического центра
к.и.н, полковник внутренней службы



Шныпко В.С.

Члены комиссии:

Заместитель начальника УНЦ ППБС
полковник внутренней службы



Злобнов П.В.

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



Лимонов В.Г.

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



Андреев В.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 174688

**Установка для определения пожарной опасности
конденсированных материалов при их термическом
разложении**

Патентообладатели: *Сулейкин Евгений Владимирович (RU),
Акперов Руслан Гянджавиевич (RU), Пузач Сергей
Викторович (RU)*

Авторы: *Сулейкин Евгений Владимирович (RU), Акперов Руслан
Гянджавиевич (RU), Пузач Сергей Викторович (RU)*

Заявка № 2017113747

Приоритет полезной модели 20 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 26 октября 2017 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 20 апреля 2027 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

