

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

Академия Государственной противопожарной службы

На правах рукописи



Болдрушкиев Очир Баатрович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ
ЦИАНОВОДОРОДОМ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Москва – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ТОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЦИАНОВОДОРОДА ПРИ ПОЖАРАХ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ ...	13
1.1 Особенности пожарной опасности объектов энергетики	13
1.2 Анализ пожарной нагрузки объектов энергетики.....	24
1.3 Токсикологический эффект продуктов горения при пожарах на объектах энергетики.....	35
1.4 Особенности образования и токсикологического воздействия циановодорода на человека при пожарах на объектах энергетики.....	45
1.5 Методы расчета плотностей токсичных продуктов горения.....	54
1.6 Выводы по первой главе	57
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ЦИАНОВОДОРОДОМ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ	59
2.1 Интегральная модель пожара.....	59
2.2 Зонная модель пожара	65
2.3 Математическая модель расчета плотности циановодорода при пожарах	69
2.4 Физико-математическая модель отравления циановодородом в условиях пожара	77
2.5 Методика определения времени блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики	83
2.6 Выводы по второй главе	86
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	87

3.1 Постановка задач экспериментального определения парциальной плотности циановодорода и удельных коэффициентов образования циановодорода в экспозиционной камере установки.....	87
3.2 Описание модифицированной экспериментальной установки. Методика проведения экспериментов.....	89
3.3 Результаты экспериментальных исследований по определению удельных коэффициентов образования газов, потребления кислорода и парциальных плотностей газов в маломасштабной установке	98
3.4 Выводы по третьей главе.....	107
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ЦИАНОВОДОРОДОМ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ..	108
4.1 Численное решение модели расчета парциальной плотности циановодорода и показателя токсичности при совместном воздействии <i>HCN</i> и <i>CO</i>	108
4.2 Численное решение физико-математической модели отравления циановодородом.....	114
4.2.1 Исходные данные для численных экспериментов.....	114
4.2.2 Принятые критические времена воздействия <i>HCN</i> на организм человека в условиях пожара.....	115
4.2.3 Численное решение физико-математической модели отравления циановодородом при постоянной во времени концентрации <i>HCN</i>	116
4.2.4 Влияние повышенной скорости легочной вентиляции на степень отравления человека циановодородом.....	119
4.2.5 Численное решение физико-математической модели отравления циановодородом при изменяемой по времени концентрации циановодорода.....	122
4.3 Численные эксперименты по математическому моделированию пожара в полномасштабном помещении объекта энергетики.....	127

4.4 Практические рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации циановодородом при пожарах на объектах энергетики	131
4.7 Выводы по четвертой главе.....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	135
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ Результатов диссертационной работы.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ Б СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	152

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В современной России задачи в области энергетики имеют высокую стратегическую значимость и являются основой энергетической стабильности государства, а вопросы пожарной безопасности данных объектов являются актуальными.

Согласно статистическим данным, основной причиной гибели людей на пожарах является отравление токсичными продуктами горения – более чем в 70 % случаев. Токсичность продуктов горения обусловлена содержанием опасных токсикантов, выделяющихся при термическом разложении материалов. Как правило, количественный и качественный состав продуктов горения, в первую очередь, зависит от материалов, участвующих в процессе газификации [1]. Исследования в области газификации различных материалов представляют, что в условиях пожара при горении полимерных материалов могут образовываться от 50 до 100 токсичных химических соединений. Таким образом, рост номенклатуры применяемых полимерных материалов в производственных зданиях объектов энергетики может значительно усложнять токсикологическую картину пожара новыми токсичными веществами.

Исследования в области изучения токсикологической картины пожара определяют монооксид углерода в качестве основного токсиканта, образующегося в условиях пожара. Однако, работы [2–12] указывают на присутствие различных токсикантов в крови погибших в токсикологически значимых концентрациях. Обобщенные результаты судебно-медицинских экспертиз в работах [6] отмечают, что во многих случаях летального отравления в условиях пожара основным токсикантом являлся циановодород, гибель от которого происходит не реже, чем от монооксида углерода. Образование циановодорода при пожарах на объектах энергетики возможно при горении изоляции кабельной продукции (полиуретан, сшитый полиэтилен, резина), проложенных в кабельных сооружениях [13].

В качестве профилактических противопожарных мероприятий по предотвращению негативного воздействия токсичных продуктов горения

используется математическое моделирование распространения токсичных газов и их воздействие на организм человека. Данное моделирование основывается на прогнозировании динамики развития опасных факторов пожара. Математические модели, осуществляющие данное прогнозирование, достаточно развиты для решения прикладных задач пожарной безопасности, однако, рассматривают процессы образования и распространения лишь двух токсичных газов (монооксид углерода, хлороводород) не принимая во внимание чрезвычайно опасный токсикант – циановодород. Отсутствие циановодорода в расчетных методиках по определению времени блокирования путей эвакуации, в первую очередь, связано с отсутствием обширной экспериментальной базы по образованию циановодорода при горении различных материалов [13]. Удельные коэффициенты образования, позволяющие определять величины массового образования токсиканта при горении материалов, отсутствуют по циановодороду в существующих базах данных по выделению токсичных продуктов горения.

Таким образом, разработка методики расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом и получение экспериментальных данных по его образованию позволит повысить уровень безопасности персонала на объектах энергетики и является **актуальной научной и практической задачей.**

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в понимание процесса развития опасных факторов пожара внесли такие ученые как: Ю.А. Кошмаров [14–16], В.М. Астапенко [17], И.С. Молчадский [18, 19], С.В. Пузач, [20–32], В.М. Есин [33–35], А.Н. Баратов [36], Р.Г. Акперов [28, 31, 37], Е.В. Сулейкин [28, 32], W. K. Chow, T. Tanaka [38], S. Yamada, K. Matsuyama, G.D. Loughheed и другие.

В понимание процесса горения и газификации полимерных материалов внесли: В.С. Иличкин [39, 40], В. Веселы [41], Д.В. Трушкин [42], Л.К. Исаева [43, 44], Л.М. Шафран [45], П.П. Щеглов [46–48] и другие.

Однако, в данных исследованиях не рассматривались достаточно подробно процессы образования и распространения циановодорода, необходимые для расчета времени блокирования путей эвакуации этим токсикантом. Удельные

коэффициенты выделения циановодорода приведены только для малого количества горючих материалов. Для современных полимерных материалов, находящихся на объектах энергетики, таких данных нет. Кроме того, отсутствует научное обоснование критической величины парциальной плотности циановодорода, используемой при определении времени блокирования путей эвакуации. [49, 50].

В работах С.В. Пузача, Е.В. Сулейкина и Р.Г. Акперова [37] был рассмотрен подход к определению плотности токсичного газа на основе экспериментальной зависимости плотности монооксида углерода (далее CO) от среднеобъемной температуры продуктов горения. Однако, в данной работе основным критерием частичного подобия рассматривался коэффициент теплопотерь, который изменяется по времени, что в значительной степени влияет на точность определения плотности токсичного газа.

В данной работе для определения времени блокирования путей эвакуации циановодородом предлагается использование экспериментально-теоретической зависимости плотности токсичного газа от изменения плотности кислорода. Применение данного подхода к определению времени блокирования циановодородом исключает необходимость в определении коэффициента теплопотерь и решении дифференциальных уравнений законов сохранения массы токсичного газа, а также позволяет установить связь между парциальной плотностью циановодорода в маломасштабном объеме и полномасштабным помещением.

Целью исследования в работе является разработка методики расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики с использованием экспериментально-теоретического подхода к определению зависимости парциальной плотности циановодорода от изменений среднеобъемной плотности кислорода.

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

– провести анализ пожарной опасности объектов энергетики и литературных источников по определению возможности образования циановодорода в условиях пожара на данных объектах, а также рассмотреть комбинированное токсическое воздействие циановодорода с другими токсичными продуктами горения;

– разработать экспериментально-теоретический подход к определению среднеобъемной парциальной плотности циановодорода (далее HCN), основывающийся на экспериментальной зависимости парциальной плотности токсичного газа от изменения среднеобъемной плотности кислорода (далее O_2) в помещении с учётом масштабного фактора при горении современных полимерных материалов, находящихся на объектах энергетики;

– разработать физико-математическую модель отравления циановодородом в условиях пожара с учетом психофизиологических особенностей эвакуирующихся;

– модифицировать экспериментальную установку и провести на ней экспериментальные исследования по определению удельных коэффициентов образования циановодорода и зависимости парциальной плотности циановодорода от изменения парциальной плотности кислорода в помещении в случае горения современных полимерных материалов, находящихся на объектах энергетики;

– разработать методику расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом на основе предложенной модификации интегральной и зонной моделей прогнозирования динамики развития опасных факторов пожара, а также научно-обоснованные рекомендации для обеспечения безопасной эвакуации людей при пожаре на объектах энергетики.

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

Предметом исследования в работе является время блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– получены новые экспериментальные и теоретические данные по зависимости парциальной плотности циановодорода от изменения парциальной плотности кислорода и удельному коэффициенту образования HCN в условно герметичном объеме, необходимые для расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом, при горении изоляции современной кабельной продукции, находящейся на объектах энергетики;

– разработана физико-математическая модель отравления циановодородом в условиях пожара с учетом психофизиологических особенностей эвакуирующихся;

– разработан новый подход к определению показателя токсичности при совместном влиянии циановодорода и монооксида углерода, основывающийся на аналитическом решении интегральной модели пожара в условно герметичном помещении;

– разработаны модификации интегральной и зонной моделей, используемых при расчете времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения, основывающиеся на использовании экспериментальной зависимости парциальной плотности циановодорода от изменения парциальной плотности кислорода с учетом масштабного фактора.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

– научном обосновании использования в математической модели расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики экспериментальных зависимостей парциальной плотности циановодорода от изменений парциальной плотности кислорода с учетом масштабного фактора и особенностей термогазодинамической картины пожара в полномасштабном помещении;

– совершенствовании научных основ образования и распространения циановодорода в объеме помещений объектов энергетики и их влияние на время блокирования путей эвакуации;

– создании методики расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом на основе модифицированных интегральной и зонной моделей, используемых для расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре на объектах энергетики.

Методология и методы исследования. Методологические основы данного исследования составили работы в области изучения тепломассообменных процессов и прогнозирования динамики развития опасных факторов пожара, а также работы, посвященные исследованию токсичности продуктов горения.

При проведении данного исследования были использованы экспериментальные методы исследования термического разложения различных материалов, методы расчета газодинамики и тепломассообмена, а также методы численного решения дифференциальных уравнений.

Реализация работы. Материалы исследования реализованы при:

– разработке фондовых лекций, проведении практических и лабораторных занятий с обучающимися Академии ГПС МЧС России в рамках дисциплины «Теплотехника и прогнозирование опасных факторов пожара» по теме «Дополнительные соотношения интегральной модели пожара»;

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

– 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».

Положения, выносимые на защиту:

– новый подход к определению показателя токсичности при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода, основывающийся на аналитическом решении интегральной модели пожара в условно герметичном помещении;

– физико-математическая модель отравления циановодородом в условиях пожара, основанная на определении степени отравления за счет увеличения массы циановодорода в крови во время эвакуации людей с учетом повышенной скорости вентиляции легких;

– результаты экспериментов по определению удельных коэффициентов образования циановодорода и зависимостей среднеобъемной парциальной плотности циановодорода от изменений среднеобъемной парциальной плотности кислорода, позволяющие проводить расчет динамики изменений среднеобъемной плотности циановодорода без решения дифференциального уравнения закона сохранения массы HCN при горении материалов, применяемых на объектах энергетики;

– модификации интегральной и зонной моделей прогнозирования динамики ОФП, позволяющие определять среднеобъемную парциальную плотность циановодорода при горении характерных для объектов энергетики материалов в реальном полномасштабном помещении, используя экспериментальные зависимости среднеобъемной парциальной плотности HCN от среднеобъемной парциальной плотности O_2 , полученные в маломасштабном объеме экспериментальной установки;

– методика расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом, основанная на применении модифицированных интегральной и зонной математических моделей, а также физико-математической модели отравления циановодородом при эвакуации людей при пожаре.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается за счет применения поверенных средств измерения при проведении экспериментальных исследований, апробированных методов обработки полученных экспериментальных данных, апробированных математических методик анализа численных данных. Полученные экспериментальные данные с достаточной точностью для инженерных расчетов совпадают с теоретическими данными.

Личный вклад автора. Основные результаты исследования, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично и опубликованы в журналах, включенных в перечень ВАК России.

Апробация работы. Основные результаты были доложены на следующих конференциях: XXVII международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2018» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018); XII научно-практической конференции «Ройтмановские чтения», (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019); VII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2018» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019); IX международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести» (Минск, Университет гражданской защиты МЧС Беларуси, 2019); XXVIII международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2019» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2019); III международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, Национальный исследовательский университет МЭИ, 2020); IX международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2021» (Москва, Академия ГПС МЧС России, 2021).

Публикации: в ходе выполнения диссертационной работы автором было опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе цитирования Scopus, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Представленная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 153 страницах машинописного текста и включает в себя 50 рисунков и 21 таблицу. Список литературы включает в себя 115 библиографических ссылок.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ТОКСИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЦИАНОВОДОРОДА ПРИ ПОЖАРАХ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

1.1 Особенности пожарной опасности объектов энергетики

Энергетика – область народного хозяйства, науки и техники, охватывающая энергетические ресурсы, производство, передачу, преобразование, аккумулирование, распределение и потребление энергии различных видов [51].

Уровень развития данной отрасли всегда олицетворял состояние экономики, промышленности и сельскохозяйственного производства в любой стране мира. С наступлением XX века наблюдается активный рост технических систем и потребляемых ими мощностей, что приводит к необходимости в электроэнергии всех ведущих отраслей промышленности.

Аварии на объектах энергетики, которые принимают непосредственное участие в производстве и передаче электроэнергии, могут оказывать значительное влияние на энергоснабжение жизнеобеспечивающих технических систем государства. Таким образом, развитие энергетической промышленности должно коррелировать с уровнем обеспечения пожарной безопасности на объектах энергетики.

В зависимости от особенностей технологического процесса и вида перерабатываемой энергии, принято разделять электростанции на:

- тепловые электростанции (ТЭС);
- гидроэлектростанции (ГЭС);
- атомные электростанции (АЭС);
- ветровые электростанции (ВЭС);
- солнечные электростанции (СЭС).

Исторически сложилось, что лидирующее положение в области развития энергетики России, занимает теплоэнергетика. Несмотря на совместное развитие других видов электростанций, на долю ТЭС приходится свыше 70% всей производимой электроэнергии. Согласно данным ЕЭС за 2017 год суммарная

установленная мощность электрогенерации в Российской Федерации составила более 240 гигаватт (ГВт). Распределение производимой электроэнергии различными типами электростанции представлено на рисунке 1.1.

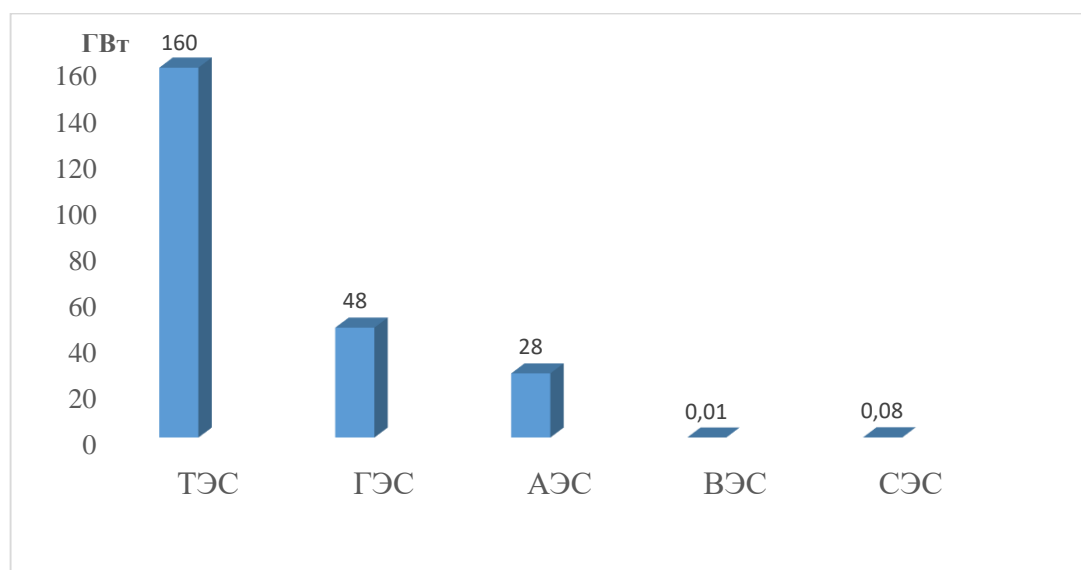


Рисунок 1.1 – Суммарная электрогенерация в РФ по типам электростанции за 2017 год

Тепловые и гидроэлектростанции играют значительную роль для энергетической отрасли Российской Федерации. Значительные объемы добычи топливных ресурсов являются основой дальнейшей перспективы развития тепловых электростанций. Список основных тепловых электростанций с установленной мощностью более 600 МВт представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Основные теплоэлектростанции, находящиеся на территории РФ, с номинальной мощностью более 600 МВт

№ п/п	Наименование электростанции	Вид топлива	Номинальная мощность, МВт
1.	Рязанская ГРЭС	Уголь Газ Мазут	3130
2.	ТЭЦ 26 «Южная»	Газ Мазут	1840
3.	ТЭЦ 21	Газ Мазут	1765
4.	Костромская ГРЭС	Газ Мазут	3600
5.	ТЭЦ – 25	Газ Мазут	1370

В ходе анализа статистических данных по пожарам в производственных зданиях объектов энергетики было выявлено, что основная доля пожаров происходит на тепловых электростанциях и гидроэлектростанциях (рисунок 1.2).

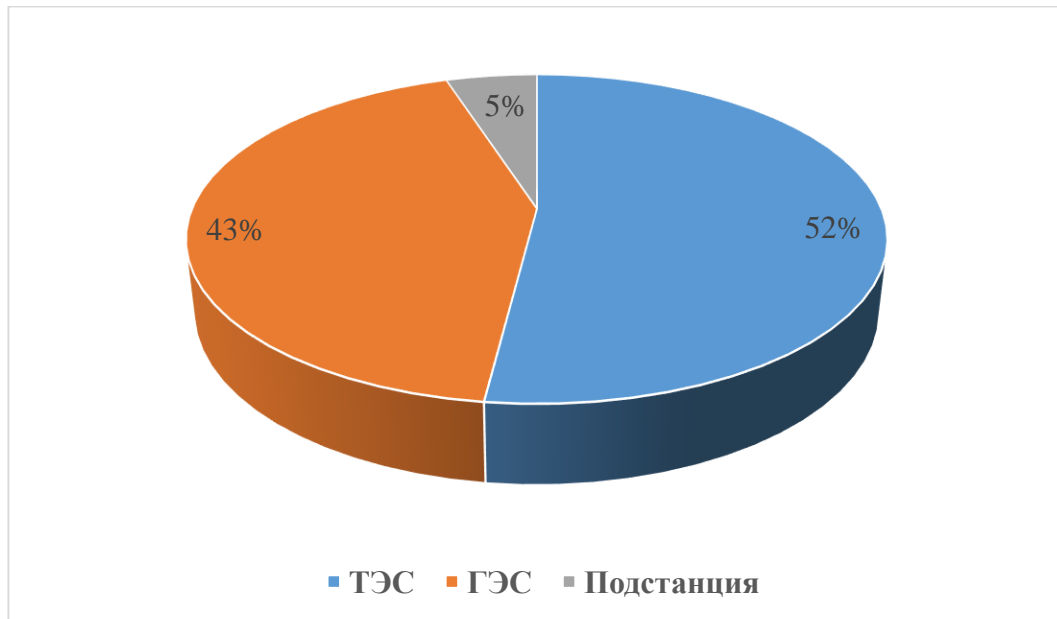


Рисунок 1.2 – Статистические данные по пожарам на электростанциях

Пожары на тепло- и гидроэлектростанциях, как правило, сопровождаются значительным материальным ущербом и потенциальной остановкой деятельности предприятия, что может также привести к остановке деятельности энергозависимых отраслей промышленности.

Тепловая электростанция (ТЭС) – электростанция, преобразующая химическую энергию топлива в электрическую энергию или электрическую энергию и тепло [51].

ТЭС представляют собой оптимально расположенные сооружения, необходимые для генерации пара, получающегося из воды за счет теплоты сжигаемого топлива и оборудования необходимого для преобразования потенциальной энергии пара в электрическую. В общем понимании, тепловая схема ТЭС является техническим воплощением термодинамического цикла [52].

Оценивая пожарную опасность ТЭС стоит отметить, что рассматриваемые объекты можно отнести к высокой категории опасности, так как на данных объектах хранятся и обращаются топливно-энергетические ресурсы в значительном количестве. По отношению к другим типам электростанций,

тепловые, по праву можно считать наиболее опасными, так как на данных объектах наибольшее количество пожароопасных производственных объектов, которые имеют большое количество горючих материалов и технических средств, потенциально являющиеся источниками зажигания и горения.

В зависимости от типа помещений объектов энергетики может изменяться уровень пожарной опасности. Типовые производственные здания электростанций условно можно классифицировать на следующие помещения:

- машинный зал;
- турбинные агрегаты;
- кабельные сооружения;
- подагрегатное пространство;
- технический этаж.

Машинный зал условно можно разделить на три отсека: турбинный, деаэрационный и котельный. Характерное фото машинного зала ТЭС представлено на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Характерное фото машинного зала ТЭС

Турбинный отсек состоит из фундамента, опорной железобетонной плиты, установленной на грунт, и вертикально расположенных колонн, на которые также

опирается фундаментальная плита. На верхнюю фундаментную плиту устанавливают паровую турбину, электрогенератор и возбудитель. В целом, совокупность данных элементов образует турбоагрегат.

Как правило, турбогенераторы располагаются в машинном зале с заранее предусмотренным между ними свободным пространством на всю высоту здания от нулевой отметки до наивысшей отметки кровли. Также при размещении турбогенераторов предусматривают подогреватели высокого давления.

Пожарная опасность машинного зала обуславливается сложностью протекающих в нем технологических процессов, а также сосредоточением большого количества пожарной нагрузки. К основной пожарной нагрузке машинных залов можно отнести следующие материалы и вещества:

- смазки генераторов;
- машинное и трансформаторное масло;
- дизельное топливо;
- топливное и гидравлическое масло;
- изоляция обмоток генераторов;
- изоляция обмоток электрооборудования.

Содержание большого количества легковоспламеняющейся и горючей жидкости (далее ЛВЖ и ГЖ) в машинном зале способствует формированию условий возникновения взрывоопасной концентрации в случае аварий различного характера. Размещение систем смазки генераторов предусматривается на нулевой отметке и представляют из себя емкости с маслом объемом до 10 тонн. Повреждение данного оборудования в условиях пожара может сопровождаться значительным разливом масла по площади машинного зала. Принимая во внимание протяженность машинного зала и количество размещенного масла, площадь разлива, а также его интенсивность испарения ($\text{кг/с}\cdot\text{м}^2$), может достигать значительных величин, что может привести к образованию взрывоопасных концентраций, и, как следствие, к взрыву.

Помимо этого, при разрушении трубопроводов системы смазки генераторов наблюдается выход находящегося под высоким давлением масла и образование

горящего факела. Тепловой поток, образующийся от горящего факела, может вызвать быструю деформацию с последующим обрушением металлических конструкций, расположенных в машинном зале [53]. Быстрая скорость выгорания и большое количество удельного тепловыделения способствуют быстрому развитию пожара и достижению критических температур для металлических несущих конструкций в течении нескольких минут.

Пожары в машинных залах, вызванные выбросами масла, разделяют на следующие виды [54]:

- аэрозольное возгорание (при выбросе масла с высоким давлением);
- пожар пролива (горение масла, пролившегося на пол);
- трехмерное горение пролитого масла – горение протечек масла из резервуаров, не находящихся под давлением, в направлении «вниз».

Образующиеся в результате выброса масла взрывоопасные среды могут образовываться в различных местах масляной системы генераторов, а также в прилегающих узлах и отсеках. Помимо образования взрывоопасных зон, вследствие выброса масла или иных утечек, возможны утечки водорода из корпусов генераторов и масляной системы. Однако, пожары, связанные с выбросами водорода, происходят при его значительных утечках, которые происходят при полном или частичном разрушении генератора, а также при значительных выбросах масла. В работе [55] также отмечалось, что при возгорании масла вне генератора, при условии его целостности, возгорание водорода не наблюдается.

Помимо наличия большого количества ЛВЖ и ГЖ машинные залы ТЭС характеризуются наличием следующих горючих и взрывопожароопасных веществ:

- обращение горючих газов в турбоагрегатах для охлаждения ротора генератора;
- твердой горючей нагрузки: уголь, фильтрующие материала, древесина и др.;
- значительным количеством кабельной продукции, включающей в себя изоляцию электрических кабелей на основе полимерных веществ.

Образование водорода при пожарах в машинных залах способствует возникновению аварийных ситуаций в системе охлаждения генераторов, что может стать причиной разрушения маслопроводов и выброса масла на соседние агрегаты и кабельные сооружения.

Уголь является одним из основных горючих топлив, применяемых на ТЭС. Еще одним важным источником возникновения взрывоопасных ситуаций является образование дисперсной угольной пыли. При наличии взвешенной в воздухе дисперсной пыли в достаточной концентрации и источника тепла (достаточного для образования горения) возможно образование первичного взрыва. Помимо этого, при протекании первичного взрыва наблюдается распыление оставшейся пыли в взвешенное состояние, что в последующем может вызвать серию вторичных взрывов, которые могут распространиться по всему производственному зданию [54].

Натурные огневые испытания по случаю горения турбинного масла площадью 5 м² показали, что полное задымление машинного зала площадью более 8000 м² наблюдалось в течении 5 минут [56]. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что при пожарах на объектах энергетики необходимое время эвакуации из помещений машинного зала будет сравнительно небольшим.

В работе [56] также было отмечено, что при нахождении эвакуирующихся в помещениях, расположенных ниже уровня пола машинного зала, время их эвакуации может занимать от 10 до 15 минут. Продолжительная эвакуация из рассматриваемых помещений связана с отсутствием достаточного количества эвакуационных лестниц из помещений, находящихся ниже уровня пола машинного зала, а также большой протяженностью кабельных туннелей и подагрегатных помещений.

Помимо наличия большого количества ГЖ, существенную часть пожарной нагрузки объектов энергетики занимает кабельное хозяйство.

В целях генерации, передачи и обращения большого количество электроэнергии на объектах энергетики предусматривается большая оснащенность электрическими установками. Для обеспечения технологического

процесса, применяемые электрические установки имеют большую номинальную мощность и, как следствие, имеют значительное количество кабельной продукции, располагаемой в кабельных сооружениях и подагрегатных помещениях. Применение большого количества кабельной продукции, эксплуатируемой в условиях повышенных токов, может привести к серьезному пожару вследствие перегрузок и коротких замыканий электропроводов и электрокабелей.

В результате анализа статистических данных по причинам возникновения пожаров в кабельных сооружениях объектов энергетики было выявлено, что одной из основных причин возникновения пожаров на рассматриваемых объектах, перерабатывающих и передающих значительные величины токов, является короткое замыкание, которое происходит вследствие перенапряжения электросети, нарушения изоляции токопроводящих жил и механического повреждения кабельной продукции в процессе монтажа и ремонта. Одной из основных причин возникновения короткого замыкания может являться тепловое старение изоляции кабеля, которое возникает при перегрузке электросетей током, превышающие длительно допустимые для данного сечения кабеля [54].

Помимо этого, расположение кабельной продукции предусматривается в отдельных сооружениях, в которых возможна горизонтальная и вертикальная прокладки электрических линий. Как правило, в данных сооружениях применяется групповая прокладка кабельных изделий.

Расположение кабельной продукции в кабельных сооружениях во многом влияет на скорость и характер развития пожара. Кабельную продукцию в туннелях и полуэтажах укладывают на металлические конструкции (вертикально или горизонтально). В зависимости от размеров кабельных сооружений предусматривается двухстороннее наличие специальных металлических конструкций. Количество электропроводов и кабельных изделий, размещенных на строительных конструкциях при их двухстороннем расположении, может достигать до 80 единиц, что соответствует условной удельной пожарной нагрузке

от 30 – 60 кг/м² [53]. Расположение кабельной продукции в туннелях представлено на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Расположение кабельной продукции в туннелях

Кабельный канал – элемент системы электропроводки, расположенный над землей или полом, или в земле или в полу, открытый, вентилируемый или замкнутый, размеры которого не позволяют вход людей, но обеспечивают доступ к трубам и (или) кабелям по всей длине в процессе монтажа и после него [57].

Кабельный туннель – коридор, размеры которого допускают проход людей по всей его длине, содержащий поддерживающие конструкции для кабелей, а также соединительные и (или) другие элементы электропроводок [57].

Кабельные туннели классифицируются в зависимости от количества протяженной кабельной продукции и подразделяются на двусторонние, ширина которых более 1800 мм и односторонние, ширина которых не более 1500 мм. В зависимости от способа размещения кабельной продукции, туннели подразделяются на горизонтальные и вертикальные.

Расположение и количество выходов из кабельных туннелей предусматривается в зависимости от протяженности туннеля. Так, для туннелей протяженностью до 150 метров предусматриваются не менее двух выходов, расположенных в различных концах туннеля. В целях недопущения

распространения пожара по кабельным туннелям, по его длине предусматриваются противопожарные перегородки, которые разделяют туннели на отсеки длиной до 150 метров для туннелей, расположенных вне здания, и на отсеки длиной не более 40 метров для туннелей, расположенных под зданием. В соответствии с нормативными документами, предусматриваемые противопожарные перегородки должны быть выполнены из негорючих материалов и иметь предел огнестойкости не менее EI 45. Выход из кабельных туннелей, расположенных под зданием, должен осуществляться непосредственно из каждого отсека.

Помимо этого, кабельные туннели должны обеспечивать условия для естественной вентиляции. Однако, выбор и расчет необходимых вентиляционных условий определяется на основании тепловыделений, образующихся в результате эксплуатации значительного количества кабельной продукции в замкнутом пространстве.

Пожары в кабельных сооружениях можно охарактеризовать высокой скоростью дымообразования и быстрым распространением дымовой зоны, быстрым ростом среднеобъемных температур, а также растеканием расплавленного металла, который может вызвать новые очаги возгорания. В соответствии с опытными данными, скорость роста среднеобъемной температуры при пожаре в отсеке кабельного туннеля может достигать до 50 °С в минуту. Быстрому развитию пожара в кабельных сооружениях способствует прогревание изоляции кабельной продукции, находящейся под высоким напряжением, до 80 °С и выше. Экспериментальные исследования процесса горения кабельной продукции, говорят о достаточно быстром распространении пламени по кабельным изделиям при отсутствии напряжения. Линейная скорость распространения пламени в данном случае может варьироваться от 0,1 до 0,3 м/мин. При наличии напряжения в электросетях, линейная скорость распространения пламени может увеличиваться до 0,9 м/мин.

Помимо высокой скорости распространения пламени и дымовой зоны, при пожарах в кабельных туннелях образуется достаточно широкий спектр токсичных

продуктов горения. Образование большого количества токсичных веществ происходит вследствие термического разложения изоляции кабельной продукции, которая выполнена из сложно компонентных полимерных материалов. Принимая во внимание условия протекания газификации изоляции кабельной продукции в кабельных сооружениях, а именно отсутствие значительного количества кислорода в замкнутом пространстве, возможно образование компонентов неполного сгорания (оксид углерода, циановодород, ароматические углеводороды и др.). В работе [39] было определено, что при газификации азотосодержащих материалов в условиях пониженного содержания кислорода, образуется большее количество циановодорода, чем в условиях избытка кислорода. Таким образом, при пожарах в кабельных сооружениях образуется большое количество токсичных соединений, которые посредством естественной вентиляции могут распространиться по всему объему производственного здания.

Помимо кабельной продукции с изоляцией из полимерных материалов на объектах энергетики активно применяются маслонаполненные кабели. При пожарах в кабельных туннелях с участием данных изделий, помимо горения изоляции, возможно возгорание трансформаторного масла, которое находится в трубах под избыточным давлением и при температуре 35 – 40 °С. При возникновении аварийных ситуаций, горящее масло растекается по уклонам, что значительно увеличивает площадь пожара.

Таким образом, пожары в кабельных сооружениях имеют высокую скорость распространения пламени и дымовой зоны, содержащей токсичные продукты горения, а также могут распространяться по объему производственного здания и создавать угрозу возникновения пожара на других участках объекта энергетики.

В результате проведенного анализа пожарной опасности производственных зданий объектов энергетики были выявлены наиболее опасные участки: масляные системы и кабельные сооружения.

1.2 Анализ пожарной нагрузки объектов энергетики

Анализ пожарной опасности объектов энергетики позволил выявить основные взрывоопасные и горючие материалы, используемые на данных объектах. К основным можно отнести:

- масло, находящейся в системе смазки генераторов;
- трансформаторное масло;
- гидравлическое масло (предназначено для охлаждения подшипников турбин;
- горючие сжиженные газы;
- твердые горючие материалы (уголь, фильтрующие материалы, древесина и др.);
- кабельная продукция, включающая в себя изоляцию электрических кабелей на основе полимерных веществ.

Как известно, для поддержания технологического процесса объекта энергетики в исправном состоянии предусматриваются большие объемы маслосистем. Применение маслосистем в рамках технологического процесса предназначено для выполнения функций охлаждения и смазки технологического оборудования, участвующего в процессе производства и передачи электроэнергии. Так, для энергоблоков мощностью до 300 МВт предусматривается объем маслосистем не менее 47 м³, а для энергоблоков более 300 МВт объем маслосистем составляет не менее 58 м³.

Как правило, в рамках технологического процесса на объектах энергетики применяется трансформаторное масло с температурой воспламенения 180 °С. В режиме эксплуатации оборудования, масляные системы находятся в непосредственной близости к горючим поверхностям турбин и другим источникам искрообразования, что может стать причиной возникновения пожароопасной ситуации [54].

Масло, находящееся в различном технологическом оборудовании, находится под давлением. В случае возникновения аварийной ситуации, выброс

большого количества масла может стать причиной образования взрывоопасных концентраций. Помимо этого, выброс значительного количества масла способствует быстрому распространения пожара по всем площадкам и его сборникам. За непродолжительный период времени количество масла, вышедшее из различных масляных систем может достигать нескольких тонн. При наличии масляных систем под давлением и достаточного источника тепла возможно образование горящего факела, который за непродолжительное время может привести к обрушению несущих металлоконструкций [54].

Вследствие высокой энергоемкости производственных зданий объектов энергетики, на них размещено значительное количество электрооборудования. Наличие подстанций, питающихся вырабатываемой электростанциями энергией, требуют для их коммуникации огромных кабельных линий. Таким образом, наиболее распространенной твердой горючей нагрузкой на объектах энергетики являются материалы оболочки и изоляции электрических кабелей. Согласно [58] кабельная продукция классифицируется по показателям пожарной опасности на следующие типы:

- 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).

На фоне постоянного совершенствования и усложнения технологических процессов, протекающих на объектах энергетики, наблюдается увеличение вспомогательного электрооборудования, а также устройств автоматизации и контроля электроустановок, вследствие чего модернизируется и кабельное хозяйство исследуемых объектов. В настоящее время на объектах энергетики используются кабели следующего назначения:

- кабели силовые;
- кабели управления;
- контрольные кабели.

Силовые кабели предназначены для передачи электрической энергии токами промышленных частот [59]. Силовые кабели состоят из токопроводящих жил, оболочек и других защитных покрытий изоляции кабеля. В зависимости от условий эксплуатации и классов опасности зон, в которых используется данный

вид кабельной продукции, в конструкцию силовых кабелей могут включаться защитные экраны, жилы защитного заземления, нулевые жилы, а также наполнители.

Количество и толщина изолированных токопроводящих жил определяется в зависимости от номинального напряжения и условий прокладки электрической линии. В случае использования силового кабеля в агрессивных средах и в зонах с повышенным классом опасности также рассматривается применение защитных покровов и бронирование.

Характерная конструкция силового электрического кабеля представлена на рисунке 1.5.

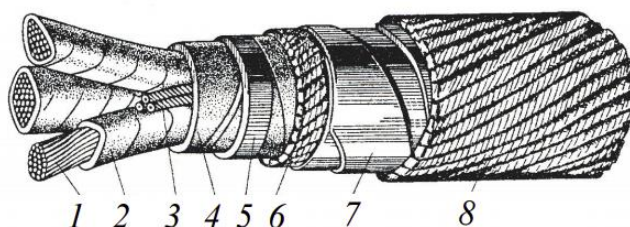


Рисунок 1.5 – Характерная конструкция силового электрического кабеля

1 – токоведущая жила; 2 – изоляция токопроводящих жил; 3 – наполнитель; 4 – поясная изоляция (резина, бумажно-пропитанная); 5 – защитная оболочка; 6 – прослойка; 7 – броня; 8 – джутовый покров

В настоящее время в России и странах СНГ, наиболее широко используемым на объектах энергетики силовым кабелем является маслонаполненный кабель. Данный кабель применяется для напряжения 110 кВт и выше, в котором пропитка бумажной изоляции осуществляется за счет кабельного масла.

Как правило, маслонаполненные кабеля классифицируют в зависимости от величин избыточного давления. Приняты следующие классификации:

- кабельные изделия низкого давления (до 1,5 кгс/см²);
- кабельные изделия среднего давления (до 3,5 кгс/см²);
- кабельные изделия высокого давления (до 15 кгс/см²).

Сечение маслонаполненного кабеля представлено на рисунке 1.6.

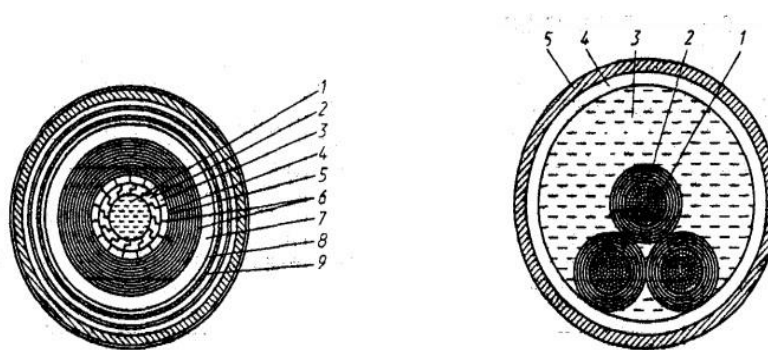


Рисунок 1.6 – Сечение маслонаполненного кабеля: 1 - канал для циркуляции масла; 2 - зетобразные проволоки токопроводящей жилы; 3 - сегментные проволоки токопроводящей жилы; 4 - внутренний слой бумажной изоляции; 5 - наружный слой бумажной изоляции; 6 - экран по изоляции; 7 - свинцовая оболочка; 8 - упрочняющие покрытия; 9 - защитные покрытия

Однако, в настоящее время на фоне глобального потребления полимерных материалов в производстве наблюдается активный переход от маслонаполненных изделий к кабельной продукции, в качестве изоляции которой применяются полимерные материалы. Наиболее широко применяемым кабелем с изоляцией на основе полимера является кабель из «сшитого полиэтилена» [60, 61].

Получение «сшитого полиэтилена» заключается в модификации этилена путем создания («сшивки») новых систем межмолекулярных связей до выстраивания новой молекулярной структуры. Полученное в результате вещество имеет более прочную кристаллическую решетку. Такое изменение дает особую прочность на разрыв и повышение всех остальных характеристик полиэтилена.

Изоляция кабельной продукции из сшитого полиэтилена, как правило, используется при разработке кабелей, предназначенных для кабельных сооружений. Возможно использование для кабельных изделий с несколькими токопроводящими жилами. Исходя из условия, что данный тип кабельной продукции прокладывается в агрессивных средах, толщина его изоляции из «сшитого полиэтилена» может значительно варьироваться. Так, толщина изоляции из «сшитого полиэтилена» для кабеля с сечением 3000 мм² и номинальным напряжением до 600 кВ, может достигать 35 мм [60].

На рисунке 1.7 представлена типовая конструкция одножильного кабеля с полиэтиленовой изоляцией для рабочего напряжения 10 кВт.

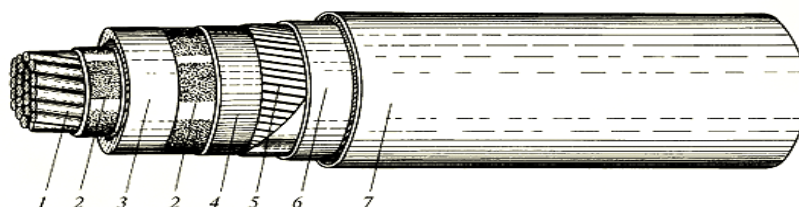


Рисунок 1.7 – Типовая конструкция одножильного кабеля с полиэтиленовой изоляцией:
 1-алюминиевая токопроводящая жила; 2-электропроводящие экструдированные экраны;
 3-изоляция из сшитого полиэтилена; 4-электропроводящие влагонабухающие ленты;
 5-экран из медных проволок; 6-разделительная обмотка лентой; 7-оболочка из полиэтилена

Применение данной кабельной продукции возможно лишь в закрытых кабельных сооружениях вследствие плохой устойчивости к длительному ультрафиолетовому излучению. При пожарах в закрытых кабельных сооружениях с участием рассматриваемого типа кабельной продукции возможно образование концентрации циановодорода, так как один из методов получения «сшитого полиэтилена» заключается в азотной «сшивке» этилена.

Общая классификация силовых кабелей представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Классификация силовых кабелей, используемых на объектах энергетики в зависимости от области применения и материалов изоляции токопроводящих жил и наружной оболочки

№ п/п	Наименование группы кабельных изделий	Классификационные характеристики			Маркировка
		Материал изоляции токопроводящих жил	Материал наружной оболочки	Область применения	
1.	Силовой кабель с ПВХ изоляцией	ПВХ пластикат	ПВХ пластикат пониженной горючести	Прокладка в кабельных эстакадах и на открытом воздухе	ВВГ, ВВГнг ВВГ-ХЛ ВВГЭ
2.	Силовой кабель с бумажной изоляцией	Фазная бумажная изоляция с пропиточным составом	Поясная бумажная изоляция с пропиточным составом	Для стационарной прокладки в высоковольтных сетях	СБ СГ СБл СКл
3.	Силовые кабели с резиновой изоляцией	Резина из натурального и бутадиенового каучука	ПЭТ пленка и резина из изопренового каучука	Для подвижного электрооборудования	КГ КПР РПШ
4.	Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена	Изоляция из сшитого полиэтилена	Защитный слой из полиэтилена	Для прокладки горизонтальных и вертикальных кабельных трасс	ПвВг ПвПг ПвБбШп

Контрольный кабель применяется в целях контроля и измерения на расстоянии электрических и физических параметров [59]. В отличие от силовых данный тип кабельной продукции имеет большое количество проводящих жил. Контрольные кабели считаются промежуточными между кабелями связи и силовыми кабелями. Они чаще всего применяются для вторичной коммутации устройств удаленного управления для активации систем и регулирования пуска.

Возможные вариации изоляции токопроводящих жил и изоляции контрольных кабелей, применяемых на объектах энергетики, представлены на рисунке 1.8.

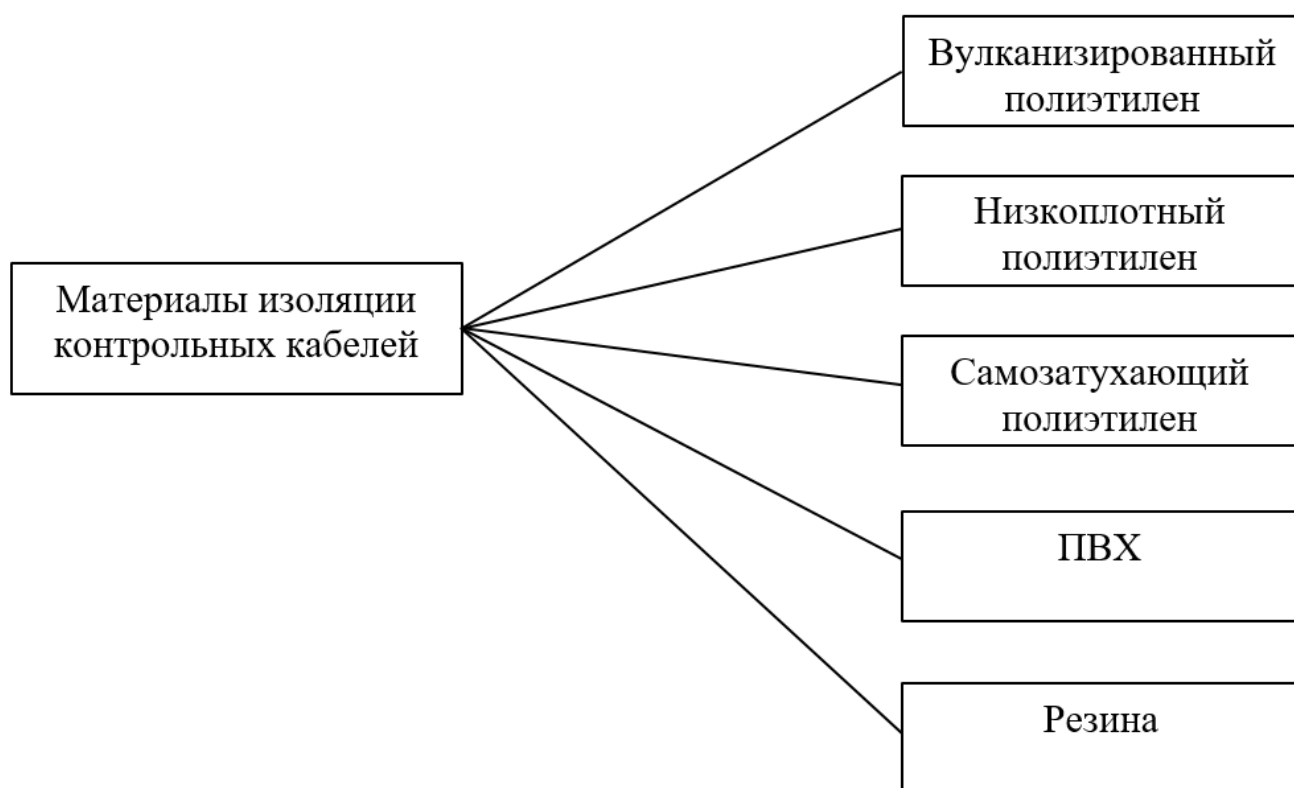


Рисунок 1.8 – Материалы изоляции токопроводящих жил и наружных оболочек контрольных кабелей, применяемых на объектах энергетики

Кабель управления предназначен для целей дистанционного управления релейной защиты и автоматики [59].

Кабели управления отличаются условиями эксплуатации (подвижная эксплуатация, необходимость обеспечения защиты от взаимных и внешних помех, увеличенное число электрических цепей в кабеле, стойкость к действию различных механических, климатических воздействий).

Характерной особенностью кабелей управления является сочетание используемых в качестве оболочки и изоляции материалов. Возможные вариации исполнения представлены на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Материалы изоляции токопроводящих жил и наружных оболочек кабелей управления, применяемых на объектах энергетики

Рассматривая используемую на объектах энергетики кабельную продукцию, стоит отметить, что большое количество эксплуатируемых кабельных изделий выполнены из горючих материалов изоляции и оболочки. Анализ статистических данных позволил выявить основные причины воспламенения горючих материалов изоляции и оболочки. К ним относятся: короткое замыкание, механическое повреждение изоляции, искры и дуги, перегрев защитного слоя кабеля. Нагрев оболочки кабеля при эксплуатации высокими токами значительно усугубляет ситуацию, так как способствует развитию пожара.

В исследованиях [62] по оценке влияния конструктивного исполнения и свойств материалов изоляции кабелей на нераспространение горения представлена физико-математическая модель горения кабельных изделий в условиях групповой прокладки. В ходе исследования были определены основные параметры изоляционных и защитных материалов, оказывающих решающее значение на скорость распространения пламени в условиях групповой прокладки. Результаты исследования показали, что на скорость развития горения кабельной продукции значительное влияние оказывают: удельная теплота сгорания, теплота, образующаяся в процессе газификации материала. В результате исследования [62] были установлены значения удельной теплоты сгорания для основных полимерных материалов, применяемых в качестве изоляции токопроводящих жил и наружных оболочек кабелей, которые представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Значение высшей теплоты сгорания полимерных материалов кабельного производства

Наименование материала изоляции кабеля	Значение высшей теплоты сгорания, МДж/кг
Полиэтилен самозатухающий	41,9
Сшитый полиэтилен	48,0
ПВХ-пластиках обычных рецептур	25,8
ПВХ-пластикат пониженной горючести	19,7
ПВХ-пластикат пониженной пожарной опасности (с низким дымо- и газовыделением):	
Для изоляции	18,9
Для заполнения	10,8
Для оболочки	17,7

Таким образом, результаты исследований [62] указывают на различную скорость распространения пожара в кабельных помещениях в зависимости от применяемых в качестве изоляции материалов. Применяемые в качестве оболочки и изоляции материалы, в особенности с применением «сшитого полиэтилена», способствуют более быстрому распространению пожара, а также образованию более широкого спектра токсичных веществ вследствие многокомпонентности их состава.

В случаях возникновения пожара в кабельных сооружениях, горение изоляции наружной оболочки кабельных изделий способствуют возникновению коротких замыканий на других участках электрических линий, что приводит к возникновению новых очагов пожара. Помимо распространения фронта пламени при горении изоляции кабельного изделия, возможно образование и стекание горящего сплава, который может стать причиной возгорания нижерасположенных кабельных изделий.

С точки зрения пожарной безопасности высокую опасность представляют муфтовые соединения кабельных изделий. Статистические данные по причинам возникновения пожаров в кабельных сооружениях говорят, что перегрев муфтовых соединений с последующим воспламенением кабельного изделия является достаточно распространенной причиной возникновения крупных пожаров.

Пожары в кабельных сооружениях оказывают значительное воздействие на технологический процесс объекта энергетики. В условиях пожара на производственных объектах возможны неполадки в работе распределительных устройств. Распределительные устройства располагаются в помещениях, с относительно небольшим объемом, что способствует более быстрому достижению критических значений дымообразующей способности. Задымленность помещений с распределительными устройствами ухудшает видимость и препятствует работе пожарных подразделений по ликвидации пожара.

Помимо предельных значений дымообразующей способности, при горении кабельных изделий, состоящих из полимерных композитных материалов, образуется достаточно широкий спектр токсичных газов [39]. Как правило, образование и быстрое распространение зоны задымления способствует распространению токсичных продуктов горения вследствие абсорбции токсичных элементов на частицах дыма [46]. Распространение дымовой зоны и токсичных продуктов горения по всему объему производственного здания возможно за счет оснащённости кабельных сооружений естественной вентиляцией, а также наличия негерметичных проёмов кабельных сооружений и машинного зала.

Исследования в области термического разложения различных полимерных материалов указывают на то, что при термическом разложении полимерных материалов изоляции токопроводящих жил и наружной оболочки кабельной продукции могут образовываться от 50 до 100 химических соединений, оказывающих негативное воздействие на организм человека, которые по мере развития пожара могут распространиться по всему объему производственного здания объекта энергетики [13].

Анализ возможности образования циановодорода на объектах энергетики также показал, что при горении кабельной продукции имеющей в качестве изоляции материалы на основе полиуретана, сшитого полиэтилена и резины могут образовывать значительные концентрации циановодорода.

Таким образом, пожары на объектах энергетики могут сопровождаться образованием значительной дымовой зоны, содержащей в себе широкий спектр токсичных продуктов горения, которые могут оказать негативное воздействие на персонал объекта энергетики на ранних стадиях развития пожара. Так, исследование токсикологической картины пожара позволит более обосновано определять необходимое время эвакуации персонала в зависимости от опасности потенциально образующихся токсичных продуктов горения.

Помимо этого, в рамках исследования процесса образования циановодорода на пожарах объектов энергетики необходимо рассматривать кабельную продукцию, потенциально образующую циановодород.

1.3 Токсикологический эффект продуктов горения при пожарах на объектах энергетики

Под токсичностью продуктов горения понимают свойства различных химических соединений, которые при попадании в организм человека могут вызывать нарушения функции организма, проявляющиеся в виде симптомов отравления.

В количественном отношении под токсичностью понимается мера несовместимости вещества с организмом человека и определяется как величина обратная величине смертельной дозе или концентрации [63]. Одними из важнейших характеристик токсичности вещества являются средняя смертельная концентрация в воздухе (CL_{50}) и средне смертельная доза (DL_{50}).

Средняя смертельная концентрация вредного вещества в воздухе – это концентрация, вызывающая гибель 50% животных при определенном времени экспозиции посредством ингаляционного воздействия [64].

Токсичность различных химических соединений при воздействии на организм человека проявляется по-разному. Скорость и характер токсикологического процесса во многом зависит от процесса взаимодействия токсиканта с биологической системой и определяется в зависимости от [64]:

- скорости достижения токсиканта конечной биологической мишени;
- характера и прочности связи, образующейся между веществом и биологической мишенью;
- биологической роли мишени в функционировании организма.

Однако, в условиях пожара образуются преимущественно газообразные токсичные вещества, которые поступают в организм человека ингаляционным способом. Данный вид поступления токсиканта в организм человека зависит от скорости легочной вентиляции и скорости резорбции токсиканта через легочную мембрану в кровь. Как правило, вещества, образующиеся в условиях пожара, достаточно быстро преодолевают легочную мембрану и попадают в кровеносное русло, тем самым инициируя процесс отравления.

Токсикологическая картина пожара имеет сложную структуру. Активный рост номенклатуры применяемых полимерных материалов осложняет токсикологическую картину пожара химическими веществами антропогенного происхождения. Термическое разложение полимерных материалов в условиях пожара, образует достаточно широкий спектр токсичных веществ. Формирование широкого спектра токсичных веществ обусловлено сложно компонентным химическим строением полимерных материалов. В исследованиях [39] было представлено, что состав продуктов горения, в первую очередь, зависит от химического строения материалов. В количественном отношении на состав продуктов горения также оказывают влияние следующие факторы: условия протекания газификации материала, температура окружающей среды и количество воздуха, участвующего в процессе горения.

В работе [40] также было отмечено, что при горении полимерных материалов в условиях избытка кислорода наблюдается образование преимущественно углеводородных соединений. Однако, при протекании горения в условиях недостатка кислорода (недожег) наблюдается образование большего количества токсичных соединений.

Так, при оценке уровня опасности токсикологического воздействия продуктов горения на человека необходимо учитывать наиболее опасные токсиканты, которые образуются в достаточных концентрациях и обладают высокой биологической активностью даже при небольших концентрациях.

Анализ результатов исследования в области судебно-медицинских экспертиз [6] по причинам гибели людей при пожарах указывают на то, что основной причиной гибели людей является отравление токсичными продуктами горения – более чем в 70% случаев. Отравление токсичными продуктами горения в условиях пожара вызывает асфиксию и приводит к гибели вследствие удушающего токсикологического эффекта, нежели чем от ожогов [1, 6, 39, 65, 66].

Удушающие газы в условиях пожара являются основными токсикантами. Попадая в организм, они блокируют дыхательно-транспортную систему. Вследствие блокировки дыхательных систем нарушается процесс передачи и

усвоения кислорода различными клетками организма. Недостаток кислорода на клеточном уровне наиболее чувствителен клетками центральной нервной системы, которая уже при незначительных нарушениях вызывает потерю сознания и паралич. К основным удушающим газам относят: монооксид углерода (CO) и циановодород (HCN).

Исследования процесса образования монооксида углерода и его влияния в условиях реального пожара на людей имеют большую теоретическую и практическую базу. В работе [67] были рассмотрены особенности воздействия монооксида углерода при пожарах на объектах энергетики.

Как уже отмечалось ранее, токсикологическая картина пожара имеет сложную структуру. Исследования [43, 44] позволили сопоставить содержание токсичных продуктов горения в воздухе по случаю горения различной пожарной нагрузки, что представлено в таблицах 1.4 – 1.8.

Таблица 1.4 – Продукты горения, образующиеся при газификации различных полимерных материалов [43, 44]

Наименование материала (изделия из него)	Выделение продуктов горения кг/м ³				Концентрация, кг/м ³
	CO	CO ₂	HCN	Оксиды азота	
Целлюлоза	0,060	1,152	-	-	0,0450
Линолеум ПВХ	0,069	0,777	-	-	0,0610
Древесностружечная плита	0,108	0,857	-	-	0,0490
Стеклопластик ПН-1	0,058	1,270	0,06000	-	0,0630
Пенополиуретан ПУ-318	0,121	0,944	0,00519	0,01220	0,0260
Пенополистирол	-	-	-	-	0,0397
Пенопласт ФРП	0,539	0,656	0,00156	0,00099	0,0066

Таблица 1.5 – Состав продуктов пиролиза ДСП [43, 44]

Вещество	Концентрация, % об.		
	ДСП (500 °С)	ДСП с покрытием ПП (500 °С)	ДСП (700 °С)
CO ₂	10,9	15,3	7,6
CO	2,60	3,80	0,38
CH ₃ CHO	-	-	0,12
CH ₂ O	0,051	-	-
C ₃ H ₄ O	0,0024	-	-
C ₂ H ₄ O ₂	0,015	0,034	0,012
C ₃ H ₆ O	-	-	0,4

Таблица 1.6 – Состав продуктов горения полистирола [43, 44]

Условия эксперимента Вещество	Концентрация, % об.	
	На воздухе	В атмосфере
CO ₂	9,6	-
CO	0,53	-
HCN	0,092	-
C ₆ H ₆ O	0,000021	-
NO ₂	0,0057	-
C ₃ H ₆ O	0,002	-
C ₆ H ₆	0,013	27

Таблица 1.7 – Состав продуктов горения материалов на основе ПВХ [43, 44]

Вещество	Концентрация, % об.		
	линолеум	винипласт	плитка
CO ₂	3,6	3,4	0,12
CO	1,70	1,15	1,58
HCl	1,0	7,9	2,3
C ₆ H ₆	-	2,2	-
C ₇ H ₈	-	0,1	-
CH ₄	0,2200	-	0,0082

Таблица 1.8 – Состав продуктов горения полиуретановых материалов [43, 44]

Материал Вещество	Концентрация, % об.		
	ППУ-317	Эластичный ППУ	ППУ-304 Н
CO ₂	8	0,55	-
CO	1,20	0,19	37,50
HCN	0,085	-	1,600
C ₆ H ₆ O	0,027	-	-
NO ₂	0,045	-	-
CH ₃ OH	-	0,02	-
CH ₃ CHO	-	1,86	-

Рассмотрим особенности токсического воздействия представленных веществ. В таблице 1.9 представлены токсические эффекты основных токсикантов, которые образуются при горении материалов, применяемых на объектах энергетики. При отравлении различными токсикантами смертельная концентрация будет напрямую зависеть от времени экспозиции токсичным продуктом горения.

Таблица 1.9 – Особенности токсикологического воздействия веществ, образующихся при горении горючей нагрузки объектов энергетики

Токсикант	Механизм отравления	Смертельная концентрация, мг/м ³	Время экспозиции, мин
Монооксид углерода (CO)	При попадании в организм ингаляционным способом взаимодействует с гемоглобином, что приводит к нарушению дыхательно-транспортной системы	570	5
Циановодород (HCN)	При попадании в организм ингаляционным способом ингибирует цитохромоксидазу, вследствие чего вызывая тканевую гипоксию	240-360	5
Диоксид азота (NO ₂)	При попадании в организм ингаляционным способом вызывает респираторные заболевания	375	1
Диоксид углерода (CO ₂)	При попадании в организм ингаляционным способом вызывает учащенное дыхание и увеличивает легочную вентиляцию. Как следствие, наблюдается сосудорасширяющее действие и сдвиг pH крови.	12% об.	Летальный исход в течении нескольких минут
Сероводород (H ₂ S)	При попадании в организм ингаляционным способом ингибирует цитохромоксидазу, вследствие чего вызывая тканевую гипоксию	460	5

Токсикант	Механизм отравления	Смертельная концентрация, мг/м ³	Время экспозиции, мин
Сернистый ангидрид (SO ₂)	При попадании на влажные слизистые оболочки глаз и носоглотки превращается в сернистую и серную кислоту. Вызывает спазм бронхов, носовые кровотечения, способствует образованию метгемоглобина в крови.	1500-2000	Летальный исход в течении нескольких минут
Толуолendiизоцианат (C ₉ H ₆ N ₂ O ₂)	Оказывает сильное раздражающее действие, нарушает биологическую структуру тканей, поражает глаза, приводит к отеку легких.	Нет данных	Нет данных
Хлористый водород (HCl)	Вызывает нарушения функции дыхания. Раздражение слизистых оболочек глаз и носоглотки. Головокружение и тошнота.	250	5
Фтористый водород (HF)	Раздражающее действие на слизистую оболочку глаз и носоглотки. При значительных отравлениях наблюдается бронхит и носовые кровотечения. Спазмы дыхательных органов при очень высоких концентрациях.	1500	5
Акролеин (C ₃ H ₄ O)	Раздражающее действие на слизистую оболочку глаз и носоглотки, тошнота, головокружение.	350	10
Аммиак (NH ₃)	Раздражающее действие на слизистую оболочки глаз и носоглотки. Отравление сопровождается обильным слезотечением, удушьем и сильными приступами кашля. Вызывает головокружение, головные боли, рвоту и отек легких.	375 (допустимая)	10
		1400	Мгновенная летальная концентрация

Помимо образования токсичных продуктов горения в условиях пожара в помещении наблюдается изменение плотности кислорода. Изменение плотности кислорода в значительной степени оказывает влияние на организм эвакуирующихся. В соответствии с исследованиями [39] при процентном содержании кислорода в помещении 16% наблюдается учащенное дыхание, снижение концентрации, снижение мышечной активности. При процентном содержании кислорода 12% наблюдается учащенный пульс, снижение умственной деятельности. В случае понижения процентного содержания кислорода до 8% – потеря сознания, а при 6% смерть при экспозиции – 7 минут.

Пониженное содержание кислорода способно усиливать токсикологический эффект некоторых токсикантов. Физиологические процессы, протекающие в организме в условиях пониженного содержания кислорода, оказывают значительное воздействие на период интоксикации. Так, при эвакуации в условиях пониженного содержания кислорода наблюдается учащенное дыхание и как следствие, увеличение скорости легочной вентиляции, которое увеличивает скорость резорбции токсиканта в организм человека и ускоряет процесс токсикологического отравления.

В условиях пожара в помещении высокая температура также влияет на период интоксикации. Воздействие высокой температуры на организм человека, в первичном приближении, вызывает нарушение процессов терморегуляции в организме. Нарушение терморегуляции организма сопровождается обильному потовыделению, при котором возможно ускорение процесса резорбции токсикантов (циановодород, сероводород, акролеин) через незащищённые участки кожи.

Комбинированное воздействие некоторых токсикантов было рассмотрено в работах [39, 67–70]. В условиях пожара, комбинированное воздействие токсикантов достаточно сложный процесс и будет зависеть от таких параметров как: концентрации токсикантов, скорости и частоты дыхания, температуры газовой среды, плотности кислорода. Комбинированное воздействие принято разделять по эффектам взаимодействия, таким как [40]:

– аддитивность воздействия токсикантов (суммирование эффектов токсичных продуктов горения);

– синергизм токсикантов (токсикологических эффектов нескольких продуктов горения получается больше, чем суммирование эффектов воздействия каждого вещества);

– антагонизм токсикантов (при совместном воздействии нескольких токсичных веществ наблюдается снижение общего токсикологического эффекта по сравнению с суммой от воздействия каждого вещества в отдельности).

В работах [28, 39, 69] были исследованы изменения показателя токсичности продуктов горения в зависимости от комбинированного воздействия нескольких токсикантов. Изменения показателя токсичности для различных газовых смесей представлены в таблице 1.10.

Таблица 1.10 – Изменения показателя токсичности при комбинированном воздействии различных газовых смесей [28, 39, 69]

№ п/п	Состав газовой смеси	Изменение показателя токсичности
1.	Монооксид углерода + недостаток кислорода (15%)	Изменений не наблюдается
2.	Монооксид углерода + недостаток кислорода (10%)	Уменьшается
3.	Монооксид углерода + диоксид углерода (от 2-8%)	При увеличении концентрации CO_2 наблюдается увеличение.
4.	Монооксид углерода + диоксид углерода + недостаток кислорода (15%)	По сравнению с $\text{CO}+\text{CO}_2$, изменений не наблюдается
5.	Монооксид углерода + диоксид углерода + недостаток кислорода (10%)	По сравнению с $\text{CO}+\text{CO}_2$, наблюдается уменьшение
6.	Монооксид углерода+хлороводород	Наблюдается увеличение
7.	Монооксид углерода + диоксид углерода + хлороводород	По сравнению со смесью $\text{CO}+\text{HCl}$, наблюдается уменьшение
8.	Монооксид углерода + циановодород	Изменяется по типу суммирования токсикологических эффектов
9.	Монооксид углерода + диоксид углерода + циановодород + недостаток кислорода	Наблюдается уменьшение
10.	Монооксид углерода + аммиак	Изменений не наблюдается
11.	Монооксид углерода + диоксид углерода + аммиак	По сравнению со смесью $\text{CO}+\text{NH}_3$, наблюдается уменьшение

В настоящее время при реализации методик расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения не принимаются во внимание условия комбинированного воздействия токсикантов. Определение времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения выполняется из условия, что каждый токсикант отдельно взаимодействует с организмом человека. Данное допущение обусловлено отсутствием значительной теоретической и экспериментальной базы о процессах взаимодействия различных токсикантов с различными биологическими мишенями.

1.4 Особенности образования и токсикологического воздействия циановодорода на человека при пожарах на объектах энергетики

Как уже отмечалось ранее, отравление токсичными продуктами горения является основной причиной гибели людей при пожарах. Исследования в области образования и распространения токсичных продуктов горения представляют монооксид углерода основным токсикантом [37, 39, 46, 67, 69], оказывающим токсичное воздействие на эвакуирующихся. Однако, в исследованиях [2–12] представлены результаты анализа газовой среды помещения не только по монооксиду углерода, но и по ряду другим токсичным веществам. Результаты данных исследований указывают на то, что летальные исходы при отравлении токсичными продуктами горения происходят не только вследствие воздействия монооксида углерода, но также от ряда других токсичных газов. Результаты исследования [6] показывают, что в крови погибших при пожарах, помимо значительной концентрации карбоксигемоглобина ($HbCO$), обнаружены концентрации цианидов в токсикологически значимых концентрациях. Кроме этого, исследования [71] показали, что при пожаре на борту самолета, в результате которого погибло более 50 человек, были обнаружены не критические концентрации $HbCO$, однако, концентрации цианидов были в токсикологически значимых концентрациях, тем самым указывая на первичную токсикологическую роль циановодорода в этом пожаре.

Токсикологическая роль циановодорода в условиях пожара рассмотрена косвенно. Связано это непосредственно с ошибками в результате экспертизы. Так как цианиды имеют небольшой период полураспада (1 час), а произвести забор крови в кратчайшие сроки не всегда представляется возможным. Таким образом, измеренные концентрации цианидов в крови погибших зачастую ошибочно малы.

Процессы образования циановодорода при пожарах в помещении не имеют достаточной теоретической и практической базы. Оценка токсикологического эффекта циановодорода в условиях «реального» пожара – задача, нерешенная с точки зрения пожарной безопасности.

Образование циановодорода при пожарах на объектах энергетики возможно при горении полимерных материалов, находящихся в помещении и используемых в качестве изоляции кабельной продукции. Полимерные материалы используются практически в каждом административном, жилом или производственном помещении. Наиболее используемыми в этом отношении будут являться: полиэтилен, полистирол, полиуретан, поливинилхлорид, полиамид.

Как правило, циановодород выделяется при горении азотосодержащих материалов: шерсть, нейлон, каучук [39], полиуретан [111], «сшитый полиэтилен» [72]. В работе [41] отмечалось, что интенсивное образование циановодорода при горении некоторых синтетических текстильных волокон начинается при температуре более 200 °С и зависит от химического состава и условий горения материала.

Характерный процесс образования циановодорода при пожарах представим в виде химической реакции на примере горения текстильных изделий из капрона:



При исследовании процесса образования циановодорода на объектах энергетики необходимо рассматривать те помещения, в которых расположение удельной пожарной нагрузки ($\text{кг}/\text{м}^2$) будет наибольшим.

Так, при пожарах в кабельных сооружениях где пожарная нагрузка (изоляция токопроводящих жил и наружных оболочек кабелей) составляет от 30–60 $\text{кг}/\text{м}^2$, возможно образование *HCN* в токсикологически значимых концентрациях. Распространение циановодорода из кабельного сооружения в машинный зал возможно через незащищенные участки перекрытий кабельных сооружений.

Распространение циановодорода в объеме машинного зала может оказать токсическое воздействие на рабочий персонал, что затруднит процесс эвакуации.

Токсическое воздействие циановодорода на человека заключается в ингибировании цитохромоксидазы путем взаимодействия с гемом Fe^{3+} – терминального фермента митохондриальной цепи переноса электронов [73]. Ингибирование цитохромоксидазы приводит к гистотоксической аноксии, при

которой окислительный метаболизм в клетках доводится до полного прекращения. Ингибирование цитохромоксидазы и нарушения окислительного метаболизма приводит к дисфункции процесса образования аденозинтрифосфат (далее АТФ). Представленная цепочка нарушений в совокупности с цитотоксической гипоксией вызывает серьезные метаболические нарушения в центральной нервной системе, что приводит к нарушениям восприятия и последующему параличу [71].

Основными факторами, определяющими развитие отравления циановодородом, являются скорость его накопления и величина свободных цианогрупп ($-CN$) в клеточных целевых сайтах. Скорость его накопления и величина свободных цианогрупп будет зависеть от множества факторов. К основным можно отнести [64]:

- путь поступления циановодорода в организм человека;
- биораспределение циановодорода в организме человека;
- детоксикация и выведения цианидов.

Поступление газообразного циановодорода в организм человека происходит ингаляционным способом и посредством чрезкожной резорбции. Ингаляционный путь поступления токсиканта в организм человека рассматривается как основной, вследствие сложности и достаточно длительной абсорбции цианидов через незащищенные кожные покровы.

В соответствии с исследованиями [74] поступление кислорода в организм является необходимым условием преобразования энергии на клеточном уровне. Транспортная система доставки O_2 и выведения CO_2 по сути является газообменными процессами. Поступление кислорода в организм осуществляется за счёт вентиляции легких, откуда в последующем он диффундирует в кровеносное русло. Поступая в кровь кислород взаимодействует с гемоглобином, окисляя его до оксигемоглобина. Движение оксигемоглобинов в кровеносном русле передает кислород клеткам, вследствие которого начинается окислительный метаболизм в клетках с последующим производством энергии.

Поступление токсикантов в организм человека посредством внешнего дыхания (ингаляционный путь поступления) осуществляется за счет комплексной работы дыхательной системы. Расширение грудной клетки увеличивает объем легких, что способствует понижению давления в них ниже атмосферного, вследствие чего воздух проникает в легкие. Продвижение газов по дыхательным путям сопровождается с их частичной адсорбцией на поверхностях дыхательных путей (трахеи, бронхов) [74].

Последовательность процессов транспортировки газов в организме человека представлена на рисунке 1.10.

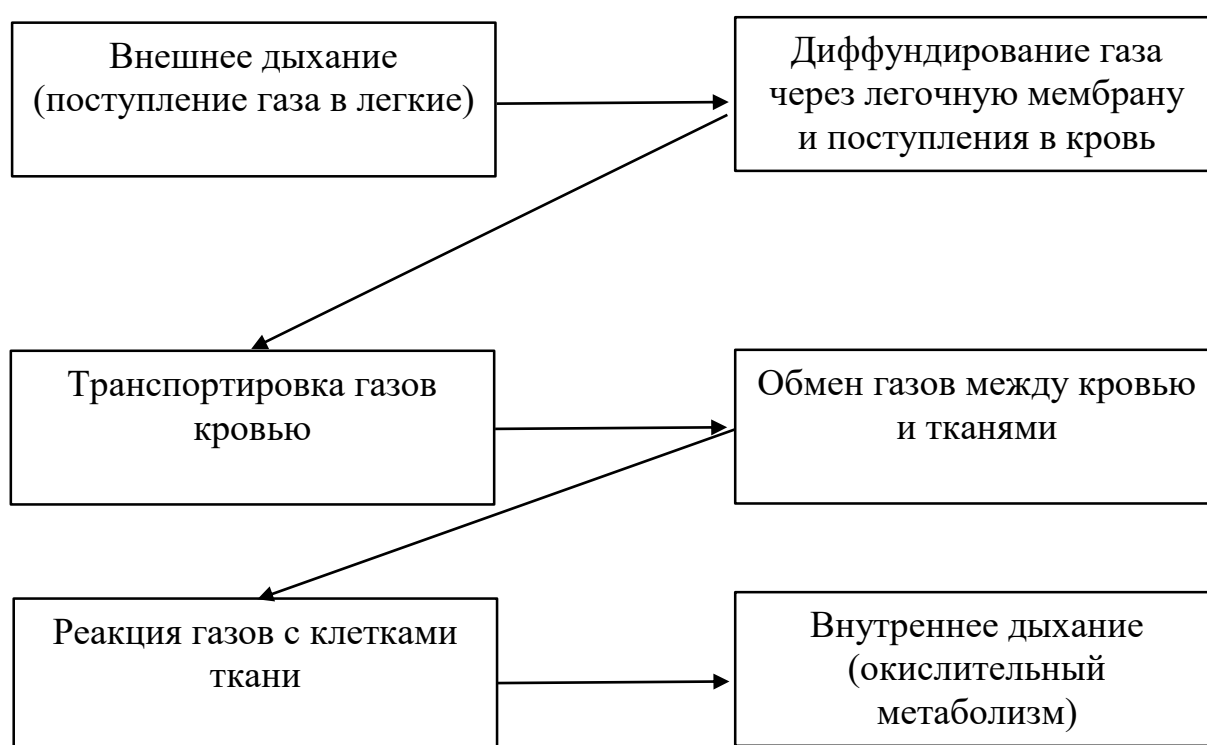


Рисунок 1.10 – Схема транспортировки газов в организме человека

Для резорбции газу необходимо вступить в контакт с альвеолярной поверхностью легких. Количественные значения поступающего в организм газа будут напрямую зависеть от скорости вентиляции легких.

В соответствии с работой [74] альвеолярная вентиляция будет определяться по следующей формуле:

$$W = f(V_D - V_M), \quad (1.2)$$

где W – скорость легочной вентиляции, л/мин; V_d – объем дыхания, л; V_M – объем мертвого пространства, л; f – частота дыхания, 1/мин.

После резорбции в кровь вещество в соответствии с градиентом концентрации распределяется по всем органам и тканям [64]. По большей части, токсикант распределяется в организме человека неравномерно. Выраженность токсического эффекта будет пропорциональна концентрации токсиканта в месте действия на определенную биологическую мишень. Относительно циановодорода, при попадании вещества в кровь первыми биологическими целями являются сердце, мозг и печень [64].

При попадании цианидов в кровь, относительно большая их часть транспортируется с ней в составе плазмы и взаимодействует с метгемоглобином содержащий трехвалентный гем железа (Fe^{+3}). Содержание в крови метгемоглобина оценивается приблизительно 2% от общего числа гемоглобина [75, 112]. При взаимодействии цианидов с метгемоглобином происходит его детоксикация с последующим выведением его из организма. Однако, исследование процесса детоксикации циановодорода достаточно сложная задача, так как различные исследования указывают на различное содержание метгемоглобина в кровеносном русле человека.

Взаимодействие токсиканта, находящегося в кровеносном русле, с клетками ткани достаточно сложный процесс, который зависит от следующих основных факторов [64]:

- интенсивности кровоснабжения определенного органа;
- особенностей капиллярной системы;
- физиологических свойств клеток, составляющих орган;
- кислотно-основные свойство тканей [64].

Непосредственно процесс перехода токсиканта из циркулирующей крови возможен только в том случае, если молекулы токсиканта превышают радиус пор стенок капилляра. В отношении циановодорода процесс перехода из кровеносного русла в ткани происходит без затруднений.

Количество диффундируемого из крови в ткани вещества будет определяться суммарной площадью капиллярного русла ткани. В соответствии с исследованиями [64] площади капиллярного русла различных органов представлены в таблице 1.11.

Таблица 1.11 - Площадь капиллярного русла различных органов (см²/г) [64]

Мозг	Печень	Почки	Мышцы	Легкие
240	250	350	70	250

Вещества, имеющие высокое химическое сродство к определенным молекулам, накапливаются в тканях, содержащие такие молекулы в большом количестве. Однако, распределение токсикантов модифицируется и внешними условиями. Таким образом, цианистые соединения обладают высоким сродством с гемопротейнами, содержащими трехвалентное железо. Дальнейшее соединение цианидов связано непосредственно с цитохромоксидазой – важнейшей частью тканевого окислительного метаболизма [64].

Как уже отмечалось ранее, взаимодействие цианистых соединений с цитохромоксидазой напрямую связано с взаимодействием с гемом Fe³⁺ – терминального фермента митохондриальной цепи переноса электронов. Ингибирование данного фермента и, как следствие нарушение транспорта электронов в данном ферменте, приводит к снижению митохондриального кислорода и снижению АТФ. Модель цепи переноса электронов в ингибируемом ферменте представлена на рисунке 1.11.

Таким образом, общую модель отравления циановодородом в условиях пожара посредством ингаляционного поступления в организм можно представить в виде модели, представленной на рисунке 1.12. В данной модели не рассматривалось поступление токсиканта путем чрескожной резорбции.

Оценить токсикологический эффект с точки зрения цитотоксичности (ингибирования ферментов на клеточном уровне) достаточно сложная задача. Проведение исследований по количественной оценке ингибируемых ферментов

при ингаляции различными концентрациями невозможно из-за отсутствия конкретных значений по количеству ферментов в различных органах ткани.

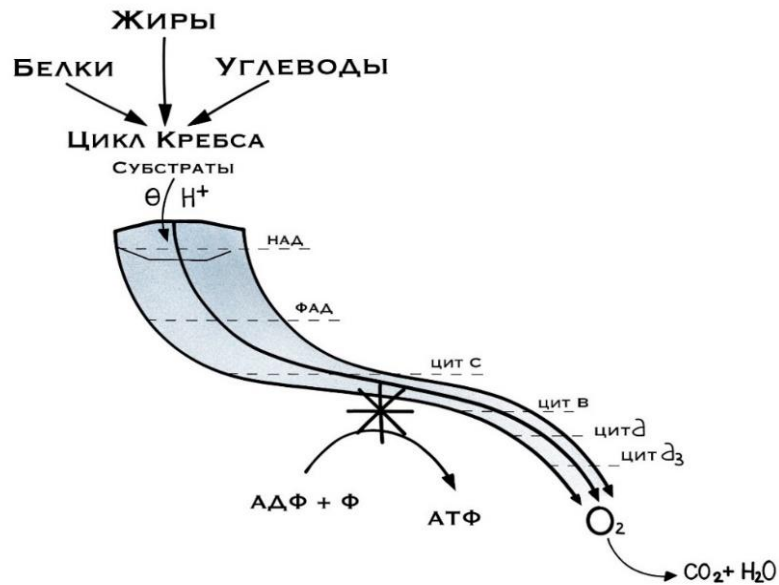


Рисунок 1.11 – Модель движения электронов в ингибируемом ферменте

В связи с сложностью оценки цитотоксичности цианистых соединений современные исследования в данной области в основном отталкиваются от концентрации токсиканта во вдыхаемом воздухе.

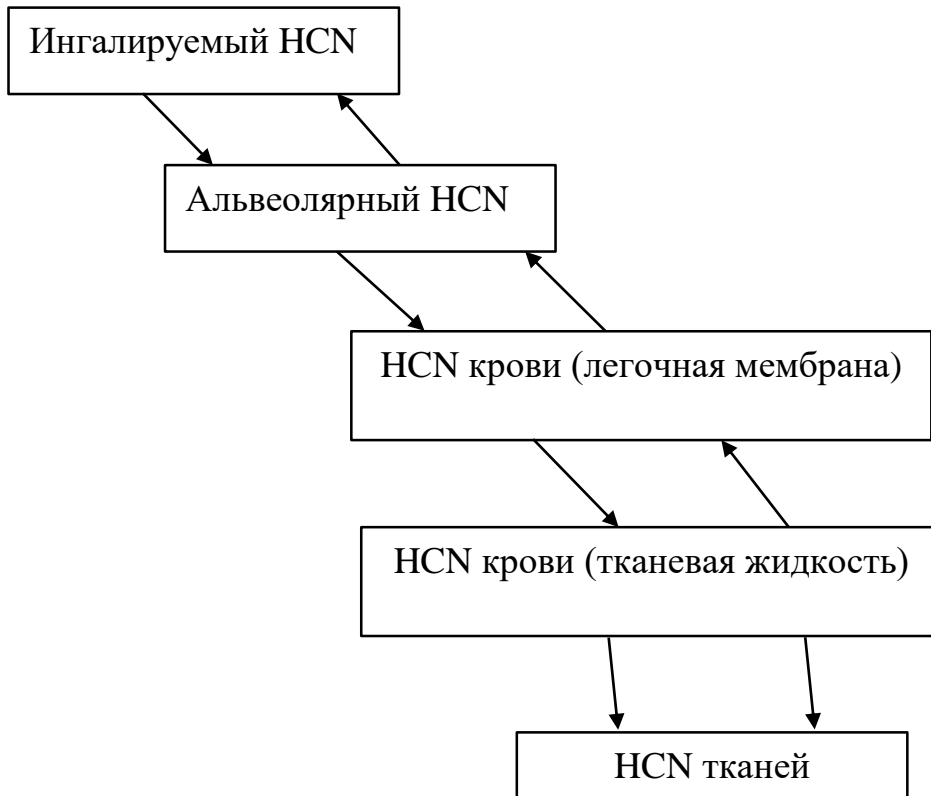


Рисунок 1.12 – Общая модель поступления циановодорода в организм человека

Проявления симптомов отравления при различных концентрациях циановодорода приведены в таблице 1.12.

Таблица 1.12 – Токсический эффект циановодорода при различных концентрациях [58]

Концентрация, мг·м ⁻³	Симптомы
24-48	Симптомы легкого отравления (головокружение, головная боль, тошнота, рвота) при вдыхании в течении нескольких минут
50-60	Переносится в течении 30-60 минут без опасных токсических проявления
120-150	Опасна для жизни при 30 минутном воздействии
240-360	Смерть в течении 5-10 минут
420-500	Быстрая смерть

В нормативных документах [76, 77] критическая величина парциальной плотности циановодорода принята равной $HCN_{крит}=2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³. Однако, в соответствии с исследованиями токсикологического воздействия циановодорода на человека [5, 78] раздражение слизистой оболочки глаз и носа происходит при концентрации $1,11 \cdot 10^{-5}$ кг/м³, а летальный исход наступает при концентрации $1,11 \cdot 10^{-4}$ кг/м³ при 30-минутном воздействии. Представленная в нормативном документе концентрация в 2 раза превышает смертельную концентрацию, представленную в исследованиях [5, 78] и почти в 20 раз превышает концентрацию, при которой выявлено раздражение слизистой оболочки глаз, что в значительной степени препятствует своевременной эвакуации [26, 49, 50, 79].

Помимо этого, в условиях «реального» пожара токсикологический эффект циановодорода может усиливаться по мере увеличения температуры в помещении, физических нагрузок, недостатка кислорода и увеличения скорости легочной вентиляции.

Таким образом, с учетом неоднозначности в понимании критической концентрации циановодорода необходимо определить критерии критического воздействия циановодорода в условиях «реального» пожара с учетом психофизиологических особенностей эвакуирующихся людей. Для решения данной задачи было принято решение разработать физико-математическую модель отравления циановодородом с учетом изменяемой скорости легочной вентиляции и плотности циановодорода в помещении. Данная модель позволит определить критические значения времени воздействия циановодорода в производственных помещениях объектов энергетики.

1.5 Методы расчета плотностей токсичных продуктов горения

Одним из наиболее опасных факторов пожара являются токсичные продукты горения. Процесс образования и распространения данного опасного фактора, как правило, обусловлен горением различных материалов, наличием систем вентиляции и дымоудаления, а также систем пожаротушения.

Процесс распространения токсичных продуктов горения в здании протекает в достаточно сложных термогазодинамических условиях, так как на процесс оказывают влияние различные внешние факторы [80].

В качестве противопожарных профилактических мероприятий по предотвращению негативного воздействия токсичных продуктов горения применяются различные методы расчета их плотностей. Данные методы основываются на определении количественных величин парциальной плотности исследуемого токсичного газа.

В настоящее время методы расчета термогазодинамики пожара подразделяются на следующие группы: интегральные, зонные, полевые (дифференциальные) [14, 29].

При использовании интегральной математической модели пожара рассматриваются средние значения основных термогазодинамических параметров в любой момент времени с начала пожара. Получение искомым значений осуществляется путем решения дифференциальных уравнений закона сохранения массы (токсичных продуктов горения, кислорода, огнетушащих веществ) и энергии для всей термогазодинамической среды.

В рамках решения интегральной математической модели был принят ряд допущений, в значительной степени снижающий область ее применения:

- не принимается во внимание взаимное расположение горючего элемента и проемов;
- есть необходимость в дополнительных соотношениях, полученных экспериментальным или расчетным способом с более детально рассмотренным процессом, для определения локальных значений по объему помещения.

Применение зонной математической модели пожара в отличие от интегральной, позволяет определять средние значения основных термогазодинамических параметров для заданных пространственных зон [14, 29]. При применении данной математической модели необходимо предусмотреть разбиение помещения на характерные зоны. Как правило, количество характерных пространственных зон определяется исходя из необходимости соблюдения условий однородности температурных и концентрационных полей в рассматриваемом помещении.

При решении данной математической модели выделяют следующие пространственные зоны: припотолочную область пространства, область незадымляемого пространства, область восходящих продуктов горения [14].

Для реализации зонной математической модели были приняты следующие допущения:

- необходимы дополнительные соотношения с учётом объемно-планировочных решений, с целью распределения параметров газовой среды для каждой из принятых зон;
- при выделении зоны конвективной колонки в отдельную расчетную зону, необходима дополнительная информация, так как данная зона не является свободно-конвективной струей.

Полевая математическая модель является наиболее точно описывающей термогазодинамическую картину пожара в помещении. Данная модель позволяет получить значения всех локальных параметров во всех точках пространства в любой момент времени. Однако, реализация данной математической модели достаточно трудоемкий процесс, так как она основывается на системе трехмерных нестационарных дифференциальных уравнений.

К недостаткам полевой модели можно отнести следующее:

- процесс решения замкнутой системы трехмерных нестационарных уравнений достаточно трудоемок;
- решение полевой математической модели требует значительных затрат машинного времени, несмотря на развитие ЭВМ;

– разработка программ для решения данной модели требует значительных ресурсов.

Представленные математические модели достаточно развиты для решения прикладных задач пожарной безопасности, в том числе для расчета плотностей токсичных продуктов горения, однако, они рассматривают процесс образования и распространения лишь двух токсичных веществ (монооксид углерода и хлороводород), не принимая во внимание чрезвычайно опасный токсикант – циановодород. Отсутствие данного токсиканта в расчетных методиках связано с отсутствием полной экспериментальной и теоретической базы по процессу его образования при горении различных материалов [13, 49, 50, 79].

Таким образом, определение параметров образования циановодорода и разработка методики расчета времени блокирования путей эвакуации *HCN* является актуальной научно-практической задачей.

1.6 Выводы по первой главе

По результатам проведенного анализа пожарной опасности объектов энергетики были сделаны следующие основные выводы:

1. В результате проведенного анализа пожарной опасности объектов энергетики были выявлены наиболее опасные участки производственных зданий объектов энергетики, а также рассмотрена возможность образования циановодорода при пожарах в кабельных сооружениях объекта энергетики;

2. Анализ токсикологического воздействия продуктов горения позволил выявить, что циановодород, во многих случаях, является основным токсикантом, гибель от которого происходит не реже, чем от монооксида углерода;

3. Существует неоднозначность в понимании критической концентрации циановодорода, что требует дополнительных уточнений и разработки физико-математической модели отравления циановодородом в условиях пожара с учётом психо-физиологических особенностей эвакуирующихся;

4. В современных методиках расчета динамики опасных факторов пожара не рассмотрен процесс образования и распространения циановодорода, образующегося при термическом разложении полимерных материалов, что свидетельствует о необходимости разработки методики расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом при пожарах в помещении.

Таким образом, для достижения цели исследования необходимо решить **следующие задачи:**

– разработать экспериментально-теоретический подход к определению среднеобъемной парциальной плотности циановодорода, основывающийся на экспериментальной зависимости парциальной плотности токсичного газа от изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода в помещении с учетом масштабного фактора при горении современных полимерных материалов, находящихся на объектах энергетики;

– модифицировать экспериментальную установку и провести на ней исследования по определению удельных коэффициентов образования

циановодорода и зависимости парциальной плотности циановодорода от изменения парциальной плотности кислорода в помещении в случае горения современных полимерных материалов, находящихся на объектах энергетики;

– разработать физико-математическую модель отравления циановодородом в условиях пожара с учетом психофизиологических особенностей эвакуирующихся;

– разработать методику расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом на основе модифицированных интегральной и зонной моделей прогнозирования динамики развития опасных факторов пожара, а также научно обоснованные рекомендации по обеспечению безопасной эвакуации людей при пожаре на объектах энергетики.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ЦИАНОВОДОРОДОМ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

2.1 Интегральная модель пожара

Интегральная математическая модель пожара является одним из основных методов расчета тепломассобмена при пожарах в помещении [81]. Рассматриваемая математическая модель, основываясь на законах сохранения массы, энергии и импульса позволяет определять изменения во времени термогазодинамических параметров при пожарах в помещениях. В рамках данной математической модели газовая среда, распространяющаяся по объему помещения с дверными и оконными проемами, рассматривается как открытая термодинамическая система, где в любой момент времени сохраняется локальное равновесие. По отношению к рассматриваемой открытой термодинамической системе, внешней системой является ограждающие конструкции (пол, стены, наружный воздух). Изменение термодинамической системы осуществляется в результате взаимодействия с внешней системой за счет тепломассообмена.

Состояние газовой среды при пожаре характеризуется среднеобъемными термодинамическими параметрами состояния (среднеобъемная плотность, среднеобъемная парциальная плотность, среднеобъемное давление, среднеобъемная температура), которые связаны между собой уравнением, вытекающим из условия существования локального равновесия. Процесс изменения среднеобъемных термодинамических параметров описывает общие закономерности развития пожара. Для описания изменений среднеобъемных параметров состояния в помещении в течении времени используют уравнения пожара.

В рамках решения задач исследования применяется модифицированная интегральная модель пожара [82], в которой более подробно рассматриваются неоднородности распределения температурных полей по высоте помещения и

используется решение двумерных нестационарных уравнений теплопроводности для определения степени прогрева ограждающих конструкций.

В самом общем виде структура интегральной модели представлена на рисунке 2.1 [14].

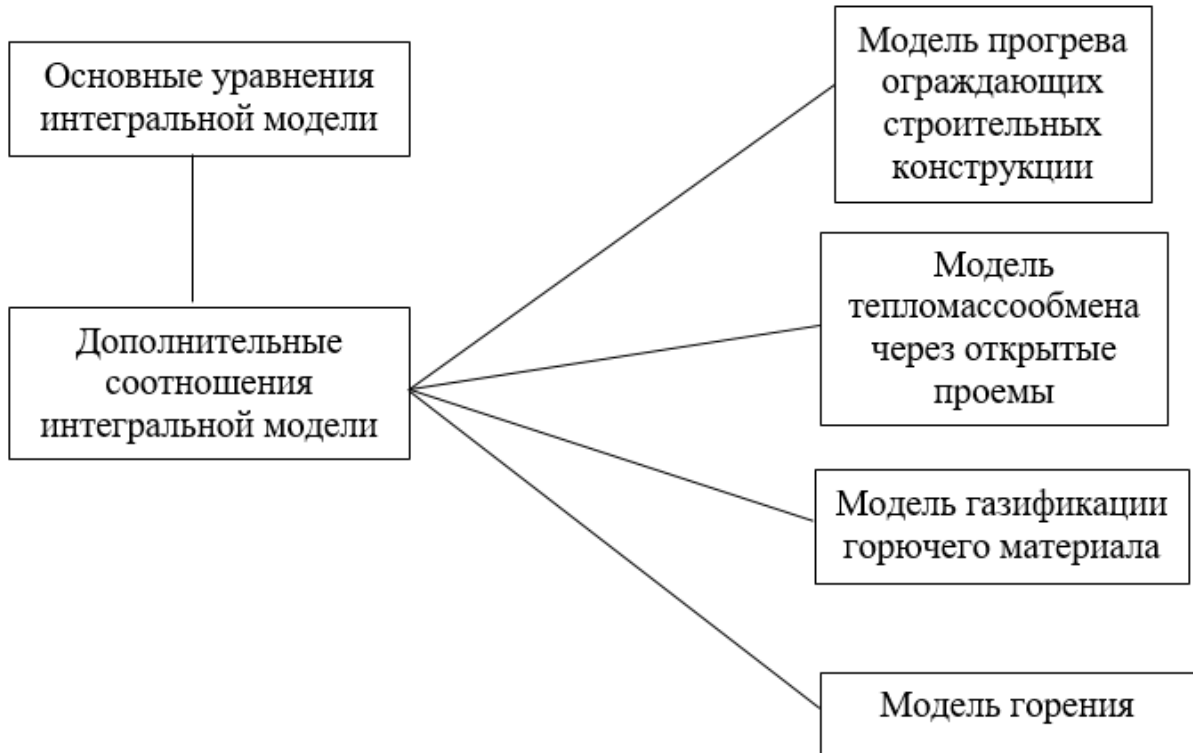


Рисунок 2.1 – Структура интегральной модели пожара

Для рассматриваемой математической модели пожара в условно герметичном помещении уравнения закона сохранения массы и энергии газовой среды, а также законов сохранения массы кислорода и токсичного газа (циановодород) имеют следующий вид [14, 81, 83, 110]:

$$V \frac{d\rho_{cp}}{d\tau} = \Psi_z - G_{cp}, \quad (2.1)$$

где V – объем помещения; ρ_{cp} – среднеобъемная плотность газовой среды помещения, кг/м³; Ψ_z – скорость газификации горючего материала, кг/с; τ – время, с; G_{cp} – массовый расход вытекающих наружу газов при естественном газообмене, кг/с [81, 83].

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{p_{cp} V}{k_{cp} - 1} \right) = \Psi_z \eta Q_n^p + c_{p.g} T_g G_g - c_{p.cp} T_{cp.np} G_{cp} - Q_s - Q_{np}, \quad (2.2)$$

где k_{cp} – среднеобъемный показатель адиабаты газовой среды помещения; η – коэффициент полноты сгорания; Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; $c_{p.в}, c_{p.г}$ – удельные изобарные теплоемкости воздуха и газовой среды, Дж/(кг·К); $T_г$ – температура наружного воздуха, К; $G_в$ – массовый расход поступающего воздуха при естественном газообмене, кг/с; $T_{г.г} = a_T T_{cp}$ – средняя температура газов, выходящих через проемы, К; a_T – коэффициент, учитывающий отличие среднemasсовой температуры выходящих газов от среднеобъемной температуры газовой среды помещения; Q_s – суммарный тепловой поток, отводимый в ограждающие конструкции, Вт; $Q_{г}$ – тепловой поток, излучаемый через проемы, Вт [81, 83].

$$V \frac{d(X_{O_2,г} \rho_{г})}{d\tau} = -\eta L_{O_2} \Psi_г + X_{O_2,в} G_в - X_{O_2,г.г} G_{г.г}, \quad (2.3)$$

где $X_{O_2,г}$ – среднеобъемная массовая концентрация кислорода в помещении; L_{O_2} – потребление кислорода, кг/кг; $X_{O_2,в}$ – массовая концентрация кислорода в наружном воздухе; $X_{O_2,г.г} = a_{O_2} X_{г.г}$ – средняя массовая концентрация кислорода в газах, выходящих через проемы; a_{O_2} – коэффициент, учитывающий отличие среднemasсовой концентрации кислорода в выходящих газах от его среднеобъемной концентрации в газовой среде помещения [81, 83].

$$V \frac{d(X_{HCN,г.г} \rho_{г.г})}{d\tau} = \eta L_{HCN} \Psi_г - X_{HCN,г.г} G_{г.г}, \quad (2.4)$$

где $X_{HCN,г.г}$ – среднеобъемная массовая концентрация циановодорода в газах, выходящих через проемы; $X_{HCN,г}$ – среднеобъемная массовая концентрация циановодорода в помещении.

При решении представленных уравнений применяются экспериментальные величины, полученные в маломасштабном объеме, что не позволяет учитывать масштабный фактор при определении среднеобъемной плотности токсичного газа.

Таким образом, необходимо разработать модификации, позволяющие устанавливать связь между парциальной плотностью токсичного газа в маломасштабном объеме с парциальной плотностью в полномасштабном помещении.

Для рассматриваемой математической модели пожара расчет расходов поступающего воздуха и убывающих продуктов горения через проемы помещения более подробно представлены в работах [14, 82].

Методика численных решений замкнутой системы уравнений для рассматриваемой математической модели более подробно представлена в работах [14, 82].

Процесс газификации материалов протекает при достаточно сложных физико-химических условиях, которые зависят от множества различных факторов. Математические модели расчета процессов газификации включают в себя большое количество допущений и упрощений реального процесса горения.

Условия однозначности задачи принято разделять на: физические, начальные, граничные и геометрические условия [14, 82].

В рамках рассматриваемой математической модели геометрические условия однозначности задают форму и линейные размеры объекта, в котором протекает термодинамический процесс. При решении интегральной математической модели задаются геометрические условия, представленные на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Геометрические условия однозначности интегральной математической модели пожара

Физические условия однозначности характеризуют физические свойства термодинамической среды и объектов, находящейся в ней. Для интегральной

математической модели пожара задаются физические условия, представленные на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Физические условия однозначности интегральной математической модели пожара

Граничные условия однозначности представлены на рисунке 2.4. Данные условия задают распределение термогазодинамических параметров по всему объему рассматриваемого помещения. Так, граничные условия однозначности задаются с учетом внутренних поверхностей открытых проемов.

Начальные условия однозначности задают условия распределения температурных полей в объеме рассматриваемого помещения в начальный момент времени.

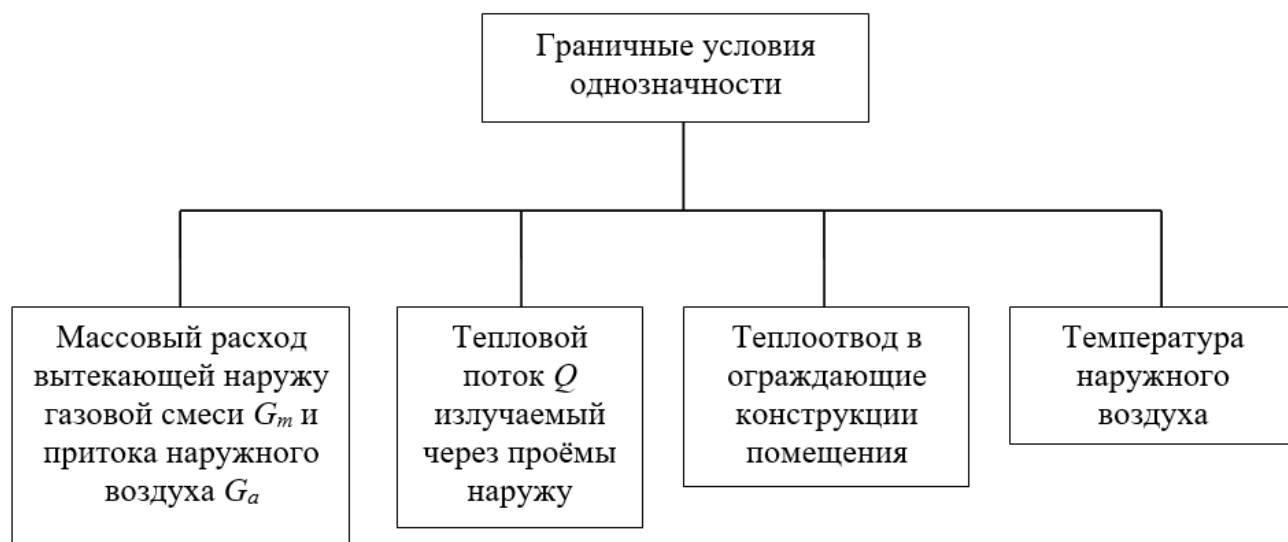


Рисунок 2.4 – Граничные условия однозначности интегральной математической модели пожара

Величины начальных условий однозначности принимаются в момент времени до начала пожара и соответственно имеют следующие значения:

$$T_{m0} = T_0; p_m = p_0; X_{O2m} = X_{O2a} = 0,23; X_{N2m} = X_{N2a} = 0,77;$$

$$X_{im} = 0; M = M_0,$$

где T_0 – значения температуры в объеме помещения перед началом пожара, К; p_0 – значения давления в помещении перед началом пожара, Па; X_{O2m} – среднеобъемная концентрация кислорода в помещении перед началом пожара; X_{N2m} – среднеобъемная концентрация азота в помещении перед началом пожара; X_{im} – среднеобъемная концентрация токсичного газа в помещении перед началом пожара; X_{N2a} , - концентрация азота в внешней системе (атмосферный воздух); X_{O2a} , - концентрация кислорода в внешней системе (атмосферный воздух) [113].

В рамках разработки методики определения времени блокирования путей эвакуации циановодородом необходимо разработать модификации, позволяющие определять плотность циановодорода в полномасштабном помещении объекта энергетики с обоснованным использованием экспериментальных данных, полученных в результате маломасштабных экспериментов.

2.2 Зонная модель пожара

Согласно исследованиям [14, 82] зонные математические модели пожара в основном используются для расчета динамики ОФП при начальных стадиях пожара. Математические основы модели опираются на фундаментальные законы сохранения массы, энергии и импульса. Начальную стадию пожара, с точки зрения термодинамики, можно охарактеризовать неоднородностью распределения газовой среды в объеме рассматриваемого помещения. В рассматриваемой стадии пожара вследствие неоднородного распределения газовой среды принято условно разделять пространство помещения на несколько характерных зоны. Как правило, в каждой характерной зоне наблюдаются различные значения температуры и количественный состав газовой среды. В рамках данной математической модели рассматривается взаимодействие газовой среды с внешней системой через открытые оконные/дверные проемы. Геометрические параметры рассматриваемых характерных зон определяются исходя из однородности газовой среды в рамках границ выбранных зон, а также расположением горючей нагрузки. Границы принятых характерных зон могут изменяться в зависимости от развития пожара [14].

Наиболее частым разделением помещения на характерные зоны является разделение по принципу распространения газовой среды. Исходя из данных по распространению газовой среды в помещениях, характерными зонами в пространстве помещения являются:

- зона конвективной колонки (образующиеся при горении материалов газообразные продукты горения устремляются вверх, образуя над очагом пожара свободноконвективную газовую струю, которая при достижении потолка растекается в радиальных направлениях;
- зона припотолочного слоя (растекание газообразных продуктов горения в припотолочном пространстве образует зоны припотолочного слоя);
- зона холодного воздуха.

Представленные зоны разделены границей бесконечно малой толщины. Тепломассообмен между рассматриваемыми зонами не рассматривается.

Для представленной расчетной схемы зона припотолочного слоя рассматривается равномерно прогретой и задымленной. Располагающиеся в объеме помещения перекрытия также рассматриваются равномерно прогретыми. При решении зонной математической модели пожара, мелкодисперсные частицы дыма не рассматриваются, так как тепломассообмен с данными частицами несущественен по сравнению с величинами для всей газовой среды.

Газовая среда в данной математической модели рассматривается как смесь идеальных газов, а ее параметры были приняты как для сухого воздуха, так как термогазодинамические параметры между газовой средой, образующейся в условиях пожара, и сухим воздухом имеют несущественные отличия.

Помимо этого, в данной модели на процесс взаимодействия термогазодинамической системы с внешней средой не оказывает влияние расположение в объеме помещения пожарной нагрузки.

Основные структурные части зонной математической модели пожара представлены в виде блоков на рисунке 2.5.

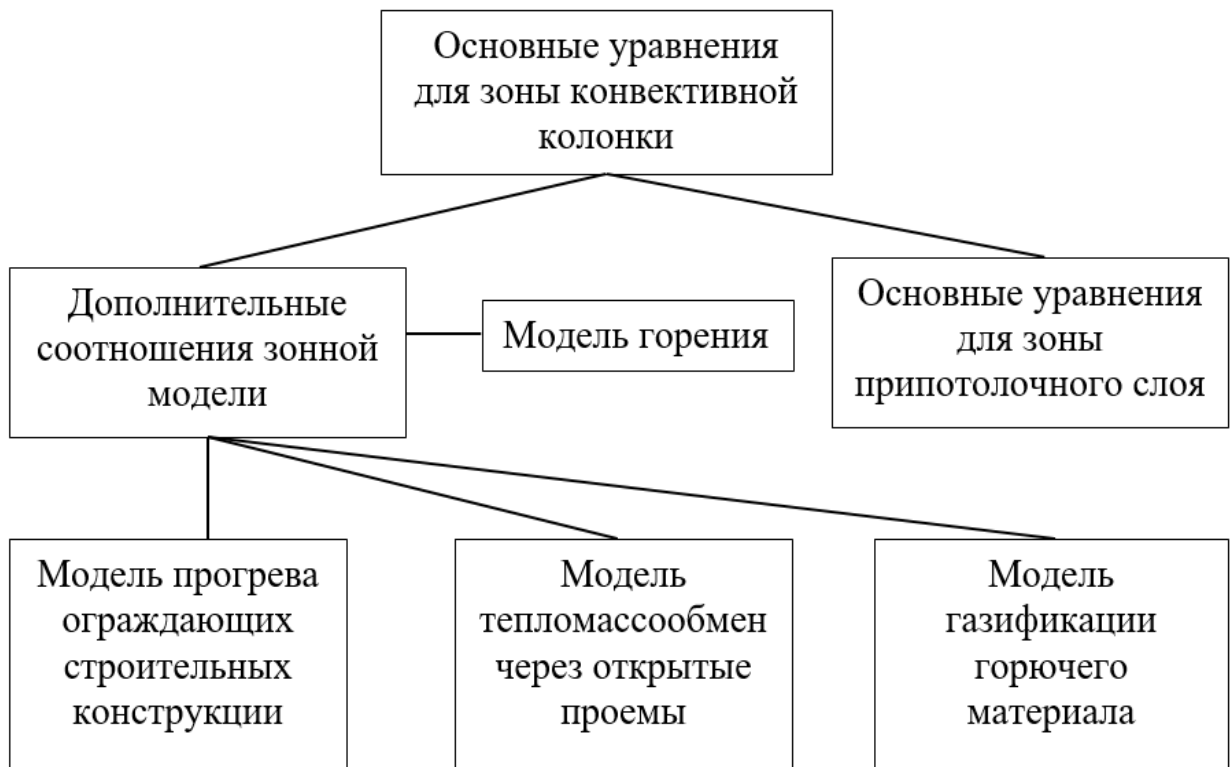


Рисунок 2.5 – Блок схема зонной математической модели пожара

Представленную зонную модель объективно можно рассматривать при пожарах в помещениях с значительным объемом и высотой, так как определение термогазодинамических параметров будет производиться в каждой характерной зоне [115].

В случае пожара в производственных зданиях объектов энергетики (например, машинный зал) определение термогазодинамических параметров возможно с учетом особенностей объемно-планировочных решений производственных зданий ОЭ.

Так, масса газа, образующегося при термическом разложении материала и устремленная в припотолочную зоны будет определяться $m = \rho V$. Так как давление внутри помещения остается неизменным и равняется своему начальному значению p_0 , то внутренняя энергия припотолочной зоны будет определяться согласно следующему уравнению [72]:

$$\frac{d(c_v \rho_2 T_2 V_2)}{d\tau} = c_p T_k G_k - Q_{w2} - p_0 \frac{dV_2}{d\tau}, \quad (2.12)$$

где ρ_2 – средняя плотность во второй зоне, кг/м³; T_2 – средняя температура во второй зоне, К; V_2 – объем второй зоны, м³.

Расчет среднеобъемных значений температур и плотности газовой среды основывается на решении дифференциальных уравнений закона сохранения массы и уравнения состояния идеального газа.

$$V_2 \frac{d\rho_2}{d\tau} = G_k - G_m, \quad (2.13)$$

$$p_2 \approx p_0 = \rho_2 R T_2, \quad (2.14)$$

где $V_2 = F_i (H - z_k - \delta)$ - объем припотолочного слоя, м³; p_2 – давление во II зоне, Па; H – высота помещения, м; δ – толщина горючего материала, м; p_0 – давление во внешней среде, Па.

Закон сохранения массы токсичного газа в припотолочной зоне описывает следующее уравнение:

$$\frac{d(p_i V_2)}{d\tau} = \Psi L_i, \quad (2.15)$$

где p_i – парциальная плотность i -го токсичного газа, кг/м³; L_i – удельный коэффициент образования i -го токсичного газа, кг/кг [14].

Формула для определения парциальной плотности рассматриваемого токсичного газа была получена в результате интегрирования уравнения (2.15) при соблюдении условий, что удельные коэффициенты образования циановодорода остаются постоянными с момента начала пожара:

$$\rho_i = \frac{1}{V_2} \int_0^{\tau} \Psi L_{HCNi} d\tau = \frac{L_{HCN}}{V_2} \int_0^{\tau} \Psi d\tau = \frac{L_{HCN} M \tau}{V_2}, \quad (2.16)$$

где $M\tau$ – масса пожарной нагрузки, выгоревшей к расчетному моменту времени, кг; L_{HCN} – удельный коэффициент образования циановодорода, кг/кг.

Выгоревшая масса горючей нагрузки к расчетному моменту времени определяется в зависимости от типа горючего материала, условий распространения пламени и режима пожара. Более подробно расчет представлен в работе [14].

При определении плотности токсичного газа с использованием представленных уравнений, применяются величины удельных коэффициентов образования (L_i) и величины массовой скорости выгорания, полученные в результате маломасштабных экспериментов. Применение результатов маломасштабных экспериментов не позволяет достаточно обосновано определять плотность циановодорода в полномасштабном помещении, так как не установлены зависимости парциальных плотностей рассматриваемых газов в маломасштабном и полномасштабном объеме.

Таким образом, необходимо разработать модификации, позволяющие определять плотность циановодорода при пожарах в полномасштабных помещениях с учетом масштабного фактора и свойств горючих материалов.

2.3 Математическая модель расчета плотности циановодорода при пожарах

Представленные ранее расчетные математические модели достаточно развиты для решения прикладных задач пожарной безопасности. Однако, как уже отмечалось ранее, аналитические решения представленных моделей позволяют рассматривать процесс образования и распространения лишь двух токсичных газов (монооксида углерода, хлороводорода). Отсутствие циановодорода в расчетных методиках, в первую очередь, связано с отсутствием значительной экспериментальной базы по образованию циановодорода при горении различных материалов [66, 84].

Процесс образования токсичных продуктов горения в условиях пожара, в количественном отношении, описывается удельными коэффициентами образования. В настоящее время удельные коэффициенты образования токсичных продуктов горения представлены лишь в базе данных типовой пожарной нагрузки Кошмарова Ю.А. [14] и представляют данные лишь по двум токсичным газам (монооксид углерода и хлороводород).

Представленные в данной работе удельные коэффициенты образования приняты как постоянные величины, не изменяющиеся в зависимости от термогазодинамической картины пожара. Однако, последние исследования в области газификации различных материалов [28, 31, 32] показали, что удельные коэффициенты образования в значительной степени изменяются в ходе проведения эксперимента. Так, их величины существенно зависят от периода осреднения по времени проведения эксперимента.

В исследованиях [31, 85] был предложен подход к определению плотностей токсичных газов, основывающийся на экспериментально-теоретической зависимости плотности токсичного вещества от изменения среднеобъемной температуры в маломасштабной экспериментальной установке. При решении данного подхода отпадает необходимость в решении дифференциальных уравнений закона сохранения масс токсичных веществ и, как следствие, в определении удельных коэффициентов образования.

Однако, при использовании данного подхода точность определяемой

плотности токсичного газа в значительной степени зависит от точности определения коэффициентов теплопотерь маломасштабной установки и в полномасштабном помещении.

Объективность применения в данном подходе экспериментальных данных, полученных в маломасштабном объеме, к полномасштабному помещению более подробно представлены в работе [86].

В данной работе предлагаются аналитические решения, позволяющие определять плотность циановодорода при пожарах в помещениях с использованием экспериментальных данных по удельным коэффициентам образования $HSCN$ и экспериментально-теоретической зависимости плотности $HSCN$ от изменения плотности кислорода в помещении. Так как данный подход основывается на зависимости плотности $HSCN$ от изменения плотности O_2 , то при его решении отсутствует необходимость в определении коэффициента теплопотерь и решении дифференциального закона сохранения массы токсичного газа.

Помимо этого, аналитическое решение в предложенном подходе, выражающее зависимость среднеобъемной плотности циановодорода от изменения среднеобъемной плотности кислорода, не включает в себя геометрические свойства помещений и горючих материалов, что позволяет рассматривать его справедливым как для маломасштабного объема установки, так и для полномасштабного помещения [13, 50, 87, 88].

Однако, предложенное аналитическое решение является справедливым только для пожара, протекающего в герметичных условиях, так как взаимодействие рассматриваемой термогазодинамической системы с внешней средой может существенно повлиять на концентрацию кислорода в помещении, на основании которой и реализуется предложенный подход.

Таким образом, рассмотрим особенности теплообмена в условно герметичном объеме. Исследуемым токсичным газом является циановодород. Характерная схема теплообмена в герметичном пространстве представлена на рисунке 2.6.

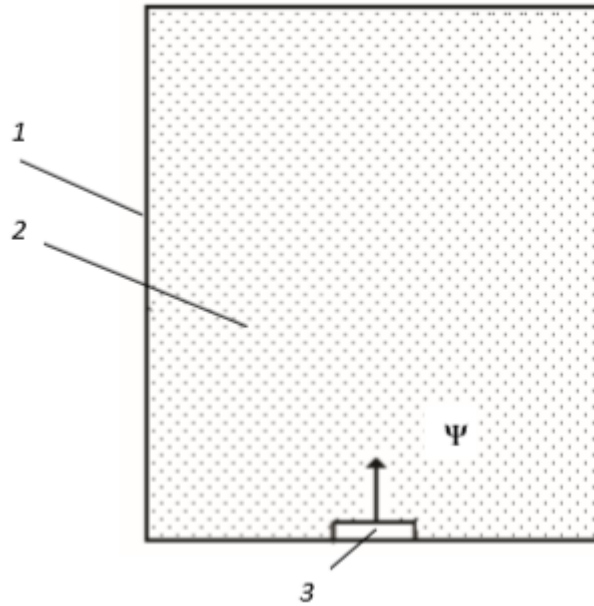


Рисунок 2.6 – Схема теплообмена в экспериментальной установке при герметичных условиях проведения испытаний:

1 – стенки условного помещения; 2 – газовая смесь (продукты горения и воздух);
3 – горючий материал

Для исследования закономерностей протекания термогазодинамического процесса рассмотрим основные уравнения для условно герметичного объема.

Для рассматриваемых условий пожара законы сохранения массы и энергии газовой среды, массы токсичного газа и кислорода представлены в уравнениях (2.18 – 2.21) [86]:

$$\rho_{cp} V \frac{dT_{cp}}{d\tau} = \eta \Psi Q_n^p (1 - \varphi), \quad (2.18)$$

$$V \frac{d\rho_{O_2, cp}}{d\tau} = -\eta \Psi L_{O_2}, \quad (2.19)$$

$$V \frac{d\rho_{z, cp}}{d\tau} = \eta \Psi L, \quad (2.20)$$

$$V \frac{d\rho_{cp}}{d\tau} = \Psi, \quad (2.21)$$

где V – объем условного помещения, m^3 ; ρ_{cp} – среднеобъемная плотности газовой среды, kg/m^3 ; τ – время, s ; Ψ – скорость газификации горючего материала, kg/s ; T_{cp} – среднеобъемная температура газовой среды, K ; η – коэффициент полноты

сгорания; Q_n^p - низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; φ - коэффициент теплопотерь, равный доле теплоты, выделяющейся в очаге горения и поступающей в ограждающие конструкции помещения; $\rho_{z.cp}$ - среднеобъемная плотность токсичного газа; кг/м³; η - коэффициент полноты сгорания; Ψ - скорость газификации горючего материала, кг/с; L - удельный коэффициент образования токсичного газа, кг/кг; $\rho_{O_2.cp}$ - среднеобъемная концентрация кислорода, кг/м³; L_{O_2} - удельный коэффициент потребления кислорода [86].

Удельную изохорную теплоемкость для газовой смеси и воздуха принимаем одинаковой: $c_v = 714$ Дж/(кг·К) [14, 82, 86].

Определение плотности циановодорода для различных промежутков времени будет проводиться в соответствии с формулой, полученной в результате интегрирования уравнения (2.20), которая имеет следующий вид:

$$\rho_{HCN.cp} = \rho_{z.v.} + \frac{\eta L_{HCN}}{V} \int_0^{\tau} \Psi d\tau, \quad (2.22)$$

где $\rho_{z.v.}$ - среднеобъемная плотность токсичного газа в воздухе, кг/м³ [86].

При решении данного уравнения принимаем, что плотность циановодорода в помещении перед началом пожара отсутствует.

В рамках рассматриваемой термогазодинамической картины пожара дифференциальное уравнение закона сохранения массы циановодорода и кислорода будут иметь следующий вид:

$$V \frac{d\rho_{HCN}}{d\tau} = \eta \Psi L_{HCN}, \quad (2.23)$$

$$V \frac{d\rho_{O_2.cp}}{d\tau} = -\eta \Psi L_{O_2}, \quad (2.24)$$

где $\rho_{O_2.cp}$ - среднеобъемная плотность кислорода, кг/м³.

Коэффициенты потребления кислорода определялись исходя из аналитических решения интегральной модели пожара в соответствии с формулой:

$$L_{O_2} = \left| \frac{Vd\rho_{O_2}}{n\Psi d\tau} \right|, \quad (2.25)$$

После совместного интегрирования уравнений закона сохранения массы циановодорода (2.23) и закона сохранения кислорода (2.24) была получена формула, описывающая зависимость плотности HCN от изменения плотности O_2 в любой рассматриваемый промежуток времени от $\tau = 0$:

$$\rho_{HCN} = \frac{(\rho_{O_{2a}} - \rho_{O_2})L_{HCN}}{L_{O_2}}, \quad (2.26)$$

где $\rho_{O_{2a}}$ - плотность кислорода в атмосферном воздухе, кг/м³ [86].

Аналитическое решение (2.26) позволит определить плотность рассматриваемого токсичного газа с учетом масштабного фактора, так как в него не входят размеры помещения и горючей нагрузки.

Представленное аналитическое соотношение указывает на необходимость использования экспериментальных значений плотности циановодорода и удельных коэффициентов образования HCN и потребления O_2 .

Как уже отмечалось ранее, основным достоинством представленного аналитического решения заключается в отсутствии необходимости определения величин коэффициента теплопотерь.

При решении задач по определению времени блокирования путей эвакуации циановодородом необходимо также учесть методы определения показателя токсичности продуктов горения.

Под показателем токсичности продуктов горения понимается отношение количества материала к единице объема замкнутого пространства, в котором образующиеся при горении материала газообразные продукты горения вызывают гибель 50% подопытных животных [89].

В соответствии с действующими нормативными документами [89], показатель токсичности продуктов горения определяется экспериментальным и расчетным способами. При определении экспериментальным способом

проводится серия огневых испытаний.

Формула для определения показателя токсичности продуктов горения расчетным способом имеет следующий вид:

$$H_T = \frac{\rho_i}{\rho_{i_{\text{крит}}}}, \quad (2.27)$$

где ρ_i - среднеобъемная парциальная плотность i -го токсичного газа, кг/м³;
 $\rho_{i_{\text{крит}}}$ - предельно допустимая для человека плотность i -го токсичного газа, кг/м³ [86, 89].

Экспериментальное определение показателя токсичности продуктов горения основывается на определении образующихся концентрации токсичных продуктов горения в закрытом экспозиционном объеме. [114]. Однако, величины показателей токсичности продуктов горения, полученные в результате проведения маломасштабных огневых испытаний, могут быть не в полной мере объективны для условий протекания пожара в полномасштабном помещении. Данное утверждение обосновано тем, что величины концентрации токсичных продуктов горения и кислорода в маломасштабном объеме установки не всегда соответствуют термогазодинамическим условиям пожара полномасштабном помещений [90, 91].

Применение представленного ранее аналитического решения (2.26) при определении показателя токсичности продуктов горения позволит установить связь между плотностями токсичных продуктов горения и их удельными коэффициентами образования как для маломасштабного объема, так и для полномасштабного помещения. Таким образом, определение показателя токсичности с применением аналитического решения (2.26) будет справедливым как для мелкомасштабных экспериментов, так и для полномасштабного реального помещения [90,91].

Анализ токсикологического воздействия продуктов горения показал, что токсикологический эффект циановодорода и монооксида углерода имеет аддитивный характер. Исследование совместного токсикологического воздействия рассматриваемых токсикантов проводилось с использованием

модельных смесей.

Вследствие аддитивного характера воздействия HCN и CO , их токсикологическое воздействие будет увеличиваться путем суммирования эффектов.

Так, изменения величин показателя токсичности при совместном воздействии HCN и CO , в соответствии с работами [40, 86, 90], будет определяться в соответствии с формулой:

$$H = H_{T.CO} + H_{T.HCN} = \frac{\rho_{HCN}}{\rho_{HCN_{крит}}} + \frac{\rho_{CO}}{\rho_{CO_{крит}}}, \quad (2.28)$$

где $\rho_{HCN_{крит}}$ - предельно допустимая для человека плотность циановодорода, кг/м³;

$\rho_{CO_{крит}}$ - предельно допустимая для человека плотность монооксида углерода, кг/м³.

Для учета масштабного фактора при определении показателя токсичности при совместном воздействии монооксида углерода и циановодорода была получена формула, позволяющая определять величины показателя токсичности с использованием удельных коэффициентов образования (HCN и CO) и изменения парциальной плотности кислорода. Данная формула была получена после совместного интегрирования уравнений (2.26) и (2.28) и имеет следующий вид [90]:

$$H_T = \left(\frac{L_{HCN}}{L_{O_2} \rho_{HCN_{крит}}} + \frac{L_{CO}}{L_{O_2} \rho_{CO_{крит}}} \right) (\rho_{O_2a} - \rho_{O_2cp}), \quad (2.29)$$

Показатель токсичности продуктов горения по совместному влиянию HCN , CO и недостатка O_2 будет определяться в соответствии с формулой [90]:

$$H_T = \left(\frac{L_{HCN}}{L_{O_2} \rho_{HCN_{крит}}} + \frac{L_{CO}}{L_{O_2} \rho_{CO_{крит}}} + \frac{1}{\rho_{O_2a} - \rho_{O_2крит}} \right) (\rho_{O_2a} - \rho_{O_2cp}), \quad (2.30)$$

Аналитическое решение (2.30) позволит определять показатель токсичности с учетом масштабного фактора, так как в него не входят размеры помещения и пожарной нагрузки.

Предложенная математическая модель позволяет определять плотность циановодорода в полномасштабных помещениях с использованием экспериментально-теоретической зависимости парциальной плотности HCN от изменения плотности O_2 . Предложенное аналитическое решение позволит определить плотность рассматриваемого токсичного газа с учетом масштабного фактора и без решения дифференциального уравнения закона сохранения массы HCN .

Однако, для реализации предложенной модели необходимо экспериментальным путем определить зависимость парциальной плотности HCN от изменения плотности O_2 в маломасштабном объеме, а также величины удельных коэффициентов образования циановодорода.

2.4 Физико-математическая модель отравления циановодородом в условиях пожара

Как уже отмечалось ранее, количество поступающего в организм циановодорода будет напрямую зависеть от скорости вентиляции легких и скорости диффундирования токсиканта через легочную мембрану человека.

В расчетной модели отравления были приняты следующие допущения:

- в соответствии с исследованиями [82], 80% от массы поступающего циановодорода будет беспрепятственно диффундировать через легочную мембрану в кровь;
- отравление циановодородом путем чрезкожной резорбции не рассматривается в данной модели отравления так как, количество диффундирующего HCN через незащищённые участки кожи пренебрежительно мало по сравнению с ингаляционным способом поступления токсиканта;
- воздух, находящийся в воздухоносных путях не принимает участие в газообмене [74, 92];
- вся масса циановодорода поступившего в кровеносное русло остается в плазме крови, не принимая в учет детоксикацию при взаимодействии с метгемоглобином;
- после диффундирования циановодорода через легочную мембрану в кровь, его давление рассматривается как меньшее по отношению к давлению перед легочной мембраной.

В рамках разработанной физико-математической модели отравления циановодородом степень поражения организма человека определяется содержанием цианида в крови в соотношении миллиграмм/литр [93] (таблица 2.1).

В соответствии с работами [94, 95] при концентрации циановодорода в крови: 0,5-0,1 мг/л наблюдается легкое отравление (ощущение царапанья в горле, горький вкус во рту, тошнота, головокружение); 1,0-2,5 мг/л наблюдается умеренное отравление (отдышка, учащенное дыхание, рвота); 2,0-3,0 мг/л

наблюдается тяжелое отравление (сильные судороги, потеря сознания); 3,0 и более мг/л наблюдается летальное отравление (остановка дыхания).

В соответствии с работой [76] критические концентрации токсичных продуктов горения принимаются по литературным данным для условий однократного воздействия на эвакуирующихся в течение нескольких минут при средних физических нагрузках и по критерию сохранения ими способности реально оценивать окружающую обстановку, уверенно принимать и выполнять соответствующие решения.

Таблица 2.1 - Соотношение концентрации циановодорода в крови и проявлении симптомов отравления [94, 95]

Концентрация HCN в крови	Степень отравления	Симптомы отравления
19-38 ммоль/л (0,5-0,1 мг/л)	Легкое отравление	Ощущение царапанья в горле, жгуче горький вкус во рту, головная боль, головокружение и тошнота
38 и 96 ммоль/л (1,0-2,5 мг/л)	Умеренное отравление	Появляется отдышка, учащенное дыхание, увеличивается слабость, тошнота и рвота
96 до 115 ммоль/л (2,0-3,0 мг/л)	Тяжелое отравление	Сильные судороги и потеря сознания
> 115 ммоль/л (3,0 мг/л)	Летальное отравление	Ослабление судорог, паралич, поверхностное и аритмичное дыхание, остановка дыхания

Как уже отмечалось ранее (глава 1 раздел 1.5), при легком отравлении циановодородом наблюдаются симптомы, которые могут в значительной степени затруднить процесс эвакуации.

Исходя из того, что рамках математической модели отравления HCN степени отравления будут определяться массовым содержанием цианидов в крови, определим критические времена воздействия данного токсиканта.

Критическое время воздействия циановодорода $\tau_{кр.1}$ – время от начала пожара до момента времени, при котором еще возможна безопасная эвакуация. Данное критическое время будет соответствовать легкой степени отравления при

массовом содержании циановодорода ($\bar{M}_{HCN} = 0,5$ мг/л) [93].

Критическое время воздействия циановодорода $\tau_{кр.2}$ – время от начала пожара до момента времени, при котором эвакуирующиеся неспособны самостоятельно покинуть помещение. Данное критическое время будет соответствовать средней степени отравления при массовом содержании циановодорода ($\bar{M}_{HCN} = 1$ мг/л) [93].

Помимо критических времен воздействия HCN в зависимости от его массового содержания в крови, также рассмотрим критическое время воздействия $\tau_{кр.3}$ в зависимости от величин плотности HCN на уровне рабочей зоны помещения.

Критическое время воздействия циановодорода $\tau_{кр.3}$ – время от начала пожара до момента достижения критических величин плотности HCN на уровне рабочей зоны помещения [67, 92].

В соответствии с формулой (1.2) альвеолярную вентиляцию в условиях пожара необходимо рассматривать с учетом физических нагрузок при эвакуации. Как известно, физические нагрузки способствуют учащению дыхания человека, что сказывается на его скорости легочной вентиляции.

В условиях отсутствия физических нагрузок и спокойном дыхании, скорость легочной вентиляции может варьироваться от 5 до 25 литров/минуту. Однако, в условиях реального пожара с учётом возможной задымленности помещения, пониженного содержания кислорода и физических нагрузок, частота и скорость дыхания могут существенно изменяться [96]. Таким образом, в условиях пожара скорость легочной вентиляции может достигать 150 литров/минуту [97].

Помимо этого, на скорость легочной вентиляции также оказывает влияние возраст эвакуирующихся. Так, в соответствии с работой [98], максимальная вентиляция легких существенно изменяется с возрастом эвакуирующихся в соответствии с таблицей 2.2.

Принимая во внимание возрастные категории персонала объекта энергетики рассмотрим изменения скорости легочной вентиляции от 20 до 60 лет.

Из представленных данных видно, что для возрастной группы 20-40 лет, скорость легочной вентиляции варьируется от 7,1-9,2 литров/минуту. Также необходимо рассмотреть максимальную вентиляцию легких. Из таблицы видно, что в зависимости от возрастной группы значительно изменяется максимальная вентиляция легких от 120 литров до 75.

Таблица 2.2 – Скорость легочной вентиляции при спокойном дыхании в зависимости от возрастной группы [98]

Критерии	Возрастные группы, лет			
	20-29	30-39	40-49	50-60
Частота дыхания, кол./мин	15,5	14,1	17,3	14
Минутный объем дыхания, л/мин	9,2	8,7	8,5	7,1
Максимальная вентиляция легких, л	122,5	98	85	76

Таким образом, при реализации предложенной модели необходимо рассматривать средние значения минутного объема дыхания и максимальной вентиляции легких для представленных возрастных групп.

Помимо этого, принимая во внимание изменения скорости легочной вентиляции вследствие физических нагрузок, рассмотрим динамику её изменения в соответствии с исследованиями [99]. В данной работе представлено, что у физически подготовленных людей при субмаксимальных физических нагрузках скорость легочной вентиляции изменяется до 78 % от скорости, характерной для спокойного дыхания.

Скорость легочной вентиляции также изменяется при возникновении внешних условий, характерных для пожара в помещении. В работе [92] представлены результаты исследования изменения скорости легочной вентиляций в условиях гипоксии (пониженного содержания O_2). Так, при пониженном содержании кислорода скорость легочной вентиляции может повышаться до 50 процентов, что представлено на рисунке 2.7.

Исследование в работе [100] было проведено при понижении концентрации

O_2 в газовой смеси на 9%. Из результатов исследования видно, что пониженное содержание кислорода практически мгновенно оказывает влияние на скорость легочной вентиляции.

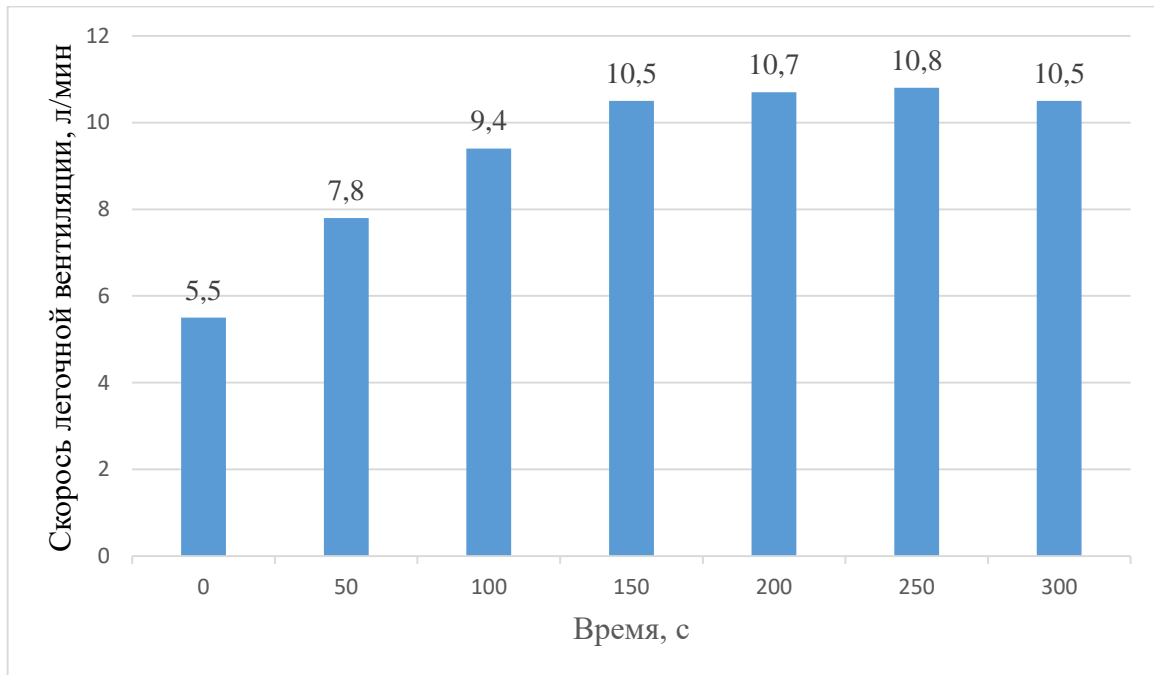


Рисунок 2.7 – Изменения скорости легочной вентиляции в условиях пониженного содержания кислорода в газовой смеси [100]

Таким образом, представленные факторы, оказывающие влияние на скорость легочной вентиляции, могут в значительной степени повлиять на количество диффундирующего HCN в организм человека и соответственно на скорость и период интоксикации, что еще раз обосновывает необходимость исследования данных факторов при определении критических времен воздействия токсичными продуктами горения.

При проведении инженерных расчетов с целью определения массового содержания циановодорода необходимо рассматривать максимальные показатели изменения скорости легочной вентиляции при влиянии различных факторов (физическая нагрузка, пониженное содержание кислорода). При спокойном дыхании эвакуирующихся также необходимо принимать максимальные показатели, характерные для условий отсутствия физических нагрузок, однако, необходимо принимать во внимание изменения скорости легочной вентиляции вследствие воздействия токсичных продуктов горения. Таким образом, для различных типов дыхания примем максимальные показатели скорости легочной

вентиляции:

- при спокойном дыхании $W=25$ литров/минуту;
- при учащенном дыхании $W=70$ литров/минуту.

С учетом принятых допущений, масса циановодорода диффундирующего в кровяное русло с учетом изменяемой скорости легочной вентиляции эвакуирующихся в условиях пожара и постоянной концентрации циановодорода по времени будет определяться по следующей формуле [93]:

-при $W < W_{max}$:

$$M_{HCN} = 0,0008 k_w \rho_{HCN} W \tau_{эксн} , \quad (2.31)$$

-при $W > W_{max}$:

$$M_{HCN} = 0,0008 k_w \rho_{HCN} W_{max} \tau_{эксн} , \quad (2.32)$$

где $\tau_{эксн}$ - время экспозиции, мин; M_{HCN} – масса циановодорода диффундирующего в кровь за время экспозиции, г; W – скорость легочной вентиляции, л/мин; W_{max} – максимальная скорость легочной вентиляции, л/мин.

При изменяемой во времени плотности циановодорода, масса диффундирующего HCN будет определяться по следующей формуле:

$$M_{HCN} = 0,0008 k_w W \int_0^{\tau} \rho_{HCN} d\tau , \quad (2.33)$$

где τ - время от начала горения, с.

Представленная математическая модель, основывающаяся на определении массового содержания цианидов в крови эвакуирующихся, позволит определять критические времена воздействия циановодорода с учетом особенностей поглощения и биораспределения HCN в организме человека.

2.5 Методика определения времени блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики

Под определением времени блокирования путей эвакуации понимается расчетное определение времени от начала пожара до момента достижения на путях эвакуации критических значений хотя бы одного опасного фактора пожара [101, 102].

Под временем блокирования путей эвакуации циановодородом понимается промежуток времени от начала пожара до момента времени, при котором на путях эвакуации достигается критические значения по концентрации HCN .

В рамках данной методики в качестве критических характеристик по рассматриваемому токсичному газу понимаются величины его плотности и расчетное массовое содержание цианидов в крови эвакуирующихся (решение математической модели отравления).

При выборе критической характеристики токсичного газа необходимо учесть два варианта принятия критических значений:

- по достижению критической плотности циановодорода, при которой наблюдается такое токсикологическое отравление, которое в значительной степени затрудняет процесс эвакуации;
- по массовому содержанию диффундирующего в организм человека циановодорода, соответствующее легкой и среднетяжелой степени отравления.

Методика определения времени блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики состоит из следующей последовательности необходимых мероприятий:

- сбор и анализ исходных данных (анализ пожарной опасности основных помещений, анализ основной пожарной нагрузки);
- на основе выявленных наиболее опасных участков объекта энергетики, выбрать наиболее опасные сценарии развития пожара;
- использование наиболее обоснованной математической модели пожара и метода её численного решения;

- определение удельных коэффициентов образования циановодорода по случаю горения материалов, применяемых на объектах энергетики. Определить экспериментальные зависимости плотности циановодорода от функции плотности кислорода;
- проведение расчета (возможно с использованием ЭВМ);
- анализ результатов расчета и научно обоснованные методические рекомендации.

При проведении анализа пожарной опасности необходимо ознакомиться с особенностями технологического процесса на исследуемом объекте защиты. Размещение пожарной нагрузки, как правило, распределено по всему объему электростанции и определено проектной документацией.

Выбор наиболее опасных сценариев развития пожара вытекает из результатов, полученных при анализе пожарной опасности объекта защиты. Наиболее вероятными сценариями развития пожара являются:

- горение кабельной продукции в кабельных сооружениях;
- горение разлива турбинного масла.

При проведении расчета системы обеспечения пожарной безопасности (автоматические системы пожаротушения, дымоудаления) следует не учитывать, так как предполагается свободное развитие пожара.

Определение удельных коэффициентов образования и зависимостей парциальной плотности циановодорода от изменения среднеобъемной плотности кислорода определяются экспериментальным путем для каждого материала, составляющего горючую нагрузку исследуемого объекта.

Проведение расчета возможно с применением программ для ЭВМ. Используемые для расчета программы динамики ОФП должны пройти процедуру официальной регистрации программы в ФИПС.

Помимо использования при расчете экспериментальных зависимостей, необходимо провести расчет по определению критической концентрации циановодорода, в условиях свободной конвекции, при определенных концентрациях, образующихся при горении пожарной нагрузки исследуемого

объекта (глава 2 раздел 2.4).

После проведения экспериментальных и численных исследований (аналитическое решение интегральной модели пожара (2.26), решение математической модели отравления) на основании полученных критических времен воздействия $HSCN$ определим время блокирования путей эвакуации циановодородом:

$$\tau_{\text{бл}} = \tau_{\text{крит}HSCN}. \quad (2.35)$$

Таким образом, для реализации данной методики необходимо экспериментальным путем получить зависимость парциальной плотности циановодорода от изменения плотности кислорода ($\rho_{HSCN} = f(\rho_{O_2})$) при горении материалов, характерных для объектов энергетики.

2.6 Выводы по второй главе

1. Существующие математические модели расчета динамики ОФП из-за отсутствия экспериментальных данных по образованию циановодорода рассматривают процесс образования и распространения лишь 3-х газов (монооксид углерода, оксид углерода, хлороводород), не принимая во внимание чрезвычайно опасный токсикант – циановодород;

2. Необходимы модификации существующих математических моделей расчета динамики ОФП, учитывающие процесс образования и распространения циановодорода при горении материалов, применяемых на объектах энергетики;

3. Предложен экспериментально-теоретический подход к расчету парциальной плотности циановодорода при пожаре в полномасштабном помещении, позволяющий использовать экспериментальные зависимости парциальной плотности циановодорода от изменения парциальной плотности кислорода, полученные в маломасштабной экспериментальной установке. При этом отпадает необходимость решения дифференциального уравнения закона сохранения массы циановодорода, в которое входит величина L_{HCN} , существенно зависящая от времени осреднения;

4. Предложен новый подход к расчету показателя токсичности при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода, имеющих аддитивный токсикологический эффект;

5. Предложена физико-математическая модель отравления циановодором в условиях пожара с учетом повышенной скорости вентиляции легких, характерной для условий пожара в помещении;

6. Разработана методика определения времени блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики принимающая во внимание критические характеристики токсичного как по его плотности на уровне рабочей зоны, так и по массовому содержанию цианидов в крови эвакуирующихся.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДИФИКАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

3.1 Постановка задач экспериментального определения парциальной плотности циановодорода и удельных коэффициентов образования циановодорода в экспозиционной камере установки

В рамках реализации методики определения времени блокирования путей эвакуации циановодородом необходимо получить экспериментальные данные, характеризующие в количественном отношении процесс образования HCN при горении материалов, применяемых на объектах энергетики.

К величинам, характеризующим процесс образования циановодорода можно отнести:

- величины концентрации циановодорода в составе продуктов горения материалов, характерных для объектов энергетики;
- величины удельных коэффициентов образования циановодорода при сгорании определенной массы исследуемых материалов.

Определение рассматриваемых величин производится посредством проведения серии огневых экспериментов. При проведении экспериментальных исследований необходимо подвергнуть исследуемые материалы термическому разложению при температурных условиях, характерных для развитой стадии пожара на объектах энергетики.

Помимо этого, для реализации аналитического решения (2.26), позволяющего устанавливать связь между парциальными плотностями токсичных продуктов горения и их удельными коэффициентами образования как для маломасштабного объема, так и для полномасштабного помещения, необходимо получить экспериментально-теоретическую зависимость парциальной плотности HCN от изменений плотности O_2 . Для установления данной зависимости необходимо также экспериментально получить величины концентрации

кислорода и его удельные коэффициенты потребления при сгорании материалов, характерных для объектов энергетики.

Для реализации предложенного подхода к определению показателей токсичности при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода необходимо также экспериментально получить величины удельных коэффициентов образования CO .

При проведении экспериментальных исследований необходимо также учесть, что величины удельных коэффициентов образования изменяются в ходе проведения эксперимента. Таким образом, при определении удельных коэффициентов образования и потребления необходимо рассмотреть динамику их изменения в течении эксперимента и получить период их осреднения.

Все экспериментальные исследования будут проводиться с использованием маломасштабной экспериментальной установки по определению пожарной опасности конденсированных материалов.

Для получения достоверных экспериментальных данных, все приборы измерения прошли процедуры калибровки и поверки.

С целью определения концентрации циановодорода в экспозиционной камере установки, система контроля газовоздушной среды подверглась модификации путем добавления нового газоаналитического оборудования.

Таким образом, в ходе проведения экспериментальных исследований необходимо получить:

- динамику изменения удельных коэффициентов образования HCN , CO и O_2 и определить период их осреднения;
- величины парциальных плотности HCN , CO и O_2 в экспозиционной камере установки.

3.2 Описание модифицированной экспериментальной установки.

Методика проведения экспериментов

Экспериментальная установка [28] для определения пожарной опасности конденсированных материалов позволяет проводить экспериментальные исследования процесса термического разложения различных материалов. Данная установка позволяет рассматривать процесс термического разложение в двух режимах:

- режим пламенного горения исследуемых образцов при избытке кислорода;
- режим тления исследуемых образцов в условиях нехватки кислорода.

В рамках проведения экспериментальных исследований данной работы, рассматривались два режима термического разложения.

Процесс горения в данной установке инициируется посредством воздействия на исследуемый образец падающего теплового потока от электронагревательного элемента, расположенного в камере сгорания.

Система контроля газовой смеси в экспозиционной камере осуществляется за счет применения газоаналитического оборудования, позволяющего количественно оценить состав газовой смеси.

Экспериментальная установка состоит из нескольких основных элементов: теплоизолированной камеры сгорания, экспозиционной камеры, зонда отбора газа, электронагревательного излучателя, держателя образца, лазерного модуля и фоточувствительного элемента [26, 28].

Конструктивно экспериментальная установка выполнена таким образом, что образующиеся вследствие термического разложения продукты горения поступают в экспозиционную камеру через переходной рукав из камеры сгорания.

Схема модифицированной экспериментальной установки представлена на рисунке 3.1 [26, 50, 66, 90].

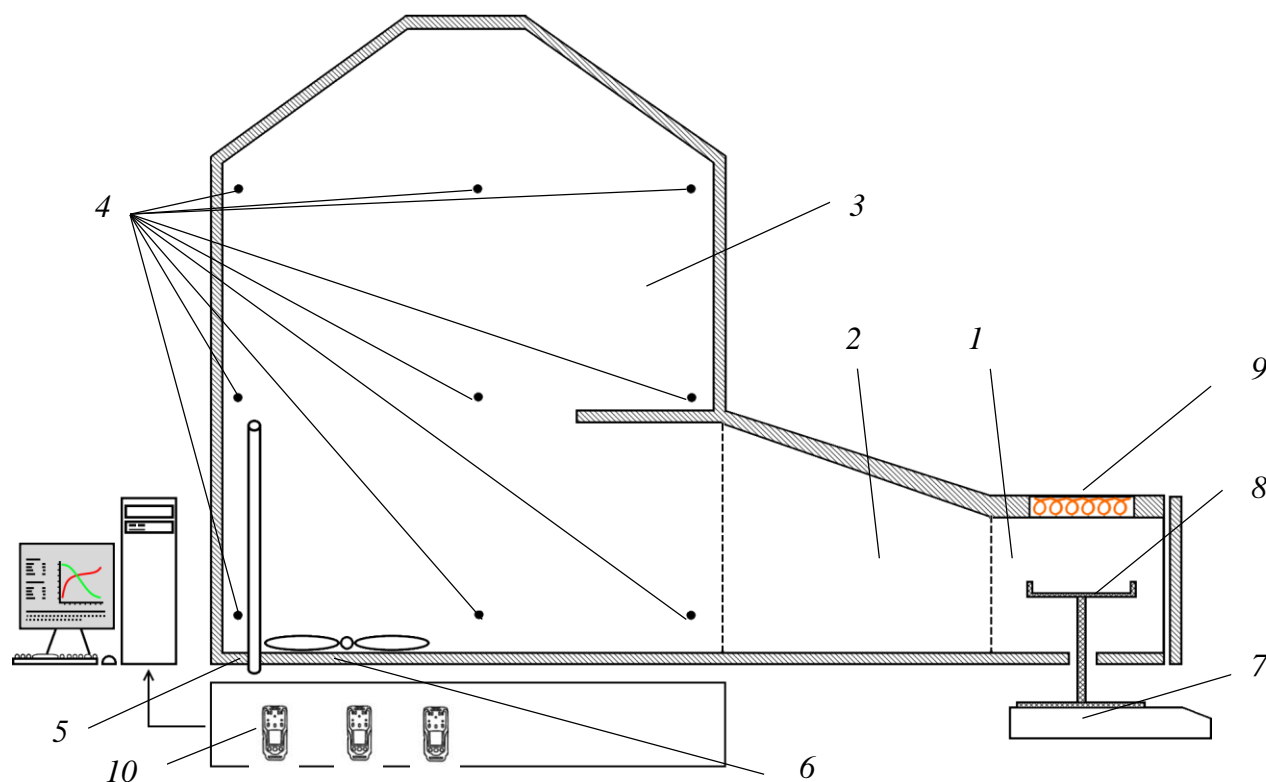


Рисунок 3.1 - Схема модифицированной экспериментальной установки. 1- камера сгорания; 2 – переходной рукав; 3 – экспозиционная камера; 4 – термопары; 5 – зонд отбора газа; 6 – вентилятор; 7 – электронные весы; 8 – держатель образца; 9 – электронагревательный элемент; 10 – газоаналитическое оборудование [26, 50, 66, 90]

Камера сгорания состоит из электронагревательного излучателя и держателя образца, размещенном на электронных весах. Контроль температуры и плотности падающего теплового потока осуществляется с помощью водоохлаждаемого датчика типа Гордона. [26, 31, 49, 85].

Экспозиционная камера представляет собой кубический объем ($0,5887 \text{ м}^3$). В целях постоянного контроля температуры в экспозиционном объеме предусмотрены 27 бронированных термопары по всему рассматриваемому объему. Диапазон измерений термопар от -40 до $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ с погрешностью не более $\pm 1^\circ\text{C}$. Держатель образцов находится на электронных весах, которые расположены на подвижном столе и имеет погрешность измерений не более $\pm 1 \text{ мг}$ [26, 31, 49, 85].

Контроль над составом газовой среды в экспозиционной камере осуществляется с помощью прецизионного газоаналитического оборудования, позволяющего определять концентрацию следующих газов: оксида углерода с

диапазоном измерений от 0 до 1% об и допустимой погрешностью $\pm 10\%$; монооксида 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 [26, 31, 49, 85].

Система контроля газовой среды в экспозиционной камере подверглась модификации путем добавления в измерительный участок газоаналитического оборудования, способного определять концентрации циановодорода в составе газовой смеси. Данный участок включает в себя систему параллельного отбора газовой среды, образующейся при тлении и горении исследуемых образцов [26, 49].

Схема системы параллельного отбора проб газовой среды представлена на рисунке 3.2.

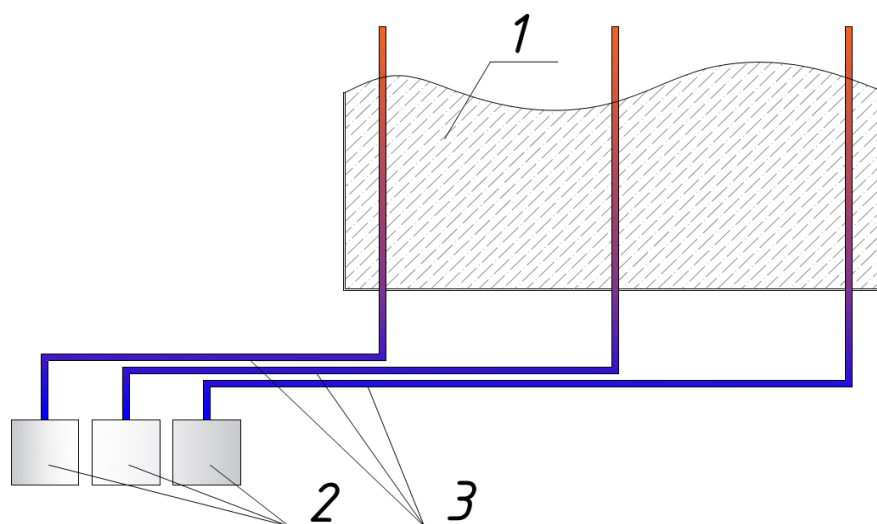


Рисунок 3.2 - Схема системы параллельного отбора проб газовой среды
1 – объем; 2 – трубки зонда отбора; 3 – фильтры грубой и тонкой очистки

Фото расположения газоаналитического оборудования представлено на рисунке 3.3.

Представленная модификация экспериментальной установки позволила определить концентрацию циановодорода в экспозиционной камере при горении исследуемой кабельной продукции.

Непосредственно перед проведением испытаний изготавливаются образцы исследуемого материала размерами 100×100 мм. Перед проведением испытаний образцы кондиционируются в течении 12 часов при комнатной температуре ± 20 °С.



Рисунок 3.3 - Фото расположения газоаналитического оборудования

Испытание начинается с запуска контура нагревательного элемента, включением ПК и запуска регистрирующих программ с последующей проверкой отклика датчиков. После чего ступенчато задаётся рабочая температура – 766 °С и плотность падающего теплового потока – 60 кВт/м². При выходе температуры и плотности на установленные значения, необходимо открыть заслонку переходного рукава и дверцу камеру сгорания. После чего, предварительно взвешенный образец материала, помещают в камеру сгорания и закрывают дверцу [26, 49].

Схема камеры сгорания экспериментальной установки представлена на рисунке 3.4. [103, 104].

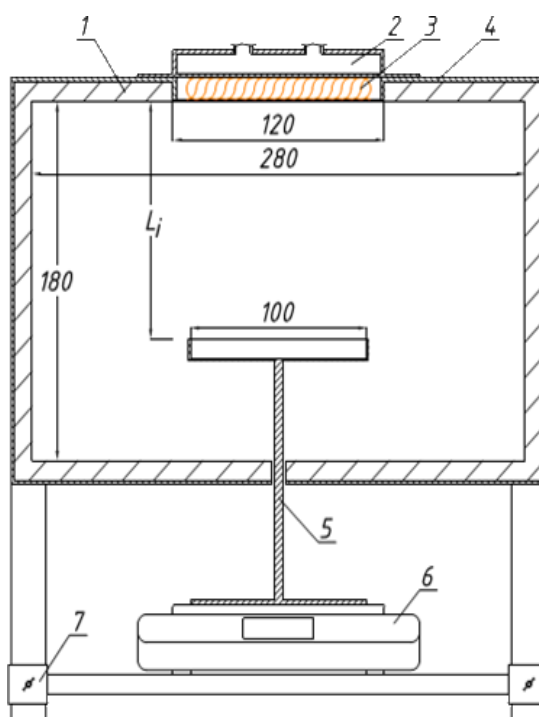


Рисунок 3.4 - Схема камеры сгорания экспериментальной установки

- 1 - теплоизоляционный слой; 2 - камера водяного охлаждения;
- 3 - электронагревательный излучатель; 4 - наружная стенка камеры сгорания;
- 5 - держатель образца; 6 - электронные весы;
- 7 - система регулировки расстояния от электронагревательного элемента до испытуемого образца [103, 104]

Предварительно взвешенный образец исследуемого материала помещается в держатель образца, где подвергается воздействию падающего теплового потока с плотностью 60 кВт/м^2 . Схема расположения исследуемых образцов представлена на рисунке 3.5.

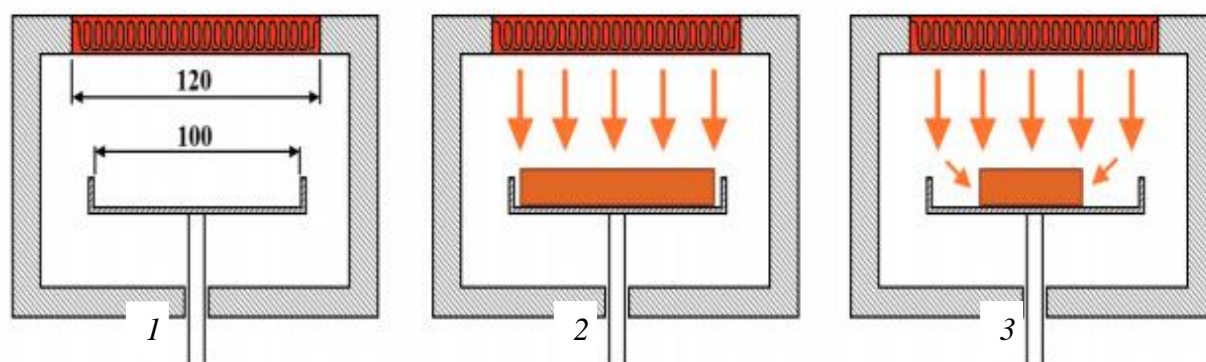


Рисунок 3.5 - Схема расположения исследуемых образцов:

- 1 - соотношение размеров держателя образца и нагревательного элемента; 2 - обогрев образца размером $100 \times 100 \text{ мм}$; 3 - обогрев образца размером $50 \times 50 \text{ мм}$

В ходе проведения испытания фиксируются следующие значения [26, 49]:

- массу образца в ходе испытания (каждые 3-10 секунд);
- температуру в объеме экспозиционной камеры;
- концентрацию газов, входящих в состав продуктов горения, а именно CO_2 , CO , HCN , O_2 .

Обработка полученных экспериментальных данных проводилась с использованием интегральной модели пожара.

Удельные коэффициенты образования циановодорода при горении исследуемых образцов в условно герметичных условиях определялись в соответствии с формулой [1, 26, 49, 105]:

$$L_{HCN} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{HCN}}{d\tau}, \quad (3.1)$$

где Ψ – массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с; где V – внутренний объем установки, м³; ρ_{HCN} – среднеобъемная плотность HCN , кг/м³; τ – время, с.

Удельные коэффициенты образования определялись в каждую секунду проведения эксперимента, что позволило отследить динамику их изменений для различных стадий эксперимента.

Удельная массовая скорость выгорания горючего материала определялась исходя из экспериментального значения изменения массы образца в ходе эксперимента. Формула для определения удельной массовой скорости выгорания горючего материала имеет следующий вид:

$$\Psi = \frac{\Delta m}{\Delta \tau \cdot F_{\text{экс}}}, \quad (3.2)$$

где Δm – количество сгоревшего материала, кг; $\Delta \tau$ – промежуток времени, с; $F_{\text{экс}}$ – экспонируемая площадь образца, м².

Парциальная плотность токсичного газа (HCN) определялась также в каждый момент времени при горении исследуемой кабельной продукции. В герметичных условиях проведения испытаний, парциальная плотность циановодорода определялась с использованием следующего уравнения:

$$\rho_{HCN} = \frac{P_0}{TR} \frac{C_{HCN} M_{HCN}}{(1 - C_{HCN} - \sum C_j)(M_{возд} + C_{HCN} + \sum C_j)}, \quad (3.3)$$

где R – универсальная газовая постоянная; C_{HCN} – концентрация циановодорода в объеме экспозиционной камеры, об. доли; M_{HCN} – молекулярная масса HCN , г/моль; C_j – концентрации j -газа, об. доли; $M_{возд.}$ – молекулярная масса воздуха, г/моль.

Обработка результатов экспериментов производилась с помощью компьютерной программы Microsoft Excel. Для комплексного расчета всех искомых показателей были разработаны алгоритмы обработки полученных с обособленных измерительных приборов данных и реализованы на базе программы Excel в формате файла *.xlst* с поддержкой макросов при помощи объектно-ориентированного языка программирования Visual Basic for Applications (VBA).

Разработанный программный код позволил, учитывая частоту записи, фиксируемых параметров, полученных с обособленных измерительных приборов подбирать значения путем частичной интерполяции и уменьшением скачков данных, вызванных большим временным интервалом между фиксацией, измеряемых параметров.

Основное информационное окно управления обработкой и отчистки введенных значений представлено на рисунке 3.6.

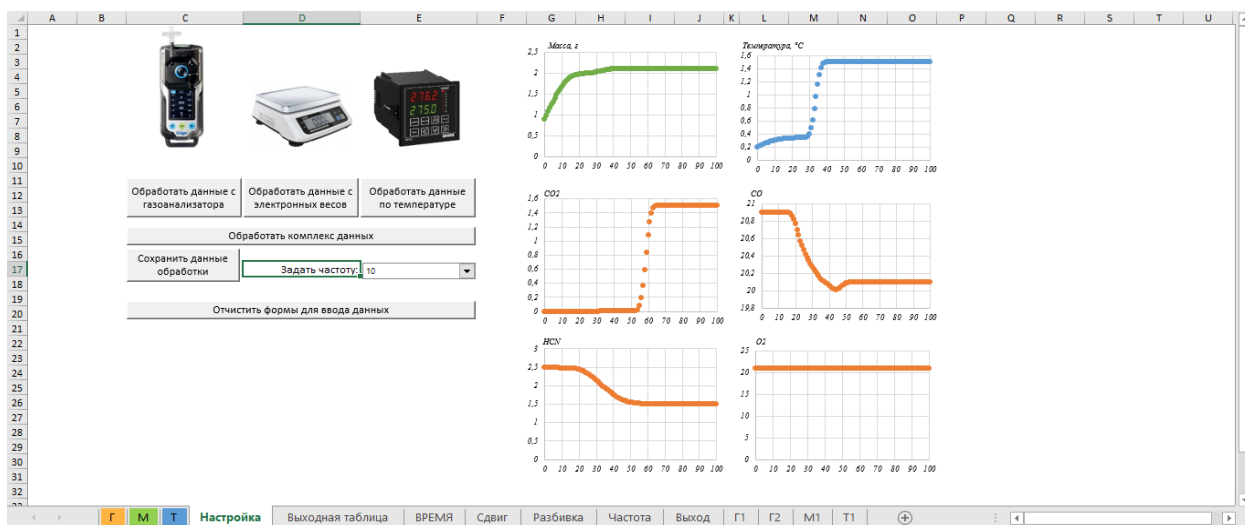


Рисунок 3.6 - Лист управления обработкой и отчистки введенных значений

Помимо этого, разработанный программный код позволял учитывать сдвиг массивов данных, полученных в ходе обработки с обособленных приборов относительно друг друга опираясь на астрономическое время.

Далее путем автоматического расчета по заранее прописанным арифметическим зависимостям между ячейками, реализуя решение формул 3.1-3.3 были получены значения искомым экспериментальных параметров.

На основании всех полученных значений, реализованных в табличной форме, была сформирована база искомым экспериментальных параметров для исследуемого материала. Характерное заполнение базы экспериментальных параметров для одного материала представлено на рисунке 3.7.

время, мин	м, г	ψ, F/c	V _{гид} , г/м ³ ·с	ψ _{гид} , кг/м ³ ·с	Δm, г	I, mA	μ _{ад} , Нп/м	D _{гид} , Нп м ³ /кг	T, °C	T, K	ΔT	K	μ _{ад} , Нп/м	CO ₂ , CO, HCN, O ₂	кг/м ³	кг/м ³				
0	0.893999	-0.00916	-91.5637	-0.09156	0	0	#ДЕЛ/0!	0	20.1111	273.2011	0	0	0	0	20.9	2.5	20	0	0.298328	
0.0001	0.166667	0.885563	-0.00877	-87.7344	-0.08773	-0.09156	0	#ДЕЛ/0!	0	21.4009	273.214	0.012888	99.33903	0.000839	0	20.9	2.49236	20.42772	0	0.297777
0.333333	1.073297	-0.00845	-84.548	-0.08455	-0.1793	0	#ДЕЛ/0!	0	0.226595	273.2266	0.025484	77.72431	0.001657	0	20.9	2.488611	20.99625	0	0.297101	
0.5	1.157845	-0.00818	-81.7736	-0.08177	-0.26385	0	#ДЕЛ/0!	0	0.238856	273.2389	0.037745	115.1157	0.002454	0	20.9	2.485571	21.63004	0	0.296352	
0.666667	1.239619	-0.00794	-79.3569	-0.07936	-0.34562	0	#ДЕЛ/0!	0	0.250712	273.2507	0.049601	151.2677	0.003225	0	20.9	2.483121	22.27531	0	0.295594	
0.833333	1.318976	-0.0077	-76.9622	-0.07696	-0.42498	0	#ДЕЛ/0!	0	0.262069	273.2621	0.060958	185.8966	0.003964	0	20.9	2.481399	22.91235	0	0.294849	
1	1.395938	-0.00744	-74.3638	-0.07436	-0.50194	0	#ДЕЛ/0!	0	0.272827	273.2728	0.071716	218.6958	0.004663	0	20.9	2.48015	23.57629	0	0.294078	
1.166667	1.470301	-0.00714	-71.4341	-0.07143	-0.57673	0	#ДЕЛ/0!	0	0.282834	273.2828	0.081723	249.2001	0.005313	0	20.9	2.479345	24.23294	0	0.293319	
1.333333	1.541736	-0.00678	-67.7749	-0.06777	-0.64774	0	#ДЕЛ/0!	0	0.291818	273.2919	0.090807	276.8939	0.005904	0	20.9	2.478553	24.85762	0	0.292601	
1.5	1.609511	-0.00634	-63.3617	-0.06336	-0.71551	0	#ДЕЛ/0!	0	0.29997	273.3	0.098859	301.4569	0.006427	0	20.9	2.478259	25.46783	0	0.291904	
1.666667	1.672872	-0.00584	-58.4161	-0.05842	-0.77887	0	#ДЕЛ/0!	0	0.306942	273.3069	0.105831	322.6854	0.006888	0	20.9	2.478392	26.05822	0	0.291233	
1.833333	1.731288	-0.00525	-52.5331	-0.05253	-0.83729	0	#ДЕЛ/0!	0	0.312831	273.3128	0.11172	340.6341	0.007263	0	20.9	2.478462	26.6119	0	0.290608	
2	1.783821	-0.00455	-45.5419	-0.04554	-0.89882	0	#ДЕЛ/0!	0	0.317722	273.3177	0.116611	355.541	0.007881	0	20.9	2.478555	27.11776	0	0.290309	
2.166667	1.829363	-0.00383	-38.2606	-0.03826	-0.95366	0	#ДЕЛ/0!	0	0.321774	273.3218	0.120663	367.8894	0.008444	0	20.9	2.478406	27.61132	0	0.289847	
2.333333	1.867624	-0.00312	-31.2033	-0.0312	-0.97362	0	#ДЕЛ/0!	0	0.32516	273.3252	0.124049	378.209	0.008664	0	20.9	2.477729	28.08284	0	0.28963	
2.5	1.898827	-0.00243	-24.2819	-0.02428	-1.00483	0	#ДЕЛ/0!	0	0.328034	273.328	0.126923	386.9676	0.008251	0	20.89963	2.476234	28.52261	0	0.288471	
2.666667	1.923109	-0.00181	-18.0955	-0.0181	-1.02911	0	#ДЕЛ/0!	0	0.330533	273.3305	0.129422	394.5841	0.008413	0	20.89551	2.474541	28.92086	0	0.287979	
2.833333	1.941205	-0.00133	-13.2684	-0.01327	-1.04721	0	#ДЕЛ/0!	0	0.332755	273.3328	0.131644	401.3551	0.008558	2.52E-09	20.8826	2.46885	29.28022	5.44E-11	0.287416	
3	1.954473	-0.00098	-9.81831	-0.00982	-1.06047	0	#ДЕЛ/0!	0	0.334761	273.3348	0.13365	407.4682	0.008688	2.43E-06	20.85776	2.462112	29.60831	5.25E-08	0.286734	
3.166667	1.964291	-0.00075	-7.4759	-0.00748	-1.07029	0	#ДЕЛ/0!	0	0.336596	273.3366	0.135485	413.0599	0.008807	2.07E-05	20.81922	2.452961	29.88757	4.48E-07	0.285929	
3.333333	1.971767	-0.00059	-5.94584	-0.00595	-1.07777	0	#ДЕЛ/0!	0	0.338299	273.3383	0.137188	418.2474	0.008918	7.08E-05	20.76596	2.44094	30.12986	1.53E-06	0.284975	
3.5	1.977713	-0.00051	-5.08408	-0.00508	-1.08371	0	#ДЕЛ/0!	0	0.339897	273.3399	0.138786	423.1188	0.009022	0.000158	20.70174	2.425726	30.34911	3.4E-06	0.283906	
3.666667	1.982797	-0.00046	-4.65103	-0.00463	-1.0888	0	#ДЕЛ/0!	0	0.341415	273.3414	0.140302	427.7364	0.00912	0.000282	20.63509	2.407511	30.5616	6.06E-06	0.282815	
3.833333	1.987428	-0.00041	-4.08772	-0.00409	-1.09343	0	#ДЕЛ/0!	0	0.342849	273.3428	0.141738	432.1124	0.009213	0.00044	20.57022	2.384953	30.7426	9.47E-06	0.281808	
4	1.991516	-0.00036	-3.55935	-0.00356	-1.09752	0	#ДЕЛ/0!	0	0.344203	273.3442	0.143092	436.2383	0.009301	0.000612	20.5146	2.358957	30.92012	1.32E-05	0.280881	
4.166667	1.995075	-0.00038	-3.8411	-0.00384	-1.10108	0	#ДЕЛ/0!	0	0.345478	273.3455	0.144367	440.1232	0.009384	0.000777	20.46458	2.329245	31.09769	1.67E-05	0.280054	
4.333333	1.998916	-0.00048	-4.82623	-0.00483	-1.10492	0	#ДЕЛ/0!	0	0.346682	273.3467	0.145571	443.7911	0.009462	0.000936	20.42119	2.296162	31.27515	2.01E-05	0.279329	
4.5	2.003743	-0.0006	-5.96005	-0.00596	-1.10974	0	#ДЕЛ/0!	0	0.347821	273.3478	0.14671	447.2639	0.009537	0.001095	20.3842	2.260273	31.45372	2.35E-05	0.278663	

Рисунок 3.7 - Лист формирования базы экспериментальных параметров для одного материала

Помимо этого, при определении искомым экспериментальных параметров исследуемого материала также применялись алгоритмы обработки результатов многократных измерений [106].

Среднее арифметическое значение (\bar{X}) измеряемой физической величины, являющейся при многократных измерениях действительным значением измеряемой физической величины (X_d), определялось в соответствии с формулой [106]:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \tag{3.4}$$

где X_i – результаты измерений ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$); n – число измерений.

Определение рассеивания экспериментальных и расчетных данных (X_i) по отношению к среднеарифметическому значению (\bar{X}) проводилось при определении среднеквадратичного отклонения (σ_x) в соответствии с формулой:

$$\sigma_{xi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}, \quad (3.5)$$

Доверительный интервал (Δ) для случайной погрешности определялся по формуле:

$$\Delta = t_{ct} \cdot \sigma_{\bar{X}}, \quad (3.6)$$

где t_{ct} – коэффициент Стьюдента, вводящийся в силу ограниченности числа измерений и определяемый по таблице распределения Стьюдента [88].

Действительное значение физической величины X с учётом доверительного интервала определялось по формуле:

$$X = (\bar{X} \pm \Delta), \quad (3.7)$$

Предложенные алгоритмы были реализованы в программе для ЭВМ, которая прошла государственную регистрацию и имеет соответствующее свидетельство [109].

3.3 Результаты экспериментальных исследований по определению удельных коэффициентов образования газов, потребления кислорода и парциальных плотностей газов в маломасштабной установке

Экспериментальное исследование проводилось с использованием характерной кабельной продукции, применяемой на объектах энергетики. В качестве исследуемых материалов были рассмотрены:

- кабель коммуникационный «LOW SMOKE»;
- кабель силовой ВВГнг 13×0,5.



Рисунок 3.8 - Фото исследуемого образца (кабель силовой ВВГнг 13×0,5)

В ходе проведения экспериментов были зафиксированы значения концентрации циановодорода, кислорода, монооксида углерода, температуры в экспозиционной камере, а также изменения массы исследуемого образца.

Зависимость изменения концентрации циановодорода в экспозиционной камере от времени проведения эксперимента представлена на рисунке 3.9 [66].

Полученные значения концентрации циановодорода позволили получить количественные показатели парциальной плотности циановодорода в экспозиционной камере путем решения уравнения (3.3).

Зависимость изменения парциальной плотности циановодорода в экспозиционной камере от времени проведения эксперимента представлена на рисунке 3.10 [13, 49].

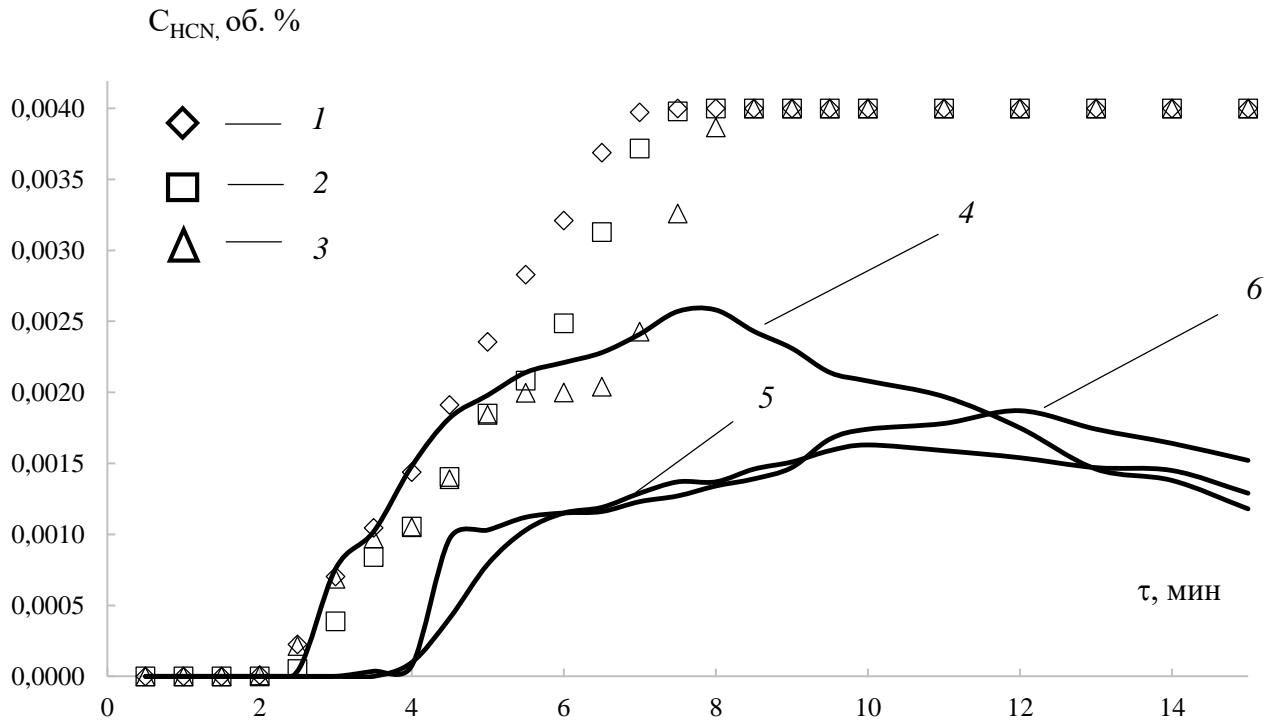


Рисунок 3.9 - Зависимость концентрации циановодорода от времени проведения эксперимента: 1,2,3 – кабель силовой «ВВГнг»; 4,5,6 – кабель коммуникационный «Low smoke»

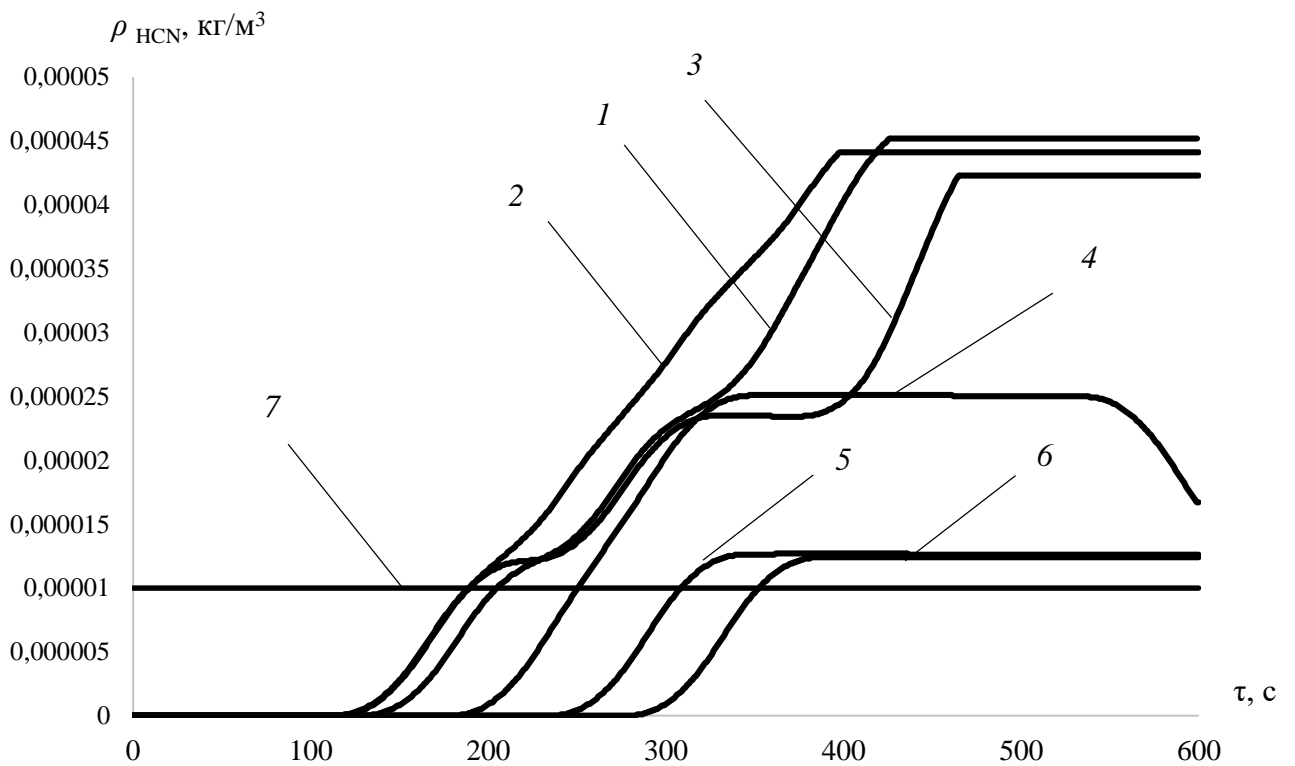


Рисунок 3.10 - Зависимость парциальной плотности циановодорода от времени проведения эксперимента: 1,2,3 – Кабель силовой «ВВГнг»; 4,5,6 - кабель коммуникационный «Low smoke»; 7 – критическая плотность HCN [13, 49]

Из результатов эксперимента видно, что при горении рассматриваемой кабельной продукции образуются значительные концентрации циановодорода. Рисунок 3.10 показывает, что образующиеся при горении исследуемых образцов концентрации циановодорода достигают своих критических значений на ранних стадиях эксперимента. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при пожарах в кабельных сооружениях с участием рассматриваемой кабельной продукции время блокирования путей эвакуации циановодородом может быть минимальным.

Зависимость среднеобъемной парциальной плотности монооксида углерода от времени проведения эксперимента представлена на рисунке 3.11. Количественное значение величин определялось путем численного решения уравнения (3.3) [26].

Изменение среднеобъемной парциальной плотности кислорода в объеме экспозиционной камеры представлено также в виде графической зависимости от времени проведения эксперимента на рисунке 3.12 [88].

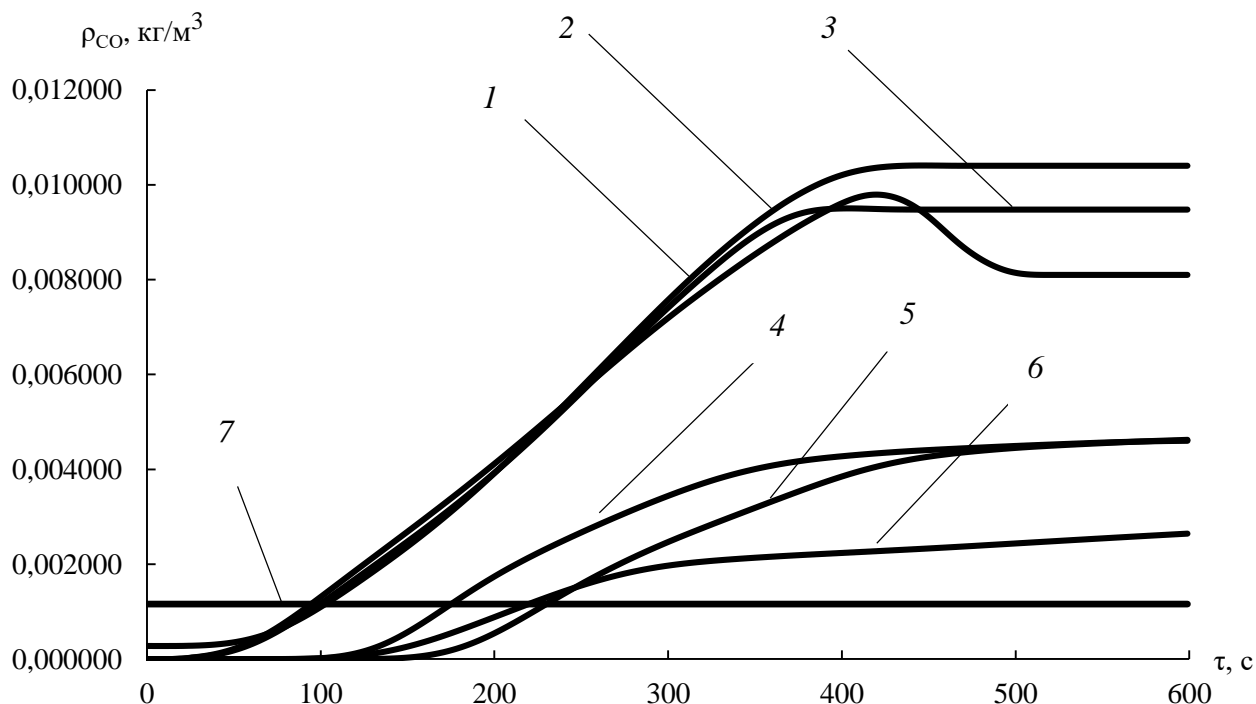


Рисунок 3.11 - Зависимость среднеобъемной парциальной плотности монооксида углерода: 1,2,3 – кабель силовой «ВВГнг»; 4,5,6 – кабель «Low smoke»; 7 – критическая плотность CO [26]

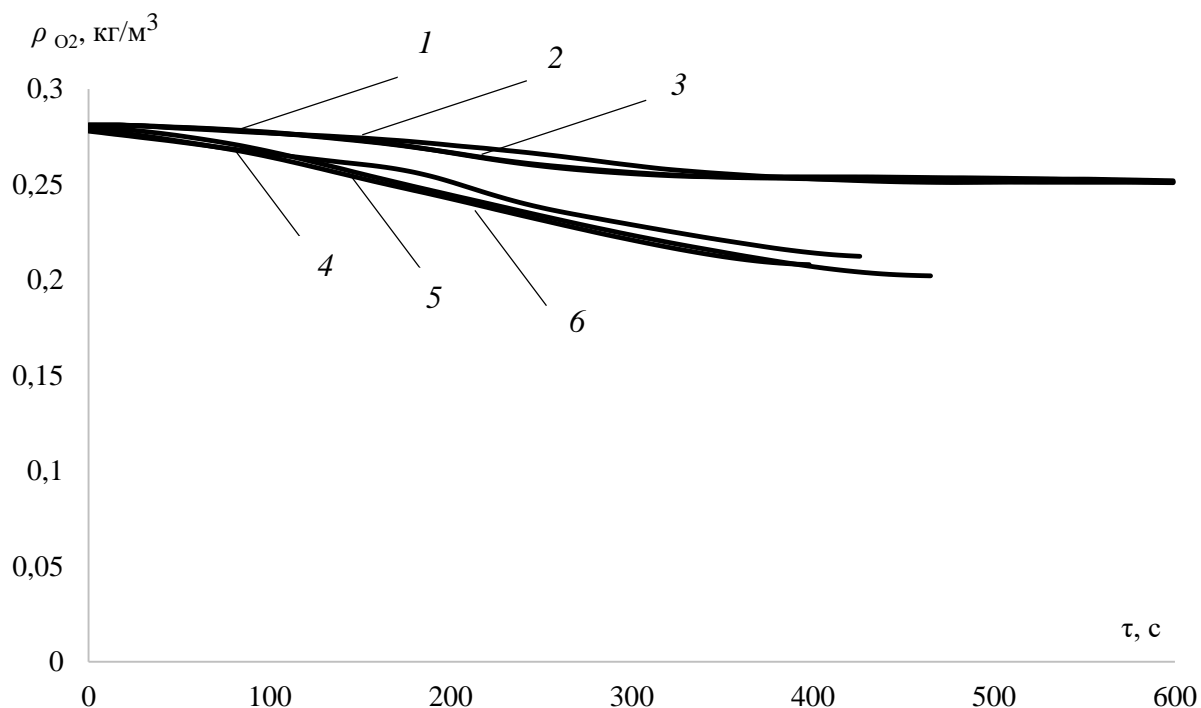


Рисунок 3.12 - Зависимость среднеобъемной плотности кислорода от времени проведения эксперимента: 1,2,3, - кабель силовой «ВВГнг»; 4,5,6 – кабель «Low smoke» [88]

Определение изменений концентрации кислорода было проведено в герметичном объеме экспозиционной камере. Из результатов видно, что при отсутствии газообмена с внешней средой, концентрация кислорода в герметичном объеме падает на 28%.

Массовая скорость выгорания для исследуемых образцов определялась исходя из значений потери массы образца за время проведения эксперимента. Значения массы фиксировались интервалом в 3 секунды, что позволило определить динамику изменения массовой скорости выгорания по времени проведения эксперимента.

Зависимость массовой скорости выгорания от времени проведения эксперимента представлена на рисунке 3.13 [13, 26].

Определение удельных коэффициентов образования циановодорода (L_{HCN}) и монооксида углерода (L_{CO}) было проведено в соответствии с формулой 3.1. Данные о количественном значении парциальной плотности циановодорода, монооксида углерода и массовой скорости выгорания были приняты исходя из представленных экспериментальных зависимостей.

Зависимость величин удельных коэффициентов образования циановодорода

и монооксида углерода от времени проведения эксперимента представлены на рисунке 3.14 и 3.15 [26, 49].

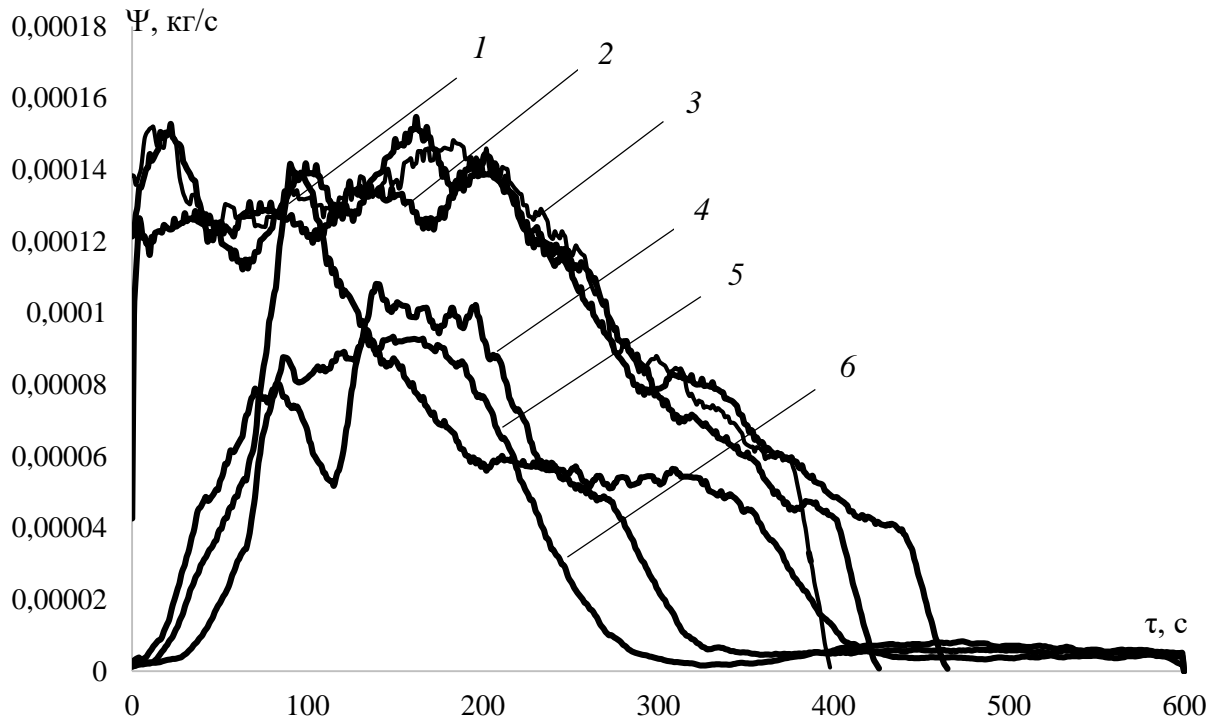


Рисунок 3.13 - Зависимость массовой скорости выгорания от времени проведения экспериментов: 1,2,3 – Кабель силовой «ВВГнг»; 4,5,6 – кабель коммуникационный «Low Smoke» [13,26]

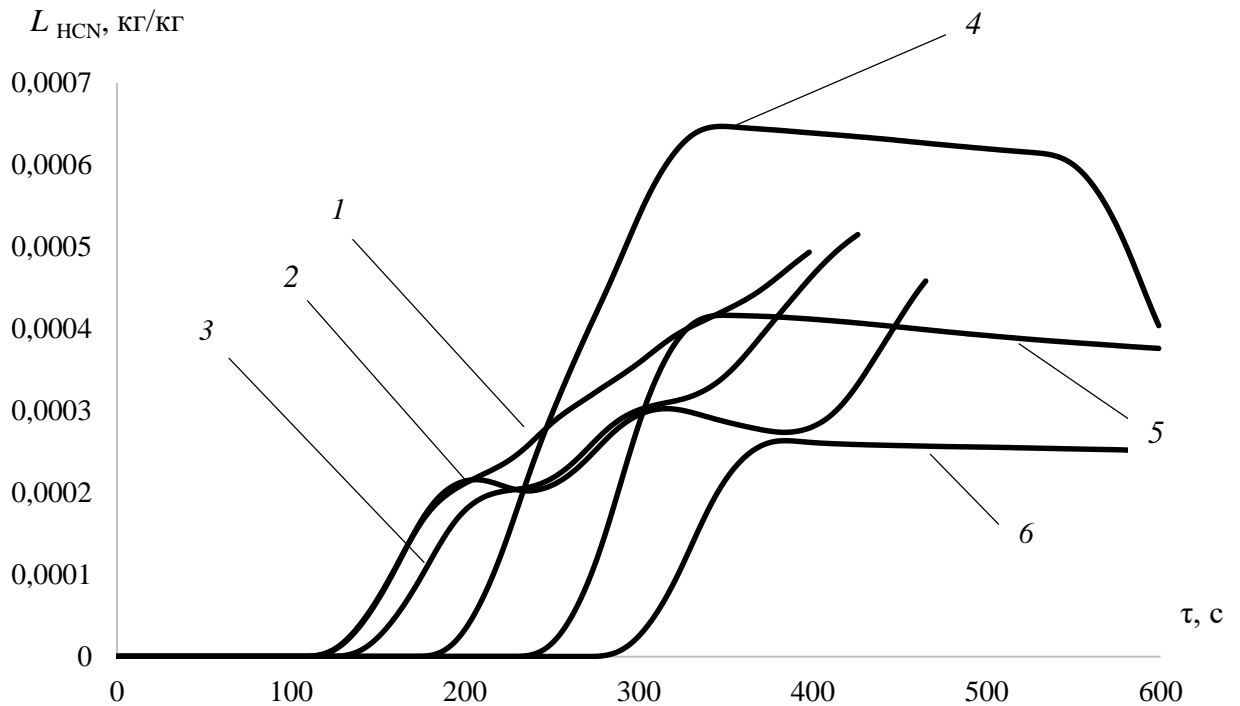


Рисунок 3.14 - Зависимость удельных коэффициентов образования от времени проведения эксперимента: 1,2,3 – кабель силовой «ВВГнг»; 4,5,6 – кабель «Low Smoke» [26, 49]

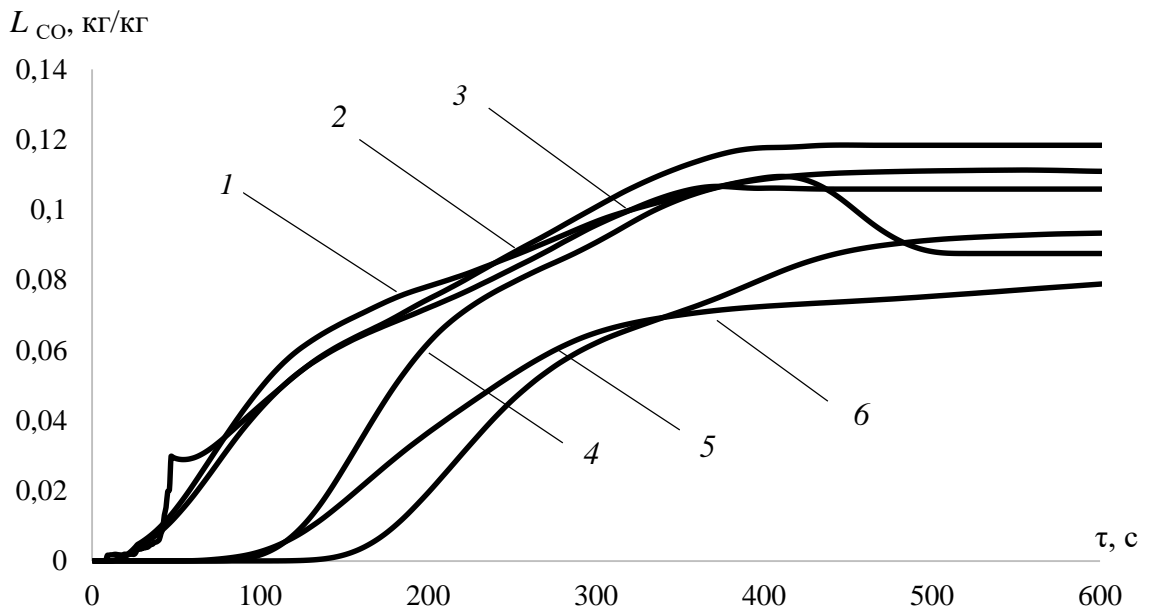


Рисунок 3.15 - Зависимость удельных коэффициентов образования от времени проведения эксперимента: 1,2,3 – кабель силовой «ВВГнг»; 4,5,6 – кабель «Low Smoke» [26]

Полученные экспериментальные данные по удельным коэффициентам образования циановодорода и монооксида углерода указывают на то, что величины удельных коэффициентов непостоянны и изменяется со временем проведения эксперимента.

Количественные значения удельного коэффициента образования циановодорода и монооксида углерода представлены в таблице 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 - Количественные значения удельного коэффициента образования монооксида углерода от времени проведения эксперимента

Время проведения эксперимента, мин	L_{CO} при горении Кабеля силового ВВГнг, кг/кг			L_{CO} при горении Кабеля коммуникационный «Lowsmoke», кг/кг		
	1 экспр.	2 экспр.	3 экспр.	1 экспр.	2 экспр.	3 экспр.
1.	0,02225	0,018967	0,0294	-	-	-
2.	0,05817	0,05288	0,05281	0,00786	0,00786	0,00695
3.	0,07439	0,06830	0,06953	0,01026	0,05035	0,0294
4.	0,08449	0,08100	0,08520	0,04144	0,07694	0,05009
5.	0,09624	0,09585	0,10104	0,06227	0,09093	0,0651
6.	0,10469	0,10604	0,11387	0,07282	0,10481	0,07073
7.	0,10922	0,10605	0,11794	0,08437	0,10971	0,07310
8.	0,09187	0,10591	0,11833	0,09046	0,11088	0,07474
9.	0,08752	0,10591	0,11833	0,09251	0,11124	0,07676
$L_{CO.ср.ед.}$	0,08098	0,08232	0,089606	0,057749	0,08284	0,055859

Таблица 3.2 - Количественные значения удельного коэффициента образования циановодорода от времени проведения эксперимента

Время проведения эксперимента, мин	L_{HCN} при горении Кабеля силового ВВГнг, кг/кг			L_{HCN} при горении Кабеля коммуникационный «Lowsmoke», кг/кг		
	1 экспр.	2 экспр.	3 экспр.	1 экспр.	2 экспр.	3 экспр.
1.	-	-	-	0,00006	0,00007	0,00008
2.	-	-	-	0,000129	0,00022	0,000182
3.	0,00026	0,000245	0,00024	0,000183	0,00037	0,000283
4.	0,00019	0,000254	0,00019	0,000237	0,0005	0,000379
5.	0,00031	0,000308	0,00031	0,000246	0,00059	0,000391
6.	0,00028	0,000393	0,00042	0,000243	0,00061	0,000382
7.	0,00027	-	0,000045	0,000239	0,0006	0,000375
8.	-	-	-	0,000238	0,00059	0,000306
9.	-	-	-	0,000238	0,00059	0,000205
$L_{HCN.сред.}$	0,00026	0,0003	0,00024	0,000201	0,00046	0,000287

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что значения удельных коэффициентов образования циановодорода и монооксида углерода могут изменяться в ходе проведения эксперимента.

Изменения удельных коэффициентов образования циановодорода могут изменяться вследствие изменения концентрации кислорода в экспозиционной камере установки. Так, при термическом разложении кабельной продукции в условиях пониженного содержания кислорода, процесс образования HCN может инициировать быстрее, с образованием большей концентрации HCN .

Определение удельных коэффициентов потребления O_2 было проведено в соответствии с формулой 3.1. Данные о количественном значении парциальной плотности кислорода и удельной массовой скорости выгорания были приняты исходя из представленных экспериментальных зависимостей.

Зависимость величин удельных коэффициентов потребления кислорода от времени проведения эксперимента представлены на рисунке 3.16 [90, 91].

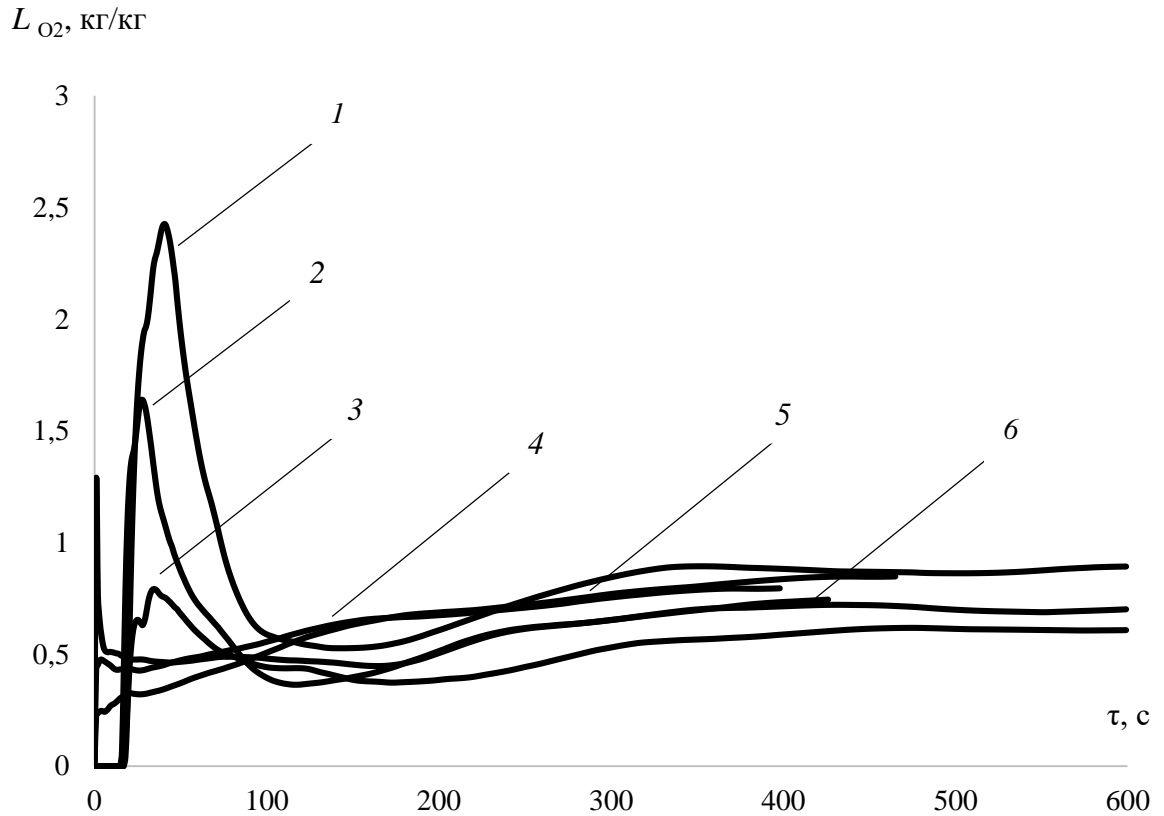


Рисунок 3.16 - Зависимость коэффициентов удельного потребления O_2 от времени проведения эксперимента: 1,2,3 – кабель силовой «ВВГнг»; 4,5,6 – кабель коммуникационный «Low Smoke» [90, 91]

Количественные значения удельного коэффициента потребления кислорода представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Количественные значения удельного коэффициента потребления кислорода от времени проведения эксперимента

Время проведения эксперимента, мин	L_{O_2} при горении Кабеля силового ВВГнг, кг/кг			L_{O_2} при горении Кабеля коммуникационный «LowSmoke», кг/кг		
	1 экспр.	2 экспр.	3 экспр.	1 экспр.	2 экспр.	3 экспр.
1.	0,5	0,4	0,71	0,26	0,36	0,41
2.	0,64	0,67	0,71	0,54	0,51	0,68
3.	0,65	0,68	0,81	0,71	0,54	0,74
4.	0,67	0,68	0,82	0,74	0,61	0,75
5.	0,68	0,71	0,87	0,76	0,64	0,74
6.	0,67	0,72	0,85	0,71	0,67	0,71
7.	0,65	0,73	0,86	0,73	0,67	0,71
8.	0,64	0,74	0,91	-	-	-
9.	0,64	0,71	0,94	-	-	-
$L_{O_2.ср.д.}$	0,67	0,69	0,86	0,63	0,58	0,62

В результате проведенных экспериментальных исследований, впервые были получены коэффициенты, характеризующие процесс образования циановодорода при сгорании определенной массы горючего вещества – удельные коэффициенты образования HCN .

Представленные результаты экспериментальных исследований позволяют:

1. решить предложенное аналитическое решение интегральной модели пожара (2.26);
2. рассчитать показатель токсичности при совместном воздействии монооксида углерода и циановодорода (2.29);
3. решить физико-математической модели отравления циановодородом в условиях пожара (2.31-2.33);
4. определить время блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики.

3.4 Выводы по третьей главе

1. Выполнена модификация экспериментальной установки, позволяющая экспериментальным путем определять концентрации и величины удельных коэффициентов образования циановодорода в экспозиционной камере установки при горении кабельной продукции, характерной для объектов энергетики;

2. Проведена серия экспериментов по определению основных характеристик образования и распространения циановодорода при горении кабельной продукции, характерной для производственных зданий объектов энергетики;

3. Экспериментальным путем получены величины удельных коэффициентов образования и парциальной плотности циановодорода, монооксида углерода, коэффициент удельного потребления кислорода, а также зависимость ($\rho_{HCN} = f(\rho_{O_2})$) по случаю горения кабельной продукции, характерной для объектов энергетики. Выявлено, что величины удельных коэффициентов образования циановодорода и потребления кислорода значительно изменяются в ходе проведения эксперимента и во многом зависят от времени осреднения;

4. Результаты экспериментальных исследований позволяют провести численные эксперименты по решению аналитического соотношения интегральной модели пожара, математической модели отравления HCN , подхода к определению показателя токсичности при совместном воздействии HCN и CO , которые необходимы для реализации методики расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ЦИАНОВОДОРОДОМ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

4.1 Численное решение модели расчета парциальной плотности циановодорода и показателя токсичности при совместном воздействии HCN и CO

Численное решение модели расчета парциальной плотности циановодорода проводилось с использованием аналитического решения (2.26) и параметров горючих материалов, полученных экспериментальным путем.

Для сравнительного анализа, помимо теоретических данных, также представлены результаты экспериментальных исследований.

В качестве исходных данных для численного эксперимента были приняты следующие параметры:

- плотность кислорода в атмосферном воздухе $\rho_{O_2,a} = 1,42987$ кг/м³;
- плотность кислорода в ходе проведения эксперимента ρ_{O_2} (принимались исходя из экспериментальных значений (рисунок 3.12) для каждого момента времени);
- удельные коэффициенты образования циановодорода L_{HCN} (принимались исходя из экспериментальных значений (рисунок 3.14) для каждого момента времени);
- удельные коэффициенты потребления кислорода L_{O_2} (принимались исходя из экспериментальных значений (рисунок 3.16) для каждого момента времени);
- горючая нагрузка (кабель силовой ВВГнг, кабель коммуникационный Low smoke).

Результаты расчета с применением аналитического решения (2.26) интегральной модели пожара представлены в виде графических зависимостей на рисунке 4.1 и 4.2 [13, 50, 88]

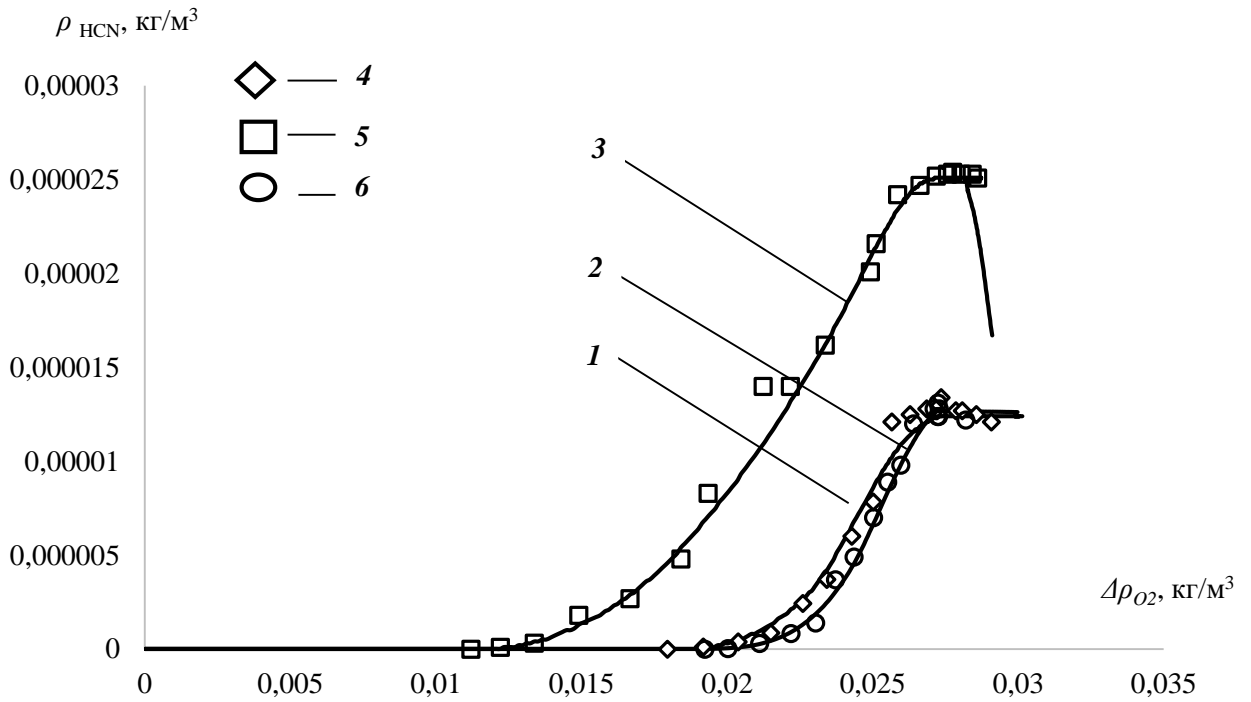


Рисунок 4.1 - Зависимости среднеобъемной плотности циановодорода от изменения среднеобъемной плотности кислорода при горении изоляции кабеля «Low smoke»: 1, 2, 3 – экспериментальные значения; 4, 5, 6 – расчет по формуле (2.26) [13, 50, 88]

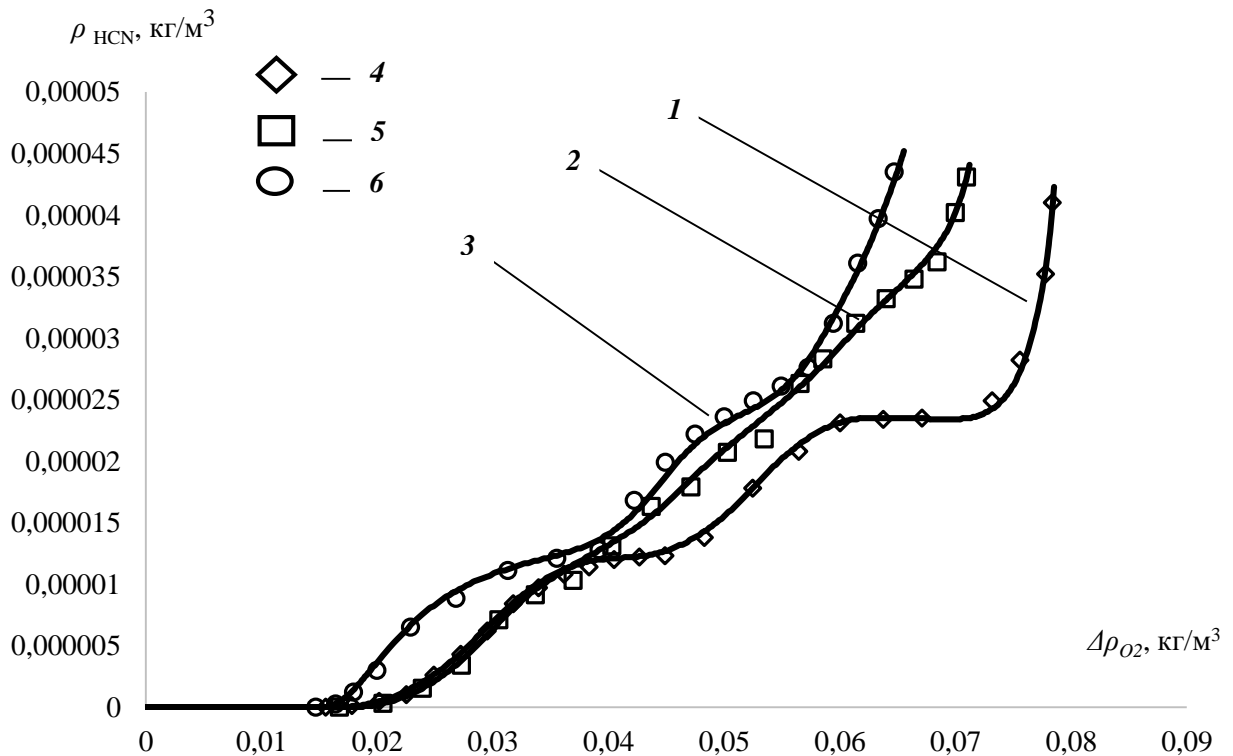


Рисунок 4.2 - Зависимость среднеобъемной плотности циановодорода от изменения среднеобъемной плотности кислорода при горении изоляции кабеля ВВГнг: 1, 2, 3 – экспериментальные значения; 4, 5, 6 – расчет по формуле (2.26) [13, 50, 88]

Результаты численного эксперимента по определению плотности циановодорода с использованием аналитического решения (2.26) показали достаточную для инженерных расчетов сходимость с экспериментальными данными.

Достаточная сходимость экспериментальных и теоретических значений обеспечивается за счёт использования большого количество значений L_{HCN} и L_{O_2} , которые характеризуют процесс образования токсичного газа. При использовании данного аналитического решения и большого количества экспериментальных данных по L_{HCN} и L_{O_2} , возможно определять парциальную плотность циановодорода с большей точностью.

Критические величины парциальной плотности циановодорода достигается уже при небольших изменениях плотности кислорода, что говорит о возможности образования HCN уже на ранних стадиях пожара.

Численное решение аналитического решения (2.26) интегральной модели пожара с использованием экспериментальных значений удельных коэффициентов образования HCN и потребления кислорода, с погрешностью не более 5% совпадает с экспериментальными значениями парциальной плотности циановодорода для всех рассматриваемых материалов (рисунки 4.1 и 4.2) [13, 88].

Таким образом, представленное выражение (2.26) позволяет определить изменение по времени среднеобъемной плотности циановодорода при пожаре в полномасштабном помещении без решения дифференциального уравнения закона сохранения массы циановодорода только с учётом экспериментальных значений L_{HCN} и L_{O_2} , полученных в маломасштабной экспериментальной установке, и изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода. При этом, зависимость парциальной плотности кислорода определяется из решения дифференциального уравнения для полномасштабного помещения [13].

Как отмечалось ранее, токсикологический эффект циановодорода и монооксида углерода имеет аддитивный характер. Исследования совместного воздействия токсичных газов при различных условиях проводилось на модельных смесях, на которых изучается механизм действия газов на организм человека.

Определение показателя токсичности при совместном воздействии HCN и CO было проведено как экспериментальным путем, так и расчетным с использованием аналитического решения (2.26) и формулы (2.29) [90, 91]

Сопоставление результатов численных и экспериментальных исследований при горении кабеля коммуникационного «Low smoke» представлено на рисунке 4.3.

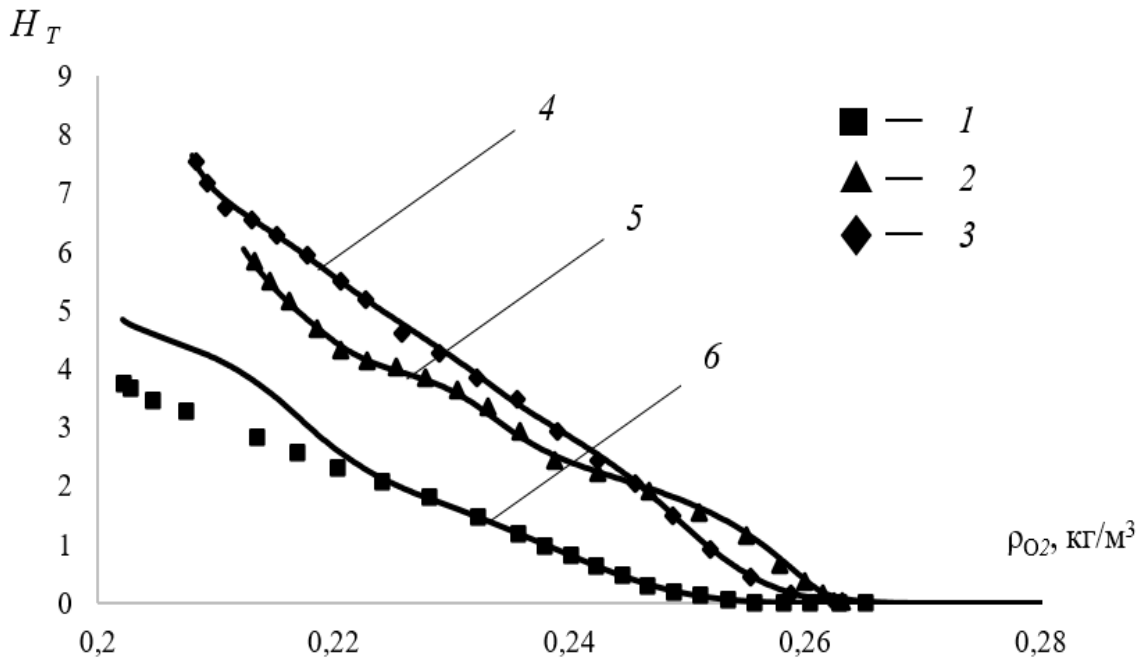


Рисунок 4.3 - Зависимости показателя токсичности от среднеобъемной парциальной плотности кислорода при горении изоляции кабеля Low smoke: 1-3 – эксперимент (формула (2.28)); 4-6 – расчет (формула (2.29))

Из рисунка 4.3 видно, результаты численных экспериментов имеют достаточную для инженерных расчетов сходимость с экспериментальными величинами.

Результаты численных экспериментов по случаю горения кабеля силового ВВГнг и их сопоставление с экспериментальными величинами представлены также в виде графических зависимостей на рисунке 4.4.

Из результатов численных и теоретических экспериментов видно, что расчетные величины показателя токсичности, полученное с использованием формулы (2.29) и экспериментальных значений удельных коэффициентов (L_{HCN} ,

L_{CO} и L_{O_2}), совпадает с экспериментальными величинами (формула (2.28)) с погрешностью, не превышающей 20% [90, 91].

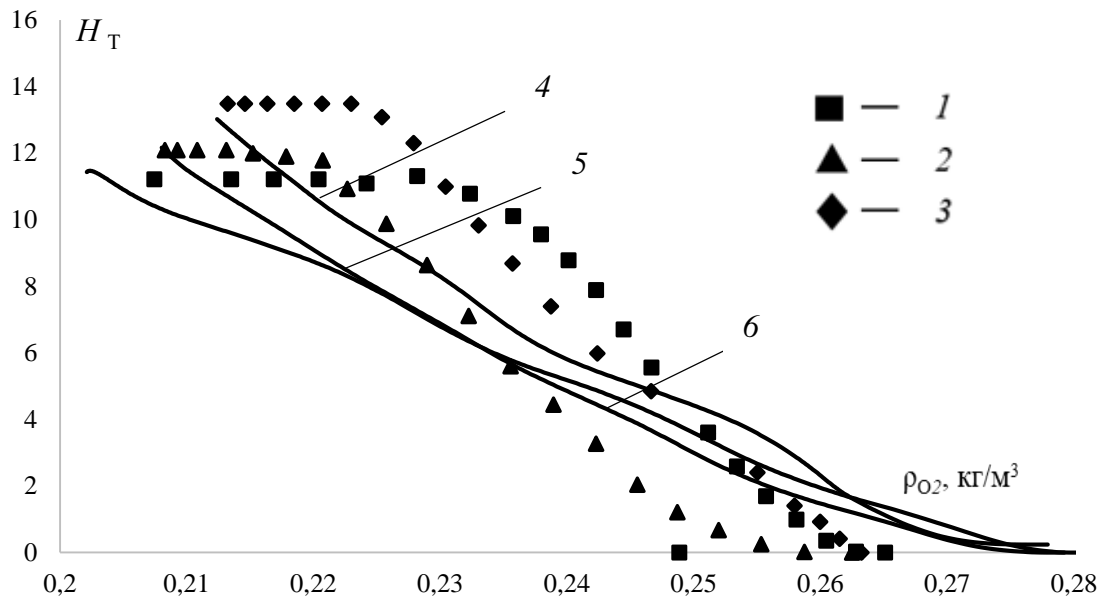


Рисунок 4.4 - Зависимости показателя токсичности от среднеобъемной парциальной плотности кислорода при горении изоляции кабеля силового ВВГнг: 1-3 – эксперимент (формула (2.28)); 4-6 – расчет (формула (2.29))

Исходя из этого, предложенный экспериментально-теоретический подход с достаточной для практических целей точностью позволяет определить показатель токсичности продуктов горения при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода с использованием аналитического решения (2.26), которое справедливо как для маломасштабной установки, так и для полномасштабного помещения.

Таким образом, предложенный экспериментально-теоретический подход позволяет обосновать определение показателя токсичности в полномасштабном условно герметичном помещении при совместном воздействии монооксида углерода и циановодорода двумя способами, основанными на экспериментальном исследовании горения веществ и материалов в маломасштабной опытной установке:

- экспериментальное измерение зависимостей среднеобъемных парциальных плотностей HCN и CO (формула (2.28));

- экспериментальное определение удельных коэффициентов образования HCN и CO , удельного коэффициента потребления O_2 , а также парциальной плотности O_2 (формула (2.29)).

Поэтому при расчете среднеобъемных парциальных плотностей HCN и CO в полномасштабном условно герметичном помещении можно не решать дифференциальные уравнения законов сохранения массы вышеуказанных токсичных газов. При этом, для реализации предложенных подходов необходимо решить дифференциальное уравнение закона сохранения массы кислорода, по результатам которого определяется показатель токсичности продуктов горения по выражениям (2.28) или (2.29) с использованием экспериментальных данных, полученных в маломасштабной опытной установке.

4.2 Численное решение физико-математической модели отравления циановодородом

4.2.1 Исходные данные для численных экспериментов

Для определения скорости легочной вентиляции в условиях отсутствия раздражающих факторов, необходимо подробно рассмотреть физиологические особенности дыхания среднестатистического человека. В соответствии с исследованиями [107], для среднестатистического человека принимаются следующие параметры дыхания: объем дыхания $V_D = 0,18$ литров; объем мертвой зоны $V_M = 0,45$ литров, частота дыхания $f = 17,3$ 1/мин. Частоты дыхания была принята из результатов исследования [98] и является максимальной для возрастной группы 20-60 лет.

Таким образом, в соответствии с литературными источниками объемная скорость вентиляции легких среднестатистического человека, с учётом пониженного содержания кислорода, составляет $W = 25$ л/минуту. Данная скорость легочной вентиляции была принята как максимальная для условий спокойного дыхания эвакуирующихся, так как необходимо также учитывать негативное влияние образующихся токсичных продуктов горения.

Исходя из условия, что объем крови человека может изменяться от 4,5 до 6 литров в зависимости от внешних факторов [74], принимаем для численного эксперимента средние значения объема крови $V_k = 5,25$ литров.

Для проведения расчета примем несколько модельных помещений в виде параллелепипеда с следующими геометрическими размерами: $4 \times 6 \times 2$, $13 \times 8 \times 4$. (длина \times ширина \times высота).

Помимо этого, необходимо определить критические времена воздействия циановодорода в зависимости от массового содержания HCN в крови человека.

В качестве горючих материалов были приняты рассмотренные ранее кабельные изделия: кабель силовой ВВГнг, кабель коммуникационный «Low smoke».

- кабель силовой ВВГнг (оболочка ПВХ): низшая рабочая теплота сгорания $Q_n^p = 25$ МДж/кг, $\Psi_{yo} = 0,00013$ кг/(м²·с), $w=0,0585$ м/с;
- кабель коммуникационный «Low smoke» - $Q_n^p = 25$ МДж/кг, $\Psi_{yo} = 0,00011$ кг/(м²·с), $w=0,0585$ м/с.

Удельную изохорную теплоемкость для газовой смеси и воздуха принимаем в соответствии с работой [20]: $c_p=1000$ Дж/(кг·К).

Атмосферное давление равно $p_0=1,013 \cdot 10^5$ Па, температуру воздуха принимаем $T_0=20$ °С.

4.2.2 Принятые критические времена воздействия *HCN* на организм человека в условиях пожара

Критическое время воздействия циановодорода $\tau_{кр.1}$ – время от начала пожара до момента, при котором еще возможна безопасная эвакуация. Данное критическое время будет соответствовать легкой степени отравления при массовом содержании циановодорода ($\bar{M}_{HCN} = 0,5$ мг/л).

Критическое время воздействия циановодорода $\tau_{кр.2}$ – время от начала пожара до момента, при котором эвакуирующиеся неспособны самостоятельно покинуть помещение. Данное критическое время будет соответствовать средней степени отравления при массовом содержании циановодорода ($\bar{M}_{HCN} = 1$ мг/л).

Помимо критических времен воздействия *HCN* в зависимости от его массового содержания в крови, также рассмотрим критическое время воздействия $\tau_{кр.3}$ в зависимости от величин плотности *HCN* на уровне рабочей зоны помещения.

Критическое время воздействия циановодорода $\tau_{кр.3}$ – время от начала пожара до момента достижения критических величин плотности *HCN* на уровне рабочей зоны помещения [92].

В качестве критической концентрации в данном расчёте была принята концентрация $\rho_{HCN.крит} = 1,11 \cdot 10^{-5}$ кг/м³, при которой наблюдаются симптомы, затрудняющие процесс эвакуации.

4.2.3 Численное решение физико-математической модели отравления циановодородом при постоянной во времени концентрации *HCN*

Решение физико-математической модели отравления циановодородом сводится к определению расчетным способом содержания *HCN* в крови эвакуирующихся в соотношении мг/л крови.

Массовое содержание циановодорода в крови было проведено в соответствии с формулой (2.31). Определение массового содержания циановодорода в крови, в данном случае, было проведено при постоянной во времени концентрации $\rho_{HCN.крит} = 1,11 \cdot 10^{-5}$ кг/м³, при которой наблюдается раздражение слизистой оболочки глаз, головокружение, тошнота, возможная потеря сознания.

Объемная скорость вентиляции легких была принята максимальной для средне спокойного дыхания человека - $W = 25$ литров/мин. При проведении данного расчета влияние повышенной скорости вентиляции легких не учитывалось.

Расчетные зависимости массового содержания циановодорода в крови человека от времени экспозиции при принятой постоянной концентрации *HCN* представлены на рисунке 4.5 [93].

Из результатов расчета видно, что при постоянной концентрации циановодорода и спокойном дыхании, массовое содержание *HCN* в крови достигает значений, при котором наблюдается легкое отравление, на 9 минуте эксперимента.

Количественные значения массового содержания циановодорода в крови при постоянной концентрации $\rho_{HCN} = 1 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ представлены в таблице 4.1.

Помимо этого, наблюдается достижение значения массового содержания

HCN в крови, при которой наблюдается средняя степень отравления, на 20 минуте. Однако, при определении времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения, целесообразно рассматривать начальные стадии развития пожара при которых, как правило, происходит процесс эвакуации.

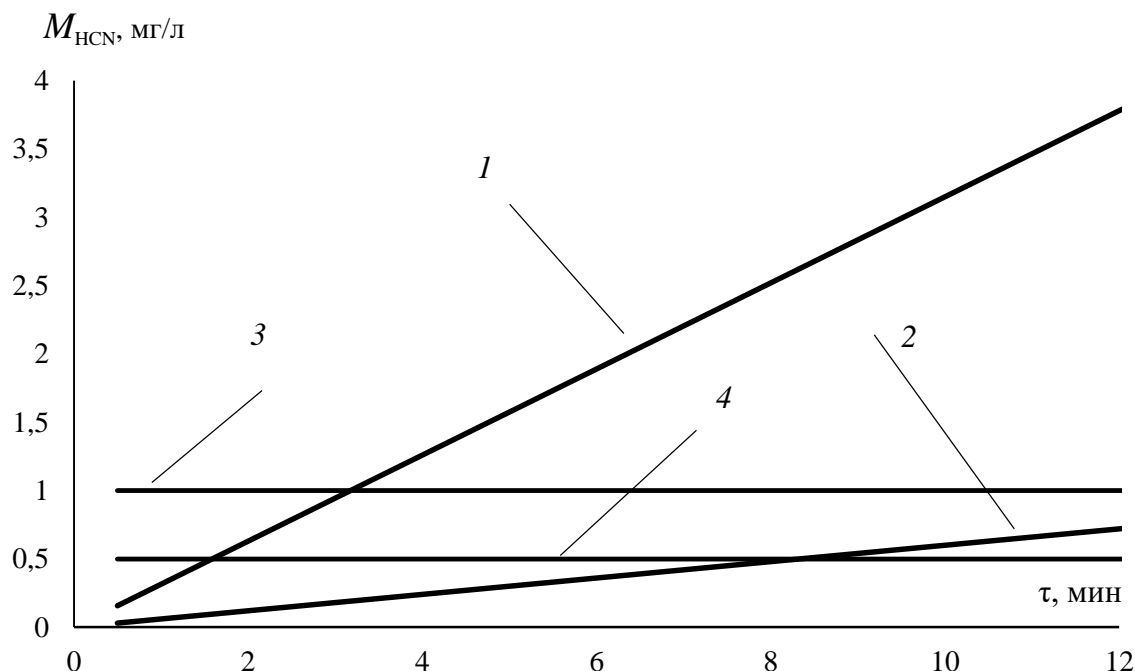


Рисунок 4.5 - Зависимость массового содержания циановодорода в крови человека при спокойном дыхании и постоянной концентрации HCN в воздухе: 1 – расчет формула (2.31)

$\rho_{HCN} = 2 \cdot 10^{-4}$; 2 – расчет формула (2.31) $\rho_{HCN} = 1 \cdot 10^{-5}$; 3,4 – критические значения [93]

Таблица 4.1 - Массовое содержание циановодорода в крови человека при постоянной концентрации $\rho_{HCN} = 1 \cdot 10^{-5}$ и спокойном дыхании

Концентрация циановодорода, $кг/м^3$	Скорость легочной вентиляции легких, л/мин	Время экспозиции, мин	Массовое содержание HCN в крови, мг/литр
0,00001	25	0	0
0,00001	25	2	0,105
0,00001	25	4	0,21
0,00001	25	6	0,315
0,00001	25	8	0,42
0,00001	25	10	0,525
0,00001	25	12	0,63
0,00001	25	14	0,735
0,00001	25	16	0,84
0,00001	25	18	0,945
0,00001	25	20	1,05

При рассматриваемой постоянной концентрации $\rho_{\text{HCN}}=1 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ видно, что критические времена воздействия циановодорода достигаются при:

- $\tau_{\text{кр.1}}$ – легкая степень отравления наступает на 9,7 минуте экспозиции;
- $\tau_{\text{кр.2}}$ – средняя степень отравления наступает на 19,9 минуте экспозиции.

Количественные значения массового содержания циановодорода в крови при постоянной концентрации $\rho_{\text{HCN}}=2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³ представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Массовое содержание циановодорода в крови человека при постоянной концентрации $\rho_{\text{HCN}}=2 \cdot 10^{-4}$ и спокойном дыхании

Концентрация циановодорода, кг/м ³	Скорость легочной вентиляции легких, л/мин	Время экспозиции, мин	Массовое содержание HCN в крови, мг/литр
0,0002	25	0	0
0,0002	25	2	0,59
0,0002	25	4	1,28
0,0002	25	6	1,87
0,0002	25	8	2,48
0,0002	25	10	3,06
0,0002	25	12	3,71
0,0002	25	14	4,57
0,0002	25	16	4,93
0,0002	25	18	5,42
0,0002	25	20	5,89

При постоянной концентрации $\rho_{\text{HCN}}=2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³ видно, что критические времена воздействия циановодорода достигаются при:

- $\tau_{\text{кр.1}}$ – легкая степень отравления наступает на 1,85 минуте экспозиции;
- $\tau_{\text{кр.2}}$ – средняя степень отравления наступает на 3,25 минуте экспозиции.

Из представленных результатов численных экспериментов видно, что при различных постоянных концентрациях циановодорода $\rho_{\text{HCN}}=2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³ и $\rho_{\text{HCN}}=1 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ критические времена воздействия HCN существенно отличаются. Так, критическое время воздействия HCN при $\rho_{\text{HCN}}=2 \cdot 10^{-4}$ наступает в 5 раз быстрее, чем при постоянной концентрации $\rho_{\text{HCN}}=1 \cdot 10^{-5}$.

Как уже отмечалось ранее, концентрация $\rho_{\text{HCN}}=2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³ принята критической в нормативно-правовой документации. Рассмотрение данной

концентрации в качестве критической приводит к необоснованному завышению времени наступления критических концентраций.

Таким образом, необходимо более обосновано принимать критические времена воздействия циановодородом при решении задач пожарной безопасности.

4.2.4 Влияние повышенной скорости легочной вентиляции на степень отравления человека циановодородом

Как отмечалось ранее, степень интоксикации человека токсичными продуктами горения ингаляционным способом во многом зависит от концентрации токсикантов и скорости легочной вентиляции.

При оценке степени отравления газообразным циановодородом в условиях пожара необходимо также рассматривать влияние повышенной скорости вентиляции легких на степень отравления человека [93].

Помимо этого, изменения скорости легочной вентиляции у эвакуирующихся могут происходить не только вследствие физических нагрузок, но и вследствие негативного воздействия продуктов горения и дымовой зоны, заключающееся в учащении дыхания.

Определение изменений скорости легочной вентиляции вследствие воздействия продуктов горения необходимо подтверждать экспериментальным путём. Так, скорость легочной вентиляции при отравлении CO может изменяться до 70 литров/минуту, что подтверждено экспериментальным путем. Однако, экспериментальные исследования, связанные с изменениями скорости легочной вентиляции при отравлении HCN , отсутствуют. Таким образом, при расчете было принято во внимание только изменение скорости легочной вентиляции вследствие физических нагрузок и пониженного содержания кислорода.

Определение массового содержания циановодорода в крови было проведено при двух постоянных концентрациях:

- $\rho_{HCN.1} = 1,11 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ – концентрация, при которой наблюдается раздражение слизистых оболочек, головокружение, тошнота;
- $\rho_{HCN.2} = 2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³ – летальная концентрация при 5 минутной экспозиции.

При проведении численных экспериментов рассматривалась максимальная скорость легочной вентиляции при повышенной скорости дыхания: $W_{max} = 70$ литров/минуту.

Расчетные зависимости массового содержания циановодорода в крови человека от времени экспозиции при принятых постоянных концентрациях циановодорода были определены в соответствии с формулой (2.32) представлены на рисунке 4.6 [93].

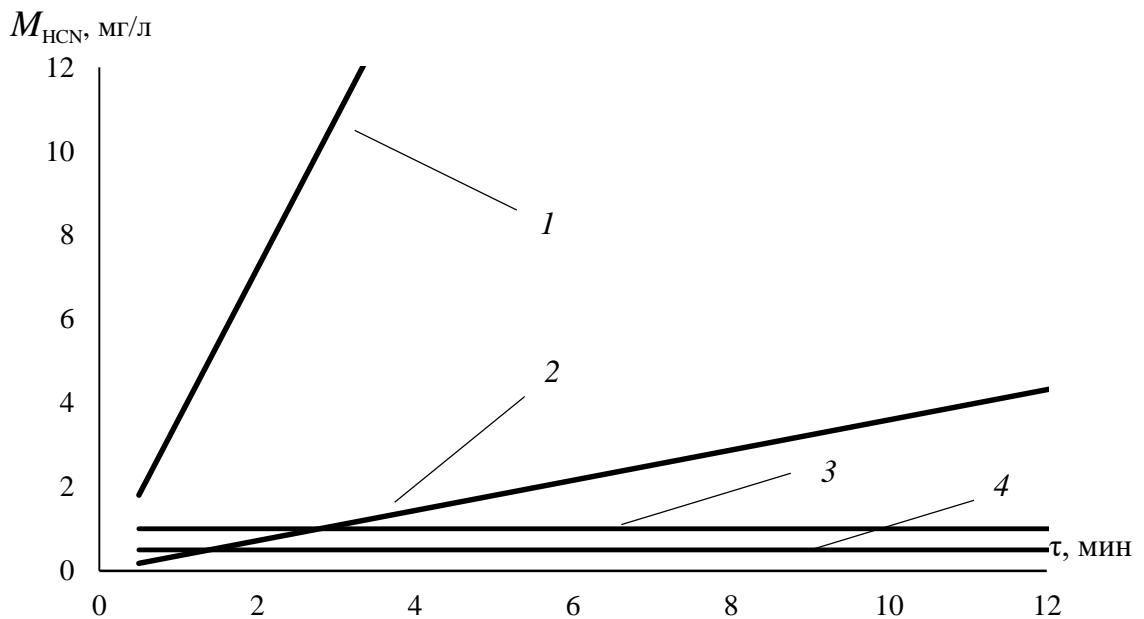


Рисунок 4.6 - Зависимость массового содержания циановодорода в крови человека при учащенном дыхании и постоянной концентрации HCN в воздухе: 1 – расчет формула (2.32); $\rho_{HCN} = 2 \cdot 10^{-4}$; 2 – расчет формула (2.32); $\rho_{HCN} = 1 \cdot 10^{-5}$; 3, 4 – критические значения [93]

Из рисунка 4.6 видно, что при различных постоянных концентрациях, объемная скорость легочной вентиляции оказывает достаточно сильное влияние на массовое содержание циановодорода в крови. Так, при постоянной концентрации $\rho_{HCN.1} = 1,11 \cdot 10^{-5}$ кг/м³, при $W_{max} = 25$ л/мин легкая степень

отравления наступает на 9-й минуте эксперимента, а при $W_{max}=70$ л/мин уже на 3-й минуте.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что плотность циановодорода, представленная в нормативно-правовом документе в значительной степени завышает критическое время воздействия и ее применение недостаточно объективно при решении задач по определению времени блокирования путей эвакуации циановодородом.

Количественные значения массового содержания циановодорода в крови при постоянных концентрациях $\rho_{HCN}=2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³ и $\rho_{HCN}=1 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ и учащенном дыхании представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Массовое содержание циановодорода в крови человека при постоянной концентрации $\rho_{HCN}=2 \cdot 10^{-4}$ и учащенном дыхании

Концентрация циановодорода, кг/м ³	Скорость легочной вентиляции легких, л/мин	Время экспозиции, мин	Массовое содержание HCN в крови, мг/литр
0,0002/0,00001	70	0	0/0
0,0002/0,00001	70	2	6,14/0,83
0,0002/0,00001	70	4	13,21/1,77
0,0002/0,00001	70	6	19,83/2,14
0,0002/0,00001	70	8	23,41/2,89
0,0002/0,00001	70	10	26,12/3,6

Исходя из полученных результатов численных экспериментов, определим критические времена воздействия при постоянных во времени концентрации циановодорода и повышенной скорости легочной вентиляции:

- при постоянной концентрации $\rho_{HCN}=2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³;
 - $\tau_{кр.1}$ – легкая степень отравления наступает на 0,18 минуте экспозиции;
 - $\tau_{кр.2}$ – средняя степень отравления наступает на 0,26 минуте экспозиции.
- при постоянной концентрации $\rho_{HCN}=1 \cdot 10^{-5}$ кг/м³;
 - $\tau_{кр.1}$ – легкая степень отравления наступает на 0,72 минуте экспозиции;
 - $\tau_{кр.2}$ – средняя степень отравления наступает на 1,26 минуте экспозиции.

Результаты численных экспериментов по оценке влияния скорости легочной вентиляции легких на степень отравления циановодородом говорят о

необходимости учета данного фактора при определении времени блокирования путей эвакуации циановодородом.

Помимо этого, полученные данные указывают на необходимость более обосновано принимать величины критической плотности циановодорода, вследствие большого разрыва во временных пределах достижения легкой и среднетяжелой степени поражения организма при различной скорости легочной вентиляции.

4.2.5 Численное решение физико-математической модели отравления циановодородом при изменяемой по времени концентрации циановодорода

Определим критические времена воздействия циановодорода с учетом изменений по времени плотности HCN . В рамках данного расчета рассмотрим скорости легочной вентиляции как при спокойном дыхании, так и при учащенном.

Измеряемая по времени концентрация при сгорании исследуемых материалов определялась с использованием формулы (2.33). В качестве исследуемых помещений были рассмотрены характерные производственные помещения объектов энергетики со следующими геометрическими параметрами:

- помещение №1 с размерами (4×6×2 м);
- помещение №2 с размерами (13×8×4 м).

Расчетные значения плотности циановодорода при горении исследуемой пожарной нагрузки (кабель силовой ВВГнг и кабель коммуникационный «Low Smoke») в рассматриваемых помещениях представлены в виде графических зависимостей от времени пожара на рисунке 4.7 и 4.8.

Исходя из представленных расчетных значений парциальной плотности циановодорода в рассматриваемых помещениях (помещения № 1 и 2) определим массовые содержания циановодорода в крови эвакуирующихся при различных скоростях легочной вентиляции. Расчет проводился с использованием формулы (2.33).

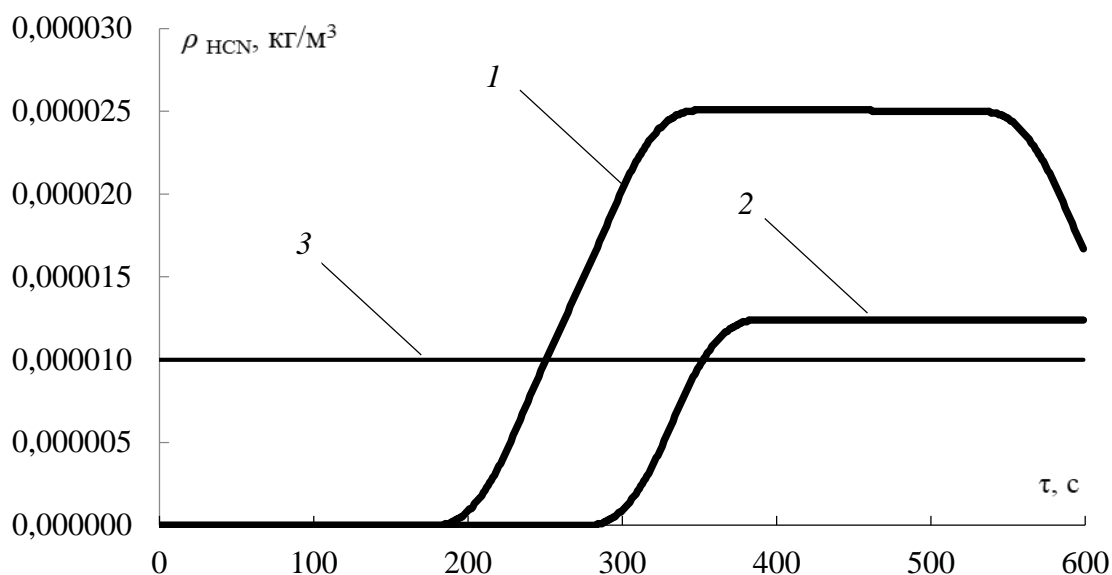


Рисунок 4.7 - Зависимость плотности HCN от времени пожара при горении кабеля «Low Smoke»: 1 – помещение 1 (4×6×2 м), 2 – помещение 2 (13×8×4 м), 3 – критическая ρ_{HCN}

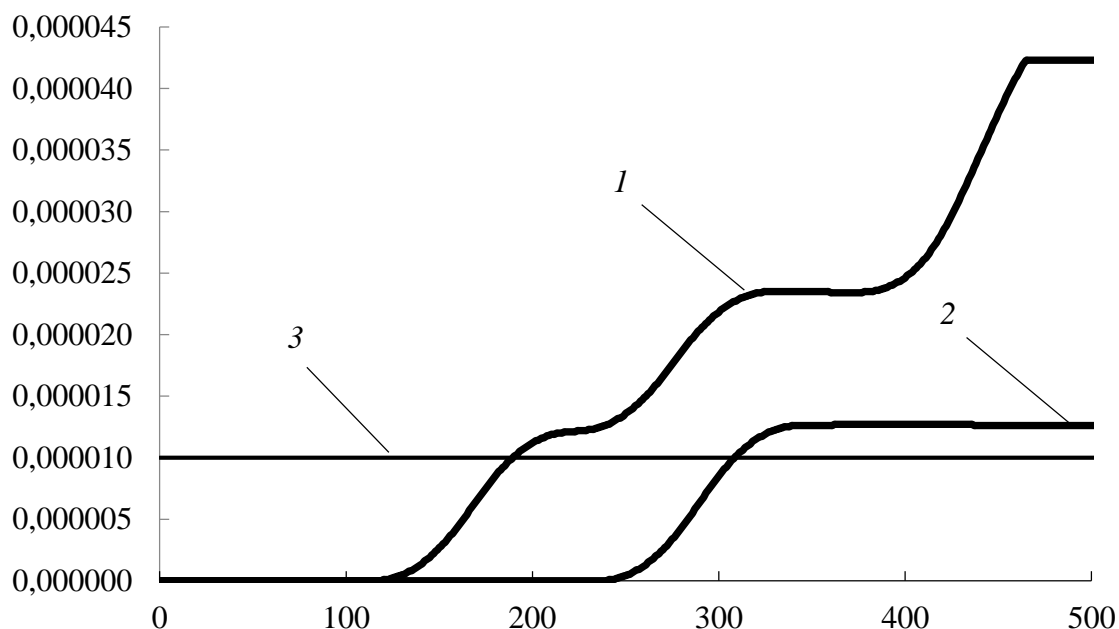


Рисунок 4.8 - Зависимость плотности HCN от времени пожара при горении кабеля силового ВВГнг: 1 – помещение 1 (4×6×2 м), 2 – помещение 2 (13×8×4 м), 3 – критическая ρ_{HCN}

Зависимость массового содержания HCN от времени пожара в помещениях № 1 и 2 при спокойном дыхании представлена на рисунке 4.9.

Зависимость массового содержания HCN от времени пожара в помещениях № 1 и 2 при учащенном дыхании представлена на рисунке 4.10.

Из представленных результатов численного эксперимента видно, что при пожарах в помещениях № 1,2 при горении кабеля силового ВВГнг и кабеля коммуникационного «Low Smoke» и спокойном дыхании эвакуирующихся

критические времена воздействия циановодородом наступают при начальных стадиях пожара.

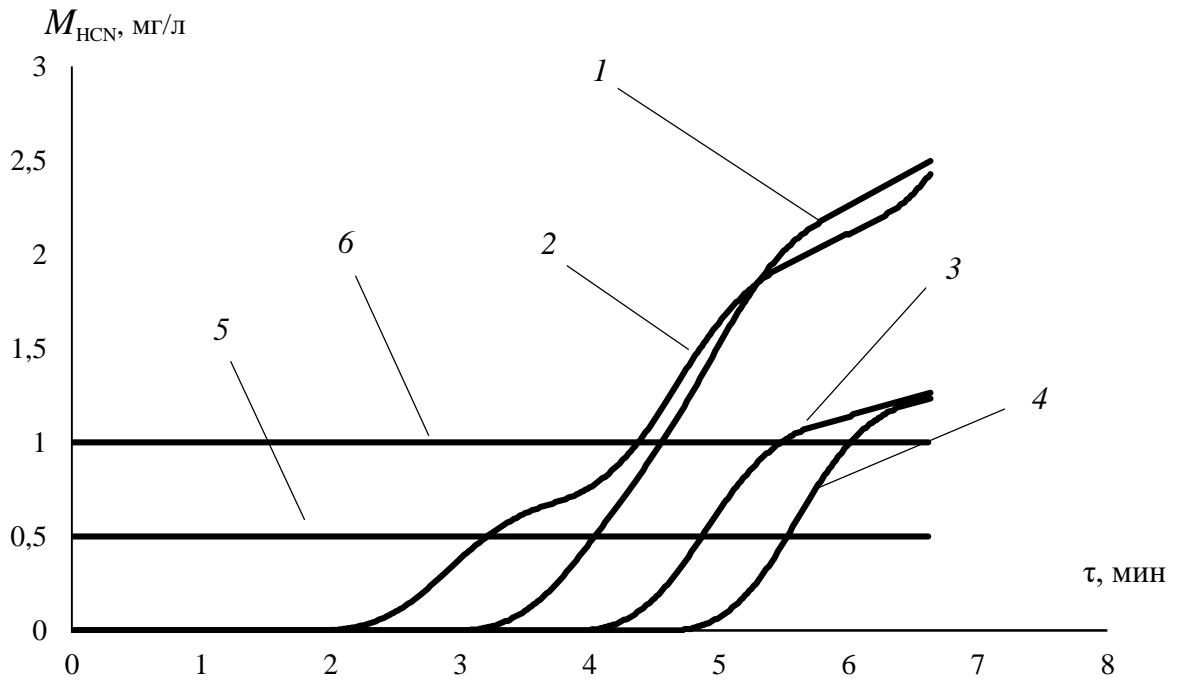


Рисунок 4.9 - Зависимость массового содержания циановодорода в крови эвакуирующихся от времени пожара при спокойном дыхании: 1 – помещение 1 (4×6×2 м) при горении кабеля ВВГнг; 2 - помещение 1 (4×6×2 м) при горении кабеля Low Smoke; 3 - помещение 2 (13×8×4 м) при горении кабеля ВВГнг; 4 - помещение 2 (13×8×4 м) при горении кабеля Low Smoke; 5,6 – критические значения M_{HCN}

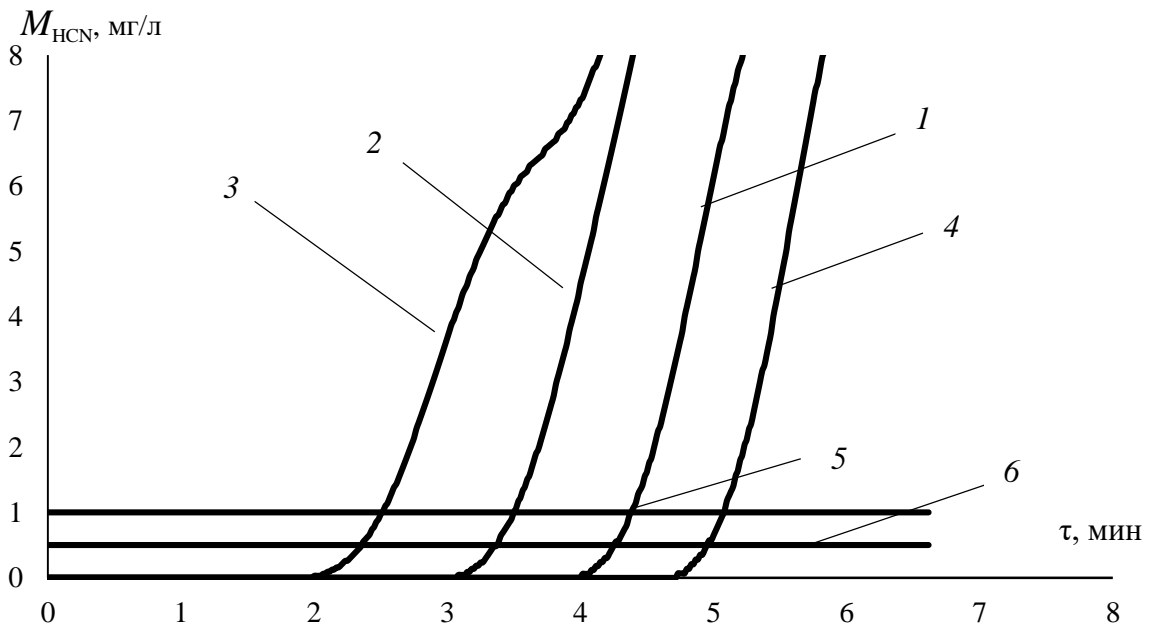


Рисунок 4.10 - Зависимость массового содержания циановодорода в крови эвакуирующихся от времени пожара при учащенном дыхании: 1 – помещение 1 (4×6×2 м) при горении кабеля ВВГнг; 2 - помещение 1 (4×6×2 м) при горении кабеля Low Smoke; 3 - помещение 2 (13×8×4 м) при горении кабеля ВВГнг; 4 - помещение 2 (13×8×4 м) при горении кабеля Low Smoke; 5,6 – критические значения M_{HCN}

Из рисунка 4.10 видно, что скорость легочной вентиляции оказывает значительное влияние на скорость интоксикации организма циановодородом. Легкая степень отравления, при всех рассматриваемых условиях, наступает буквально через несколько секунд после начала процесса образования HCN .

На основании полученных экспериментальных данных определим критические времена воздействия циановодорода в рассматриваемом помещении при горении кабельной продукции и различных скоростях легочной вентиляции. Критические времена воздействия циановодорода для различных условий представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Критические времена воздействия циановодорода на эвакуирующихся с учётом различных скоростей легочной вентиляции

Геометрические параметры помещения, м	Горючая нагрузка	Скорость легочной вентиляции, л/мин	Степень отравления	Критические времена воздействия HCN , мин	
				$\tau_{кр.1}$	$\tau_{кр.2}$
4×6×2	Кабель Low Smoke	25	Легкая	$\tau_{кр.1}$	3,21
			Средняя	$\tau_{кр.2}$	4,41
		70	Легкая	$\tau_{кр.1}$	0,79
			Средняя	$\tau_{кр.2}$	1,26
	Кабель ВВГнг	25	Легкая	$\tau_{кр.1}$	3,95
			Средняя	$\tau_{кр.2}$	4,6
		70	Легкая	$\tau_{кр.1}$	0,35
			Средняя	$\tau_{кр.2}$	1,16
13×8×4	Кабель Low Smoke	25	Легкая	$\tau_{кр.1}$	4,81
			Средняя	$\tau_{кр.2}$	5,46
		70	Легкая	$\tau_{кр.1}$	0,21
			Средняя	$\tau_{кр.2}$	2,58
	Кабель ВВГнг	25	Легкая	$\tau_{кр.1}$	5,43
			Средняя	$\tau_{кр.2}$	5,98
		70	Легкая	$\tau_{кр.1}$	0,61
			Средняя	$\tau_{кр.2}$	1,03

Из представленных результатов можно сделать следующие выводы:

1. критические времена воздействия циановодородом на организм человека наступают на ранних стадиях пожара, что может привести к гибели эвакуирующихся;
2. представленная физико-математическая модель позволяет определять критические времена воздействия циановодородом с учётом изменяемой скорости легочной вентиляции у эвакуирующихся;
3. необходимо рассматривать данный токсикант при определении времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения, так как его токсикологический эффект проявляется уже на ранних стадиях пожара.

4.3 Численные эксперименты по математическому моделированию пожара в полномасштабном помещении объекта энергетики

При выполнении численных экспериментов динамика роста температуры газовой среды в производственных зданиях объекта рассматривалась до критических для человека значений – 70 °С [14].

Численные исследования реализованы на базе Томской ТЭЦ-3 Томского филиала ОАО «ТГК-11», расположенной в 14 км от центра г. Томска.

Схема производственного здания рассматриваемой ТЭЦ представлена на рисунке 4.11.

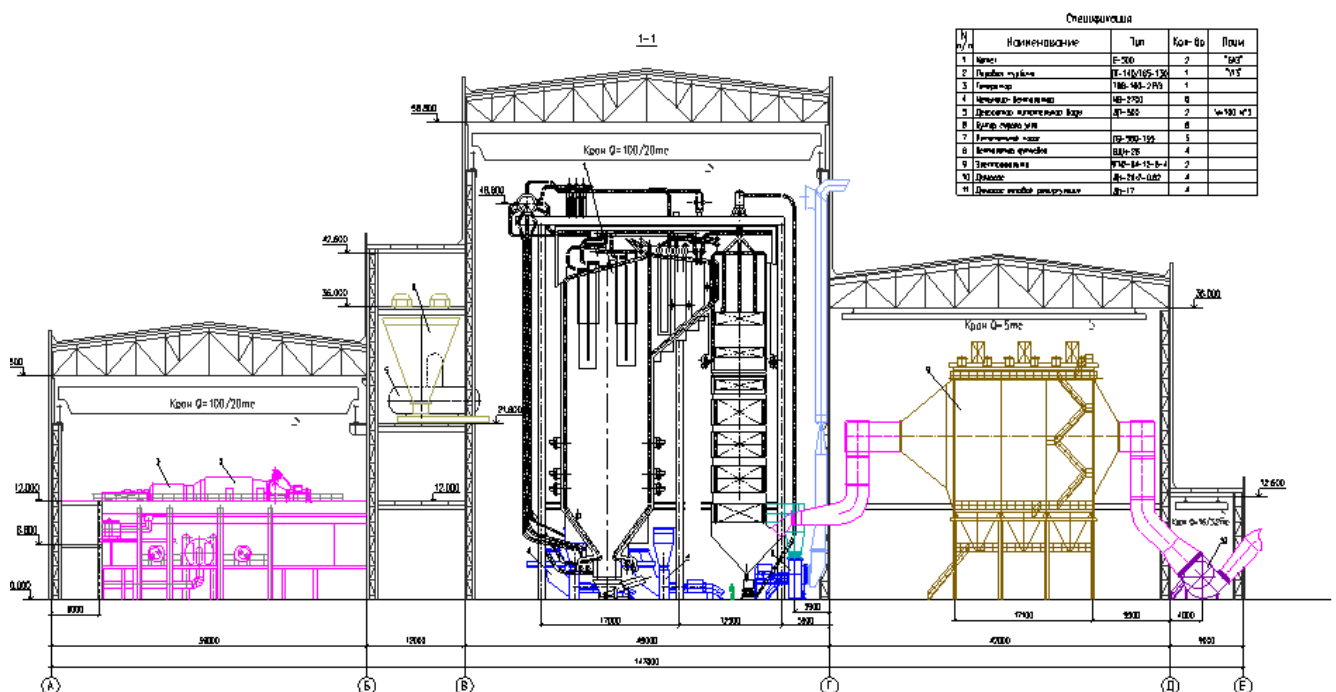


Рисунок 4.11 - Схема производственного здания Томской ТЭЦ-3

Все численные эксперименты на представленном объекте проводились с использованием официальных программ для расчета динамики развития ОФП, зарегистрированных в Федеральном институте промышленной собственности (ФИПС) [108].

Результаты проведенного расчета представлены в виде графических зависимостей. Изменения среднеобъемной температуры в рассматриваемых помещениях от времени эксперимента представлены на рисунке 4.12.

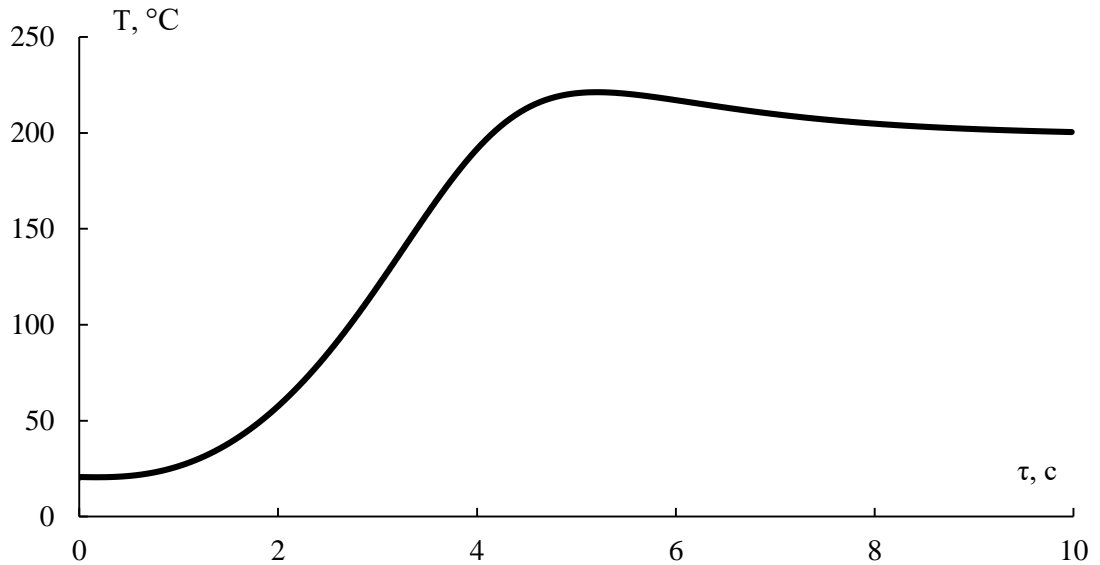


Рисунок 4.12 - Изменения среднеобъемной температуры от времени эксперимента в производственном здании

Из рисунка 4.12 видно, что температура при пожарах в помещениях производственных зданий достигает критических значений ($70\text{ }^\circ\text{C}$) уже на начальных стадиях пожара.

Изменения плотности кислорода в рассматриваемом помещении представлены на рисунке 4.13.

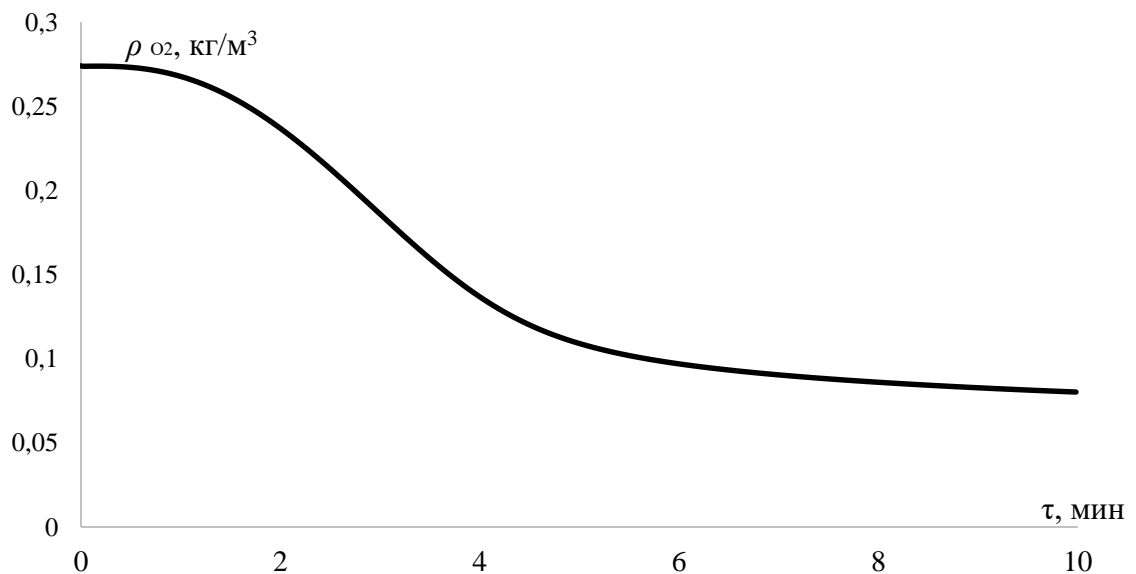


Рисунок 4.13 – Изменения плотности кислорода от времени эксперимента в производственном помещении

Зависимости среднеобъемной плотности циановодорода от изменений среднеобъемной плотности кислорода для герметичного помещения и помещения с проемами представлены на рисунке 4.14 и 4.15.

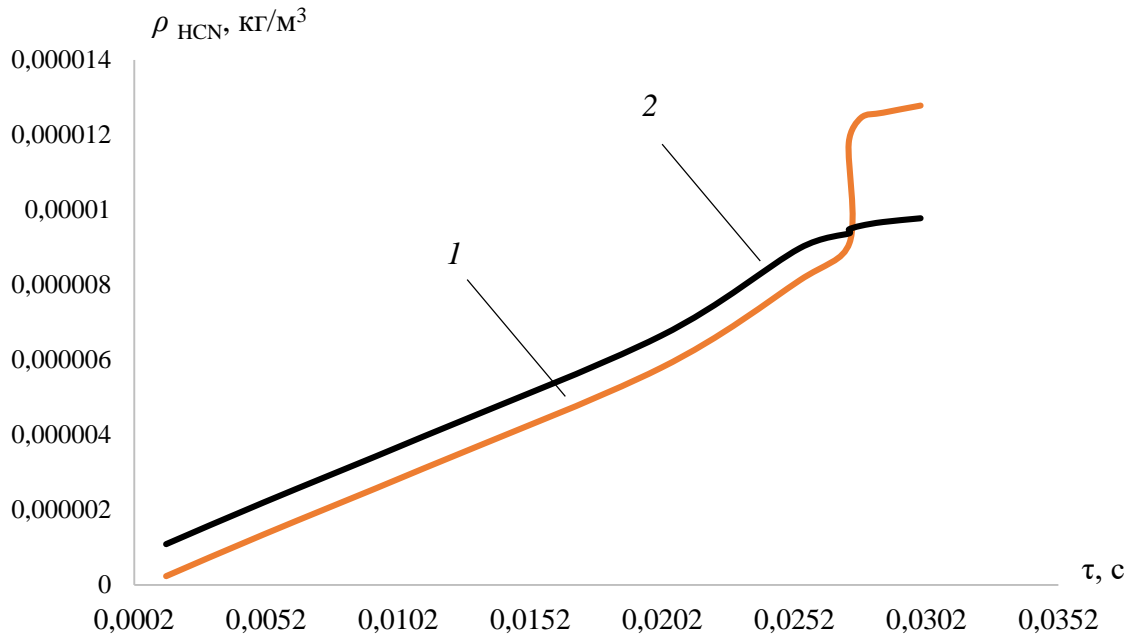


Рисунок 4.14 – Зависимости среднеобъемных плотностей HCN от изменений среднеобъемной плотности O_2 при герметичных условиях: 1 - кабельное сооружение $120 \times 2,4 \times 2,5$ м; 2 – расчет по формуле (2.26)

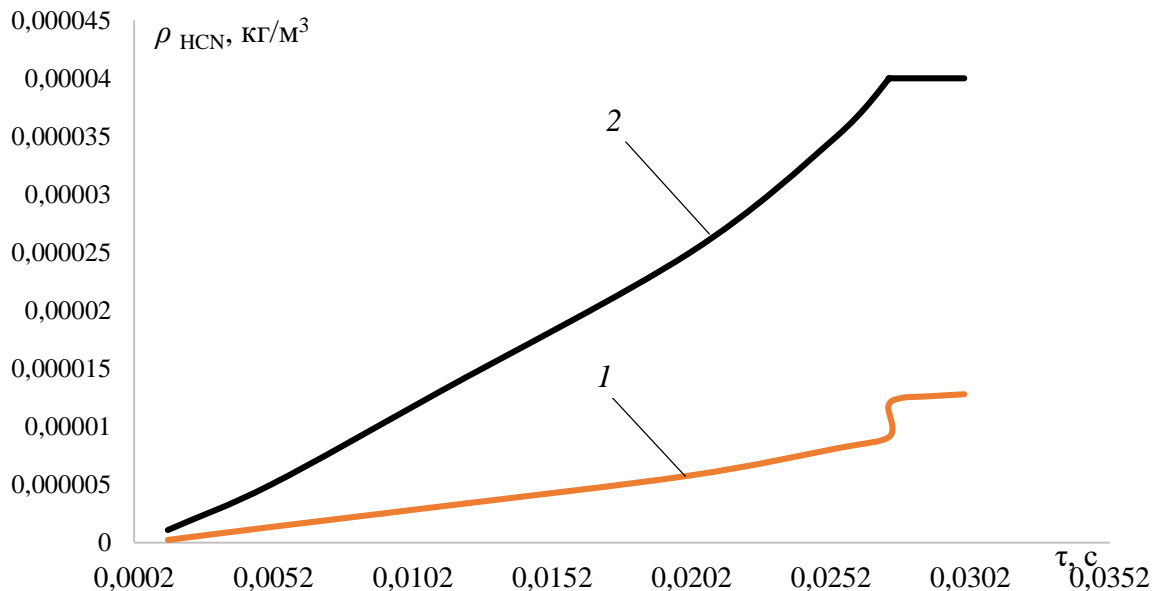


Рисунок 4.15 – Зависимости среднеобъемных плотностей HCN от изменений среднеобъемной плотности O_2 в помещении с проемами: 1 - кабельное сооружение $120 \times 2,4 \times 2,5$ м; 2 – расчет по формуле (2.26)

Из рисунка 4.14 видно, что при расчете в помещении с открытыми проемами (газообмен с внешней средой) наблюдается значительная погрешность в определении парциальной плотности циановодорода при использовании формулы (2.26). Наличие данной погрешности обосновывается невозможностью использования аналитического решения (2.26) при пожарах в помещениях с открытыми проемами, так как при газообмене с внешней средой наблюдаются изменения концентрации O_2 .

Результаты численных экспериментов в помещениях объекта энергетики показали, что на точность определения парциальной плотности циановодорода, с использованием аналитического решения (2.26), геометрические параметры помещения не оказывают значительного влияния. Зависимости плотностей HCN от изменений плотностей O_2 показывают достаточную сходимость с погрешностью не более 20%.

Однако, результаты численных экспериментов показали, что аналитическое решение (2.26) является достаточно справедливым только для герметичного объема.

Таким образом, при решении предложенной методики определения времени блокирования путей эвакуации циановодородом, применение аналитического решения (2.26) позволит определять парциальную плотность циановодорода при пожарах в герметичных помещениях с различной геометрией с учетом свойств горючих материалов.

4.4 Практические рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации циановодородом при пожарах на объектах энергетики

В целях определения времени блокирования путей эвакуации циановодородом при пожарах в производственных зданиях объектов энергетики необходимо использовать разработанную методику, представленную в п. 2.5 данной работы. В рамках данной методики при определении динамики образования и распространения циановодорода предлагается использовать аналитическое решение интегральной модели пожара (2.26) характеризующее экспериментально-теоретическую зависимость плотность HCN от изменений плотности O_2 . Разработанная методика позволяет учитывать реальные свойства горючей нагрузки, применяемой на рассматриваемом объекте.

Таким образом, при использовании предложенной методики необходимо провести анализ пожарной нагрузки, применяемой на исследуемом объекте, с целью отбора основных экспериментальных образцов. Провести серию экспериментальных исследований с целью определения:

- удельных коэффициентов образования HCN и потребления O_2 ;
- парциальной плотности O_2 ;
- экспериментальной зависимости ρ_{HCN} от $\Delta\rho_{O_2}$.

Помимо этого, при реализации физико-математической модели отравления циановодородом необходимо учесть параметры дыхания людей, находящихся на объекте исследования.

После получения необходимых исходных данных (геометрические свойства исследуемого объекта, экспериментальные данные горючей нагрузки и параметры дыхания людей, находящихся на объекте энергетики) в соответствии с пунктом 2.5 данной работы определяется время блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики.

4.7 Выводы по четвертой главе

1. Численное аналитическое решение (2.26) интегральной модели пожара с использованием экспериментальных значений удельных коэффициентов образования H_{CN} и потребления кислорода, с погрешностью не более 5% совпадает с экспериментальными значениями парциальной плотности циановодорода для всех рассматриваемых материалов;

2. Представленное аналитическое решение (2.26) позволяет определить изменение по времени среднеобъемной плотности циановодорода при пожаре в полномасштабном помещении без решения дифференциального уравнения закона сохранения массы циановодорода только с учетом экспериментальных значений $L_{H_{CN}}$ и L_{O_2} , полученных в маломасштабной экспериментальной установке, и изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода;

3. Предложенный экспериментально-теоретический подход с достаточной для практических целей точностью позволяет определить показатель токсичности продуктов горения при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода с использованием аналитического решения (2.26), которое справедливо как для маломасштабной установки, так и для полномасштабного помещения;

4. Результаты численных экспериментов показали, что при различных постоянных концентрациях, объемная скорость легочной вентиляции оказывает достаточно сильное влияние на массовое содержание циановодорода в крови. Так, при постоянной концентрации $\rho_{H_{CN},1} = 1,11 \cdot 10^{-5}$ кг/м³, при $W_{max}=25$ л/мин легкая степень отравления наступает на 9 минуте эксперимента, а при $W_{max}=70$ л/мин уже на 3 минуте;

5. В ходе проведения численных экспериментов было установлено, что критические времена воздействия циановодородом на организм человека наступают на ранних стадиях пожара, что может привести к гибели эвакуирующихся.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современные методики расчета динамики развития опасных факторов пожара не рассматривают процесс образования и распространения циановодорода, образующегося при термическом разложении полимерных материалов. Предложенный подход позволяет рассматривать динамику изменения парциальной плотности циановодорода в полномасштабном помещении с учетом масштабного фактора и характеристик образования циановодорода при горении материалов, характерных для объекта энергетики.

2. Разработана физико-математическая модель отравления циановодородом, которая позволяет учитывать психофизиологические факторы человека, характерные для условий пожара, и рассчитать критические времена воздействия циановодорода в зависимости от массового содержания HCN в крови эвакуирующихся.

3. Предложен экспериментально-теоретический подход к расчету времени блокирования путей эвакуации циановодородом в полномасштабном помещении, позволяющий использовать экспериментальные зависимости среднеобъемной парциальной плотности циановодорода от изменения среднеобъемной парциальной плотности кислорода, полученные в маломасштабной экспериментальной установке. При использовании данного подхода отсутствует необходимость в решении дифференциального уравнения закона сохранения массы циановодорода, в которое входит величина L_{HCN} , существенно зависящая от времени осреднения.

4. Разработана модифицированная экспериментальная установка, на которой получены величины удельных коэффициентов образования и парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода, а также коэффициент удельного потребления кислорода в случае горения современной кабельной продукции, характерной для объектов энергетики. Сопоставление результатов численного и экспериментального исследования показало

достаточную для инженерных расчетов сходимость предложенного метода расчета с погрешностью не более 5%.

5. Результаты численных исследований показали, что критические времена воздействия циановодорода на организм человека наступают на ранних стадиях пожара, а изменяемая по времени концентрация HCN в совокупности с увеличением у эвакуирующихся скорости легочной вентиляции значительно влияют на скорость и степень интоксикации циановодородом.

6. В целях обеспечения свободной и беспрепятственной эвакуации людей из производственных зданий объектов энергетики, а также их персонала, необходимо рассматривать возможность образования и распространения токсикологически значимых концентраций циановодорода с учетом реальных свойств горючей нагрузки и термогазодинамических особенностей распространения HCN .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пузач, С.В. Определение удельного выхода циановодорода входящего в состав продуктов горения для моделирования пожара [Текст] / С.В. Пузач, О.Б. Болдрушкиев, Е.В. Сулейкин // Материалы XII научно - практической конференции «Ройтмановские чтения». – Москва.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2019. – С. 104-107.
2. 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.
3. Anderson, R.A. Fire Deaths in the Glasgow Area: III the Role of Hydrogen Cyanide [Текст] / R.A. Anderson, W.A. Harland // Sage Pub journals. – 1982. – Vol 22, Issue 1. – P. 35-40. DOI: 10.1177 / 002580248202200106.
4. Lisa, M.S. Acute toxicity when concentration varies with time: A case study with carbon monoxide inhalation by rats [Текст] / M.S. Lisa, R.D. Sommerville, M.R. Goodwin, A.J. Stephen, R. Channel // Regulatory Toxicology and Pharmacology – 2016. – Vol. 80. – P. 102-115. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.014.
5. Pauluhn, J. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: Comparison of models to disentangle the concentration × time conundrum of lethality and incapacitation [Текст] / P. Juergen // Regulatory Toxicology and Pharmacology. – 2016. – Vol. 80. – P. 173-182. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.06.017.
6. Белешников, И. Л. Выявление синильной кислоты в тканях трупов людей, погибших в условиях пожара [Текст] / И.Л. Белешников, Р.В. Бабаханян, Л.В. Петров // Идентификация объектов и процессов судебной медицины. – М. 1991. – С. 16-17.
7. Kim, N. K. Study on the risk of particulate materials included in the combustion products of building materials [Текст] / N.K. Kim, N.W. Cho, D.H. Rie // Fire Science and Engineering – 2016. – Vol. 30, Issue 1. – P. 43-48. DOI: 10.7731/KIFSE.2016.30.1.043.

8. Anderson, R.A. Fire Deaths in the Glasgow Area: I. General considerations and pathology [Текст] / R.A. Anderson, W.A. Harland // *Medicine, Science and the Law*. – 1981. – Vol. 21, Issue 3. – P. 83–175. DOI: 10.1177/002580248102100305.

9. Pauluhn, J. Concentration \times Time Analyses of Sensory Irritants Revisited: Weight of Evidence or the Toxic Load Approach. That is the Question [Текст] / J. Pauluhn // *Toxicology Letters*. – 2019. – Vol. 316. – P. 94-108. DOI:10.1016/j.toxlet.2019.09.001.

10. Treitman, R. D. Air contaminants encountered by firefighters [Текст] / R.D. Treitman, W.A. Burgess // *American Industrial Hygiene Association Journal*. – 1980. - Vol. 41, Issue 11. – P. 796-802. DOI: 10.1080/15298668091425662.

11. Orloff, K. G. Hydrogen cyanide in ambient air near a gold heap leach field: Measured vs. modeled concentrations [Текст] / K.G. Orloff, B. Kaplan, P. Kowalski // *Atmospheric Environment*. – 2006. – Vol. 40, Issue 17. – P. 3022-3029. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.09.089.

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

13. Болдрушкиев, О.Б. Определение парциальной плотности циановодорода при пожарах на объектах энергетики [Текст] / О.Б. Болдрушкиев, С.В. Пузач, // *Пожары и ЧС* – 2020. – № 3. – С. 5-10.

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

15. Кошмаров, Ю.А. Теплотехника [Текст] / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академкнига, 2006. – 501 с.

16. Кошмаров, Ю.А. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле [Текст] / Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987. – 440 с.

17. 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.

18. Молчадский, И.С. Пожар в помещении [Текст] / И.С. Молчадский. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2005. – 456 с.
19. Молчадский, И.С. Определение удельной интенсивности тепловыделения при горении веществ и материалов в условиях пожара [Текст] / И.С. Молчадский. – М.: ВНИИПО, 1989. – 25 с.
20. Пузач, С.В. Расчет коэффициента теплопотерь при определении критической продолжительности пожара [Текст] / С.В. Пузач, М.Н. Горячева, В.В. Андреев // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16. – № 6. – С. 21–24.
21. Пузач, С.В. Некоторые закономерности радиационного теплообмена при пожаре на объектах энергетики [Текст] / С.В. Пузач // Известия РАН. Энергетика. – 2003. – № 6. – С. 145–152.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Болдрушкиев, О.Б. Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении [Текст] / О.Б. Болдрушкиев, С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28. – №5. – С. 19-26.
27. 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.

28. Пузач, С. В. Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении [Текст] / С.В. Пузач, В.М. Доан, Т.Д. Нгуен, Е.В. Сулейкин, Р.Г. Акперов. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – 130 с.

29. Пузач, С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности [Текст] / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

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

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

32. Пузач, С. В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении [Текст] / С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2016. – Т. 25. – № 2. – С. 13-20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.

33. Есин, В.М. Пожарная профилактика в строительстве. Ч.1. Пожарная профилактика систем отопления и вентиляции [Текст] / В.М. Есин, В.И. Сидорук, В.Н. Токарев. – М.: ВИПТШ МВД РФ, 1995. – 352 с.

34. Есин, В.М. К вопросу расчета температуры продуктов горения, удаляемых из коридоров зданий [Текст] / В.М. Есин, С.П. Калмыков // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2016. – Т. 25. – № 1. – С. 47-53. [https://doi.org/ 10.18322/PVB.2016.25.01.47-53](https://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.01.47-53).

35. Есин, В.М. Температурные режимы в помещениях на этаже, где происходит пожар [Текст] / В.М. Есин, А.Н. Ерофеев, Г.Н. Валеев. – М.: ВНИИПО, 1987. – 241 с.

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

37. Акперов, Р.Г. Выделение и распространение токсичных продуктов горения при пожарах в зданиях ГЭС [Текст] / Р.Г. Акперов, С.В. Пузач // Известия Южного Федерального университета. Технические науки. – 2013. – №8. – С.256-258.

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

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

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

41. 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 / Веселы Владимир. – М., 1978. – 218 с.

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

43. Исаева, Л. К. Пожары и окружающая среда [Текст] / Л.К. Исаева – М.: 2001. – 147 с.

44. Исаева, Л. К. Экологические последствия пожаров [Текст] / Л.К. Исаева. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1990. – 107 с.

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

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

47. 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.

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

49. Болдрушкиев, О.Б. Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода при пожаре в помещении [Текст] / О.Б. Болдрушкиев, С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин // Безопасность жизнедеятельности – 2019. – № 10. – С. 31-36.

50. Болдрушкиев, О.Б. Экспериментальное определение зависимости парциальной плотности циановодорода от плотности кислорода при пожаре в помещении [Текст] / Материалы XXVIII международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2019». – Москва.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2019. – С. 381-386.

51. ГОСТ 19431-84. Энергетика и электрификация. Термины и определения [Текст]. – Введ. 01.01.1986 – М.: Государственного комитета СССР по стандартам. – 26 с.

52. Беляев, Л.А. Тепловые электрические станции [Текст] / Л.А. Беляев. – М.: НИУ Томский политех, 2011. – 151 с.

53. Захарова, Д.А. Анализ пожарной опасности на Красноярской ТЭЦ-2 [Текст] / У.С. Иванова, И.И. Буянкин // Материалы I-ой Всероссийской научно-технической конференции «Молодая нефть». – 2014. – С. 2-15.

54. Рукин, М.В. Анализ аварийных ситуации на теплоэлектростанциях [Электронный ресурс] // Системы безопасности. – 2015. – №6. Режим доступа:

<http://secuteck.ru/articles2/firesec/analiz-avariynyh-situatsiy-na-teploelektrostantsiyah-chast-1> (дата обращения 10.12.2018).

55. Голоднова, О.С. Уплотнения вала турбогенераторов с водородным охлаждением и их системы маслоснабжения [Текст] / О.С. Голоднова // Энергопрогресс. – 2004. – С. 3-11

56. Микеев, А.К. Противопожарная защита АЭС [Текст] / А.К. Микеев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 430 с.

57. ГОСТ Р МЭК 60050-826-2009. Установки электрические. Термины и определения [Текст] / - Введ. 01.07.2010 – М.: Стандартинформ, 2010. – 13 с.

58. ГОСТ 31565-2012. Кабельные изделия. Требования пожарной безопасности [Текст] / - Введ. 01.01.2014 – М.: Стандартинформ, 2014. – 23 с.

59. ГОСТ 15845-80. Изделия кабельные. Термины и определения [Текст] / - Введ. 01.07.1981 – М.: Государственного комитета СССР по стандартам. – 16 с.

60. Багаутдинов, И.З. Преимущества применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена [Текст] / И.З. Багаутдинов, Н.Е. Кувшинова // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2016. – № 3. – С. 3-4.

61. Константинов, Г.Г. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена [Текст] / Г.Г. Константинов, О.В. Арсеньев // Вестник ИрГТУ. – 2010. – Т. 46. – № 6. – С. 219-224.

62. Каменский, М.К. Основные аспекты пожарной безопасности электрических кабелей [Электронный ресурс] / М.К. Каменский // Кабель-news. – 2009. – № 6-7 С. 48-55. URL: https://www.ruscable.ru/print.html?p=/article/Osnovnye_aspekty_pozharnoj_bezopasnosti/ (дата обращения: 16.01.2019).

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

64. Куценко, С.А. Основы токсикологии [Текст] / С.А. Куценко. – М.: Фолиант, 2004. – С. 102-106.

65. Болдрушкиев, О.Б. Определение зависимости парциальной плотности циановодорода от температуры для расчета времени блокирования путей эвакуации [Текст] / О.Б. Болдрушкиев, С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин // Материалы VII международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2018». – Москва.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2019. – С. 48-52.

66. Болдрушкиев, О.Б. Особенности образования циановодорода при термическом разложении полимерных материалов [Текст] / С.В. Пузач, О.Б. Болдрушкиев, Е.В. Сулейкин // Материалы IX международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести». – Минск.: 2019. – С. 244-245.

67. Пузач, С. В. Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре в помещении [Текст] / С.В. Пузач, Т.Д. Нгуен // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 1. – С. 181-183.

68. Голиков, С.Н. Неотложная помощь при острых отравлениях [Текст] / С.Н. Голиков. – М.: Медицина, 1978. – 312 с.

69. Nguyen, T.D. Experimental-theoretical approach to carbon monoxide density calculation at the incipient stage of the fire indoors/ S. V. Puzach, E. V. Suleykin, R. G. Akperov and T. D. Nguyen // Journal of Physics: Conference Series 891. – 2017. 012099. – P. 213-215. DOI :10.1088/1742-6596/891/1/012099.

70. Кустов, В.В. Комбинированное действие промышленных ядов [Текст] / В.В. Кустов. – М.: Химия, 1975. – 276 с.

71. Anseeuw, K.D. Pediatric cyanide poisoning by fire smoke inhalation: a European expert consensus [Текст] / K.D. Anseeuw, N. Burillo-Putze, D.I. Guillermod // *Pediatr Emerg Care*. – 2013. – Volume 11. – P. 1234-40.

72. Price, D. Burning behaviour of fabric/polyurethane foam combinations in the cone calorimeter [Текст] / D. Price, Y. Liu, R. Hull, J. Milnes // *Polymer International*. – 2016 – Vol. 49 – P. 1153-1157.

73. Petrova, F.S. Concise International Chemical Assessment document 61 [Текст] / F.S. Petrova, S. Bulgarova // World Health Organization Geneva, 2004. – P. 102-107.

74. Покровский, В. М. Физиология человека [Текст] / В.М. Покровский, Г.Ф. Коротько. – М.: Медицина, 2003. – 656 с. – ISBN 5-225-04729-7.

75. Ballantyne, B. [Текст] / B. Ballantyne // Toxicology, in Encyclopedia of Polymer Science and Engineering - Volume 16, Second Edition, Wiley, New York, NY, 1989, – P. 879-930.

76. СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения (с Изменением N 1) [Текст] / – Введ. 01.05.2009. – М.: Стандартинформ, 2009. – 37 с.

77. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования [Текст] / Введ. 01.07.1992. – Министерство внутренних дел СССР, 1992. – 36 с.

78. Kaplan, H. L. Modeling of toxicological effects of fire gases: I. Incapacitation effects of narcotic fire gases [Текст] / H.L. Kaplan, G.E. Hartzell // Journal of Fire Sciences. – 1984. – Vol. 2, Issue 4. – P. 286-305. DOI: 10.1177/073490418400200404.

79. Болдрушкиев, О.Б. Физико-математическая модель отравления циановодородом в условиях пожара [Текст] / О.Б. Болдрушкиев, С.В. Пузач // Материалы XIV научно-практической конференции «Ройтмановские чтения». – Москва.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2021. – С. 91-94.

80. Ахтулов, А.Л. Анализ основных моделей пожара, применяемых для определения начальной стадии пожара [Текст] / А.Л. Ахтулов, Л.Н. Ахтулова, А.Е. Любаков // Омский научный вестник. – 2015. – С. 8-11.

81. Пузач, С.В. Сравнительный анализ методов расчета массовых расходов системы дымоудаления при пожаре в помещении [Текст] / С.В. Пузач, И.Е. Фролов, О.С. Лебедченко, Е.С. Абакумов, Т.Х. Нгуен // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2008. – Т. 17. – № 4. – С. 34-41.

82. Пузач, С. В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности [Текст] / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

83. Пузач, С.В. О достоверности применения эмпирических формул расчета массового расхода системы дымоудаления при пожаре в атриуме [Текст] / С.В. Пузач, Т.Х. Нгуен // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2009. – Т. 18. – № 9. – С. 35-43.

84. Болдрушкиев, О.Б. Циановодород в токсичных продуктах горения, и его влияние на организм человека [Текст] / С.В. Пузач, О.Б. Болдрушкиев, Е.В. Сулейкин // Материалы XXVII международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2018». – Москва.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2018. – С. 163-167.

85. Сулейкин, Е.В. Определение показателей токсичности и удельного коэффициента выделения газообразных продуктов горения веществ и материалов [Текст] / Е.В. Сулейкин, Р.Г. Акперов, В.Г. Пузач // Материалы международной научно-практической конференции Молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2014». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 213-215.

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

87. Болдрушкиев, О.Б. Экспериментально-теоретический подход к расчету парциальной плотности циановодорода при пожарах на объектах энергетики [Текст] / С.В. Пузач, О.Б. Болдрушкиев, Е.В. Сулейкин // Материалы III Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики». – Москва.: МЭИ. – С. 230-231.

88. Болдрушкиев, О.Б. Experimental-theoretical approach to calculating the partial density of hydrogen cyanide during fires at energy facilities [Электронный ресурс] / С.В. Пузач, О.Б. Болдрушкиев, Е.В. Сулейкин // «Journal of Physics: Conference Series», 2020. – №1683. – 022055. Режим доступа:

https://www.researchgate.net/publication/350211515_Experimentaltheoretical_approach_to_calculating_the_partial_density_of_hydrogen_cyanide_during_fires_at_energy_facilities (дата обращения 04.02.2021).

89. ГОСТ 12.1.044-2018. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения [Текст] / Введ. 01.05.2019. – Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2019. – 206 с.

90. Болдрушкиев, О. Б. Новый подход к определению показателя токсичности при совместном воздействии циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении [Текст] / С.В. Пузач, О.Б. Болдрушкиев, Е.В. Сулейкин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – № 2. – С. 38-45.

91. Болдрушкиев, О.Б. Определение показателя токсичности при воздействии циановодорода [Текст] / О.Б. Болдрушкиев, С.В. Пузач, Е.Н. Косьянова // Материалы X международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2021». – М.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2021. – С. 178-185.

92. Nguyen, T.D. Calculation of the Critical Times of Carbon Monoxide Influence on Humans in Case of Fire in the Premises / V.G. Plyushchikov, S.V. Puzach, Y.G. Fominykh, V.G. Puzach, R.R. Gurina and Nguen Tat Dat // International Interdisciplinary Journal International Information Institute. – Vol. 20. – № 9(A). September, 2017. – P. 6585-6594.

93. Болдрушкиев, О.Б. Физико-математическая модель отравления циановодородом в условиях пожара [Текст] / О.Б. Болдрушкиев, С.В. Пузач // Материалы XIV научно-практической конференции «Ройтмановские чтения». – М.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2021. – С. 91-94.

94. Kerns, W.P. Cyanide and hydrogen sulfide. In: Goldfrank LR, Flomenbaum NE, Lewin NA, Weisman RS, Howland MA, Hoffman RS, eds. Goldfrank's [Текст] / W.P. Kerns, M.A. Kirk // Toxicological Emergencies. Stamford: Appleton & Lange, 1998. – 570 p.

95. Ellenhorn M.J. Hydrogen sulfide. In: Ellenhorn MJ, Schonwald S, Ordog G, Wasserberger J [Текст] / M.J. Ellenhorn, J. Wasserberger // *Medical Toxicology: Diagnosis and Treatment of Human Poisoning*. Baltimore: Williams & Wilkins, 1997. –1489 p.

96. Нгуен, Т.Д. Критические времена воздействия монооксида углерода на человека при повышенной объемной скорости вентиляции легких при переменной концентрации монооксида углерода при пожаре [Текст] / Т.Д. Нгуен, С. В. Пузач // *Материалы XI международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность»*. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная Академия ГПС МЧС России. – 2016. – С. 436-438.

97. Баранова, Е.А. Влияние физической нагрузки на показатели легочной вентиляции у спортсменов [Текст] / Е.А. Баранова, Л.В. Катилевич // *Вестник Томского государственного университета*. – 2013. – №374. – С. 152-155.

98. Коркушко, О.В. Возрастные изменения дыхательной системы при старении и их роль в развитии бронхолегочной патологии [Текст] / О. В. Коркушко, Д. Ф. Чеботарев, Н. Д. Чеботарев // *Украинский пульмонологический журнал*. – 2005. – №3. – С. 35-41.

99. Евдокимов, Е.И. Особенности изменений показателей функции внешнего дыхания под воздействием физической нагрузки [Текст] / Е.И. Евдокимов, Т.Е. Одинец, В.Е. Голец // *Физическое воспитание студентов творческих специальностей*. – 2008. – № 4. – С. 64-72.

100. Голов, А.В. Математическая модель регуляции легочной вентиляции при гипоксии и гиперкапнии [Текст] / А.В. Голов, С.С. Симаков // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2017. – Т. 9. – № 2. – С. 297-310. DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-2-297-310.

101. 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 библиотеки Академии ГПС МЧС России.

102. 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 библиотеки Академии ГПС МЧС России.

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

104. Пузач, С.В. Экспериментальное исследование параметров горения кроны наиболее распространенных пород деревьев Вьетнама [Текст] / С.В. Пузач, Л.А. Туан // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2019. – Т. 28. – № 6. – С. 10-17. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.

105. Болдрушкиев, О.Б. Экспериментально-теоретическое определение концентрации циановодорода при пожарах в помещении [Текст] / О.Б. Болдрушкиев, С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин // Материалы XIII научно - практической конференции «Ройтмановские чтения». – М.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2020. – С. 91-94.

106. Серков, Б.Б. Методические рекомендации «Метрология, стандартизация и сертификация [Текст] / Б.Б. Серков, Р.Г. Акперов, Н.В. Королева. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 5-8.

107. In Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS) [Текст] / Toxicological review of hydrogen cyanide and cyanide salts. September 2010. – Environmental Protection Agency Washington, DC. September, 2010. – 321 p.

108. 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.

109. 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.

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

111. Xiu, L. Recent studies on the decomposition and strategies of smoke and toxicity suppression for polyurethane based materials [Текст] / L. Xiu, H. Jianwei, G. Sabyasachi // Royal society of chemistry: 2016 – Vol. 6 – P. 74742-74756. DOI:10.1039/c6ra14345h.

112. NFPA 92B Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces [Текст]. Quincy, Massachusetts: NFPA, 2009. – 65 p.

113. Горячева, М.Н. Оценка критической продолжительности пожара по нескольким токсичным продуктам горения [Текст] / М.Н. Горячева, С.В. Пузач, С.А. Горячев // Пожары и чрезвычайные ситуации. – 2014. – № 1. – С. 36–40.

114. Акперов, Р.Г. Анализ современных методов определения токсичности веществ и материалов [Текст] / Р.Г. Акперов, Е.В. Лендель // Материалы международной научно-практической конференции Молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2014». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 234-235.

115. Нгуен, Т.Х. Сравнительный анализ методов расчета массовых расходов систем дымоудаления из атриумных зданий [Текст] / Т.Х. Нгуен, А.А. Сударушкин, О.С. Лебеченко, С.В. Пузач, Е.В. Витовщик // Материалы восемнадцатой научно-технической конференции «Системы Безопасности» – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – С. 140-142.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ



Начальник технического управления

АО «Атомэнергоспецпроект»

А.В. Овчинников

» сентября 2021 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования на тему:
«Определение времени блокирования путей эвакуации циановодородом на
объектах энергетики», выполненной Болдрушкиевым Очиром
Баатровичем

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Болдрушкиева Очира Баатровича использованы при:

- выполнении расчетов пожарного риска и разработке плана безопасной эвакуации людей при пожаре на Нововоронежской АЭС, расположенной по адресу: Россия, Воронежская область, г. Нововоронеж, промзона и Курской АЭС-2, расположенной по адресу: Курская область, площадка «Макаровка»;

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

Разработанная Болдрушкиевым О.Б. методика расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом на объектах энергетики позволила учесть образование и распространение циановодорода при термическом разложении современных горючих веществ и материалов, используемых на объектах энергетики, но не включенных в базу типовой пожарной нагрузки.

Главный инженер по пожарной безопасности
АО «атомэнергоспецпроект»

В.И. Захаров

Главный специалист,
технического управления

Д.С. Никонов

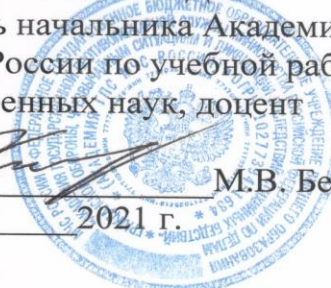
Главный специалист
технического управления

А.В. Шульгин

УТВЕРЖДАЮ

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


«23» 05 2021 г. М.В. Бедило



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук адъюнкта очного обучения кафедры инженерной теплофизики и гидравлики Академии ГПС МЧС России, старшего лейтенанта внутренней службы Болдрушкиева Очира Баатровича

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

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

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


Заместитель начальника УМЦ - начальник
учебного отдела
полковник внутренней службы

 Колесников В.В.

Заместитель заведующего кафедрой
инженерной теплофизики и гидравлики
полковник внутренней службы

 Болдырев Е.Н.

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

 Бегишев И.Р.

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

 Лимонов В.Г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021664548

**Программа для обработки и формирования базы
параметров пожарной нагрузки**

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

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

Заявка № 2021619872

Дата поступления **12 июня 2021 г.**

Дата государственной регистрации

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

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0x02A5CFBC00B1ACF59A40A2F08092E9A118
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев