

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ
АКАДЕМИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ
МЧС РОССИИ

На правах рукописи



Нгуен Тат Дат

**ВРЕМЯ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ МОНООКСИДОМ
УГЛЕРОДА ПРИ ПОЖАРЕ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Современное состояние проблемы расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре на объектах энергетики Вьетнама.....	13
1.1. Особенности пожарной опасности объектов энергетики Вьетнама	13
1.2. Токсичность продуктов горения веществ и материалов, находящихся на объектах энергетики.....	25
1.3. Методы оценки токсичности продуктов горения.....	41
1.4. Особенности воздействия монооксида углерода на организм человека.....	45
1.5. Математические модели расчета концентраций токсичных газов при пожаре	54
1.6. Выводы по первой главе.....	65
Глава 2. Математические модели и методика расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре на объектах энергетики Вьетнама.....	68
2.1. Интегральная модель	68
2.1.1. Основные положения и уравнения.....	68
2.1.2. Особенности расчета концентраций токсичных газов.....	74
2.2. Зонная модель	76
2.2.1. Особенности и упрощения термогазодинамической картины пожара	76
2.2.2. Основные уравнения.....	79
2.2.3. Условия однозначности и метод численного решения.....	83
2.3. Полевая модель	84
2.3.1. Основные особенности и упрощения термогазодинамической картины пожара.....	84
2.3.2. Основные уравнения.....	86

2.3.3. Условия однозначности.....	90
2.4. Методика расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре в производственных зданиях объектов энергетики Вьетнама.....	93
2.5. Выводы по второй главе	96
Глава 3. Физико-математическая модель расчета критических продолжительностей пожара по монооксиду углерода в помещении.....	97
3.1. Некоторые особенности поражения организма человека монооксидом углерода	97
3.2. Физико-математическая модель расчета содержания карбоксигемоглобина в крови человека при пожаре.....	99
3.3. Критические времена воздействия СО на человека при пожаре	102
3.4. Исходные данные для численных экспериментов.....	103
3.5. Результаты численных и натурных экспериментов при спокойном дыхании	104
3.6. Результаты и анализ численных экспериментов при повышенной объемной скорости вентиляции легких при постоянной концентрации монооксида углерода	105
3.7. Результаты и анализ численных экспериментов при повышенной объемной скорости вентиляции легких при переменной концентрации монооксида углерода.....	110
3.8. Выводы по третьей главе.....	114
Глава 4. Экспериментально-теоретическая модель расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода на объектах энергетики Вьетнама при пожаре.....	115
4.1. Постановка задачи.....	115
4.2. Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов.....	116
4.3. Математическая модель	118
4.4. Исходные данные для численных и натурных экспериментов	121

4.5. Результаты численных и натурных экспериментов и их анализ.....	122
4.6. Результаты и анализ численных экспериментов по математическому моделированию пожара в полномасштабных помещениях объектов энергетики Вьетнама.....	129
4.7. Методика расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре	138
4.8. Практические рекомендации по обеспечению безопасности людей от воздействия монооксида углерода при пожарах на объектах энергетики Вьетнама	140
4.9. Выводы по четвертой главе.....	142
Заключение	144
Литература	146
Приложение. Акты внедрения результатов диссертационного исследования.	156

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Рост экономики Вьетнама в последние годы сопровождается увеличением потребности в электроэнергии около 10-15 % в год, и в ближайшем будущем во Вьетнаме возникнет серьёзный дефицит электроэнергии (он уже равен 1000-1500 МВт) [1]. Поэтому необходимо строительство новых гидроэлектростанций (ГЭС), атомных электростанций (АЭС) и тепловых электростанций (ТЭС).

За 2006-2015 гг. большое количество крупных пожаров произошло на объектах энергетики Вьетнама, что привело к гибели людей и причинению большого материального ущерба. В том числе 16 пожаров зарегистрировано на ГЭС, на ТЭС зафиксировано 58, на электроподстанциях – 67. При этом погибли 5 чел., травмированными оказались 29 чел., общий ущерб равнялся 15,7 млн. долларов.

Причинами смерти людей на пожарах более чем в 80 % случаев согласно статистическим данным является отравление продуктами горения, среди которых монооксид углерода наиболее часто оказывает решающее негативное влияние [2-4]. Поэтому обеспечение безопасности людей при пожарах на объектах энергетики (ОЭ) Вьетнама на основе использования математического моделирования времени блокирования путей эвакуации СО является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время математические модели расчета динамики опасных факторов пожара (в том числе и концентраций токсичных продуктов горения) в помещении достаточно развиты для решения практических задач пожарной безопасности, в частности, расчета пожарных рисков.

Существенный вклад в развитие теории математического моделирования пожаров внесли Кошмаров Ю.А., Рыжов А.М., Молчадский И.С., Матюшин А.В., Меркушкина Т.Г., Есин В.М., Снегирев А. Ю., Пузач С.В., Chow W. K., Tanaka T., Turner, J. S., You Fei и др.

Исследования образования и распространения токсичных продуктов горения на пожарах проводились в работах Кошмарова Ю.А., Иличкина В.С., Белешникова И.Л., Щеглова П.П., Пузача С.В., Исаевой Л.К., Levin В.С., Kuligovski E.D., Hartzell G.E., Priest D.N., Morikawa T. и др.

Время блокирования путей эвакуации монооксидом углерода в современных методах расчета определяется по достижению концентрацией СО или токсодозой СО ее критического значения для человека на высоте органов дыхания. При этом для обоснования критических значений вышеуказанных параметров не учитываются резкое увеличение концентрации карбоксигемоглобина в крови (степень интоксикации организма), а также повышенная скорость легочной вентиляции, характерная для условий пожара в помещении.

Существующие базы данных по выделению токсичных газов при пожаре (например, работа [5]) содержат данные для ограниченного количества веществ и материалов. При этом удельные коэффициенты выделения токсичных газов получены при проведении мелкомасштабных экспериментов и приняты постоянными, не зависящими от термогазодинамической картины развития пожара (концентрации кислорода, температуры и т.д.). Кроме того, использование вышеуказанных коэффициентов выделения при расчете пожара в реальном полномасштабном помещении требует научного обоснования.

В работах [6, 7] предложен новый подход к расчету концентраций токсичных продуктов горения, который заключается в определении среднеобъемных плотностей токсичных газов в каждый момент времени по их экспериментальным зависимостям от среднеобъемной температуры, полученным в разработанной экспериментальной установке. При этом отпадает необходимость в решении дифференциальных уравнений законов сохранения масс токсичных газов, и, следовательно, в определении удельных коэффициентов выделения газов. Однако точность предложенного подхода в значительной степени зависит от погрешности определения коэффициента теплопотерь в экспериментальной мелкомасштабной установке и в реальном полномасштабном помещении.

Поэтому необходимо развитие вышеуказанного подхода к расчету распространения СО при пожаре в помещении с учетом теплофизических свойств конкретной пожарной нагрузки, характерной для ОЭ Вьетнама.

Объектом исследования в диссертации являются тепломассообменные процессы, протекающие при пожаре на ОЭ Вьетнама и определяющие величину времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода.

Предметом исследования является время блокирования путей эвакуации монооксидом углерода на ОЭ Вьетнама при пожаре.

Целью диссертационной работы является разработка методики расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода на ОЭ Вьетнама, использующей экспериментальные данные по параметрам горения характерных для ОЭ горючих веществ и материалов и учитывающей непосредственное воздействие СО на организм человека, для обеспечения безопасной эвакуации и спасения людей при пожаре.

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

- провести анализ литературных источников по расчету времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре в помещении, а также по воздействию СО на организм человека с целью обоснования критических значений концентрации СО во время эвакуации и спасения людей при пожаре;

- разработать методику расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода на основе применения модифицированных интегральной и зонной моделей прогнозирования термогазодинамики пожара, которые используют теплофизические и химические свойства горючих веществ и материалов, характерных для ОЭ Вьетнама, а также учета степени отравления организма человека во время его эвакуации и спасения;

- провести экспериментальные исследования в мелкомасштабной опытной установке горючих веществ и материалов, характерных для ОЭ Вьетнама, с целью получения экспериментальных зависимостей, необходимых для замыкания

предложенных модифицированных интегральной и зонной математических моделей;

- выполнить численные эксперименты по определению времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода в типовых помещениях ОЭ Вьетнама с использованием предложенных и существующих математических моделей, а также провести сопоставление с экспериментальными данными и результатами расчетов в мелкомасштабной опытной установке;

- разработать научно-обоснованные рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода для обеспечения безопасной эвакуации и спасения людей во время пожара на объектах энергетики Вьетнама с учётом их объёмно-планировочных и конструктивных решений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- получены новые теоретические и экспериментальные зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной плотности кислорода, позволяющие проводить расчет среднеобъемной плотности СО и показателя токсичности по совместному воздействию СО и O_2 при горении характерных для ОЭ горючих веществ и материалов в реальном полномасштабном помещении ОЭ, не решая дифференциальное уравнение закона сохранения массы СО;

- впервые научно обоснованы с введением новых критериев критические времена воздействия СО на человека во время его эвакуации и спасения на ОЭ при повышенной скорости легочной вентиляции, характерной для условий пожара в помещении, с использованием разработанной физико-математической модели расчета концентрации карбоксигемоглобина в крови человека;

- разработаны модифицированные интегральная и зонная модели прогнозирования термогазодинамики пожара и методика расчета времени блокирования путей эвакуации ОЭ монооксидом углерода, которые используют экспериментальные зависимости среднеобъемной плотности СО от среднеобъемной плотности O_2 для характерных для ОЭ горючих веществ и материалов;

- предложена методика расчета критических времен воздействия СО на человека во время его эвакуации и спасения, которая учитывает степень отравления организма человека во время его эвакуации и спасения.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в совершенствовании научных основ обеспечения безопасной эвакуации людей при пожаре на ОЭ Вьетнама. Предложенные физико-математические модели позволяют учесть при расчете концентраций СО экспериментальные параметры характерных для ОЭ горючих веществ и материалов, а также закономерности воздействия СО на организм человека при повышенной скорости легочной вентиляции, характерной для условий пожара в помещении;

- в более надежном по сравнению с использованием существующих методик расчете времени блокирования путей эвакуации ОЭ Вьетнама монооксидом углерода с целью обеспечения безопасной эвакуации людей, что позволяет разрабатывать научно-обоснованные практические рекомендации для конкретного ОЭ с учетом его объемно-планировочных и конструктивных решений, а также его пожарной нагрузки с целью обеспечения требуемого уровня пожарного риска;

- в определении времени спасения людей, подвергающихся воздействию СО, которые не смогли эвакуироваться или исполняют на ОЭ свои функциональные обязанности во время пожара.

Методология и методы исследования. Основными методами исследования являются экспериментальные и теоретические методы газодинамики и тепломассообмена, методы получения экспериментальных зависимостей на основе обработки экспериментальных данных, анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретические и экспериментальные зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной плотности кислорода, позволяющие проводить расчет динамики изменения среднеобъемной плотности СО и показателя токсичности по совместному воздействию СО и O_2 при горении

характерных для ОЭ твердых и жидких веществ и материалов в реальном полномасштабном помещении ОЭ, не решая дифференциальное уравнение закона сохранения массы СО;

- модифицированные интегральная и зонная модели прогнозирования термогазодинамики пожара, позволяющие проводить расчет среднеобъемной плотности СО и показателя токсичности по совместному воздействию СО и O_2 при горении характерных для ОЭ горючих веществ и материалов в реальном полномасштабном помещении ОЭ, не решая дифференциальное уравнение закона сохранения массы СО и используя экспериментальные зависимости среднеобъемной плотности СО от среднеобъемной плотности O_2 ;

- математическая модель расчета критических плотностей СО, основанная на расчете степени отравления организма человека за счет увеличения концентрации карбоксигемоглобина в крови во время его эвакуации или спасения при повышенной скорости легочной вентиляции, характерной для условий пожара в помещении;

- методика расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода, основанная на применении разработанных модифицированных интегральной и зонной моделей, а также математической модели расчета критических времен воздействия СО на человека во время его эвакуации или спасения;

- результаты сопоставления расчетных и экспериментальных значений среднеобъемной плотности СО и показателя токсичности по совместному воздействию СО и O_2 при горении характерных для ОЭ твердых и жидких веществ и материалов в условно герметичной мелкомасштабной экспериментальной установке и в типовых полномасштабных помещениях ОЭ Вьетнама;

- научно-обоснованные рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации СО с целью обеспечения безопасной эвакуации и спасения людей при пожаре на ОЭ Вьетнама.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием апробированных экспериментальных методов исследования процессов теплообмена и физико-математических методов анализа. Предложенные модифицированные интегральная и зонная математические модели, а также математическая модель расчета степени отравления человека имеют достаточно точное для инженерных методов расчета совпадение с экспериментальными и теоретическими данными, полученными автором и приведенными в литературных источниках.

Апробация результатов. Основные результаты работы были доложены на: международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2016» (г. Москва, 2016), XI международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность» (г. Иваново, 2016), VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (г. Воронеж, 2016), 25-ой международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2016» (г. Москва, 2016), 6-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности» (г. Москва, 2017), VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций» (г. Воронеж, 2017), 26-ой международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2017» (г. Москва, 2017), IV международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности» (г. Москва, 2017), международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (г. Москва, 2017), 7-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности» (г. Москва, 2018); на объединенном заседании кафедр инженерной теплофизики и гидравлики, пожарной безопасности технологических процессов, физики, процессов горения,

пожарной автоматики, пожарной безопасности в строительстве, пожарной тактики и службы Академии ГПС МЧС России.

Материалы диссертации реализованы при:

- созданию новой учебной дисциплины «Прогнозирование опасных факторов пожара» для обучения магистров и в проведении научных исследований по совершенствованию методики расчета пожарных рисков в Институте противопожарной безопасности МОБ Вьетнама;

- разработке нормативных документов для противопожарных требований Вьетнама и создании планов безопасной эвакуации людей при пожаре на объектах энергетики Вьетнама в Главном управлении пожарной безопасности и аварийно-спасательных служб Министерства общественной безопасности СРВ;

- при разработке и создании плана безопасной эвакуации людей при пожаре в ТЭС Фу Му 1, расположенной в г. Хо Ши Минь Вьетнама, ОАО «Гражданское строительство Ха Нинь»;

- разработке фондовых лекций, проведении лекционных, лабораторных и практических занятий со специалистами и бакалаврами Академии ГПС МЧС России по дисциплине «Прогнозирование опасных факторов пожара» по темам №2 «Основные понятия и уравнения интегральной математической модели пожара в помещении» и №6 «Основные положения зонного моделирования пожаров».

Публикации: по результатам диссертационного исследования автором опубликовано 19 научных работ (в том числе в 5 журналах, рекомендованных ВАК).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 160 страницах текста, включает в себя 33 рисунка, 19 таблиц. Список литературы включает 93 наименования.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ ТОКСИЧНЫМИ ПРОДУКТАМИ ГОРЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА

1.1. Особенности пожарной опасности объектов энергетики Вьетнама

Современный период развития экономики, науки и техники характеризуется нарастающими противоречиями между высоким промышленным потенциалом и возможностями его безопасного и эффективного использования. В связи с этим все большее значение приобретает практическое решение задач по снижению опасности возникновения пожара, в том числе и на объектах энергетики.

Энергетика – это область хозяйственно-экономической деятельности человека, включающая совокупность больших искусственных и естественных подсистем, которые предназначены для разведки, освоения, производства, преобразования, распределения и использования всех видов энергетических ресурсов. Энергетика может состоять из топливных подсистем, обеспечивающих производство электроэнергии, с помощью преобразования первичной природной энергии во вторичную [8].

Большинство электростанций и подстанций включены в единую энергосистему. Вышеуказанная энергосистема представляет собой сеть электростанций, подстанций, линий электропередачи и тепловых сетей, объединенных в одно целое общностью режима и непрерывностью процесса производства и распределения энергии. Большие территории с крупными промышленными центрами и большими городами охвачены сетями энергосистемы, что в условиях широкого использования продукции энергетического комплекса повышает важность обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики при всех режимах работы.

Таким образом, проведение научных исследований для обеспечения пожарной безопасности на энергетических объектах является актуальной задачей.

Рост потребности в электроэнергии вызван ускоренным развитием экономики Вьетнама в последние годы. Согласно [1] доступные мощности национальной электроэнергетической системы равны 26-28,2 тыс. МВт, при этом максимальная мощность составляет 24,560 тыс. МВт. Согласно прогнозам специалистов потребность в электроэнергии увеличивается каждый год на 10-15 %, что приведет к серьёзной ситуации во Вьетнаме, связанной с недостатком электроэнергии (в последние годы дефицит электроэнергии равен 1000-1500 МВт). Поэтому быстро строятся новые ГЭС, АЭС и ТЭС.

Структура национальной электроэнергетической системы Вьетнама на 31.12.2015 г. имеет вид, представленный на рисунке 1.1: 34,4 % - электроэнергия, вырабатываемая на ГЭС, 62,8 % - на ТЭС и 2,8 % - на АЭС и других (например, электроэнергия импорта и т.д.).

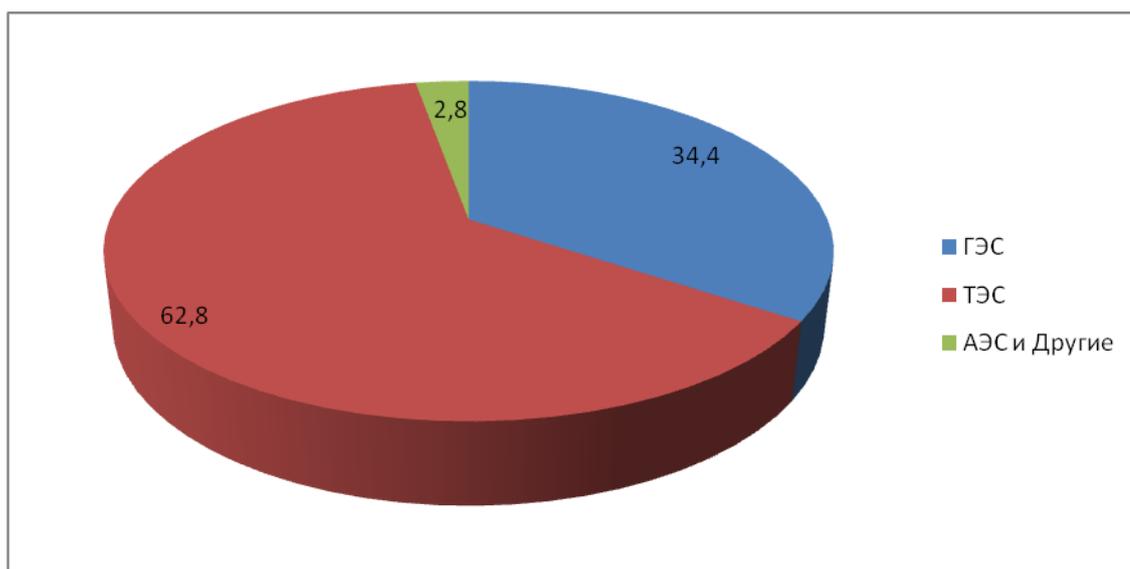


Рисунок 1.1 - Структура национальной электроэнергетической системы Вьетнама на 31.12.2015 г.

Структура национальной электроэнергетической системы Вьетнама по прогнозам в 2020г. по прогнозам специалистов будет иметь, показанную на рисунке 1.2, где 22,7 % - вырабатывается на ГЭС; 63 % - ТЭС; 14,3 % - АЭС и других.

Таким образом, ТЭС и ГЭС играют главную роль в обеспечении электроэнергией Вьетнама.

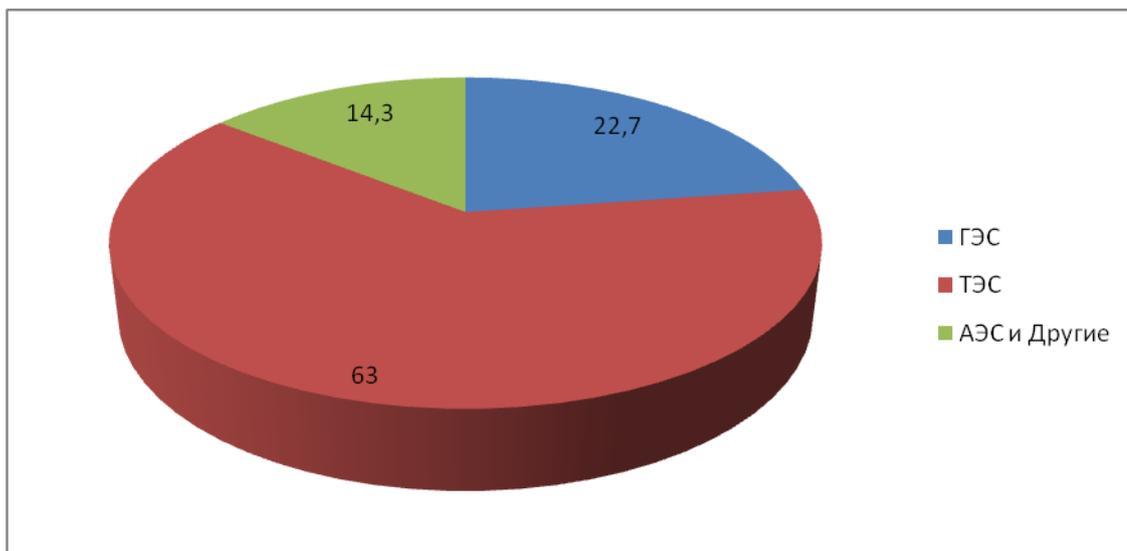


Рисунок 1.2 – Прогноз структуры национальной электроэнергетической системы Вьетнама на 2020 г.

Список основных ТЭС Вьетнама приведен в таблице 1.1, и ГЭС Вьетнама в таблице 1.2.

Таблица 1.1 – Список ТЭС (> 100 МВт) Вьетнама

№	Теплоэлектростанции	Количество турбогенераторов	Мощность, МВт
1	Формоса	4	1500
2	Вунг Анг 1	2	1200
3	Фу Ми 1	8	1108
4	Фа Лай 1	3	440
5	Фа Лай 2	4	600
6	Куанг Нинь	2	600
7	Хай Фонь	4	600
8	Кам фа	4	670
9	Шон Донг	2	220
10	Као Нган	2	115

Таблица 1.2 – Список ГЭС Вьетнама

№	Гидроэлектростанции	Количество гидроагрегатов	Мощность, МВт
1	Шон Ла	6	2400
2	Хоа Бинь	8	1920
3	Лай Чау	3	1200
4	Иалу	4	720
5	Чи Ан	4	400
6	Донг Най 4	2	340
7	Туен Куан	3	342
8	Хам Тхуан	2	300
9	Дами	2	175
10	Да Ньим	4	160

Много крупных пожаров на объектах энергетики (ОЭ) Вьетнама произошло за последние годы, что привело к гибели людей, причинению большого материального ущерба и отрицательному влиянию на общественную безопасность.

В таблице 1.3 приведена статистика крупных пожаров на ОЭ Вьетнама в течение 2006-2015 гг.

В таблице 1.4 представлены данные по гибели и травмированию людей, а также по прямому ущербу при пожарах на ОЭ Вьетнама за 2006-2015 гг.

Статистика крупных пожаров на ОЭ Вьетнама за 2006-2015 гг. показана также на рисунках 1.3 и 1.4.

Таблица 1.3 – Статистика пожаров на ОЭ Вьетнама в течение 2006-2015 гг.

Количество пожаров в год	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2006-2015
ГЭС	1	2	5	1	0	1	1	2	2	1	16
ТЭС	6	5	8	6	6	9	3	6	5	4	58
Подстанции	9	9	8	5	7	5	8	5	6	5	67

Таблица 1.4 – Ущерб, нанесенный пожарами на ОЭ Вьетнама за период с 2006 по 2015 гг.

Наименование объекта	2006-2015 гг.			
	Количество пожаров, ед.	Зарегистрировано погибших людей, чел	Кол-во травмированных людей, чел.	Прямой ущерб, мил. дол.
ГЭС, ТЭС, Подстанции	141	5	29	15,7

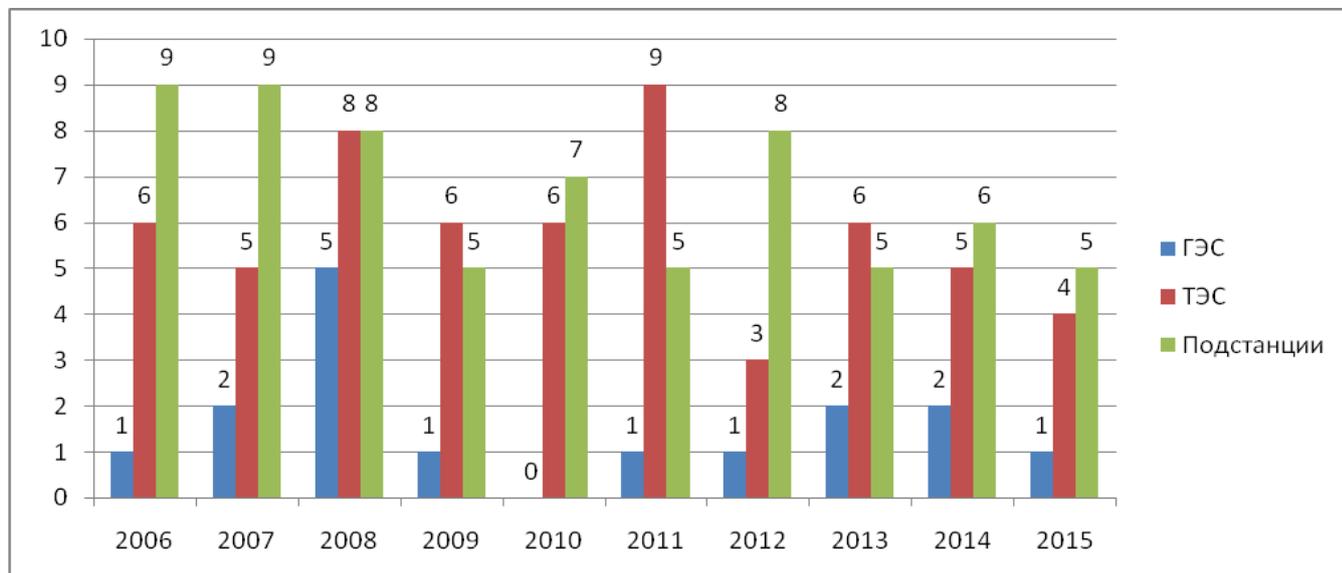


Рисунок 1.3 – Статистика пожаров на ОЭ Вьетнама за 2006-2015

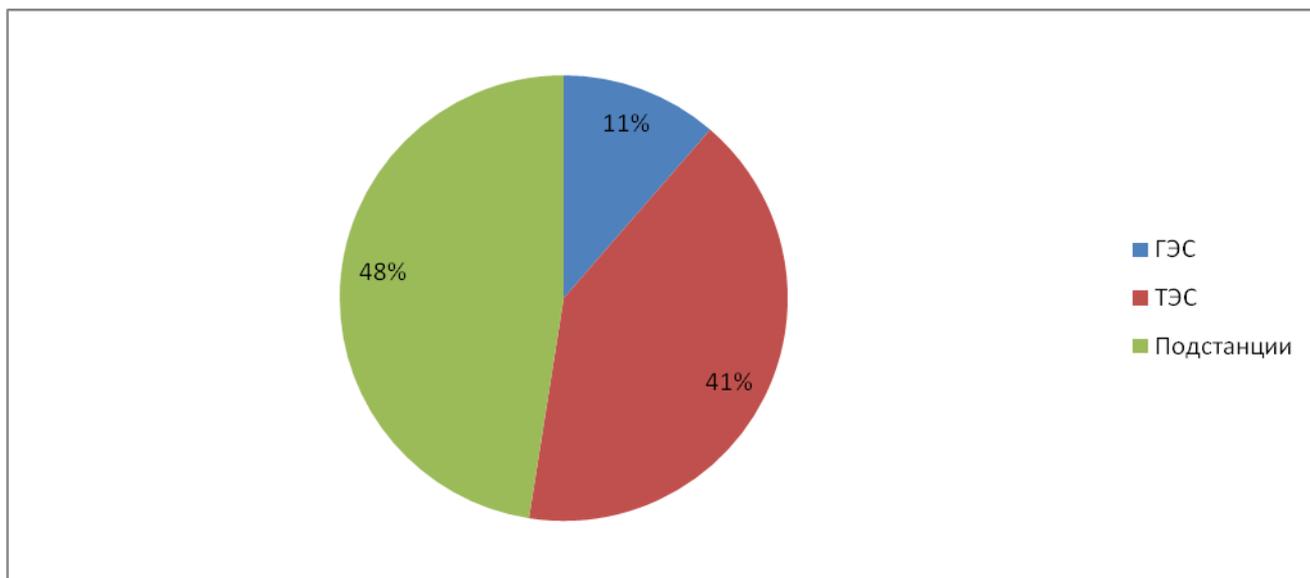


Рисунок 1.4 – Статистика пожаров на ОЭ Вьетнама за период с 2006 по 2015 гг.

В ОЭ Вьетнама основными горючими веществами являются турбинное масло, трансформаторное масло, изоляция кабелей, кабельные лотки, упаковка, строительные и отделочные материалы, бензин.

В соответствии с [3] при полном сгорании полимеров, содержащих углерод и водород, с кислородом воздуха образуются углекислый газ и пары воды. В случае неполного сгорания при пламенном и тлеющем горении выделяется намного больше газообразных продуктов горения. При недостатке кислорода в помещении при горении большинства материалов образуются CO , CO_2 и H_2O .

Если материалы содержат азот, то вероятнее всего образуются диоксид азота (NO_2) и циановодород (HCN). При горении огнезадерживающих и галогено-содержащих материалов обычно выделяются HCl и HBr . Среди других наиболее распространенных газов, входящих в состав газовой среды на пожаре, можно отметить оксиды азота (NO_x), аммиак (NH_3), сульфид водорода (H_2S), диоксид серы (SO_2) и соединения фтора. Пониженная концентрация кислорода также дает дополнительный отрицательный эффект на физиологию организма [3].

Термогазодинамические условия пожара, химический состав и концентрации газообразных продуктов процесса газификации жидких и твердых горючих веществ и материалов определяют количество и концентрации образующихся токсичных газов. Сложность физико-химических условий

протекания процессов газификации и горения, неопределенность химического состава современных строительных материалов, используемых на ОЭ, приводит к тому, что расчет количества и концентраций токсичных газов является нерешенной теоретической и экспериментальной проблемой.

Пожары на ОЭ происходят в следующих основных местах:

- основные производственные цеха и помещения;
- туннели, кабельные проводки, и полуэтажи;
- вспомогательные и подсобные помещения производств;
- котельная и другие вспомогательные помещения.

Повышенный уровень пожарной опасности в производственных зданиях ОЭ объясняется быстрым развитием пожара из-за присутствия большого количества горючих твердых, жидких и газообразных веществ, а также быстрого распространения токсикантов. Токсичные газы могут в течение 3-5 мин заполнить верхнюю часть машинного зала, достигая отметок обслуживания турбогенераторов [9].

Типовое производственное здание ОЭ состоит из следующих основных помещений:

- машинный зал (МЗ);
- парогенераторы (для ТЭС и АЭС);
- техническая этажерка;
- турбинные агрегаты;
- подагрегатное пространство;
- кабельные тоннели.

Схема основных помещений типового производственного здания ОЭ приведена на рисунке 1.5.

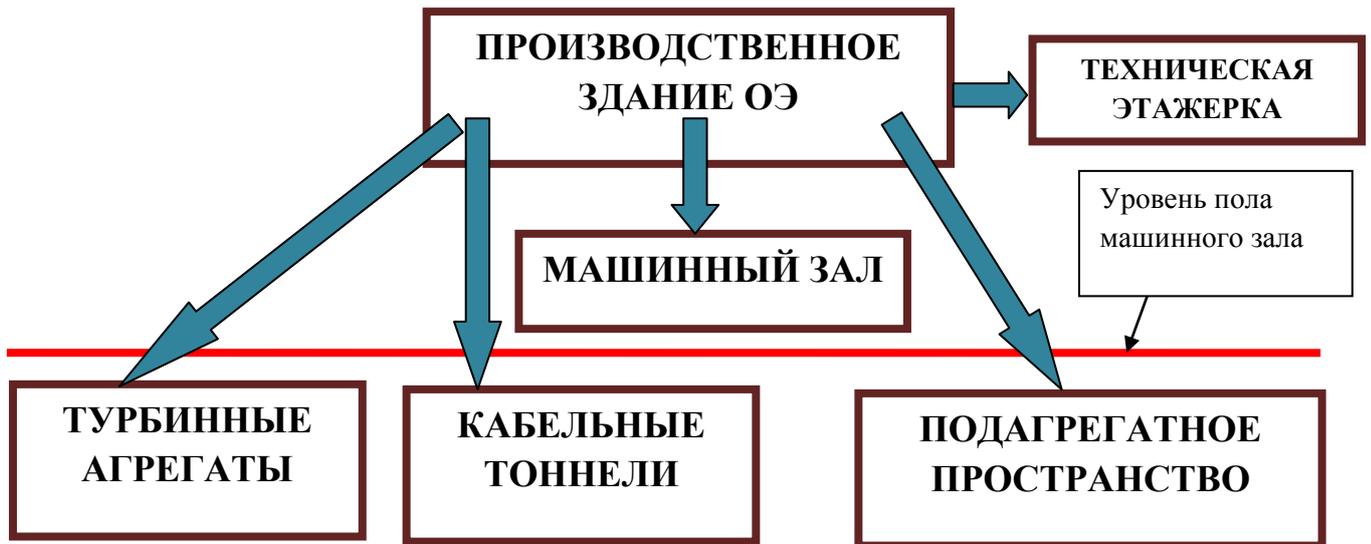


Рисунок 1.5 - Основные помещения типового производственного здания ОЭ

Краткие характеристики основных помещений производственных зданий ОЭ с точки зрения их пожарной опасности представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Краткие характеристики основных помещений производственных зданий ОЭ

№	Основные помещения	Характеристика помещения	Горючие материалы
1	Машинный зал	Развитое по вертикали и горизонтали протяженное пространство	Машинное, турбинное и трансформаторное масло, бензин, ободочка кабелей, этиловый спирт, упаковка, пластмассы, древесина и т.д.
2	Кабельные тоннели	Развитое по горизонтали протяженное пространство	Оболочка кабелей, турбинное масло
3	Турбинные агрегаты	---	Турбинное масло
4	Подагрегатное пространство	Развитое по горизонтали протяженное пространство	Оболочка кабелей, турбинное масло

МЗ ОЭ - часть ОЭ, где расположено основное оборудование, которое вырабатывает электроэнергию, а также электрические генераторы и вращающие их двигатели (турбины, дизели и т. д.) с вспомогательным оборудованием.

МЗ отличается сложностью протекающих в нем производственных процессов. Повышенная пожарная опасность МЗ объясняется тем, что в нем находятся:

- сжиженный ацетилен;
- водород, используемый для охлаждения ротора генератора;
- значительные количества ЛВЖ и ГЖ, такие как гидравлическое, трансформаторное и турбинное масло, этиловый спирт, дизельное топливо для аварийных силовых установок, смазочные масла, применяемые для охлаждения и смазки подшипников турбин;
- твердые горючие материалы, такие как упаковка, древесина, древесный уголь;
- электрические установки (изоляция электрических кабелей, конструкционные материалы на основе пластмасс и т.д.).

МЗ согласно своим объемно-планировочным и конструктивным решениям является атриумом, так как соответствует всем необходимым признакам атриумного пространства.

Атриум - часть здания в виде многосветного пространства, развитого в вертикальном направлении, как правило, с поэтажными балконами и галереями, на которые могут выходить помещения различного назначения [10, 11].

Будучи использованным в разных целях, атриум образует своего рода вестибюль и коммуникационное пространство, обеспечивающие доступ ко всем частям здания. Хорошая обозреваемость внутреннего пространства здания позволяет рассматривать атриумное пространство как особого рода расширение основных площадей здания.

Для атриумных конструкций МЗ характерно проявление двух эффектов [10]. Оранжевый эффект ярко выражен в случае прозрачного перекрытия из-за того, что коротковолновая составляющая солнечного света, проходящая через остекление, нагревает вещества, материалы и конструкции, находящиеся внутри атриума. В тоже время излучение, направленное изнутри помещения наружу, характеризуется большей длиной волны и поэтому поглощается и ослабляется

стеклянным перекрытием. Вследствие этого тепло удерживается внутри атриумного пространства.

Воздушная тяга возникает вследствие разницы атмосферного давления на разных высотах помещения. Поднимающиеся нагретые в результате парникового эффекта воздушные массы усиливают вертикальное движение воздуха, что приводит к созданию мощного восходящего тока воздуха в атриуме и при наличии проемов - к созданию сильной тяги из смежных с атриумом помещений. Эта тяга может быть эффективно использована для вентиляции.

Атриумные конструкции получили широкое распространение в качестве производственных помещений (МЗ ГЭС, ТЭЦ и т.д.) [10]. Использование светопрозрачных конструкций перекрытия позволяет использовать в помещениях МЗ естественное освещение в полной мере. Инженерные разработки позволяют аккумулировать естественное освещение при помощи его отражения от потолков. В остеклении крыши используются движущиеся жалюзи, которые автоматически поворачиваются на угол, соответствующий углу падения солнечных лучей. Иногда используются световоды, позволяющие осветить глубокие помещения.

Основными особенностями объемно-планировочных и конструктивных решений, существенно влияющими на уровень пожарной безопасности МЗ, являются:

- многосветное пространство, которое развито в вертикальном направлении МЗ и объединяет различные уровни МЗ в общий объем;
- наличие поэтажных балконов и галерей, на которые выходят прилегающие вспомогательные помещения;
- развитая система помещений (кабельные галереи, помещения силовых турбин, производственные помещения и т.д.), которые расположены ниже уровня пола МЗ.

Характерный вид атриума МЗ производственного здания самой большой ГЭС Шон Ла, расположенной во Вьетнаме на реке Да, приведен на рисунке 1.6. Из рисунка 1.6 видно, что светопрозрачными является частично перекрытие зала

и частично вертикальные проемы, расположенные вблизи перекрытия на продольных стенах.

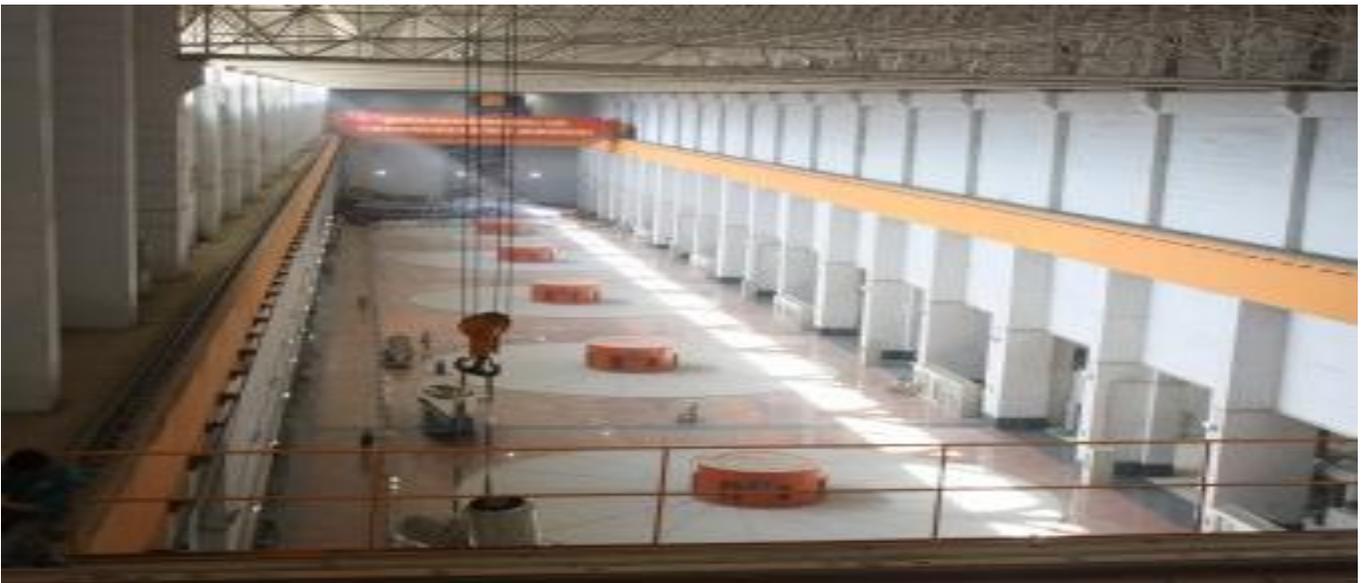


Рисунок 1.6 - Характерные виды атриумов МЗ производственных зданий ГЭС Шон Ла

На рисунке 1.7 показан внешний вид самого большого атриума МЗ ТЭС во Вьетнаме, расположенной в г. Фу Му 1. Из рисунка 1.7 видно, что все перекрытие МЗ практически полностью является светопрозрачным.



Рис. 1.7. Характерный вид атриума МЗ производственного здания ТЭС в г.Фу Му 1

Загорания в различных элементах маслосистемы относятся к наиболее опасным по последствиям аварийным ситуациям в турбинном отделении ОЭ [12]. Самым опасным видом загораний является пожар в МЗ [12]. Основными причинами возникновения пожаров являются вытекание масла из маслосистемы и его попадание на горячие поверхности, воспламенение пропитанной маслом тепловой изоляции трубопроводов, ветоши, строительного мусора, деревянных лесов, горение водорода, возгорание электрических двигателей, короткое замыкание проводов, кабелей и т.д.

В общем случае в МЗ горючими веществами и материалами являются горючие газы, такие как ацетилен и водород, горючие жидкости такие как турбинное масло, этиловый спирт и т.п., а также твердые горючие материалы (упаковка, оболочка кабелей, древесина и т.д.

Необходимое время эвакуации из МЗ, несмотря на их большие объемы, сравнительно небольшое. Например, натурные огневые опыты показали, что при горении турбинного масла на площади 5 м^2 полное задымление МЗ объемом более 8000 м^3 , характеризующееся снижением видимости до 1 м, происходит в течение 5 мин. [9].

Расчетное время эвакуации людей из МЗ, которые находятся в помещениях, расположенных ниже пола МЗ, является большим (около 10-15 мин.) [13].

Вышеуказанное время уменьшить практически невозможно из-за большой протяженности кабельных тоннелей и подагрегатных пространств и невозможности технологически увеличить количество эвакуационных лестниц, ведущих из нижних уровней в МЗ. В производственных зданиях используются горючие отделочные и строительные материалы с практически неизвестным химическим составом. Варианты пожарных нагрузок и материалов, различных по химическому составу и пожарной опасности и наиболее часто встречающихся на оэ, представлены в [5].

1.2. Токсичность продуктов горения веществ и материалов, находящихся на объектах энергетики

Продукты горения, образующиеся на пожаре, могут быть классифицированы с помощью четырех основных категорий [22]: удушающие (наркотические) газы, раздражающие газы, подострые токсиканты и сублетальные токсиканты.

В первую категорию входят удушающие газы. В общем, асфиксия может быть определена как недостаточная подача кислорода в организм человека, которая предотвращает поглощение кислорода клетками, что приводит к потере сознания и смерти. Основные удушающие газы включают угарный газ (CO) и цианистый водород (HCN) [22].

Вторая категория включает в себя раздражающие газы [22]. Они делятся на органические и неорганические раздражители в зависимости от источника и молекулярной структуры соединений. Значительные органические раздражители включают окисленные органические вещества, такие как акролеин и формальдегид. Неорганические раздражители включают окиси азота, окиси серы и галогениды водорода. Галогенводороды высвобождаются, когда пожар содержит галогенированные материалы, такие как поливинилхлорид, бромированные антипирены и политетрафторэтилены (тефлон). Воздействие раздражающих газов и дымов может вызвать трудности с дыханием с сильной болью в глазах, носу, горле и груди, а в некоторых случаях может привести к

смерти либо из-за ослабленного зрения и невозможностью спасения бегством или путем вдыхания дисперсных частиц, которые достаточно малы, и поэтому они проникают и накапливаются в дыхательных путях. Болезненное раздражение органов чувств происходит сразу в верхних дыхательных путях, тогда как воспаление легких и отек легких происходят в течение большего периода времени глубоко в легких.

Третья категория включает в себя подострые токсины, такие как канцерогены. Например, летучие органические соединения (VOCs), такие как бензол, и полуметучие органические соединения (SVOCs) такие, как полициклические ароматические углеводороды (PAHs), такие как нафталин, бенз(а)пирени и 2-нитрофенол [22].

Четвертая категория токсикантов соответствует сублетальным токсикантам, которые могут проявлять широкий спектр негативных последствий от дыхательной чувствительности (например, изоцианаты) до тератогенных и мутагенных эффектов, таких как те, которые вызваны галогенированными дибензо-*p*-диоксинами и дибензофуранами [22].

Токсичностью продукта горения при пожаре называется способность этого вещества вызывать поражение организма [23]. Количественно понятие токсичность понимают как меру несовместимости химического вещества с жизнью и определяют как величину, обратную величине средней смертельной дозы (*LD50*) или концентрации (*LC50*) [23]. Под дозой понимается количество вещества, воздействующее на организм. Уровнем дозы называется доза за единицу времени. Величины средних смертельных доз или концентраций выбраны потому, что они, соответствующие гибели 50% подопытных животных, наиболее статистически достоверны [23].

В таблице 1.6 представлены экспериментальные данные [14, 15] по токсичности продуктов горения пожарной нагрузки зданий и сооружений различного функционального назначения.

В 80% случаев согласно статистике [2] причиной смерти людей на пожарах является отравление продуктами горения. В предыдущие годы до настоящего времени этот процент растет.

В работе [24] выполнен обзор статистических данных по гибели и отравлению людей на пожарах в США, образованию токсичных газов, их воздействию на людей и животных, а также определению их токсикологической опасности.

В работе [24], среди причин смерти людей на пожарах выделены, в первую очередь, монооксид углерода и «другие токсичные газы в добавление к СО». На седьмом месте находится плотность дыма и нахождение раздражителей в дыму, которые воздействуют на зрение человека и мешают процессу его эвакуации.

При оценке опасности вредного воздействия на организм человека токсичных газов необходимо учитывать наиболее опасные компоненты смеси газов, которые преобладают в количественном отношении и характеризуются высокой биологической активностью.

Древесина и ее производные (фанера, бумага, картон, ДВП, ДСП и т.д.) применяются при изготовлении целых строений (жилые дома), несущих конструкций, мебели, для отделки помещений и т.п. Состав продуктов горения древесины с учетом применения различных, сложных по химическому составу компонентов (клеи, мастики, шпоны, пропитки и т.д.) насчитывает более 220 химических соединений [3, 4, 14, 15]. Основными и наиболее опасными токсичными газами являются оксид углерода, акролеин, циановодород, двуокись углерода, формальдегид, ксиленол, крезол и др. [3, 4, 14, 15].

Таблица 1.6 - Оценка токсичности материалов по произведению концентрации и времени экспозиции [14, 15]

Материал	Токсичность материалов по произведению концентрации и времени, мг / (л·мин)
Тефлон	32-85
Шерсть	117
ПВХ	127-312,5
Полиформальдегид	151
Полимочевинформальдегид	155,5
Бумажные обои	260,5
Полиизоциануат	275-305
Пенополистирол	290
Ковер из нейлона с пенопластовой прокладкой	298
ППУ	360-645
Латексные краски	402
ДВП	414
Целлюлозные волокна	464
Минеральные плиты на бумажной основе	486
Потолоч-е отделоч-е плиты на основе древесины	486
Огнезащитный пенополиуретан	509
Хлопковая ткань	561
Жесткий ППУ	661
Высокоэластичный ППУ	641
Картон из макулатуры	883
Древесина различных пород	1059-2647
Полиэфир	1274
Хлопок	1302
Гипсовые панели для стен	1521

Состав продуктов пиролиза и горения древесины приведен в таблице 1.7 [4].

Таблица 1.7 - Состав продуктов пиролиза и горения древесины [4]

Токсичный газ	Концентрация, % об.
Диоксид углерода	11,3 – 56,5
Монооксид углерода	0,3 – 3,2
Формальдегид	0,001
Акролеин	0,0005 – 0,132
Уксусная кислота	0,007 – 0,26
Ацетон	0,017 – 0,03
Ацетальдегид	0,0044 – 0,11
Метан	0,026 – 9,23
Метанол	0,009 – 0,14
Этилен	0,21

В работах [14, 15] приведены сведения об образовании токсичных газов при сгорании древесины и её производных (таблица 1.8).

Полимерные материалы используются в жилых, административных, общественных и производственных зданиях при отделке помещений, применяются при улучшении свойств материалов, из них изготавливаются различные предметы домашнего обихода, утеплители, герметики, теплозвукоизоляционные материалы, трубы, каналы для прокладки проводов и кабелей и т.д. Наиболее часто из полимерных материалов применяются полиэтилен, полистирол, полиуретан, поливинилхлорид, полипропилен, полиакрилонитрил, полиформальдегид и полиамид. Большинство этих веществ получают из нефтепродуктов. Следовательно, при горении этих веществ будут выделяться монооксид и диоксид углерода, углеводородные смеси, цианистый и хлористый водород, оксиды азота, серы и сажи.

Таблица 1.8 - Сведения об образовании токсичных газов при сгорании древесины и её производных [14, 15]

Токсикант	Концентрация продуктов горения, кг/м ³				
	Древесина	Древесина с лакокрасочным покрытием	ДСП	Фанера ФФ	Картон «Г»
Диоксид углерода	0,22	0,016	0,18	0,12	0,129
Оксид углерода	0,026	0,0045	0,0053-0,033	0,0269	0,0054
Диоксид азота	+	+	+	+	0,00027
Хлористый водород	+	+	+	+	+
Цианистый водород	-	-	+	+	0,00006
Метанол	0,0021	+	0,0017	$0,13 \cdot 10^{-7}$	+
Формальдегид	0,015	+	0,00068	+	0,00015
Акролеин	0,001	+	0,00006	0,000091	0,0002
Ацетальдегид	0,000084	0,0015	0,0024	$-0,66 \cdot 10^{-6}$	0,00096
Уксусная кислота	0,00015	0,00024	0,0004	0,0004	+
Ацетон	0,00044	0,00018	0,001	+	0,00022
Бензол	+	0,0015	0,0008	+	+
Толуол	+	0,0008	0,0007	+	+
Кумол	+	0,00009	+	+	+
Стирол	-	-	0,0004		-
Фенол	+	0,0017	0,0002	+	0,0031
Толуилендиизоцианат	-	-	-	-	-
Винилхлорид	-	-	-	-	-
Фосген	-	-	-	-	-
Диоксины (по 2,3,7,8-ТХДД)	+	+	+	+	+
Бенз(а)пирен (BaП)	+	+	+	+	+

Примечания: + - газ выделяется, но нет данных по концентрациям;

- - газ не выделяется

Состав продуктов горения наиболее распространенных полимеров приведен в таблице 1.9 [14, 15].

Таблица 1.9 - Состав продуктов горения полимерных материалов [14, 15]

Наименование материала (изделия из него)	Выделение продуктов горения кг/м ³				Концентрация, кг/м ³
	СО	СО ₂	HCN	Окислы азота	
Целлюлоза	0,06	1,152	-	-	0,045
Линолеум ПВХ	0,0693	0,777	-	-	0,061
Древесностружечная плита	0,108	0,857	-	-	0,049
Стеклопластик ПН-1	0,0579	1,270	0,06	-	0,063
Пенополиуретан ПУ-318	0,121	0,944	0,00519	0,0122	0,026
Пенополистирол	-	-	-	-	0,0397
Пенопласт ФРП	0,539	0,656	0,00156	0,00099	0,0066
Декоративный бумажнослоистый пластик	-	-	-	-	0,0112

Примечания:

+ - газ выделяется, но нет данных по концентрациям;

- - газ не выделяется при горении.

Анализ данных, приведенных в таблицах 1.6-1.9, показывают, что при горении веществ и материалов, характерных для основной пожарной нагрузки современных зданий ОЭ, выделяются практически одни и те же газы такие как монооксид и диоксид углерода, сероводород и хлороводород, циановодород, окислы азота, акролеин, бензол и т.д.

Концентрации вышеуказанных токсичных газов могут находиться на уровне летальных доз и в десятки раз превышать ПДК, а в некоторых случаях и смертельные концентрации. Учитывая, что в помещении могут находиться сотни килограммов пожарной нагрузки и все газы могут выделяться одновременно, то вероятность отравления и смерти человека, не успевшего своевременно произвести эвакуацию из здания, достаточно высока.

В таблице 1.10 представлены данные [14, 15] о концентрациях токсичных газов, образующихся при горении пожарной нагрузки зданий и сооружений различного функционального назначения, а также проведено сравнение с предельно-допустимыми и смертельными концентрациями.

В приложении 1 [5] представлены характеристики комбинированной пожарной нагрузки зданий и сооружений, в которых приведены значения удельных коэффициентов выделения трех токсичных газов (CO , CO_2 , HCl). Данная база данных широко используется при проведении научных и практических расчётов по методикам прогнозирования ОФП [16, 18-21]. В других научно-технических источниках обнаружить значения по выделению токсичных газов при горении пожарной нагрузки зданий и сооружений в таком сочетании невозможно.

Значения удельных коэффициентов образования токсичных газов при сгорании однотипных материалов в различных научных источниках отличаются друг от друга [4, 5]. Это связано с тем, что невозможно в экспериментах на различных по характеристикам опытных установках воспроизвести одинаковую термогазодинамическую картину развития пожара, которая зависит от количества и расположения проемов, площади и свободного объема помещения, массы сгорающего материала и т.д.

Следовательно, для выполнения расчетов времени блокирования путей эвакуации токсичными газами необходимо использовать данные по выделению токсичных газов, которые получены в максимально соответствующих реальной термогазодинамической обстановке пожара условиях при конкретных объёмно-планировочных решениях производственных зданий.

Таблица 1.10 - Содержание некоторых токсичных продуктов горения в воздухе помещений при пожарах [14, 15]

Токсичный газ	Концентрация, кг/м ³		
	Среднее на пожаре	ПДК	LC ₅₀
CO ₂	0,16	0,000916	0,2
CO	0,022	0,000001	0,003
CH ₃ OH	0,0007	0,5·10 ⁻⁶	0,005
CH ₃ COOH	0,0003	0,06·10 ⁻⁶	-
(CH ₃) ₂ CO	0,001	0,35·10 ⁻⁶	0,0024
HCHO	0,0001	0,003·10 ⁻⁶	0,0001-0,0002
CH ₂ CHCHO	0,0003	0,3·10 ⁻⁶	0,000005-0,0001
HCN	0,0005	0,01·10 ⁻⁶	0,00015-0,0002
NO	0,0003	0,04·10 ⁻⁶	0,00024
C ₂ H ₅ (OH)	0,0001	0,000005	-
C ₁₀ H ₈	0,0017	0,003·10 ⁻⁶	-
CH ₃ CHO	0,003	0,01·10 ⁻⁶	-
C ₆ H ₆	0,0033	0,1·10 ⁻⁶	0,0008
C ₆ H ₅ -CH ₃	0,0011	0,6·10 ⁻⁶	0,00056
C ₆ H ₅ CHCH ₂	0,001	0,002·10 ⁻⁶	0,00042
ПАУ (по пирену)	0,0056	0,03·10 ⁻⁶	-
HCl	0,014	0,2·10 ⁻⁶	0,0015
CH ₃ CN	0,00004	0,03·10 ⁻⁶	0,015
ТДИ C ₆ H ₄ (NCO) ₂	0,000016	0,02·10 ⁻⁶	-
CH ₂ CHCl	0,000026	0,005·10 ⁻⁶	-
ТХДД	0,9·10 ⁻⁸	1 нг/м ³	-
ТХДФ	0,5·10 ⁻⁹	0,5 пг/м ³	-
Cd	0,135·10 ⁻⁷	0,001·10 ⁻⁶	0,0005
SO ₂	0,001	0,5·10 ⁻⁶	0,006
Hg	0,008	0,003·10 ⁻⁶	-
Сажа	0,0096	0,05·10 ⁻⁶	-

Примечания: LC₅₀ – концентрация, вызывающая гибель 50 % подопытных животных при ингаляционном воздействии; - - нет данных

При решении вышеуказанной задачи экспериментальным путем необходимо выполнение большого количества трудоемких дорогостоящих

экспериментов в течение длительного срока времени. Учитывая применение оригинальных объемно-планировочных решений, выполнить достоверные расчеты по определению критических продолжительностей пожара в этом случае не представляется возможным. При этом появится необходимость проведения новых экспериментов для подтверждения и обоснования принимаемых объемно-планировочных решений, учитывающих безопасность людей при пожаре в конкретном здании. Поэтому необходимость разработки методов математического моделирования динамики ОФП, максимально отражающих особенности развития процессов реального пожара, возрастает с каждым годом.

Экспериментальные исследования выделения токсичных газов выполнены Щегловым П.П., Веселы В., Матюшиным А.В. [26-29]. В качестве горючих материалов применялись ткани [27, 28] и поливинилхлорид (ПВХ) [26]. Получены зависимости удельных коэффициентов выделения токсичных газов от изменения температуры и коэффициента избытка воздуха при пожаре, которые представлены в виде формул для определения объёмных концентраций токсикантов.

Рассмотрим влияние на организм человека токсичных газов, выделяющихся при пожаре.

В таблице 1.11 (по данным работ [30], [31]) представлены основные токсичные газы, выделяющиеся при сгорании пожарной нагрузки зданий и сооружений, а также их влияние на организм человека.

В [31] также отмечено, что при одновременном поступлении в организм человека токсичных газов, происходит сложный эффект совместного воздействия, а рост температуры при пожаре повышает чувствительность организма к токсическому воздействию вредных веществ.

Таблица 1.11 - Влияние токсичных газов на организм человека при пожаре [30]

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

Окончание таблицы 1.11

Токсичный продукт	Материал, из которого выделяется токсичный продукт	ПДК _{сс} , кг/м ³	Реакция организма человека
Ацетон	Полиизобутилен, ПВХ, полиметилметакрилат, полиамид, поликарбонат, твердые полиуретановые пластики.	$0,35 \cdot 10^{-6}$	Пары вещества способствуют слезоточению, кашлю, раздражающее и наркотическое действие.
Алифатические углеводороды	Природные и синтетические материалы.	нет данных	Обладает наркотическим действием.
Хлористый водород	ПВХ, древесина, ДСП, фанера, бумага, ППУ, хлорсодержащие полимеры.	$0,2 \cdot 10^{-6}$	Раздражающий газ, отравление HCl, и химические ожоги.
Фтористый водород	Вещества, содержащие фторированные углеводороды, фторсодержащие полимерные материалы.	$0,05 \cdot 10^{-6}$	Поражение верхних дыхательных путей.
Аммиак	Шерсть, шелк, полиакронитрил, полиамид, полиуретан.	$0,04 \cdot 10^{-6}$	Сенсорные раздражения, вызывает рефлекторные реакции верхних дыхательных путей.
Алифатические альдегиды	Искусственные и естественные материалы.	нет данных	Приводит к некрозу слизистых и дыхательных путей при вдыхании
Акролеин	Древесина, полиэтилен, полипропилен, бумага, нефтепродукты.	$0,03 \cdot 10^{-6}$	Замедление пульса. Вызывает рвоту, отек легких, возможна смерть.
Формальдегид	Древесина, ДСП, фанера, бумага, нейлон.	$0,03 \cdot 10^{-6}$	Обладает раздражающим действием.
бензол, толуол (аром. углерод.)	ПВХ, полистирол.	нет данных	Обладают наркотическим действием.

В составе продуктов горения веществ и материалов кроме вышеуказанных химических веществ обнаружены многие другие газообразные компоненты, опасность которых в условиях пожаров до конца не изучена.

Комбинированное воздействие токсичных газов на живой организм при горении материалов исследовано в работах [3, 32-34].

Как уже отмечалось, при сгорании пожарной нагрузки зданий и сооружений выделяется 50-220 газов, достоверно определить концентрации которых не представляется возможным в связи с несовершенством измерительных приборов и сложностью задач исследования [3].

Опыты с модельными газовыми смесями показали на неоднозначность эффектов при комбинированном действии токсичных газов, считающиеся наиболее опасными на пожаре, а также их зависимость от уровня концентраций, изменения состава химических компонентов, температуры среды и других факторов.

Одновременное воздействие на организм человека большого количества токсичных газов может иметь неоднозначные эффекты [3]:

- аддитивность действия токсичных газов (суммирование эффектов каждого из токсичного газов, наиболее распространённый эффект);
- синергизм (когда конечный результат превышает арифметическую сумму эффектов воздействия отдельных газов);
- антагонизм (когда эффект совместного действия газов снижается по сравнению с суммой эффектов воздействия отдельных газов).

Поступление токсичных продуктов горения в организм человека при пожаре в зданиях и сооружениях, как правило, происходит при одновременно повышающейся температуре и понижающейся концентрации кислорода [4, 5], которые оказывают существенное влияние на период интоксикации, сопровождающееся кислородной недостаточностью органов и тканей человека и получило термин «гипоксия» [3].

Кислородная недостаточность вызывает увеличение объема дыхания, снижение внимания, нарушение мышечной деятельности и т.п. при концентрации

кислорода 16-17 % [3]. При концентрациях 12-15 % наблюдается одышка, учащение пульса, ухудшение умственной деятельности, головокружение и быстрая утомляемость. Коллапс и потеря сознания вызываются концентрациями кислорода 8 %, при 6 % - смерть в течение 7 минут [3].

Повышенная температура в помещении оказывает значительное влияние на развитие интоксикации организма и способствует ускоренному развитию признаков отравления. Это вызвано нарушением процессов терморегуляции организма, сопровождающихся учащением дыхания и сердечных сокращений, что ускоряет процесс абсорбции газо- и парообразных веществ через дыхательные пути и большее поступлению их в кровь.

Методики прогнозирования ОФП [18-21], используемые для расчета времен блокирования путей эвакуации токсичными газами при пожаре, не учитывают процесса комбинированного действия токсичных газов. В математических моделях предполагается, что каждый из токсичных газов оказывает вредное воздействие на организм человека независимо от других. Это упрощение влияния токсичных газов на организм человека обусловлено недостаточным уровнем современных знаний о физико-химическом процессе взаимодействия газов в условиях пожара и требует корректировки величин парциальных критических плотностей отдельных токсичных газов, как при их независимом воздействии, так и в смеси с другими газами.

В США существуют различные стандарты по оценке воздействия токсичных газов.

Американская Конференция Гигиенистов при Федеральной Промышленности (ACGIH) [35] оценивает ПДК загрязнений в воздухе производственного помещения при краткосрочной воздействии (T_{VL} – S_{TEL}) по безопасному уровню в течение 15 минутной экспозиции от одной вредной примеси.

ПДК является такая концентрация химического вещества, при которой при ежедневном воздействии на организм человека в течение длительного промежутка времени не происходит каких-либо заболеваний или патологических

изменений, обнаруживаемых современными методами исследования, и не нарушается биологический оптимум для человека.

Национальный институт охраны труда и здоровья (Администрация по охране труда и здоровья) использует понятие действующей немедленно опасной концентрации для жизни и здоровья (IDHL), при которой человек в течение 30 минут может покинуть опасное помещение без использования средств индивидуальной защиты органов дыхания и зрения без дальнейших последствий для здоровья. Стандарт применяется при определении необходимости использования средств защиты органов дыхания и зрения.

Для оценки работы пожарных используется понятие краткосрочной (10 минут) смертельной концентрации (STLC) [35].

В таблице 1.12 представлены предельно-допустимые концентрации загрязнений в воздухе [35], где STLC – кратковременная смертельная концентрация; IDHL – действующая опасная концентрация для жизни и здоровья человека; STEL – краткосрочная предельно-допустимая концентрация.

На основании обзора данных источников можно выбрать аварийный предел воздействия (АВП) для каждого токсичного газа. Под АВП в течение времени τ для воздуха рабочей зоны понимается уровень концентраций химического вещества в воздухе рабочей зоны, превышающий ПДК рабочей зоны, который не вызывает у людей изменения физиологических реакций организма, выходящих за пределы пороговых и обратимых эффектов в условиях фиксированного пребывания в зоне химического заражения без применения средств защиты органов дыхания [35].

Таблица 1.12 - ПДК токсичных веществ (стандарты США) [35]

Соединения	STEL (15 мин), ppm	IDHL (30 мин), ppm	STLC (10 мин), ppm
Двуокись азота	5	50	>200
Хлороводород	5	100	>500
Циановодород	15	50	350
Акролеин	0,3	5	30-100

Окончание таблицы 1.12

Монооксид углерода	400	1 500	5 000
Двуокись углерода	15 000	50 000	100 000
Бензол	-	2 000	20 000

Примечание: - - нет данных.

Из анализа данных источников можно сделать следующие выводы:

- комбинированное воздействие токсичных газов, как правило, усложняет обстановку на пожаре образованием новых, более сложных химических соединений, вредное воздействие которых изучено на недостаточном уровне, а результаты ранее проведённых опытов периодически подвергаются сомнению специалистами разных стран;
- прогнозирование токсикологической обстановки на пожаре является чрезвычайно важной задачей, которое позволяет обеспечить выполнение условия безопасной эвакуации людей из зданий и сооружений как без средств индивидуальной защиты, так и с ними;
- высокая токсичность газовой среды помещения при пожаре требует научно-обоснованного выбора средств индивидуальной защиты для людей в течение эвакуации;
- необходим научно-обоснованный выбор величин АВП для расчета критической продолжительности пожара по токсичным газам;
- наиболее опасным токсикантом является монооксид углерода;
- важной задачей, которая позволяет обеспечить выполнение условия безопасной эвакуации людей из ОЭ как без средств индивидуальной защиты, так и без них, является разработка достоверного метода расчета парциальных плотностей токсичных газов, распространяющихся на пожарах в помещениях, который учитывает конкретные объемно-планировочные решения помещений и физико-химические свойства горючих веществ и материалов, находящихся в помещениях.

1.3. Методы оценки токсичности продуктов горения.

В соответствии с работой [36] существуют три основных подхода, которые используются для оценки токсичности продуктов горения раздражающего действия на пожарах:

- оценка снижения способности людей к эвакуации (правильное принятие решений и т.д.) при высоких концентрациях токсиканта (ASET);
- оценка скорости передвижения людей и их поведения во время эвакуации в зависимости от полученной дозы токсиканта при низких концентрациях (RSET);
- оценка длительных последствий для жизни и здоровья людей после пожара в зависимости от полученной дозы токсиканта и концентраций токсиканта.

Опасность токсичных газов оценивается с использованием понятия потенциала токсичности, который определяется как количественное выражение, выражающее зависимость между концентрацией дыма или токсичных газов и временем экспозиции с особой степенью физиологического отклика, например, смерть человека или животных [37].

Потенциал токсичности – количественное выражение, выражающее зависимость между концентрацией дыма или токсичных газов и временем экспозиции с особой степенью физиологического отклика, например, смерть человека или животных [36].

Оценка токсичности продуктов горения может проводиться по двум направлениям [3]:

- биологическая оценка (токсикометрия) продуктов горения, дополняемая количественным определением концентраций наиболее опасных газов;
- оценка по данным химического анализа, направленная на расчетное определение ожидаемого токсического эффекта или индекса токсичности с использованием данных, полученных при экспериментальных измерениях уровней выделения основных газообразных продуктов горения.

При первом подходе изучается токсическое действие продуктов горения на лабораторных животных. В этом случае, как правило, находят значение массы образца, продукты горения которого вызывают гибель животных или другой регистрируемый токсический эффект [3]. Преимущество такого подхода заключается в том, что определяется токсический эффект, зависящий не только от токсичности отдельных компонентов, но и от их комбинированного воздействия на живой организм.

Второй подход рассматривается как альтернатива первому, считается более доступным для исследовательских лабораторий (резко ограничено или исключено использование лабораторных животных) и существенно снижает затраты труда и времени [3]. Но обязательным условием реализации является наличие базы данных о токсических свойствах продуктов горения, а также характере связи токсических эффектов с концентрациями газов, временем воздействия и другими факторами [18].

Существует более 30 различных методов экспериментального определения токсичности [3, 14, 38]. В работе [38] выделены два основных критерия, позволяющие оценить достоверность и надежность конкретного метода:

- условия сгорания должны соответствовать полномасштабному пожару; метод должен быть протестирован на полномасштабных экспериментах;
- измерительная техника должна позволять измерить достаточное количество параметров газовой смеси и дыма для достоверного определения показателей токсичности.

В п. 4.20 [39] представлена методика экспериментального определения показателя токсичности продуктов горения полимерных материалов. В качестве критерия выбора режима основных испытаний принято наибольшее число летальных исходов в сравниваемых группах подопытных животных.

Как правило, материалы испытывают в одном из двух режимов – термоокислительного разложения или пламенного горения, в котором выделяется больше токсичных летучих веществ. Пламенное горение обеспечивается при

величине температуре 750 °С и плотности падающего на материал теплового потока 65 кВт·м⁻².

Вышеуказанная методика имеет ряд существенных недостатков.

1. Экспериментальный метод не отвечает основным вышеуказанным критериям, так как не воспроизводятся условия полномасштабного пожара и не измеряются концентрации основных токсичных газов.

2. В зависимости от состава материала при анализе продуктов горения в соответствии с п. 4.20.3.5 [39] определяется количественный выход оксида углерода, диоксида углерода, оксидов азота, цианистого водорода, альдегидов и других веществ. Оценка вклада оксида углерода в токсический эффект определяется по содержанию карбоксигемоглобина в крови подопытных животных. Однако для оценки токсичности других кроме СО газов не предложен метод нахождения следов их воздействия в организме. Кроме того, в соответствии с п. 4.20.1.5 для измерения концентраций токсичных газов предложено использовать газоанализатор ГИАМ-5М, который позволяет измерять только концентрации СО, СО₂ и О₂, что не соответствует реальной токсикологической обстановке на пожаре.

3. У подопытных животных - белых мышей, участвующих в испытаниях, в случае их смерти забор крови не производится, т.к. в соответствующих лабораториях проводится наблюдение за мышами в течение определённого срока, где оцениваются реакция и симптоматика у животных. Опасность комбинированного воздействия токсичных газов в камере сгорания при испытании образца в конечном итоге оценивается путём подсчёта выживших и погибших особей по истечению срока наблюдения за ними, что не позволяет отслеживать стадийную симптоматику при отравлении токсичными газами.

Все эти недостатки и несоответствия процедуры сертификации в значительной степени недооценивают и занижают реальную опасность материала с точки зрения токсичности при его термической деструкции на пожаре, в результате чего в условиях реального пожара материал, прошедший сертификацию, может послужить причиной отравления и гибели людей.

Для оценки токсичности конкретного строительного материала или горючей нагрузки помещения необходимо правильно выбрать наиболее опасный режим пожара. В соответствии с [38] пожары можно разделить на 6 типов:

I – самоподдерживающееся тление (например, сигарета, лежащая на мебели или постели);

II – беспламенное окисление (например, перегрев проводов без пламени);

III – беспламенное горение, сопровождаемое пиролизом материала (например, перегрев проводов без пламени);

IV – развивающиеся пламенна;

V – полностью развитое пламя, пожар, регулируемый нагрузкой;

VI – полностью развитое пламя, пожар, регулируемый вентиляцией.

Типы пожаров I, II и III обычно не рассматриваются, так как по оценкам, экспериментальным исследованиям и наблюдениям реальных пожаров они не приводят к смерти людей и животных от повышенных концентраций токсичных продуктов горения.

Наибольший практический интерес с точки зрения токсикологии составляют пожары типа IV-VI [50]. При этом необходимо знать точное отношение топливо/кислород.

Анализ данных источников позволяет сделать следующие выводы:

1. биологическая оценка продуктов горения, дополняемая количественным определением концентраций наиболее опасных газов, как правило, не является адекватной реальной токсикологической обстановки на пожаре из-за невозможности воспроизведения при проведении экспериментов полномасштабных термогазодинамических условий протекания пожара;

2. оценка по данным химического анализа, направленная на расчетное определение ожидаемого токсического эффекта или индекса токсичности с использованием данных, полученных при экспериментальных измерениях или теоретическом обосновании удельных коэффициентов выделения основных газообразных продуктов горения, является более достоверной и подходящей для использования в математических моделях расчета времен блокирования путей

эвакуации токсичными газами с целью выполнения условия безопасной эвакуации людей из зданий ОЭ.

1.4. Особенности воздействия монооксида углерода на организм человека

Согласно [40], клетки организма человека получают энергию с использованием кислорода. Вследствие больших расстояний между внешней средой и клетками необходимы специальные системы транспорта для доставки к клеткам кислорода и удаления из клеток углекислого газа, который образуется в результате окислительного обмена веществ. Вышеуказанные транспортные процессы переноса O_2 и CO_2 являются газообменными процессами. С помощью вентиляции легких кислород доставляется в альвеолярное пространство, откуда он с помощью диффузии поступает в кровь. Кровь переносит его к клеткам организма, в которые он проникает также с помощью диффузии (рисунок 1.8 [40]).

Таким образом, дыхание включает определенную последовательность процессов:

- внешнее дыхание, обеспечивающее вентиляцию легких;
- обмен газов между альвеолярным воздухом и кровью;
- перенос газов кровью;
- обмен газов между кровью в капиллярах и тканевой жидкостью;
- обмен газов между тканевой жидкостью и клетками;
- биологическое окисление в клетках (внутреннее дыхание).

Объем альвеолярной зоны составляет около 3000 мл в конце нормально выдоха, что существенно превышает объем анатомического мертвого пространства, равного примерно 150 мл или приблизительно 5% экспираторного объема альвеол. Дыхательный объем приблизительно в 3 раза больше, чем объем мертвого пространства, поэтому примерно $2/3$ свежего воздуха достигает альвеолярной зоны при каждом вдохе. Таким образом, свежий воздух поступает с помощью вдыхаемого (инспираторного) потока на поверхность газообмена. В конце вдоха в альвеолярной зоне находится смешанный газ, в то время как в воздухоносных путях мертвого пространства находится атмосферный,

несмешанный воздух. Завершающий дыхание участок пути газы поступают через альвеолярно-капиллярный барьер в кровь с помощью диффузии [41].

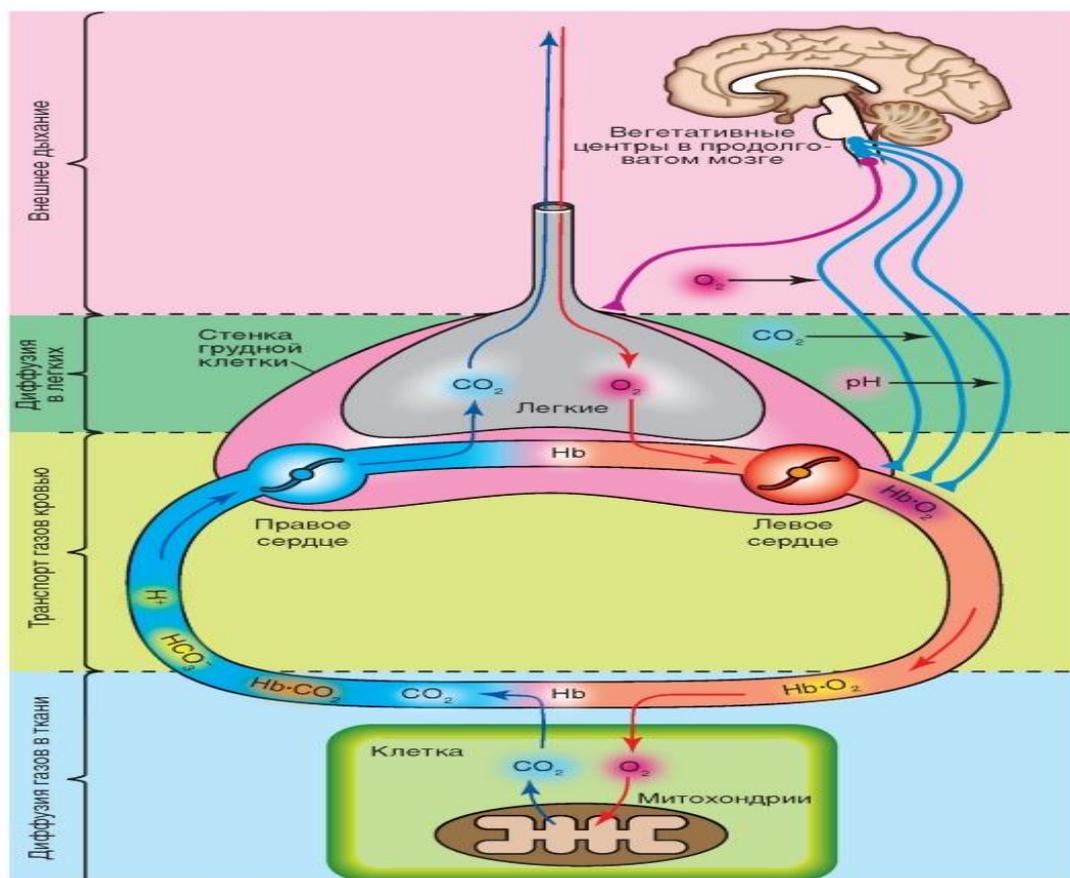


Рисунок 1.8 - Этапы процесса дыхания [40]

В соответствии с работой [40], альвеолярную вентиляцию за один дыхательный цикл можно рассчитать по формуле:

$$W = f(V_d - V_m), \quad (1.1)$$

где W – объемная скорость вентиляции легких, л/мин.; f – частота дыхания, 1/мин.; V_d – дыхательный объем, л; V_m – объем мертвого пространства, л.

Анатомическим мертвым пространством называется кондуктивная или воздухопроводящая зона легкого, не участвующая в газообмене. В вышеуказанное пространство входят верхние дыхательные пути, трахея, бронхи и терминальные бронхиолы. Анатомическое мертвое пространство практически соответствует кондуктивной зоне легких с объемом от 100 до 200 мл, а в среднем равно 2 мл на 1 кг массы тела, например, составляет 150 мл при массе тела человека, равной 75 кг.

Кислород и двуокись углерода проникают через барьер, разделяющий кровь и воздух, из области более высокого парциального давления в область более низкого, т.е. с помощью концентрационной диффузии.

Эритроцит попадает в легочный капилляр по следующему механизму. Парциальное давление кислорода p_{O_2} в смешанной венозной крови легочной артерии равно приблизительно 40 мм рт. ст. После попадания эритроцита в капилляр давление кислорода в альвеолярном газе на расстоянии менее 1 мкм от эритроцита увеличивается до около 100 мм рт. ст. Следовательно, кислород быстро проникает в эритроцит через барьер, где соединяется с гемоглобином, что приводит к повышению p_{O_2} . В результате разница давлений кислорода в альвеолярном газе и эритроците уменьшается, что приводит к уменьшению скорости его диффузии. В нормальном состоянии диффузионные свойства альвеолярной мембраны обеспечивают выполнение следующего условия: при высокой скорости связывания кислорода гемоглобином эритроцит не успевает пробыть в капилляре 1/3 требуемого времени, необходимого для достижения давлением кислорода в нем величины давления в альвеолярном газе. Такая скорость диффузии кислорода определяется формой кривой его диссоциации. Почти постоянная ее верхняя часть позволяет сделать вывод о том, что стимулирующая процесс диффузии разница давлений сохраняется, пока почти весь кислород не пройдет через барьер. Поэтому, в норме организма человека заметная разница давления альвеолярного газа и крови, находящейся в конце легочного капилляра, не обнаруживается. Это говорит о том, что легкие обладают большим диффузионным резервом [42].

Легочной вентиляцией называется процесс перемещения вдыхаемого воздуха в альвеолы, в которых происходит процесс газообмена воздуха с кровью. Некоторые характерные параметры процесса вентиляции легких представлены на рисунке 1.9.

В норме функционирования организма человека при объеме дыхания 500 мл и частоте дыхательных движений 15 раз в 1 мин в легкие поступает примерно 6-9 л/мин воздуха. Этот параметр называется общей легочной вентиляцией. Так как

объем воздухоносных путей (анатомически мертвое пространство) составляет около 150 мл, то примерно 350 мл из 500 мл воздуха достигает альвеолярного пространства. Оставшийся воздух задерживается в воздухоносных путях и затем при выдохе выходит наружу. Следовательно, объем свежего воздуха, поступающего в альвеолы за 1 мин, равен примерно $350 \text{ мл} \times 15 = 5,25 \text{ л/мин}$. Этот параметр называется альвеолярной вентиляцией. Альвеолярная вентиляция имеет исключительно важное значение для газообмена.

Приведенные значения параметров дыхания характерны состоянию покоя организма. Во время физической нагрузки потребление кислорода может увеличиваться до 46 л/мин, а общая легочная вентиляция может возрасти до 20 раз. Это происходит за счет увеличения, как величины дыхательного объема, так и частоты дыхания.

Монооксид углерода является одним из главных поражающих факторов в горящих и задымленных помещениях зданий при пожарах в вагонах транспорта, лифтах, самолетах, при вдыхании дыма горящих сигарет и т.д. Высокие концентрации монооксида и диоксида углерода образуются в случае горения напалмовых зажигательных смесей.

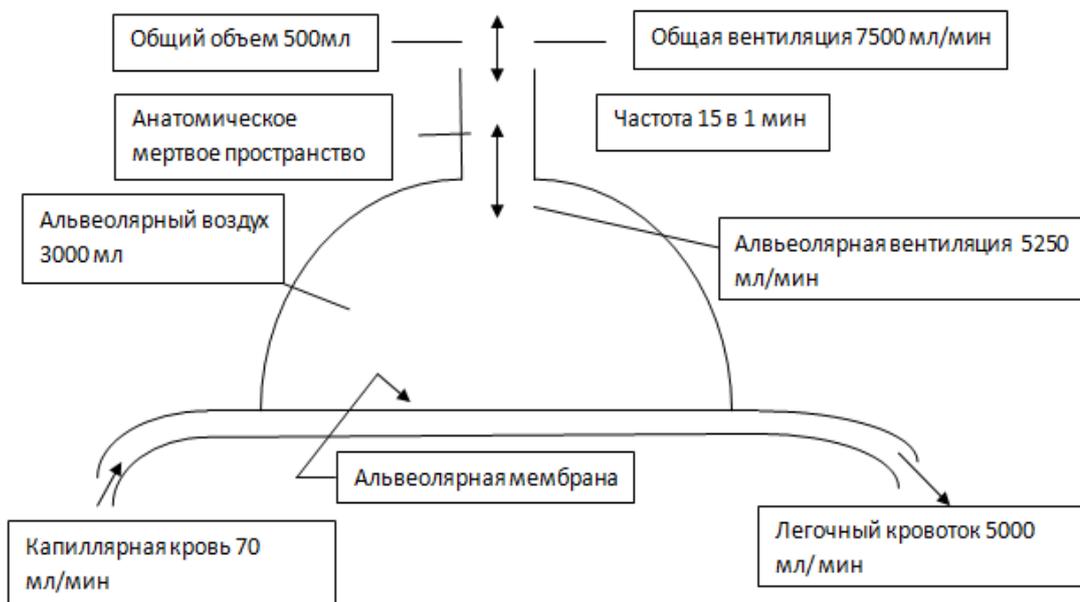


Рисунок 1.9 - Упрощенная схема легочных объемов и потоков воздуха

Монооксид углерода (угарный газ, CO) - молярная масса $28,0101 \pm 0,0011 \text{ г/моль}$, является одним из сильнейших токсичных газов, бесцветный, не имеющий

запаха, с плотностью 1,25 по воздуху. Слабо растворим в воде, лучше – в органических растворителях. Всегда выделяется на пожарах. При температуре 0°C и давлении 101 кПа (760 мм рт.ст.) имеет плотность 1,25 кг/м³.

Монооксид углерода относится к группе веществ, которые вызывают изменения пигмента крови – гемоглобина, т.е. является кровяным ядом. Токсическое воздействие СО на организм человека определяется его взаимодействием с гемоглобином, что приводит к образованию карбоксигемоглобина (HbCO), неспособного переносить кислород (гемическая (транспортная) гипоксия [63]).

В случае нормальных физиологических условий эндогенная продукция СО в результате распада гема (гемоглобина, миоглобина и цитохромов) приводит к образованию HbCO (< 1%). Проникновению СО в клетку и образованию HbCO препятствует мембрана эритроцитов. При минимальной концентрации СО в воздухе образование HbCO начинается в легочных капиллярах, расположенных на периферии эритроцитов. По мере увеличения содержания СО во вдыхаемом воздухе, начинается образование HbCO не только в периферических, но и в центральных отделах эритроцита. Во время этого процесса скорость образования HbCO прямо пропорциональна парциальной плотности СО во вдыхаемом воздухе. Максимальное значение HbCO в крови зависит от времени экспозиции, т.е. контакта человека с СО.

Гемоглобин обладает одинаковой способностью связывать кислород и монооксид углерода. Однако сродство Hb к СО в 250-300 раз больше, чем к O₂. При этом валентность железа в HbCO не меняется, а изменяются связи Fe²⁺. Все непарные электроны участвуют в образовании карбоксигемоглобина. Ассоциация СО с гемоглобином происходит в 10 раз медленнее, чем с O₂. Уровень карбоксигемоглобина увеличивают гемолиз и талассемия. Уровень концентрации HbCO составляет около 1-2% у некурящих людей. В крови курильщиков мгновенная концентрация HbCO равна приблизительно 5-10%, среднесуточная концентрация может колебаться в пределах 1,5 %-15 % [43].

Процесс диссоциации карбоксигемоглобина происходит приблизительно в 3600 раз медленнее, чем процесс диссоциация оксигемоглобина (HbO_2). Это приводит к тому, что HbCO очень быстро накапливается в крови даже в случае сравнительно небольшой концентрации CO , находящегося во вдыхаемом воздухе. Процесс образования HbCO нарушает транспорт O_2 к тканям организма и сдвигает константу диссоциации HbO_2 влево, затрудняя отщепление O_2 от HbO_2 . Кислородное голодание организма увеличивается. Реакция диссоциации карбоксигемоглобина зависит исключительно от парциального давления кислорода во вдыхаемом воздухе. Например, при вдыхании обычного воздуха период полураспада HbCO равен 320 мин, при вдыхании чистого кислорода при давлении 1 атм составляет 80 мин и под давлением 3 атм – 23 мин [43].

Монооксид углерода также обладает прямым повреждающим токсическим действием на клеточные мембраны и митохондрии, что приводит к нарушению обмена катехоламинов и аминокислот, а также к стимулированию апоптоза [43]. В результате этого процесса происходит отравление организма, сопровождающееся головокружением, тошнотой, рвотой, ослаблением зрения и потерей сознания. Причем физические нагрузки значительно ускоряют отравление организма человека.

Такие клинические проявления острого отравления человека, как головокружение, головная боль, тошнота и рвота при отравлении легкой степени и судороги, потеря сознания, кома и смерть при тяжелых случаях, зависят от концентрации CO во вдыхаемом воздухе и от времени его экспозиции (воздействия). В случае тяжелой физической работы легочная вентиляция резко увеличивается (до порядка 46 л/мин по сравнению с 6-9 л/мин в покое), поэтому, резко возрастает и поглощение CO организмом.

Отравление CO считается легким, если содержание карбоксигемоглобина в крови не превышает 20%; среднетяжелым — до 50%; тяжелым — до 60-70%. В случае содержания карбоксигемоглобина в крови больше 70% наступает быстрая смерть [44].

Влияние парциальной плотности монооксида углерода и длительности его воздействия на тяжесть интоксикации показано в таблице 1.13 [43].

Таблица 1.13 - Концентрации и симптомы при отравлении людей оксидом углерода [43]

Концентрация, кг/м ³	Длительность воздействия	Содержание НbCO, %	Симптомы отравления
1	2	3	4
0,000006	25 мин	-	Снижение цветовой и световой чувствительности глаз
(11-12)·10 ⁻⁶	5 ч	3,8	Нарушение точности оценки временных интервалов
0,000013	7-8 мин	1,6	Изменение биохимических и физиологических показателей
0,000031	3 ч	-	Снижение точности зрительного восприятия пространства и ночного зрения
0,000033	6-8 ч	3,5-4	Уменьшение содержания O ₂ в крови
(50-60)·10 ⁻⁶	2 ч	-	Снижение слуха. Изменения ЭЭГ.
	5 ч	-	Ухудшение выполнения психологических тестов
0,000055	1-3 ч	2,1-3,8	-
	5 ч	-	Увеличение латентности периода при восприятии сигналов
	6 ч	5	Уменьшение содержания O ₂ в крови
	8 ч	5-9	Увеличение порога зрительного восприятия
	-	2,5-3	Приступы стенокардии при физической нагрузке у больных ишемической болезнью сердца
0,00006	5 ч	4,7	-
	6 ч	-	Изменение ЭЭГ и частоты сердечных сокращений

Продолжение таблицы 1.13

$(80-110) \cdot 10^{-6}$	3,5-5 ч	7-10	Снижение скорости зрительного восприятия, ухудшение выполнения психологических и психомоторных тестов, координации мелких точных движений и аналитического мышления
0,00022	1-3 ч	6-10	Легкая боль в области лба
	3 ч	14	Нарушение работоспособности
0,00023	6 ч	16-20	Боль в области лба, ощущения давления на лоб, быстро исчезающие на свежем воздухе; расширение кожных кровеносных сосудов, снижение физической работоспособности
$(230-340) \cdot 10^{-6}$	5-6 ч	23-30	Головная боль. Ощущение пульсации в висках. Головокружение.
0,00034	4 ч	22-24	
	5 ч	26-27	
0,000345	30 мин	11,9	Головная боль у отдельных лиц
0,00044	1 ч	12	-
	2 ч	20	Явные признаки отравления
0,00044	4 ч	30	Тошнота, головная боль, сердцебиение
$(440-460) \cdot 10^{-6}$	1 ч	15-19	Боли в области лба и затылка, сердцебиение
	2 ч	21-28	
	2,5-3 ч	-	
$(460-690) \cdot 10^{-6}$	4-5 ч	36-40	Сильная головная боль, слабость, головокружение, туман перед глазами, тошнота и рвота, коллапс
0,00055	1 ч	14	Головная боль, сердцебиение
$(600-700) \cdot 10^{-6}$	15 мин	-	Снижение умственной и физической работоспособности
0,00066	1 ч	16	Первые симптомы отравления. Возможно выполнение лишь легкой физической работы

Продолжение таблицы 1.13

	2 ч	27	Тошнота, появление явных симптомов отравления
	4 ч	40	Тошнота, рвота, возможна потеря сознания
$(800-1000) \cdot 10^{-6}$	5 мин	-	Головная боль, первые признаки интоксикации, снижение работоспособности
	20-30 мин	-	Головная боль, общая мышечная слабость, тошнота; потери трудоспособности не было
$(800-1150) \cdot 10^{-6}$	3-4 ч	47-53	Сильная головная боль, слабость, головокружение, туман перед глазами, тошнота, рвота, учащение пульса, коллапс
0,00088	45 мин	-	Головная боль, головокружение, тошнота
	1 ч	22	Появление симптомов интоксикации
	2 ч	35	Тошнота, рвота, полная потеря трудоспособности, возможна потеря сознания, коллапс
	4 ч	50	Судороги, кома, возможна смерть
0,0011	2 ч	40	Выраженная картина отравления
0,00126	1,5-3 ч	55-60	Учащение дыхания и пульса; кома, прерываемая судорогами; чейнстоксово дыхание
0,0013	1 ч	28	Тошнота, сердцебиение, головная боль
	2 ч	45	Тяжелое отравление
0,00135	33 мин-1,5 ч	-	Сердцебиение. Легкое пошатывание, одышка при легкой мышечной работе, расстройства зрения и слуха
	2 ч	-	Пульсирующая головная боль, спутанность в мыслях

Окончание таблицы 1.13

1760 10^{-6}	20 мин	-	Головная боль, головокружение, тошнота
	2 ч	-	Потеря сознания, коллапс
$(1800-2300) \cdot 10^{-6}$	1-1,5 ч	61-64	То же. Ослабление дыхания и сердечной деятельности. Может наступить смерть
0,002	12-35 мин	50	Кома, судороги
0,003	1 ч	-	Смерть
$(2300-3400) \cdot 10^{-6}$	30-45 мин	64-68	Потеря сознания, коллапс. Может наступить смерть
0,00352	5-10 мин	-	Головная боль, головокружение.
	30 мин	-	Рвота, потеря сознания
$(3400-5700) \cdot 10^{-6}$	20-30 мин	68-73	Слабый пульс, замедление и остановка дыхания. Смерть
0,005	17 мин	-	Потеря сознания, судороги
0,0057	5-10 мин	-	Смерть
0,01408	1-3 мин	-	Потеря сознания, рвота, смерть

Примечание: - - нет данных

Таким образом, монооксид углерода при его концентрациях, характерных для начальной стадии пожара, может привести к чрезвычайно тяжелым последствиям для здоровья людей, подлежащих эвакуации или спасению, вплоть до их гибели.

1.5. Математические модели расчета концентраций токсичных газов при пожаре

Одни из самых опасных факторов пожара это токсичные продукты горения. Эти факторы количественно характеризуются парциальной плотностью (или концентрацией) каждого токсичного газа. Парциальная плотность компонентов газовой среды в помещении является параметром состояния и обозначается как ρ_i ,

(размерность – кг/м³), где индекс i относится к i -му газу. Сумма парциальных плотностей всех компонентов газовой среды равна плотности смеси газов ρ [45].

Массовой концентрацией χ_i токсичного i -го газа называют отношение парциальной плотности этого газа ρ_i к плотности смеси газов ρ [45], т. е.

$$\chi_i = \frac{\rho_i}{\rho}. \quad (1.1)$$

Распространение токсичных газов при пожаре в зданиях и сооружениях вызвано естественной конвекцией, влиянием работы систем дымоудаления, приточной вентиляции и пожаротушения и происходит в сложных термогазодинамических условиях при одновременном воздействии возмущающих течение факторов, таких как, неизотермичность, турбулентность, излучение, продольный и поперечный градиенты давления, сжимаемость, протекание химических реакций, переход ламинарного режима течения в турбулентный и т.д. [16].

Методы расчета концентраций токсичных газов в зданиях и сооружениях при пожарах после их реализации в программах для ЭВМ должны обеспечить получение надежных результатов при минимальных затратах:

- подготовительного времени, что может быть достигнуто упрощением геометрии объекта и граничных условий (выбор числа открытых дверей, окон и т.д.);
- машинного времени, что достигается увеличением шагов конечно-разностной сетки по координатам x , y , z и времени (Δx , Δy , Δz , $\Delta t \rightarrow \max$) (способы достижения: упрощение геометрии объекта; использование полностью консервативных конечно-разностных схем; обоснованный выбор дополнительных соотношений (модель турбулентности, модель лучистого теплопереноса и т.д.); оптимизация вычислительного процесса и выбор ограниченного числа сценариев развития пожара);
- времени обработки полученных результатов;
- времени оформления отчета.

Можно выделить основные особенности тепломассообменных процессов, происходящих при пожаре в помещении [16]:

- термодинамический процесс изменения параметров газовой среды помещения является практически изобарным, так как разница давления в помещении и в наружном воздухе (в случае отсутствия детонационного горения) меньше примерно 10-20 Па;

- скорости потоков газов значительно меньше скорости звука;

- тепловые эффекты химических реакций горения вносят основной вклад в тепловой режим помещения;

- скорости концентрационной диффузии газов в газовой смеси достаточно большие, что приводит к необходимости учета процесса турбулентной диффузии.

Помимо этого, климатические условия Вьетнама отличаются повышенной влажностью воздуха, которую необходимо учитывать при расчете.

В турбулентных потоках газовой среды, образующихся при пожаре в помещении, температура, скорость, давление и другие термогазодинамические параметры подвержены беспорядочным колебаниям (пульсациям). Мгновенные значения локальных параметров газовой смеси, находящейся в помещении, не определены однозначно системой исходных уравнений, граничными и начальными условиями, но существенно зависят от малых случайных возмущений [47]. Следовательно, полная постановка задачи должна быть следующей:

- даны распределения вероятностей полей всех параметров в начальный момент времени по объему помещения;

- необходимо найти вероятности реализации полей всех параметров в различные моменты времени по объему помещения.

При таком подходе конкретные задачи пожарной безопасности (например, проверка выполнения условия безопасной эвакуации людей) даже при современном развитии ЭВМ решить нельзя. Из-за этого используются уравнения, которые менее полно описывают турбулентные течения, такие как, уравнения для расчета плотности вероятности различных значений параметров [48], уравнения

Навье-Стокса [49] или уравнения Рейнольдса (когда рассматриваются осредненные по времени параметры) [49].

Решение нестационарных трехмерных нелинейных уравнений Навье-Стокса, в которые входят мгновенные значения параметров потока газа, с помощью прямых численных методов в случае сложных термогазодинамических условий пожара по прогнозам специалистов не будет возможным в течение ближайших десятилетий, несмотря на огромный прогресс в развитии быстродействия ЭВМ [50].

Системы вышеуказанных уравнений, описывающих законы сохранения осредненных по времени параметров газа (уравнения Рейнольдса) и используемых для расчета динамики ОФП пожара, могут быть практически решены только с помощью замыкания различными моделями турбулентности (так называемые «моментные» методы).

Современные модели турбулентности (k - ε , k - ω , алгебраические, модель Смагоринского и т.д. [48, 51]) при решении конкретной задачи имеют определенный набор эмпирических констант моделирования. Поэтому для каждой модели турбулентности ограничен ряд задач и условий, при которых она может давать достоверные результаты [51].

Выбор модели турбулентности при учете сложных граничных условий пожара, обусловленных, например, защитой оборудования от теплового воздействия пожара, представляет собой особую сложность. Эмпирические константы, входящие в различные модели турбулентности, еще недостаточно систематизированы даже для широкого круга стационарных безотрывных течений. Причем, применение усложненных моделей турбулентности не приводит к повышению точности расчетов [51]. Погрешности расчета с использованием существующих моделей турбулентности при определении, например, параметров теплового пограничного слоя могут достигать 20-40% (иногда до 90%)[51].

Универсальная модель турбулентности, разработанная в рамках градиентных, полуэмпирических теорий, в настоящее время не создана [51].

Пристенная турбулентность по-прежнему остается одной из наиболее сложных нерешенных проблем теории тепломассообмена.

Таким образом, для расчета характеристик конвективного турбулентного тепломассообмена при пожаре в помещении, в том числе, полей концентраций токсичных газов, необходим тщательный выбор метода расчета.

Методы расчета параметров термогазодинамики пожара в помещении согласно работам [5, 16] разделены на три группы: интегральные, зонные (зональные) и полевые (дифференциальные). Главное отличие методов расчета друг от друга заключается в разном уровне детализации термогазодинамической картины пожара.

В наиболее простых в математическом описании интегральных моделях [5, 16] в результате расчетов находятся среднеобъемные величины параметров газовой среды (давление, температура, парциальные плотности газовой среды, кислорода, токсичных продуктов горения и огнетушащего вещества, оптической плотности дыма).

Интегральная модель включает в себя систему нестационарных обыкновенных дифференциальных уравнений законов сохранения массы и энергии для всей газовой среды помещения, законов сохранения массы токсичных газов, кислорода, оптической плотности дыма и огнетушащего вещества.

Использование интегральных моделей для расчета величин концентраций токсичных газов в помещении корректно до предельной высоты 6 м [5, 52], так как эмпирические распределения величин параметров газовой смеси вдоль вертикальной оси получены для помещений с высотой, не превышающей 6 м. Точность этих распределений даже для помещений с высотой, меньшей 6 м, также требует экспериментального подтверждения в случае горения современных строительных материалов. Поэтому, зная среднеобъемную концентрацию токсичного газа в помещении, для расчета локальной концентрации этого газа, например, на уровне рабочей зоны, необходимо обосновать выбор распределения концентрации этого газа по высоте помещения.

Численное решение системы уравнений интегральной модели при его реализации на ЭВМ сопровождается вычислительными затруднениями [5, 16], потому что система уравнений представляет собой систему с «жесткой» связью между параметрами [60].

Аналитическое решение системы обыкновенных нестационарных дифференциальных уравнений интегральной модели существует только в ряде модельных случаев пожара [5, 16].

Область корректного применения интегральных моделей значительно ограничивается следующими существенными недостатками [16]:

- не учитывается трехмерная геометрия задачи (например, взаимное расположение горючего материала и проема);
- необходим ряд дополнительных соотношений, полученных из эксперимента или из расчетов с использованием теоретической модели с более подробным рассмотрением процесса (зонной или полевой), которые нужны для расчета распределений вдоль высоты помещения величин ОФП.

Вышеуказанные недостатки снижают точность расчета при решении практических задач пожарной безопасности, например, для проверки выполнения условия обеспечения безопасной эвакуации людей [16].

Зонная модель [5] используется для определения характеристик теплообмена в отдельных зонах помещения.

Количество и геометрические размеры зон выбираются таким образом, чтобы внутри них неоднородности распределений температур и других параметров газовой среды вдоль координатных осей были минимальными, или по другим предположениям, определяемым задачами исследования, например, местом расположения горючего материала в помещении и т.д. [5, 16].

Внутри каждой зоны теплофизические свойства газовой среды можно принять постоянными и использовать более обоснованные формулы для расчета суммарных тепловых потоков, которые отводятся в ограждающие конструкции по границам данной зоны. В зонных моделях используются известные закономерности гидродинамического и теплового взаимодействия струйного

течения с ограждающими строительными конструкциями при условном разбиении на характерные области (критическая точка, область ускоренного течения, область перехода ламинарного режима течения в турбулентный, а также область автомодельного течения) [52].

Использование зонных моделей для расчета концентраций токсичных газов в высоких помещениях более обоснованно, чем применение интегральных моделей, так как зонные модели более близки к реальной термогазодинамической картине пожара, например, к существованию припотолочного плоскопараллельного газового слоя в высоких помещениях (например, в МЗ ГЭС, ТЭС) [5].

Однако, в ряде работ [16, 53] показано, что припотолочный газовый слой в случае атриума со сложной геометрией не является плоскопараллельным, равномерно прогретым и задымленным, противореча тем самым основному допущению зонной модели.

Замкнутая система дифференциальных уравнений зонной модели решается с использованием простых конечно-разностных методов (например, Рунге-Кутта [54]).

Зонные модели имеют следующие основные недостатки [16]:

- необходима дополнительная экспериментальная или теоретическая информация из-за выделения конвективной колонки над очагом горения в отдельную зону, так как конвективная колонка при пожаре в помещении не является свободно-конвективной струей, которая распространяется в неограниченном пространстве;

- нужны дополнительные экспериментальные или теоретические соотношения, которые зависят от объемно-планировочных решений помещения, для расчета распределения параметров газовой смеси вдоль координатных осей внутри каждой зоны, как и в интегральных моделях.

Наиболее детальное математическое моделирование процессов теплообмена при пожаре в помещении, и, следовательно, расчета

концентраций токсичных газов дают полевые (или дифференциальные) модели [5, 16].

К основному достоинству полевых моделей относится то, что искомыми параметрами являются трехмерные нестационарные поля температур, концентраций компонентов газовой среды и частиц дыма, скоростей, давлений и т.п. по всему объему помещения.

Полевые модели являются наиболее сложными при их реализации из-за того, что они включают систему трехмерных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных законов сохранения массы, импульса и энергии. При замыкании системы уравнений нужно использовать дополнительные соотношения, необходимые для расчета турбулентного теплообмена и лучистого теплообмена.

Математическое моделирование реальных трехмерных теплообменных процессов при пожарах интенсивно развивается в России, Англии, Австралии, США и других странах.

Полевые модели имеют ряд чрезвычайно сложных, до конца не решенных проблем расчета теплообмена [16]:

- расчет турбулентного теплообмена в случае горения веществ и материалов при совместном воздействии большого количества возмущающих течение факторов (многофазность среды помещения, неизотермичность, лучистый перенос, сжимаемость, нестационарность, продольный и поперечный градиенты давления и т.д.);

- расчет лучистого теплообмена в случае неоднородной двух- или трехфазной газовой среды при турбулентном горении и взаимном влиянии на конвективный теплообмен;

- расчет прогрева и газификации горючих веществ и материалов под тепловым воздействием пожара.

Полевые модели имеют несколько основных недостатков [16]:

- численное решение замкнутой системы трехмерных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных является чрезвычайно трудоемким;

- разработка программы расчета на ЭВМ сопряжена с большими трудозатратами на ее отладку;

- сложно достоверно рассчитать достаточно подробные характеристики течения одновременно по всему объему помещения (например, в пристеночных областях и в зоне горения) из-за ограниченного параметрами даже современных ЭВМ числа точек конечно-разностной сетки;

- полевые модели требуют больших затрат машинного времени счета несмотря на огромный прогресс в быстродействии ЭВМ, поэтому они неэффективны при проведении многовариантных расчетов времени блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара и оптимизации систем противопожарной защиты.

Численные методы решения системы дифференциальных уравнений дифференциальной модели апробированы на достаточно большом объеме экспериментальных данных и теоретических исследований, относящихся к пожарам в помещениях [16].

Для расчета прикладных задач газодинамики и тепломассообмена на ЭВМ можно выделить такие программные комплексы как PHOENICS [55] (использованы конечно-разностные процедуры типа SIMPLE [56]), SOFIE [57] (специализированный программный продукт, реализующий трехмерные математические модели для условий пожара), FDS[58] и др. [16].

В случае специфических термогазодинамических условий пожара необходима модернизация большинства программ расчета тепломассообмена (внесение дополнительных уравнений и соотношений в систему основных уравнений модели), что является достаточно трудоемкой задачей. Также необходимо проведение тестирования программы на экспериментальных данных о параметрах тепломассообмена при пожаре. Следовательно, для пользователей программных комплексов требуются существенные усилия по их модернизации и

тестированию. Модернизация программы может быть и не достигнута, так как не все программы позволяют вносить все требуемые изменения непосредственно в исходный текст программы.

Например, при работе с программным комплексом SOFIE [57] требуются большие финансовые ресурсы, большие трудовые затраты по освоению, тестированию и настройке программы для решения конкретных задач пожарной безопасности.

Поэтому, создание специализированных программ для расчета тепломассообмена при пожаре является актуальной задачей.

Одной из наиболее сложных и до конца нерешенных проблем при расчете концентраций токсичных газов является ограниченность и недостаточное научное обоснование исходных данных по образованию токсичных газов, необходимых для решения дифференциальных законов сохранения масс токсичных газов.

Исходные данные по выделению токсичных продуктов горения представлены, например, в учебном пособии [5] и в монографии [4]. Удельные коэффициенты выделения токсичных газов приняты постоянными, не зависящими от термогазодинамической картины развития пожара (концентрации кислорода, температуры и т.д.).

Однако, в работах [6, 7] показано, что величины удельных коэффициентов выделения, например, CO, значительно изменяются от времени с начала горения, и их средние величины существенно зависят от периода осреднения по времени испытаний.

Кроме того, нет достаточно полного научного обоснования возможности использования величин коэффициентов образования токсичных газов, полученных в мелкомасштабных экспериментальных установках, при расчете тепломассообмена в реальных полномасштабных помещениях.

В статьях [6, 7] предложен новый подход к расчету концентраций токсичных продуктов горения, который заключается в определении среднеобъемных плотностей токсичных газов в каждый момент времени по их экспериментальным зависимостям от среднеобъемной температуры, полученным

в разработанной экспериментальной мелкомасштабной установке. При этом отпадает необходимость в решении дифференциальных уравнений законов сохранения масс токсичных газов, и, следовательно, в определении удельных коэффициентов выделения газов.

Точность предложенного подхода [6, 7] в значительной степени зависит от погрешности определения коэффициента теплопотерь в экспериментальной мелкомасштабной установке и в реальном полномасштабном помещении.

В результате анализа можно сделать следующие выводы:

1. полевой метод расчета является наиболее точным для прогнозирования токсикологической обстановки в зданиях и сооружениях, однако не позволяет выполнять многовариантные расчеты динамики концентрационных полей токсичных газов для обоснования объемно-планировочных и конструктивных решений, обеспечивающих безопасную эвакуацию людей из объектов энергетики Вьетнама, из-за большой трудоемкости при работе с программой и существенной продолжительности расчетов и обработки полученных результатов на ЭВМ;

2. необходима модификация интегральных и зонных моделей с учетом термогазодинамических условий пожара и широкого спектра выделения и образования токсичных газов для конкретных объемно-планировочных решений зданий и сооружений;

3. во всех типах математических моделей принятые допущения и упрощения реальной термогазодинамической картины приводят к существенному снижению точности расчетов концентраций токсичных газов; поэтому для выполнения достаточно точного расчета параметров теплообмена при пожаре в помещении необходимо уточнение методов определения удельных коэффициентов образования токсичных газов к конкретным условиям задачи;

4. отсутствуют научно-обоснованные методики расчета удельных коэффициентов выделения токсичных газов, учитывающие конкретные термогазодинамические условия пожара (температура, концентрация кислорода и т.п.);

5. использование коммерческих программных продуктов:

- требует необходимой квалификации пользователя;
- не позволяет оптимизировать вычислительный процесс при решении нетривиальных задач (в том числе в случае производственных зданий ОЭ);
- может привести к существенным погрешностям в определении величины пожарного риска и получении физически ошибочным результатам.

1.6. Выводы по первой главе

Из анализа литературных источников сделаны следующие основные выводы.

1. Проблема обеспечения безопасности людей при пожарах на объектах энергетики Вьетнама является наиболее актуальной и острой среди других проблем пожарной безопасности вышеуказанных объектов.

2. Наиболее опасным токсичным газом, образующемся при сгорании характерных для объектов энергетики горючих веществ и материалов и воздействующим на людей во время их эвакуации и спасения, является монооксид углерода.

3. Отсутствуют оценки влияния концентрации и времени экспозиции СО при физической нагрузке и повышенной скорости вентиляции легких на степень интоксикации организма человека. Необходим научно-обоснованный выбор критических величин плотности СО по условиям безопасной эвакуации и спасения людей при пожаре.

4. Современные математические модели расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода не учитывают в полной мере реальные характеристики характерных для объектов энергетики горючих веществ и материалов по выделению СО, а также непосредственное воздействие СО на организм человека.

5. Современные базы данных по удельному коэффициенту выделения СО (и других токсичных газов) составлены по результатам экспериментов, проведенных в мелкомасштабных экспериментальных установках, и ограничены по количеству горючих веществ и материалов. При этом недостаточное научное

обоснование имеет методика получения осредненных величин коэффициентов выделения, а также возможности использования коэффициентов образования токсичных газов, полученных в мелкомасштабных экспериментальных установках, при расчете пожара в полномасштабных помещениях.

6. Для обеспечения безопасной эвакуации и спасения людей при пожарах на объектах энергетики Вьетнама необходимо разработать научно-обоснованные рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации СО с целью обеспечения безопасной эвакуации и спасения людей с учётом объёмно-планировочных и конструктивных решений зданий объектов.

По результатам проведенных исследований можно сформулировать **цель диссертационной работы**: разработка методики расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода на ОЭ Вьетнама, использующей экспериментальные данные по параметрам процесса горения характерных для ОЭ горючих веществ и материалов и учитывающей непосредственное воздействие СО на организм человека, для обеспечения безопасной эвакуации и спасения людей при пожаре.

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

- провести анализ литературных источников по расчету времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре в помещении, а также по воздействию СО на организм человека с целью обоснования критических значений концентрации СО во время эвакуации и спасения людей при пожаре;

- разработать методику расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода на основе применения модифицированных интегральной и зонной моделей прогнозирования термогазодинамики пожара, которые используют теплофизические и химические свойства горючих веществ и материалов, характерных для ОЭ Вьетнама, а также учета степени отравления организма человека во время его эвакуации и спасения;

- провести экспериментальные исследования в мелкомасштабной опытной установке горючих веществ и материалов, характерных для ОЭ Вьетнама, с целью получения экспериментальных зависимостей, необходимых для замыкания предложенных модифицированных интегральной и зонной математических моделей;

- выполнить численные эксперименты по определению времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода в типовых помещениях ОЭ Вьетнама с использованием предложенных и существующих математических моделей, а также провести сопоставление с экспериментальными данными и результатами расчетов в мелкомасштабной опытной установке;

- разработать научно-обоснованные рекомендации по расчету времени блокирования путей эвакуации СО для обеспечения безопасной эвакуации и спасения людей при пожаре на ОЭ Вьетнама с учётом их объёмно-планировочных и конструктивных решений.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ МОНООКСИДОМ УГЛЕРОДА ПРИ ПОЖАРЕ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА

2.1. Интегральная модель

2.1.1. Основные положения и уравнения

В соответствии с работой [5], в интегральной математической модели пожара описывается процесс изменения во времени состояния газовой среды в помещении ОЭ в самом общем виде. Интегральная модель пожара позволяет получить информацию о средних значениях параметров состояния газовой среды в помещении в любой момент развития пожара. При этом для сопоставления среднеобъемных параметров среды с их предельно допустимыми значениями в рабочей зоне, применяются формулы, которые получены с использованием экспериментальных исследований пространственного распределения концентраций продуктов горения, температур, оптической плотности дыма и т. п.

Считаем, что с точки зрения термодинамики газовая среда, находящаяся в помещении с проемами, является открытой термодинамической системой (рисунок 2.1 [16]).

Интегральная модель, используемая для помещений МЗ ОЭ с высотой, большей 6 м, не позволяет достоверно провести расчет распределения величин ОФП вдоль высоты МЗ. Однако расчет среднеобъемных величин параметров физически обоснован из-за того, что основные уравнения модели являются выражением законов сохранения энергии и массы для газовой среды помещения МЗ.

В условиях однозначности задачи физическими условиями интегральной модели являются:

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

- теплофизические свойства каждого слоя материалов ограждающих конструкций;
- удельные параметры процесса горения горючего материала;
- температуры вскрытия проемов, которые разрушаются под воздействием повышенной температуры.

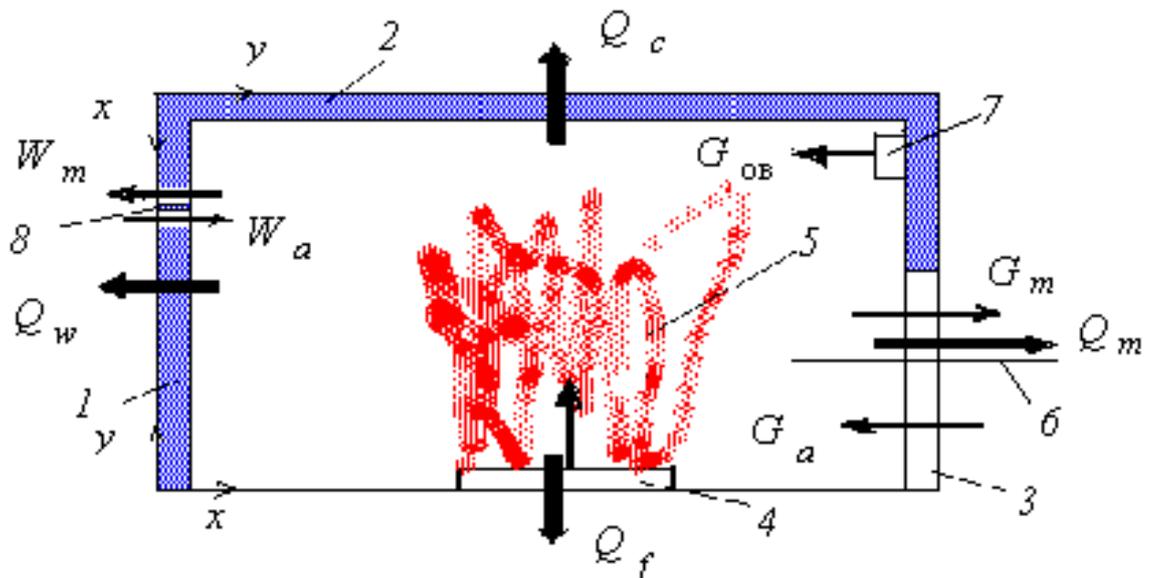


Рисунок 2.1 - Схема расчета тепломассообмена в помещении с использованием интегральной модели [16]: 1 – стены; 2 – перекрытие; 3 - открытый проем; 4 - горючий материал; 5 - очаг горения; 6 - нейтральная плоскость; 7 - система пожаротушения; 8 - механическая приточно-вытяжная вентиляция; G_a , G_m – массовые расходы поступающего воздуха и вытекающих наружу газов при естественном газообмене, кг/с; W_a , W_m – объемные расходы приточной вентиляции и дымоудаления, м³/с

На границах открытой термодинамической системы, совпадающей с внутренними поверхностями ограждающих конструкций и открытой поверхностью горючего материала, граничными условиями являются следующие:

- массовая скорость выгорания горючего материала;
- величина теплового потока, который отводится от газовой среды помещения в ограждающие конструкции.

На границах открытой термодинамической системы, которые совпадают с внутренними поверхностями открытых проемов, граничными условиями являются:

- массовые расходы газовой смеси, вытекающей наружу, и притока наружного воздуха;
- тепловой поток, излучаемый через проемы наружу;
- температура наружного воздуха;
- объемные расходы системы дымоудаления и приточной вентиляции.

Структура интегральной модели приведена на рисунке 2.2 [16].

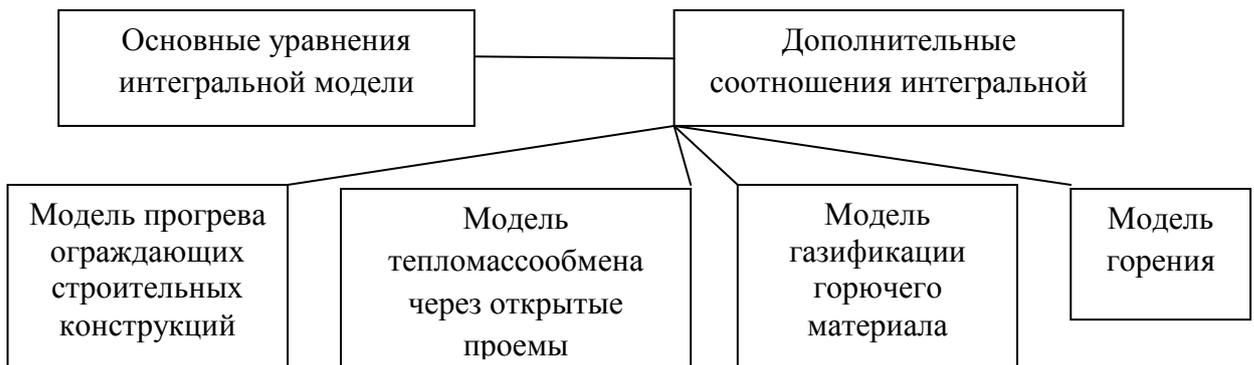


Рисунок 2.2– Структура интегральной модели

Интегральный метод расчета основан на фундаментальных законах природы (законы сохранения массы, импульса и энергии).

Состояние рассматриваемой в интегральной модели термодинамической системы изменяется в результате взаимодействия с окружающей средой.

Приступая к изложению сути интегрального метода описания процесса изменения состояния рассматриваемой термодинамической системы, отметим прежде всего следующие два факта.

Во-первых, всегда можно считать с большой точностью, что при пожаре газовая среда внутри помещения есть смесь идеальных газов [5].

Во-вторых, в любой момент времени в каждой точке пространства внутри помещения реализуется локальное равновесие [5]. Это означает, что локальные величины основных термодинамических параметров состояния (давление, плотность и температура) связаны между собой с помощью уравнения Клапейрона, т.е.

$$p = \rho R T, \quad (2.1)$$

где p – локальное давление, Н/м²; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); ρ – локальная плотность, кг/м³; T – локальная температура, К.

Термодинамическое состояние газовой среды помещения описывается следующими среднеобъемными параметрами: среднеобъемная температура T_m , К (выражение (2.2)); среднеобъемное давление p_m (2.3); среднеобъемная плотность ρ_m (2.4); среднеобъемная массовая концентрация i -го продукта горения X_{im} (2.5); среднеобъемная величина оптической плотности дыма X_{sm} (2.6):

$$T_m = \frac{1}{V} \int_V T dV; \quad (2.2)$$

$$p_m = \frac{1}{V} \int_V p dV; \quad (2.3)$$

$$\rho_m = \frac{1}{V} \int_V \rho dV; \quad (2.4)$$

$$X_{im} = \frac{1}{V} \int_V X_i dV; \quad (2.5)$$

$$X_{sm} = \frac{1}{V} \int_V X_s dV, \quad (2.6)$$

где V – свободный объем помещения, м³; X_i – локальная массовая концентрация i -го продукта горения; X_s – локальная оптическая плотность дыма, Нп/м;

Уравнения законов сохранения массы (2.7) и энергии (2.8) газовой среды, законов сохранения массы кислорода (2.9), i -го токсичного газа (2.10) и оптической плотности дыма (2.11), используемые для расчета параметров газовой среды помещения ОЭ имеют вид [16]:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \Psi + G_a + \rho_a W_a - G_m - \rho_m W_m; \quad (2.7)$$

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{p_m V}{k_m - 1} \right) = \Psi \eta Q_{\text{н}}^{\text{п}} + c_{pa} T_a (G_a + \rho_a W_a) - \\ - c_{pm} T_{\text{мпр}} (G_m + \rho_m W_m) - Q_s - Q_{\text{пр}}; \quad (2.8)$$

$$V \frac{d(X_{\text{O}_2 m} \rho_m)}{d\tau} = -\eta L_{\text{O}_2} \Psi + X_{\text{O}_2 a} (G_a + \rho_a W_a) - X_{\text{O}_2 \text{мпр}} (G_m + \rho_m W_m); \quad (2.9)$$

$$V \frac{d(X_{im} \rho_m)}{d\tau} = \eta L_i \Psi - X_{im \text{пр}} G_m; \quad (2.10)$$

$$V \frac{dX_{sm}}{d\tau} = D_s \Psi - X_{sm \text{пр}} \left[\frac{G_m + \rho_m W_m}{\rho_m} + k_s F_{\text{ок}} \right], \quad (2.11)$$

где Ψ – скорость газификации горючего материала, кг/с; V – объем помещения, м³; τ – время, с; W_a , W_m – объемные расходы приточной вентиляции и дымоудаления соответственно, м³/с; G_a , G_m – массовые расходы поступающего воздуха и вытекающих наружу газов при естественном газообмене соответственно, кг/с; ρ_a – плотность наружного воздуха, кг/м³; ρ_m – среднеобъемная плотность газовой среды помещения, кг/м³; p_m – среднеобъемное давление, Па; k_m – среднеобъемный показатель адиабаты газовой среды помещения; $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; η – полнота сгорания; $Q_{\text{пр}}$ – тепловой поток, излучаемый через проемы, Вт; Q_s – суммарный тепловой поток, отводимый в ограждающие конструкции, Вт; $T_{\text{мпр}} = a_T T_m$ – средняя температура газов, выходящих через проемы, К; a_T – коэффициент, учитывающий отличие средней температуры выходящих газов от среднеобъемной температуры газовой среды помещения; T_a – температура наружного воздуха, К; c_{pa} , c_{pm} – удельные изобарные теплоемкости воздуха и газовой среды, Дж/(кг·К); L_{O_2} – потребление кислорода; $X_{\text{O}_2 m}$ – среднеобъемная массовая концентрация кислорода в помещении; $X_{\text{O}_2 a}$ – массовая концентрация кислорода в наружном воздухе; $X_{\text{O}_2 \text{мпр}} = a_{\text{O}_2} X_{\text{O}_2 m}$ – средняя массовая концентрация кислорода в газах, выходящих через проемы; a_{O_2} – коэффициент, учитывающий отличие средней концентрации кислорода в выходящих газах от его

среднеобъемной концентрации в газовой среде помещения; X_{im} – среднеобъемная массовая концентрация i -го продукта горения; L_i – удельный коэффициент образования i -го токсичного газа; $X_{imпр} = a_i X_{im}$ – средняя массовая концентрация i -го токсичного газа в газах, выходящих через проемы; a_i – коэффициент, учитывающий отличие средней концентрации i -го токсичного газа в выходящих газах от его среднеобъемной концентрации в газовой среде помещения; X_{sm} – среднеобъемная величина оптической плотности дыма, Нп/м; $X_{smпр}$ – среднее значение оптической плотности дыма в газах, выходящих через проемы, Нп/м; D_s – дымообразующая способность горючего материала, Нп·м²/кг; k_s – коэффициент сегментации частиц дыма на поверхностях ограждающих конструкций; $F_{ок}$ – площадь внутренней поверхности ограждающих конструкций.

Уравнение скорости тепловыделения является [5]:

$$Q_{\text{пож}} = \eta \psi_{\text{уд}} Q_{\text{н}}^p F_{\text{г}}, \quad (2.12)$$

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

В работах [5, 16] отмечается, что полнота сгорания зависит от среднеобъемной массовой концентрации кислорода в помещении и для расчета предлагается использовать различные формулы. Одна из формул имеет вид [16]:

$$\eta = \eta_0 (2\bar{X} - \bar{X}^2), \quad (2.13)$$

где η_0 – полнота сгорания на открытом воздухе; $\bar{X} = (X_{O_{2m}} - X_{O_{2\min}}) / (X_{O_{2a}} - X_{O_{2\min}})$; $X_{O_{2\min}} = 0,08$ – массовая концентрация кислорода, когда прекращается горение.

При высоте нейтральной плоскости $z_{\text{н}} < z^* < z_{\text{в}}$ (“смешанный” режим газообмена), формула для массового расхода газов, выходящих через проем наружу, имеет вид [5]:

$$G_m = 2/3 \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} \xi b_{\text{пр}} (z_{\text{в}} - z^*)^{1,5}. \quad (2.14)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления проема; g – ускорение свободного падения, м/с²; $b_{\text{пр}}$ – ширина проема, м; z – координата по высоте,

отсчитываемая от уровня пола, м; z_n , z_b – координаты нижнего и верхнего краев открытого проема, м; z^* – высота нейтральной плоскости, м.

Дополнительные уравнения интегральной математической модели пожара для расчета расходов уходящих газов и поступающего через проемы воздуха подробно представлены в [5, 16].

Начальные и граничные условия задачи и методика численного решения замкнутой системы уравнений интегральной модели представлены в работах [5, 16].

Процессы газификации и горения пожарной нагрузки происходят в сложных физико-химических условиях, зависят от большого числа факторов, и их расчет является до конца не решенной проблемой. В математических моделях расчета этих процессов принимается большое число допущений и упрощений реального процесса. Поэтому для решения конкретных задач необходимо адаптация и уточнение существующих моделей к конкретным условиям пожара.

Все дифференциальные уравнения интегральной модели решены методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности [54].

2.1.2. Особенности расчета концентраций токсичных газов

Непосредственно зависимости среднеобъемных величин токсичных газов от времени с начала пожара определяются из решения уравнения (2.10), выражающего закон сохранения массы i -го токсичного газа.

В вышеуказанное уравнение входит удельный коэффициент образования i -го токсичного газа (L_i), который определяется для конкретного горючего вещества или материала из справочных данных (например, работ [4, 5]).

Существующие базы данных по выделению токсичных газов при пожаре (например, работы [4, 5]) содержат данные для ограниченного количества веществ и материалов. При этом удельные коэффициенты выделения токсичных газов получены при проведении мелкомасштабных экспериментов и приняты постоянными, не зависящими от термогазодинамической картины развития пожара (концентрации кислорода, температуры и т.д.). Кроме того, использование

вышеуказанных коэффициентов выделения при расчете пожара в реальном полномасштабном помещении требует научного обоснования.

В работе [7] проведено сопоставление результатов мелкомасштабных экспериментов с данными литературных источников и аналитическим решением интегральной модели. Показано, что существенное отличие полученных величин удельного коэффициента образования СО от представленных в литературных источниках можно объяснить как в различии условий проведения экспериментов, так и тем, что химический состав оболочки кабелей ПВХ и масла трансформаторного в работе [7] и в опубликованных может значительно отличаться друг от друга.

В [7] показано, что величины удельных коэффициентов выделения и плотности СО незначительны на начальной стадии горения, когда концентрация кислорода практически не меняется. При снижении концентрации O_2 выделение СО резко увеличивается и плотность монооксида углерода быстро достигает ее критического значения.

Так же в [7] обнаружено, что средние величины удельных коэффициентов выделения СО существенно зависят от периода осреднения по времени испытаний. Осредненная величина L_{CO} может изменяться в случае хвойных древесных стройматериалов в 2,63 раза, для оболочки кабелей ПВХ – в 1,8 раза и масла трансформаторного – в 5,1 раза.

Поэтому в работах [6, 7] предложен другой подход к расчету концентраций токсичных продуктов горения, который заключается в определении среднеобъемных плотностей токсичных газов в каждый момент времени по их экспериментальным зависимостям от среднеобъемной температуры, полученным в разработанной экспериментальной установке. При этом отпадает необходимость в решении дифференциальных уравнений законов сохранения масс токсичных газов, и, следовательно, в определении удельных коэффициентов выделения газов. Однако точность предложенного подхода в значительной степени зависит от погрешности определения коэффициента теплопотерь в экспериментальной мелкомасштабной установке и в реальном полномасштабном помещении.

Поэтому необходима разработка метода и методики расчета распространения СО при пожаре в помещении с учетом теплофизических свойств конкретной пожарной нагрузки, характерной для ОЭ Вьетнама.

2.2. Зонная модель

2.2.1. Особенности и упрощения термогазодинамической картины пожара

В соответствии с работами [5, 16], зонные математические модели в основном используются при расчете динамики ОФП на начальной стадии пожара в помещении. На начальной стадии распределения параметров газовой среды внутри объема помещения имеют большую неравномерность (неоднородность). В течение этого периода времени пространство внутри помещения можно условно разделить на характерные зоны, которые существенно различаются величинами температур и составом газовой среды. Границы вышеуказанных зон в течение развития пожара существенно изменяются. С течением времени геометрические границы зон меняются, и контрастное различие параметров газа в этих зонах сглаживается. В общем случае, объем внутри помещения можно разбить на любое число зон. В этой главе рассматривается простейшая зонная модель пожара, которая применяется при условии, когда размеры очага горения значительно меньше размеров помещения.

Процесс развития пожара представляется в следующем виде [5]. После воспламенения горючих веществ и материалов, образующиеся газообразные продукты горения поднимаются вверх, создавая над очагом горения свободно-конвективную газовую струю. После достижения потолка помещения, вышеуказанная струя растекается, образуется припотолочный слой задымленного нагретого газа. Со временем толщина этого слоя увеличивается.

Согласно этим представлениям в пространстве помещения можно выделить три характерные зоны [5]: зона конвективной колонки над очагом пожара (зона I), зона нагретого задымленного припотолочного слоя (зона II) и зона холодного

воздуха (зона III). Математическая модель пожара, базирующаяся на вышеуказанные характерные зоны, называется трехзонной моделью. Схема этой модели показана на рисунке 2.3 [4].

Обозначения на рисунке 2.3 следующие: G_a , G_m – массовые расходы поступающего воздуха и вытекающих наружу газов при естественном газообмене через открытые проемы, кг/с; Ψ_r – массовая скорость газификации горючего материала, кг/с; W_a – объемный расход системы приточной вентиляции, м³/с; W_m – объемный расход системы дымоудаления, м³/с; Q_c , Q_{w1} , Q_{w2} , Q_f – суммарные (конвекция и излучение) тепловые потоки, поступающие в потолок, стены (ниже и выше нижней границы припотолочного слоя) и пол, Вт; $Q_{пр}$ – тепловой поток, излучаемый через открытые проемы наружу, Вт.

В случае ОЭ Вьетнама рассматриваемую зонную модель обосновано можно применять для помещений больших высот и объемов, в основном для МЗ.

Принимаем следующие основные особенности пожара в ОЭ:

- газовая среда помещения является открытой термодинамической системой, которая обменивается массой и энергией с окружающей средой через открытые проемы и ограждающие конструкции помещения;

- газовая среда является многофазной, включающей в себя смесь газов (кислород, азот, продукты горения и газификации горючего материала) и мелкодисперсных твердых и/или жидких частиц дыма.

- припотолочный слой является равномерно прогретым и задымленным, а также плоскопараллельным перекрытию в любой момент времени пожара;
- существует резко выделенная граница между зонами припотолочного слоя и холодного воздуха бесконечно малой толщины, на которой термодинамические параметры изменяются скачкообразно;
- мелкодисперсные частицы дыма и огнетушащего вещества при расчете термогазодинамических параметров газовой смеси не учитываются, так как доли тепловой энергии и массы, приходящейся на вышеуказанные частицы, пренебрежимо малы по сравнению с соответствующими величинами для газовой фазы,;
- отсутствует тепломассообмен между зоной холодного воздуха и припотолочным слоем;
- газовая смесь является смесью идеальных газов, так как при атмосферном давлении свойства реальных газов (кислород, азот, окись и двуокись углерода и т.п.) близки к идеальным;
- теплофизические свойства газовой смеси (удельная изобарная теплоемкость, газовая постоянная и показатель адиабаты) принимаются равными соответствующим величинам для сухого воздуха из-за того, что различие между термодинамическими свойствами воздуха и продуктов горения пренебрежимо мало в диапазоне температур, характерных для условий пожара в помещении;
- геометрическое положение горючих веществ и материалов в помещении не оказывает влияния на характеристики тепломассообмена с окружающей средой через открытые проемы и теплоотвода в ограждающие конструкции.

2.2.2. Основные уравнения

Рассмотрим зону *I* (зона конвективной колонки, рисунок 2.3). Для расчета массовых расходов и температур в сечениях конвективной колонки используем выражения работы [5]:

$$G = 0,21 \left[\frac{g \rho_0^2 Q_{\text{пож}} (1 - \chi)}{c_p T_0} \right]^{\frac{1}{3}} (z + z_0)^{\frac{5}{3}}, \quad (2.15)$$

$$T = T_0 + \frac{Q_{\text{пож}} (1 - \chi)}{c_p G}, \quad (2.16)$$

где $Q_{\text{пож}} = \eta \Psi Q_{\text{н}}^{\text{п}} = \eta \Psi_{\text{уд}} Q_{\text{н}}^{\text{п}} F_{\text{г}}$; $Q_{\text{пож}}$ – скорость тепловыделения, Вт; $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая рабочая теплота сгорания, Дж/кг; $\Psi_{\text{уд}}$ – удельная скорость выгорания, кг/(м²·с); g – ускорение свободного падения, м/с²; T_0 и ρ_0 – температура и плотность холодного (окружающего) воздуха; G – расход газов через сечение струи, отстоящее от поверхности горения на расстояние z , кг/с; c_p – удельная изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); $\chi = \frac{Q_{\text{wl}}}{Q_{\text{пож}}}$ – доля, приходящаяся на поступающую в ограждение теплоту от выделившейся в очаге горения; Q_{wl} – тепловой поток, отводящийся из зоны конвективной колонки в ограждения, Вт; z_0 – расстояние от фиктивного источника тепла до поверхности горения, м; z – координата поперечного сечения колонки, отсчитываемая от открытой поверхности горючего материала, м; $z_0 = 1,5 \sqrt{F_{\text{г}}}$ – расстояние от фиктивного источника тепла до поверхности горючего материала, м;

Рассмотрим зону (припотолочный задымленный нагретый слой, рисунок 2.3). Объем вышеуказанной зоны в момент времени τ составляет:

$$V_2 = F_{\text{пот}} (2h - z_k - \delta_{\text{м}}), \quad (2.17)$$

где z_k – координата нижнего края припотолочного слоя газов от поверхности горючего материала, м; $F_{\text{пот}}$ – площадь потолка, м²; $\delta_{\text{м}}$ – толщина слоя горючего материала, м; h – половина высоты помещения, м.

Масса газа, находящаяся в зоне II, составляет величину $m_2 = \rho_2 V_2$, где ρ_2 – средняя плотность смеси газов в припотолочном слое, кг/м³.

Давление в зоне II практически не изменяется и поэтому равно начальному значению, т.е. p_0 . Внутренняя (тепловая) энергия зоны II равна:

$$U_2 = c_v \rho_2 T_2 V_2 = \frac{c_v}{R} p_0 V_2 = \frac{1}{k-1} p_0 V_2, \quad (2.18)$$

где c_v – удельная изохорная теплоемкость, Дж/(кг·К); T_2 – средняя температура смеси газов в припотолочном слое, К; k – показатель адиабаты смеси газов; R – газовая постоянная смеси газов, Дж/(кг·К).

Уравнения законов сохранения массы и энергии для зоны II для первой фазы начальной стадии пожара имеют вид [5]:

$$\frac{d(\rho_2 V_2)}{d\tau} = G_k; \quad (2.19)$$

$$\frac{d(c_v \rho_2 T_2 V_2)}{d\tau} = c_p T_k G_k - Q_{wII} - \rho_0 \frac{dV_2}{d\tau}, \quad (2.20)$$

где τ – время, с; G_k – массовый расход газовой смеси, поступающей из конвективной колонки в припотолочную зону в момент времени τ , кг/с; Q_{wII} – тепловой поток, отводящийся из припотолочного слоя газа в ограждения, Вт.

Средние плотности и температуры в различных зонах помещения связаны между собой соотношением [5]:

$$\rho_0 T_0 = \rho_3 T_3 = \rho_1 T_1 = \rho_2 T_2. \quad (2.21)$$

Уравнение (2.21) применимо при условии равенства давлений во всех зонах, которое является приближенным, но достаточно точным для реальных пожаров [5]. После дальнейших преобразований уравнение энергии (2.20) для припотолочного слоя [5]:

$$-F_{\text{пот}} \rho_0 \frac{dz_k}{d\tau} = \left[(1 - \varphi) \frac{Q_{\text{пож}}}{c_p T_0} + G_k \right]. \quad (2.22)$$

Начальное условие к уравнению (2.22): при $\tau=0$ $z_k = 2h - \delta_m$.

После того как найдена функция $z_k(\tau)$, из решения уравнения (2.22) при заданном начальном условии находим зависимости от времени массового расхода газовой смеси, поступающей из конвективной колонки в припотолочную зону, и объема зоны припотолочного слоя:

$$G_k = f_1(\tau); V_2 = f_2(\tau). \quad (2.23)$$

Интегрируя уравнение материального баланса (2.19), получаем [5]:

$$\rho_2 = \frac{1}{F_{\text{пот}}[2h - z_K - \delta_m]} \int_0^\tau G_K d\tau. \quad (2.24)$$

После расчета плотности ρ_2 находится средняя температура припотолочного слоя газа:

$$T_2 = T_0 \frac{\rho_0}{\rho_2}. \quad (2.25)$$

Уравнение закона сохранения массы токсичного газа (продукт горения) во II зоне имеет вид:

$$\frac{d(\rho_i V_2)}{d\tau} = \Psi L_i. \quad (2.26)$$

где ρ_i – парциальная плотность i -го токсичного газа, кг/м³; L_i – удельный коэффициент образования i -го токсичного газа) (количество (масса) токсичного газа, образующаяся при сгорании 1 кг горючего материала [5]).

Из формулы (2.26) парциальная плотность i -го токсичного газа равна:

$$\rho_i = \frac{1}{V_2} \int_0^\tau \Psi L_i d\tau = \frac{L_i}{V_2} \int_0^\tau \Psi d\tau = \frac{L_i M_\tau}{V_2}, \quad (2.27)$$

где M_τ – количество (масса) горючего материала, выгоревшего к моменту времени τ , кг.

Уравнение закона сохранения оптической плотности дыма для зоны II имеет вид [5]:

$$\frac{d(X_{sm} V_2)}{d\tau} = D\Psi; \quad (2.28)$$

и, следовательно,

$$X_{sm} = \frac{1}{V_2} \int_0^\tau D_s \Psi d\tau = \frac{D_s M_\tau}{V_2}, \quad (2.29)$$

где X_{sm} – среднеобъемная величина оптической плотности дыма, Нп/м; D_s – дымообразующая способность горючего материала, Нп·м²/кг.

Система уравнений (2.15), (2.16), (2.22)-(2.25), (2.27) и (2.29) позволяет определить основные параметры зон конвективной колонки и припотолочного слоя. Однако число неизвестных больше числа уравнений, поэтому необходимы дополнительные соотношения.

2.2.3. Условия однозначности и метод численного решения

В соответствии с работой [46], условия однозначности задачи состоят из геометрических, физических, начальных и граничных условий.

Геометрические условия в зонной модели:

- размеры помещения по внутренним поверхностям ограждающих строительных конструкций: длина, ширина и высота;
- размеры проемов, открытых и вскрывающихся под действием повышенной температуры: высоты от уровня пола до нижнего z_n и верхнего z_b краев проема; ширина проема $b_{пр}$;
- размеры открытой поверхности горючего материала: площадь F_r (или длина l_r и ширина b_r при прямоугольной форме и т.п.);
- толщины каждого слоя ограждающих строительных конструкций.

Физическими условиями задачи являются:

- теплофизические свойства каждого слоя материалов ограждающих конструкций (плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности);
- теплофизические свойства газовой среды помещения, воздуха и огнетушащего вещества (удельные массовые изобарные теплоемкости, газовые постоянные);
- параметры горючего материала (удельная массовая скорость газификации, низшая рабочая теплота сгорания, удельный коэффициент выделения продуктов горения, удельный коэффициент дымовыделения, удельное потребление кислорода, линейная скорость распространения пламени в случае твердого горючего материала или время стабилизации горения для горючей жидкости);

- температуры вскрытия проемов, разрушающихся под воздействием повышенной температуры.

Граничные условия на границах открытой термодинамической системы, которая совпадает с внутренними поверхностями ограждающих конструкций и открытой поверхностью горючего материала, определяются следующим образом:

- находится величина массовой скорости газификации горючего вещества Ψ ;

- задаются температура и давление наружного воздуха.

Граничные условия на границах открытой термодинамической системы, которая совпадает с внутренними поверхностями открытых проемов, определяются следующим образом:

- заданы температура и давление наружного воздуха;

- находится значение теплового потока, излучаемого через проемы наружу;

- рассчитываются массовые расходы газовой смеси, вытекающей наружу, и притока наружного воздуха.

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

- к дифференциальному уравнению (2.22): $z_k = 2h - \delta_m$; $T_2 = T_0$;

- к уравнению (2.24): $\rho_2 = \rho_0$.

Все дифференциальные уравнения (в частности, уравнение (2.22)) решены методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности [54].

2.3. Полевая модель

2.3.1. Основные особенности и упрощения термогазодинамической картины пожара

В помещениях ОЭ тепломассообменные процессы характеризуются сложными термогазодинамическими условиями, когда одновременно воздействует ряд возмущающих течение факторов [16]:

- протекание химических реакций;

- неизотермичность;

- излучение;
- сжимаемость;
- продольный и поперечный градиенты давления;
- двух или трехфазность (одновременно находятся в объеме помещения нескольких фаз (газ + твердые частицы, газ+жидкость, газ+твердые частицы+жидкость));
- шероховатость поверхностей конструкций;
- кривизна поверхности; турбулентность;
- переход ламинарного режима течения в турбулентный.

Основными особенностями тепломассообменных процессов при пожаре в помещении являются [16] :

- скорость диффузии газов достаточно большая, поэтому необходим учет турбулентной диффузии;
- разность давлений в различных частях помещения не превышает 0,001 от величины среднего давления в помещении (когда отсутствуют взрывы с образованием ударных волн);
- тепловой режим помещения определяются тепловыми эффектами химических реакций;
- неравновесность процессов при высоких температурах может привести к существенно медленному установлению локального термодинамического равновесия, поэтому уравнение состояния может существенно отличаться от равновесного (при температурах, больших примерно 2000 К);
- скорости потоков газов существенно меньше скорости звука (при отсутствии детонационного горения и ударных волн).

Основные допущения и упрощения реальной термогазодинамической картины пожара в помещениях ОЭ принимаем следующими [16]:

- газовая среда, заполняющая помещение во время пожара, является смесью идеальных газов, что справедливо в диапазонах температур и давлений, характерных при пожаре в помещении ОЭ;

- локальное термодинамическое и химическое равновесие существует во всем объеме помещения, что дает возможность использовать равновесное уравнение состояния;

- термогазодинамические процессы соответствуют односкоростной и однотемпературной модели течения, так как принимаем, что локальные скорости и температуры смеси газов и твердых (или жидких) мелкодисперсных частиц одинаковы между собой (межфазное взаимодействие (температурный скачок и “скольжение” фаз друг относительно друга пренебрежимо малы));

- ионизация и диссоциация газовой среды при высоких температурах не учитывается;

- взаимное влияние турбулентности и излучения пренебрежимо мало;

- турбулентные пульсации не влияют на теплофизические свойства газовой среды;

- обратное влияние горения на скорость газификации горючего вещества или материала пренебрежимо мало, поэтому для расчета массовой скорости газификации пожарной нагрузки используем ее экспериментальные величины (например, в работе [7]) без учета текущих величин параметров газовой среды.

- химическая реакция горения является необратимой и одноступенчатой;

- баро- и термодиффузией пренебрегаем.

Поэтому, газовая среда, находящаяся в помещениях ОЭ рассматривается как вязкий сжимаемый теплопроводный идеальный газ.

2.3.2. Основные уравнения

Полевой метод является наиболее универсальным из существующих детерминистических методов расчета динамики ОФП. Этот метод основан на решении трехмерных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, которые являются математическими выражениями фундаментальных законов сохранения.

Структура полевой модели показана на рисунке 2.5.

Полевые модели используют дифференциальные уравнения в частных производных, которые описывают пространственно-временные распределения температур, давлений, скоростей газовой среды в помещении, концентраций компонентов газовой среды (кислорода, азота, продуктов газификации и горения). Для замыкания этих уравнений используются закон теплопроводности Фурье, реологический закон Стокса, закон диффузии Фика, закономерности радиационного переноса (закон Стефана-Больцмана) и т.д. Замкнутая система уравнений, которая описывает изменения во времени параметров газовой среды в каждой точке объема помещения чрезвычайно громоздка. Решение этой системы возможно только с помощью мощных ЭВМ. В результате решения получают поля скоростей, температур, концентраций кислорода, азота, продуктов газификации и горения в любой заданный момент времени протекания пожара [16].

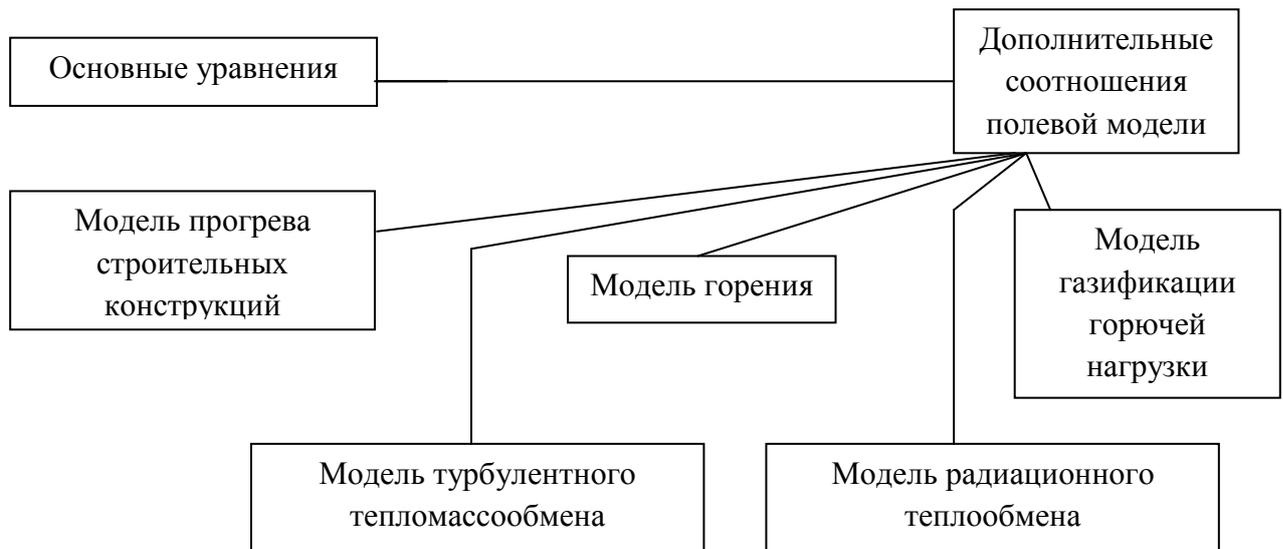


Рисунок 2.5 - Структура полевой модели

Рассмотрим основные уравнения полевой модели в случае ортогональной системы координат. Ось x направлена вдоль длины помещения, ось y – вдоль ширины помещения и ось z – высоты помещения.

Основные нестационарные трехмерные дифференциальные уравнения законов сохранения полевой модели приведены далее [16, 46].

Математическим выражением закона сохранения массы газовой смеси является уравнение неразрывности газовой смеси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho w_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w_z) = 0, \quad (2.30)$$

где τ – время, с; ρ – плотность, кг/м³, с; w_x, w_y, w_z – проекции скорости на соответствующие оси, м/с; x, y, z – координатные оси вдоль длины, ширины и высоты помещения соответственно, м.

Уравнения движения в проекциях на координатные оси записаны в виде:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_\tau) \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right); \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_y}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_\tau) \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right); \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_z}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - (\rho - \rho_o)g + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_\tau) \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_\tau) \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.33)$$

где ρ_o – плотность газовой среды за пределами нагретого слоя, кг/м³; μ – динамический коэффициент вязкости, кг/(с·м); p – давление, Па; μ_τ – коэффициент турбулентной вязкости, кг/(с·м); g – ускорение свободного падения, м/с².

Математическим выражением закона сохранения и превращения энергии является уравнение энергии:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda + \lambda_T + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\lambda + \lambda_T + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\lambda + \lambda_T + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (2.34)$$

где λ_T – коэффициент турбулентной теплопроводности, Вт/(м·К); c_p – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); λ_p – коэффициент радиационной теплопроводности, Вт/(м·К); q_v – интенсивность внутренних источников тепла, Вт/м³ ($q_v = q_{vk} + q_{vp}$, где q_{vp} – интенсивность внутреннего источника тепла за счет радиационного теплопереноса, Вт/м³; q_{vk} – вклад источников тепла другой физической природы, Вт/м³); T – температура, К.

Математическим выражением закона сохранения массы для компонентов газовой смеси является уравнение неразрывности:

$$\rho \frac{\partial X_i}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial X_i}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial X_i}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial X_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho (D_i + D_T) \frac{\partial X_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho (D_i + D_T) \frac{\partial X_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho (D_i + D_T) \frac{\partial X_i}{\partial z} \right) + m_i, \quad (2.35)$$

где D_i – коэффициент диффузии i -го газа, м²/с; D_T – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с; X_i – массовая концентрация i -го газа; m_i – интенсивность внутренних источников (стоков) массы, возникающих из-за образования (исчезновения) молекул данного газа вследствие протекания химических реакций, кг/(с·м³).

Уравнение закона сохранения оптической плотности дыма. Перенос дыма описывается уравнением [16]:

$$\frac{\partial X_s}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial X_s}{\partial x} + w_y \frac{\partial X_s}{\partial y} + w_z \frac{\partial X_s}{\partial z} = m_s, \quad (2.36)$$

где X_s – оптическая плотность дыма, Нп/м; $m_s = D_s \Psi / \Delta V$ – интенсивность внутренних источников оптической плотности дыма, возникающей из-за его образования (реакция горения), Нп/(м·с); D_s – дымообразующая способность

горючего материала, Нп·м²/кг; ΔV – объем газовой среды, внутри которой находится источник (или сток) массы, м³.

Для замыкания системы основных уравнений полевой модели необходимы дополнительные соотношения. Уравнение состояния смеси идеальных газов имеет вид:

$$p = \rho RT, \quad (2.37)$$

где R – газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К).

Уравнения теплофизических параметров смеси использованы в виде:

$$\rho = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i; \quad R = \sum_{i=1}^n g_i R_i; \quad c_p = \sum_{i=1}^n g_i c_{pi}, \quad (2.38)$$

где n – число газов в смеси; i – номер газовой компоненты смеси; r_i , g_i , R_i , c_{pi} , ρ_i – объемная и массовая доля, газовая постоянная (Дж/(кг·К)), удельная изобарная теплоемкость (Дж/(кг·К)) и плотность (кг/м³) i -ой компоненты газовой смеси. Теплоёмкости компонентов принимаются постоянными или определяются в зависимости от температуры.

Дополнительные уравнения полевой модели, используемые при расчете турбулентного теплообмена, моделировании радиационного теплообмена, расчете параметров газификации пожарной нагрузки и модели горения подробно приведены в работе [16].

2.3.3. Условия однозначности

Для решения системы уравнений полевой модели необходимы условия однозначности задачи [16].

Геометрические условия для полевой модели: размеры (ширина, длина и высота) помещения; координаты границ поверхностей предметов, которые находятся в помещении; координаты границ открытых проемов; координаты открытой поверхности горючего вещества или материала; координаты границ

проемов системы дымоудаления; координаты выходных отверстий системы пожаротушения.

Физическими условиями являются: теплофизические свойства газов газовой смеси; теплофизические свойства материалов слоев ограждающих конструкций; характеристики горючего материала (низшая рабочая теплота сгорания, удельная скорость газификации, удельные коэффициенты образования продуктов горения, удельный коэффициент потребления кислорода, скорость распространения пламени для твердого горючего материала или время стабилизации горения в случае горючей жидкости, удельный коэффициент дымообразования);

В качестве граничных условий на внутренних поверхностях ограждающих конструкций задаются:

- проекции скоростей равны нулю: $w_x = w_y = w_z = 0$;

- для уравнения энергии: $q_{\Sigma} = q_{\text{л}} + q_{\text{к}}$,

где $q_{\text{л}}$ – плотность лучистого теплового потока, Вт/м²; $q_{\text{к}}$ – плотность конвективного теплового потока, Вт/м²; для конвекции задаются два варианта:

1-й - температура на внешней границе пограничного слоя и коэффициент теплоотдачи;

2-й - используется двухслойная модель турбулентного пограничного слоя [46, 66];

- для остальных параметров Φ (плотности токсичных газов и кислорода, оптическая плотность дыма) принимается, что $\partial\Phi/\partial n = 0$, где n – нормаль к поверхности.

В качестве граничных условий на внутренних поверхностях ограждающих конструкций:

- на вентиляционных отверстиях: проекция скорости на ось, перпендикулярную плоскости отверстия, равна $w_{\text{в}} = W_{\text{пр}}/\rho_a$, где $W_{\text{пр}}$ – объемная производительность приточной механической вентиляции, м³/с; $w_{\text{в}} = W_{\text{выт}}/\rho$, где $W_{\text{выт}}$ – объемная производительность вытяжной механической вентиляции, м³/с;

- в месте подачи газообразного огнетушащего вещества: $w_{об} = G_{об} / (\rho_{об} F_{об})$, где $F_{об}$ – площадь отверстия для подачи, m^2 ; $G_{об}$ – массовый расход, $кг/с$.

Граничные условия на открытых проемах имеют вид:

- в области истечения газа из помещения наружу для всех параметров Φ принимаем, что $\partial\Phi / \partial n = 0$;

- в области поступления внутрь помещения наружного воздуха температура, давление и концентрации компонентов равны соответствующим параметрам атмосферного воздуха (смесь кислорода и азота).

Граничные условия на наружных поверхностях ограждающих конструкций (стены и перекрытие помещения):

- плотность теплового потока равна $q_{\Sigma} = q_{л} + q_{к}$; для расчета конвективного теплового потока задаются температура окружающего воздуха и коэффициенты теплоотдачи, которые находятся из критериальных уравнений для числа Нуссельта $Nu = C(Gr \cdot Pr)^n$ [46], где коэффициенты C и n различаются для горизонтальных и вертикальных поверхностей и зависят от произведения чисел Грасгоффа и Прандтля ($Gr \cdot Pr$);

- параметры наружного воздуха: скорость ветра, температура и давление определяются в соответствии с формулой [2]:

$$\frac{p_a}{p_1} = e^{-\frac{g}{RT_0} z}, \quad (2.39)$$

где p_1 – давление на уровне пола помещения ОЭ, Па;

- плотность лучистого теплового потока равна $q_{л} = \varepsilon_w \sigma (T_w^4 - T_a^4)$;

где T_w – температура наружной поверхности строительной конструкции, К; T_a – температура наружного воздуха, К; ε_w – степень черноты наружной поверхности конструкции.

Начальные условия (при $\tau=0$):

- помещение заполнено неподвижной смесью кислорода и азота (воздухом):

$$X_{O_2} + X_{N_2} = 1; X_{O_2} = 0,23; X_{N_2} = 0,77; X_{H_2} = 0; w_x = w_y = w_z = 0;$$

- скорость газификации горючего материала: $\Psi = 0$;

- параметры газовой смеси: температура T_0 ; давление (распределение по

высоте): $p / p_1 = e^{-\frac{g}{RT_0}z}$.

Нестационарные трехмерные дифференциальные уравнения в частных производных (2.30)-(2.36) полевой модели решается конечно-разностными методами (например, метод контрольных объемов [61]).

2.4. Методика расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре в производственных зданиях объектов энергетики Вьетнама

Временем блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара называется промежуток времени от начала пожара до момента времени достижения хотя бы одним опасным фактором пожара своего критического значения на высоте рабочей зоны на путях эвакуации [5].

Временем блокирования путей эвакуации токсичным продуктом горения называется промежуток времени от начала пожара до момента времени достижения данным токсичным продуктом горения критического значения хотя бы одной из его характеристик на высоте рабочей зоны на путях эвакуации.

Под критическими характеристиками токсичного газа будем понимать его концентрацию, токсодозу, поглощенную человеком, и параметр организма человека, на который непосредственно влияет данный токсичный газ.

В случае монооксида углерода будем рассматривать два варианта выбора критических параметров:

- по критической плотности CO [5, 18, 19] (наиболее распространенный подход);
- по критическим значениям (для эвакуации или спасения людей) концентрации карбоксигемоглобина в крови человека (глава 3 данной работы).

Определение времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода в помещениях ОЭ производится в следующей последовательности:

- сбор и анализ исходных данных;
- выбор наиболее опасных сценариев развития пожара;
- выбор математической модели расчета динамики ОФП;
- выбор метода численного решения математической модели (или программы расчета для ЭВМ);
- определение удельных массовых коэффициентов выделения токсичных газов (при расчете с использованием существующих методик [5, 18, 19]) или экспериментальных зависимостей $\rho_{CO,cp}=f(\rho_{O_2,cp})$ (глава 4 данной работы);
- проведение расчетов на ЭВМ;
- анализ результатов расчёта.

Блок-схема методики проведения расчётов представлена на рисунке 2.5.

Сбор исходных данных состоит из следующих этапов:

- выбор геометрической постановки задачи на основе анализа объемно-планировочных и конструктивных решений помещений здания ОЭ;
- определение горючих веществ и материалов, которые находятся в производственном здании, и нахождение их теплофизических параметров;
- выбор токсичных газов, выделяющихся при пожаре в производственном здании;
- анализ характеристик систем пожарной безопасности, находящихся в производственном здании;
- определение количества и мест размещения обслуживающего персонала здания.

Выбор сценариев развития пожара выполняется для нахождения наиболее неблагоприятного варианта его развития с точки зрения минимума времени блокирования путей эвакуации ОФП. Построение дерева событий [80] в данной работе не рассматривается.

Математическая модель выбирается из особенностей объемно-планировочных решений рассматриваемых помещений производственного здания в соответствии с областями применения математических моделей [18-21].



Рисунок 2.6. Блок-схема методики проведения расчётов

Соответственно выбранной модели определяется метод численного решения, который должен удовлетворять следующим основным критериям:

- использование полностью консервативных конечно-разностных схем;
- оптимизация вычислительного процесса с точки зрения минимального времени проведения расчета на ЭВМ.

Определение удельных массовых коэффициентов выделения токсичных газов проводится по методике [6, 7]. В данной работе (глава 4) определяются экспериментальные зависимости $\rho_{CO,cp}=f(\rho_{O2,cp})$ для горючих веществ и материалов, находящихся в помещениях ОЭ Вьетнама.

Исходные данные вводятся в разработанную или приобретенную программу расчета на ЭВМ.

После проведения расчетов выполняется их анализ, который позволяет определить время блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения в производственном здании ОЭ.

Из результатов расчета динамики ОФП с использованием моделей пожара определяются времена блокирования путей эвакуации отдельными токсичными газами, в том числе СО. Время блокирования путей эвакуации равно:

$$\tau_{\text{бл}} = \min \left\{ \tau_{\text{бл}}^{\text{п.в.}}, \tau_{\text{бл}}^T, \tau_{\text{бл}}^{\text{т.г.}}, \tau_{\text{бл}}^{\text{O}_2}, \tau_{\text{бл}}^{\text{т.п.}} \right\}, \quad (3)$$

где $\tau_{\text{бл}}^{\text{п.в.}}, \tau_{\text{бл}}^T, \tau_{\text{бл}}^{\text{т.г.}}, \tau_{\text{бл}}^{\text{O}_2}, \tau_{\text{бл}}^{\text{т.п.}}$ – времена блокирования путей эвакуации по потери видимости, температуре, токсичным продуктам горения, кислороду и тепловому потоку, с.

2.5. Выводы по второй главе

1. Все типы математических моделей расчета динамики ОФП используют в дифференциальных уравнениях для расчета концентраций СО удельные коэффициенты его выделения, которые получены в мелкомасштабных экспериментальных установках для веществ и материалов, химический состав которых не соответствует веществам и материалам, находящимся в ОЭ Вьетнама.

2. Для повышения точности расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода необходимы модификации математических моделей и методики расчета термогазодинамики пожара, учитывающие физико-химические свойства процесса горения веществ и материалов, характерных для ОЭ Вьетнама.

3. Критическое значение плотности СО, необходимое для определения времени блокирования путей эвакуации, не учитывает особенности процесса поступления СО в организм человека и его влияние на состояние человека во время его эвакуации или спасения. Поэтому необходима разработка математической модели расчета степени отравления организма человека.

4. Необходимо разработать методику расчета времени блокирования путей эвакуации СО с учетом модификаций моделей термогазодинамики пожара и степени отравления организма человека.

ГЛАВА 3. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЕЙ ПОЖАРА ПО МОНООКСИДУ УГЛЕРОДА В ПОМЕЩЕНИИ

3.1. Некоторые особенности поражения организма человека монооксидом углерода

Токсическое действие CO на организм человека основано на его взаимодействии с гемоглобином крови и образовании вследствие этого карбоксигемоглобина (HbCO), неспособного переносить кислород [59].

Одна молекула гемоглобина способна присоединить 4 молекулы O₂ или CO [60]. Образующаяся молекула карбоксигемоглобина даже при одной присоединенной молекуле CO увеличивает сродство к кислороду остальных трех участков его связывания, что приводит к тому, что кислород труднее передается тканям [40].

Степень поражения организма человека монооксидом углерода определяется содержанием карбоксигемоглобина (таблица 3.1 [59]).

Согласно работе [59] отравление считается легким, если содержание карбоксигемоглобина в крови не превышает 20%, среднетяжелым - 50%, тяжелым - 60-70%. Содержание карбоксигемоглобина больше 70% приводит к быстрой смерти.

Газообмен между воздухом внешней среды и кровью человека на его заключительном этапе состоит из поступления воздуха в альвеолы легких и последующей диффузией газов через альвеолярно-капиллярную мембрану в кровь [42].

В соответствии с [61] критические концентрации токсичных продуктов горения принимаются по литературным данным для условий одноразового 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.

Для монооксида углерода критическая величина принята равной $\rho_{\text{СО.кр}}=1,16 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ [5, 18].

Таблица 3.1 - Зависимость состояния человека от процентного содержания карбоксигемоглобина в крови [59]

НвСО, %	Симптоматика
0—2	Нормальный уровень среди некурящих
5—6	Нормальный уровень для курильщиков. Возможно нарушение навыков вождения автомобиля и снижение толерантности к физической нагрузке у некурящих
10—20	Головная боль, слабость
20—30	Сильная головная боль, тошнота, рвота, головокружение, нарушение зрения
30—40	Тошнота, рвота, обморок, тахикардия и тахипноэ, неврологическая симптоматика
40—50	Кома, судороги, нарушения дыхания и сердечно-сосудистой деятельности
50—60	Кома, судороги, глубокое угнетение дыхания и сердечной деятельности
60—70	Кома, судороги, артериальная гипотензия, брадикардия, угнетение дыхания
>70	Дыхательная недостаточность. Смерть

В работе [62] на основании анализа экспериментальных данных по воздействию СО на человека сделан вывод о том, что непрерывное воздействие монооксида углерода с концентрацией $\rho_{\text{СО.кр}}$ в течение 25 мин. безопасно для человека. Это утверждение, на первый взгляд, подтверждает обоснованность принятой величины $\rho_{\text{СО.кр}}$.

Однако, экспериментальные исследования влияния СО на человека, как правило, проводились в условиях, когда не было других опасных факторов пожара. В этом случае дыхание человека было спокойным с объемной скоростью

легочной вентиляции порядка $W=5-9$ л/мин. [42]. В присутствии повышенной концентрации углекислого газа, пониженной концентрации кислорода и интенсивной работы, воздействующих на нейроны дыхательного центра человека, глубина и частота дыхания существенно изменяются [42, 63], и объемная скорость легочной вентиляции может достигать $W=100-150$ л/мин. [42, 63]. Вследствие этого происходит существенное увеличение поглощения СО организмом человека.

Таким образом, необходима разработка математической модели расчета влияния концентрации и времени экспозиции (продолжительности действия на организм человека) СО на степень интоксикации организма человека при повышенной объемной скорости легочной вентиляции.

3.2. Физико-математическая модель расчета содержания карбоксигемоглобина в крови человека при пожаре

Рассматриваем внешнее дыхание, состоящее из обмена воздуха между внешней средой и альвеолами легких и диффузией газов в легких (обмен газов между альвеолярным воздухом и кровью через альвеолярно-капиллярную мембрану) [40].

Воздух, находящийся в воздухоносных путях (полость рта, носа, глотки, трахеи, бронхов и бронхиол), не участвует в газообмене [40]. Поэтому только часть объема воздуха, поступающего в организм человека, передает монооксид углерода.

Принимаем следующие допущения условий процесса поступления монооксида углерода в кровь человека:

- вся масса монооксида углерода, которая поступает в альвеолы легких, диффундирует через альвеолярно-капиллярную мембрану в кровь в случае количества СО, меньшего диффузионной способности легких [42];

- диффузионная способность легких по СО ($D_{л,СО}$, мл/(мм рт.ст.·мин.), количество монооксида углерода, проходящее через альвеолярно-капиллярную мембрану за минуту из расчета на 1 мм рт. ст. разницы парциального давления

газа по обе стороны мембраны [42]) определяет максимально возможное количество попадающего в кровь монооксида углерода за минуту;

- вся масса CO, проходящего через альвеолярно-капиллярную мембрану в кровь, участвует в образовании карбоксигемоглобина, так как из-за высокой аффинности гемоглобина к CO даже очень низкие парциальные давления CO приводят к связыванию значительного количества гемоглобина с CO с образованием HbCO [42];

- парциальное давление CO в крови после перехода CO через альвеолярно-капиллярную мембрану пренебрежимо мало по сравнению с парциальным давлением CO в альвеолах перед альвеолярно-капиллярной мембраной [42].

Содержание карбоксигемоглобина в крови определяется как

$$\bar{M}_{\text{HbCO}} = \frac{M_{\text{HbCO}}}{M_{\text{Hb}}}, \quad (3.1)$$

где \bar{M}_{HbCO} – массовая доля гемоглобина, перешедшего в карбоксигемоглобин; M_{HbCO} – масса карбоксигемоглобина, г; M_{Hb} – масса гемоглобина, г.

Масса гемоглобина в крови человека составляет [40]:

$$M_{\text{Hb}} = M_{\text{Hb.o}} V_{\text{к}}, \quad (3.2)$$

где $M_{\text{Hb.o}}$ – удельная масса гемоглобина, г/л; $V_{\text{к}}$ – объем крови в организме человека, л.

Принимаем концентрацию CO в окружающем воздухе постоянной по времени. Тогда масса монооксида углерода, участвующая в образовании карбоксигемоглобина, за время экспозиции равна:

- при $W < W_{\text{max}}$:

$$M_{\text{CO}} = 0,001 k_w \rho_{\text{CO}} W \tau_{\text{э}}, \quad (3.3)$$

- при $W \geq W_{\text{max}}$:

$$M_{\text{CO}} = 0,001 k_w \rho_{\text{CO}} W_{\text{max}} \tau_{\text{э}}, \quad (3.4)$$

где $\tau_{\text{э}}$ – время экспозиции, мин.; M_{CO} – масса монооксида углерода, участвующая в образовании карбоксигемоглобина за время экспозиции, г; W – объемная скорость вентиляции легких, л/мин.; $W_{\text{max}} = k_{\text{п}} \cdot D_{\text{л.CO}} / k_w$ – объемная скорость

вентиляции легких, соответствующая диффузионной способности легких по CO, л/мин.; k_w – коэффициент, равный отношению объемного расхода воздуха, поступающего в альвеолы легких, к объемной скорости вентиляции легких; ρ_{CO} – плотность CO в смеси продуктов горения и воздуха, кг/м³; k_n – размерный коэффициент перевода размерностей физических параметров, мм рт.ст./Па.

Масса карбоксигемоглобина, образующегося в крови за время экспозиции, составляет:

$$M_{HbCO} = M_{CO} \left(\frac{\mu_{Hb}}{n\mu_{CO}} + 1 \right), \quad (3.5)$$

где μ_{Hb} – молекулярная масса гемоглобина, кг/кмоль; μ_{CO} – молекулярная масса CO, кг/кмоль; n – число молекул CO в одной молекуле карбоксигемоглобина.

Окончательно, при постоянной плотности CO массовая доля карбоксигемоглобина в крови, после объединения формул (3.1)-(3.5), равна:

$$\bar{M}_{HbCO} = \frac{0,001k_w\rho_{CO}W\tau_\varepsilon}{M_{Hb}} \left(\frac{\mu_{Hb}}{n\mu_{CO}} + 1 \right). \quad (3.6)$$

В уравнении (3.6) при $W \geq W_{max}$: $W = W_{max}$.

Объемная скорость вентиляции легких при спокойном дыхании равна [40]:

$$W = f(V_d - V_m), \quad (3.7)$$

где f – частота дыхания, 1/мин.; V_d – дыхательный объем, л; V_m – объем мертвого пространства, л.

Массовая доля карбоксигемоглобина в крови при изменяемой по времени плотности CO составляет:

$$\bar{M}_{HbCO} = \frac{0,001k_w W}{M_{Hb}} \left(\frac{\mu_{Hb}}{n\mu_{CO}} + 1 \right) \int_0^\tau \rho_{CO} d\tau, \quad (3.8)$$

где τ – время от начала пожара, с.

При оценке степени интоксикации по формуле (3.8) в условиях пожара используем аналитическое решение интегральной модели расчета термогазодинамики пожара [5, 18]:

$$\rho_{\text{CO}} = \rho_{\text{п}} \left[1 - \exp \left(- \frac{A}{B} \tau^n \right) \right], \quad (3.9)$$

где $\rho_{\text{п}} = \frac{c_p T_{\text{в}} L_{\text{CO}}}{(1-\varphi) Q_{\text{н}}^{\text{п}}} \rho_{\text{в}}$ – пороговая плотность, кг/м³; c_p – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); $T_{\text{в}}$ – температура воздуха в помещении перед пожаром, К; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха в помещении перед пожаром, кг/м³; L_{CO} – удельный коэффициент выделения CO; φ – коэффициент теплопотерь; $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая рабочая теплота сгорания, Дж/кг; $B = \frac{353 c_p V}{(1-\varphi) \eta Q_{\text{н}}^{\text{п}}}$ – размерный комплекс, кг; η – коэффициент полноты горения; V – свободный объем помещения, м³; A – размерный параметр, кг/с ^{n} .

При круговом распространении пожара по твердому горючему материалу:

$A = \frac{\pi}{3} \psi_{\text{уд}} w$; $n=3$; где $\psi_{\text{уд}}$ – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м²·с); w – линейная скорость распространения пламени, м/с.

В случае неустановившегося горения жидкости: $A = \frac{2}{3} F_{\text{г}} \psi_{\text{уд}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{\text{ст}}}}$; $n=2/3$;

где $F_{\text{г}}$ – площадь открытой поверхности горючей жидкости, м²; $\tau_{\text{ст}}$ – время стабилизации горения, с.

3.3. Критические времена воздействия CO на человека при пожаре

Рассматриваем следующие критические времена воздействия CO, которые соответствуют следующим степеням тяжести отравления [59]:

- $\tau_{\text{кр.1}}$: легкое отравление ($\bar{M}_{\text{HbCO}}=0,2$);
- $\tau_{\text{кр.2}}$: среднетяжелое отравление ($\bar{M}_{\text{HbCO}}=0,5$).

Критическое время $\tau_{\text{кр.1}}$ будет определять время безопасной эвакуации людей по воздействию CO при пожаре.

Критическое время $\tau_{\text{кр.2}}$ характеризует промежуток времени от начала пожара, после которого люди, находящиеся в помещении без средств защиты от

СО (самоспасателей и т.п.), с большой вероятностью неспособны самостоятельно покинуть помещение.

Критическое время $\tau_{кр.3}$ по традиционной методике [5, 18] определяет как и $\tau_{кр.1}$ время безопасной эвакуации людей по воздействию СО при пожаре и равно промежутку времени от начала пожара до момента достижения плотности СО ее критического значения $\rho_{СО,кр}$ на уровне рабочей зоны помещения.

3.4. Исходные данные для численных экспериментов

При спокойном дыхании, когда нет дополнительных воздействий на дыхательный центр, принимаем для взрослого человека весом 75 кг [40]:

$$f=15 \text{ л/мин.}; V_d=0,5 \text{ л}; V_m=0,15 \text{ л.}$$

Тогда из формулы (3.7) при спокойном дыхании: $W=5,25 \text{ л/мин.}$

Принимаем в формулах (3.3, 3.4, 3.6, 3.8) коэффициент $k_w = (V_d - V_m)/V_d = 0,7$.

Диффузионная способность легких по СО равна [42]:

- при спокойном дыхании: $D_{л,СО}=20 \text{ мл/(мм рт.ст.·мин.)}$;

- при физической нагрузке: $D_{л,СО}=60 \text{ мл/(мм рт.ст.·мин.)}$.

Удельная масса гемоглобина в крови изменяется от 120 до 160 г/л у мужчин и от 110 до 140 г/л у женщин [40].

Принимаем, что $(M_{Hb.o})_{cp}=135 \text{ г/л}$ и $(M_{Hb.o})_{min}=110 \text{ г/л}$, где $(M_{Hb.o})_{cp}$, $(M_{Hb.o})_{min}$ – соответственно средняя и минимальная удельная масса гемоглобина в организме взрослого человека, г/л.

Объем крови взрослого человека изменяется от 4,5 до 6 л [40]. Выбираем среднее значение $V_k=5,25 \text{ л}$. Тогда средняя масса гемоглобина в крови человека равна (формула (3.2)) $(M_{Hb})_{cp}=708,75 \text{ г}$.

При минимальном объеме крови $V_k=4,5 \text{ л}$ и $(M_{Hb.o})_{min}=110 \text{ г/л}$ минимальная масса гемоглобина в крови человека в соответствии с формулой (3.2) составляет $(M_{Hb})_{min}=495 \text{ г}$.

Молекулярные массы равны: $\mu_{Hb}=68800 \text{ кг/кмоль}$ [12]; $\mu_{СО}=28 \text{ кг/кмоль}$.

Принимаем, что критическое значение массовой доли карбоксигемоглобина в крови, при которой еще возможна безопасная эвакуация людей, равно $(\bar{M}_{\text{HbCO}})_{\text{кр}}=0,2$.

Модельные помещения принимаем в виде параллелепипеда с размерами $4 \times 5 \times 3$, $4 \times 5 \times 6$ и $24 \times 12 \times 3$ м (длина \times ширина \times высота).

Рассматриваем следующие горючие материалы [5]:

- хвойные древесные стройматериалы: $Q_{\text{н}}^{\text{P}}=13,8$ МДж/кг, $\psi_{\text{уд}}=0,0063$ кг/(м²·с), $L_{\text{CO}}=0,024$, $w=0,0585$ м/с;

- оболочка кабелей ПВХ: $Q_{\text{н}}^{\text{P}}=25$ МДж/кг, $\psi_{\text{уд}}=0,0244$ кг/(м²·с), $L_{\text{CO}}=0,109$, $w=0,0071$ м/с;

- масло трансформаторное: $Q_{\text{н}}^{\text{P}}=41,9$ МДж/кг, $\psi_{\text{уд}}=0,03$ кг/(м²·с), $L_{\text{CO}}=0,122$, $\tau_{\text{ст}}=5$ мин.

Принимаем согласно [3, 6]: $c_p=1000$ Дж/(кг·К); $\phi=0,6$.

Атмосферное давление равно $p_{\text{в}}=1,013 \cdot 10^5$ Па, температура воздуха составляет $T_{\text{в}}=20^{\circ}\text{C}$.

3.5. Результаты численных и натурных экспериментов при спокойном дыхании

Сопоставление расчета количества карбоксигемоглобина в крови с экспериментальными данными является оценочным, так как в публикациях, содержащих результаты экспериментов по воздействию СО на людей, нет точных данных по возрасту, весу, полу и т.п. участников экспериментов.

Результаты сопоставления расчетного (формула (3.6)) процентного содержания карбоксигемоглобина с экспериментальными значениями [62], полученными при воздействии СО на людей при спокойном дыхании, для $\tau_3=5$ мин. и $\tau_3=10$ мин. представлены на рисунке 3.1. В расчетах принимались средняя масса гемоглобина в организме взрослого человека и $n=1$.

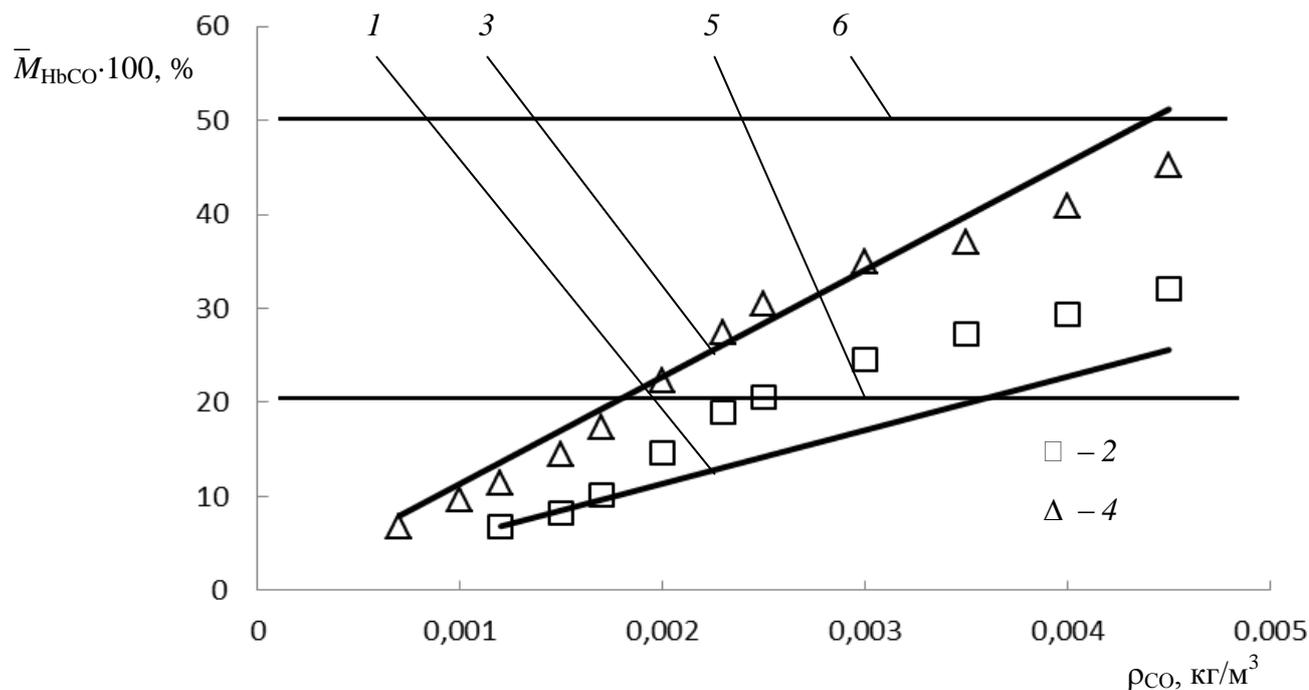


Рисунок 3.1 - Зависимости процентного содержания карбоксигемоглобина от плотности CO во вдыхаемом воздухе при спокойном дыхании:

$\tau_3=5$ мин.: 1 – расчет (формула (3.6)); 2 – эксперимент [62];

$\tau_3=10$ мин.: 3 – расчет (формула (3.6)); 4 – эксперимент [62];

5 – легкое отравление; 6 – среднетяжелое отравление

Анализ рисунка 3.1 показывает, что расчетные величины \bar{M}_{HbCO} совпадают с экспериментальными значениями с погрешностью, не превышающей 27%.

Из рис. 3.1 видно, что:

- $\tau_3=5$ мин.: легкое отравление наступает при $\rho_{CO}=0,0035$ кг/м³;

среднетяжелое отравление – $\rho_{CO}>0,005$ кг/м³;

- $\tau_3=10$ мин.: легкое отравление – $\rho_{CO}=0,0018$ кг/м³;

среднетяжелое отравление – $\rho_{CO}=0,0045$ кг/м³.

3.6. Результаты и анализ численных экспериментов при повышенной объемной скорости вентиляции легких при постоянной концентрации монооксида углерода

Исследуем влияние повышенной скорости легочной вентиляции на степень интоксикации организма человека.

Рассмотрим две постоянных по времени величины концентрации СО, при воздействии которых есть экспериментальные значения в случае свободного дыхания и эти величины близки к критическому значению $\rho_{\text{СО.кр}}$: $\rho_{\text{СО}}=0,0007 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{\text{СО}}=0,0012 \text{ кг/м}^3$.

Объемная скорость вентиляции легких, соответствующая диффузионной способности легких по СО, при заданных исходных данных равна:

- при спокойном дыхании: $W_{\text{max}}=21,6 \text{ л/мин.}$;

- при физической нагрузке: $W_{\text{max}}=64,9 \text{ л/мин.}$

Принимаем $W_{\text{max}}=64,9 \text{ л/мин.}$

Расчетные зависимости (по формуле (3.6)) времени экспозиции, при которой происходит легкое и среднетяжелое отравление организма, от объемной скорости легочной вентиляции представлены на рисунке 3.2 в случае $\rho_{\text{СО}}=0,0007 \text{ кг/м}^3$ и на рисунке 3.3 – для $\rho_{\text{СО}}=0,0012 \text{ кг/м}^3$.

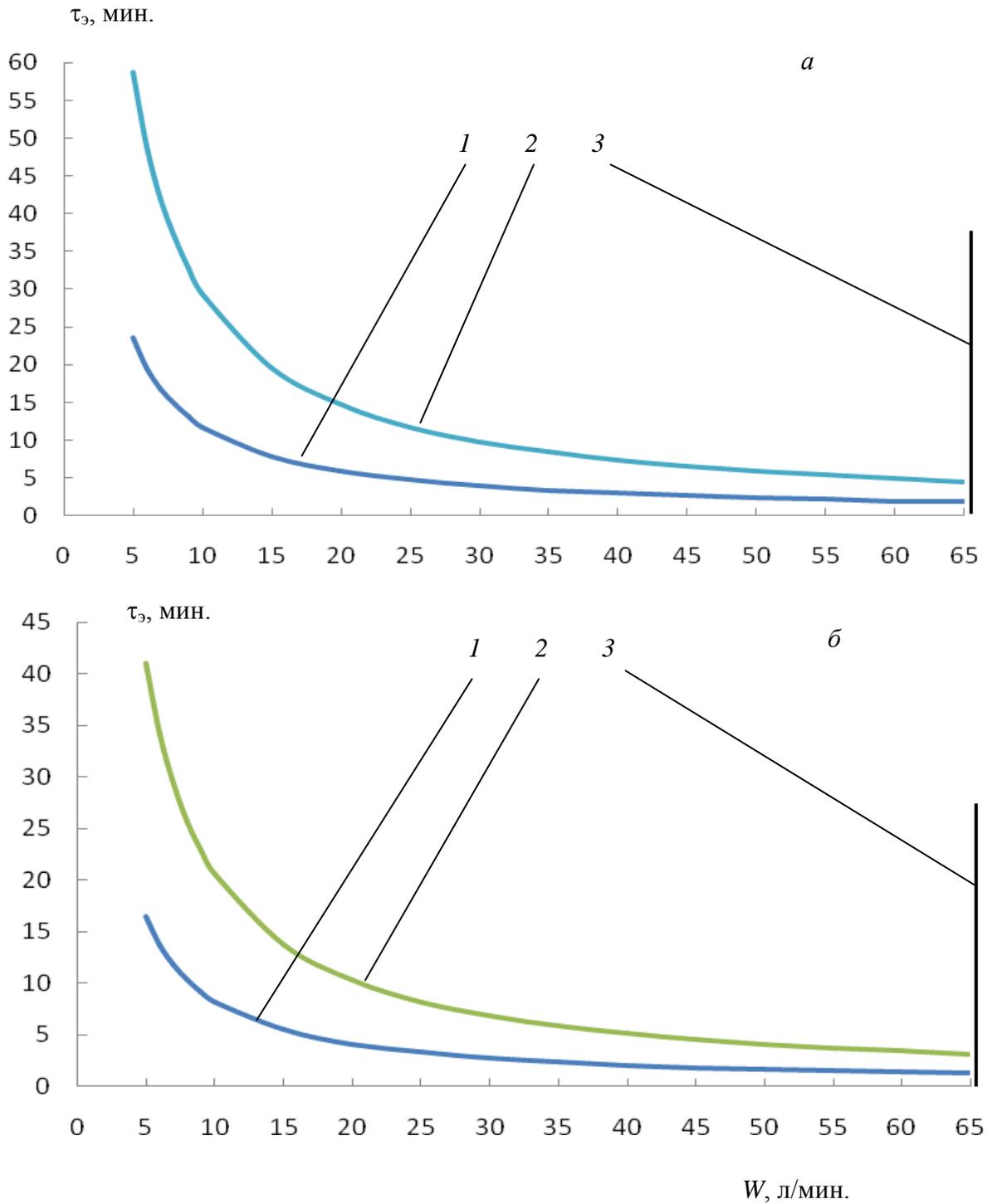


Рисунок 3.2 - Расчетные зависимости времени экспозиции от объемной скорости легочной вентиляции в случае $\rho_{CO}=0,0007$ кг/м³ при $(M_{Hb})_{cp}=708,75$ г (а) и $(M_{Hb})_{min}=495$ г (б):
 1 – $\bar{M}_{HbCO}=0,2$; 2 – $\bar{M}_{HbCO}=0,5$; 3 – $W=W_{max}$.

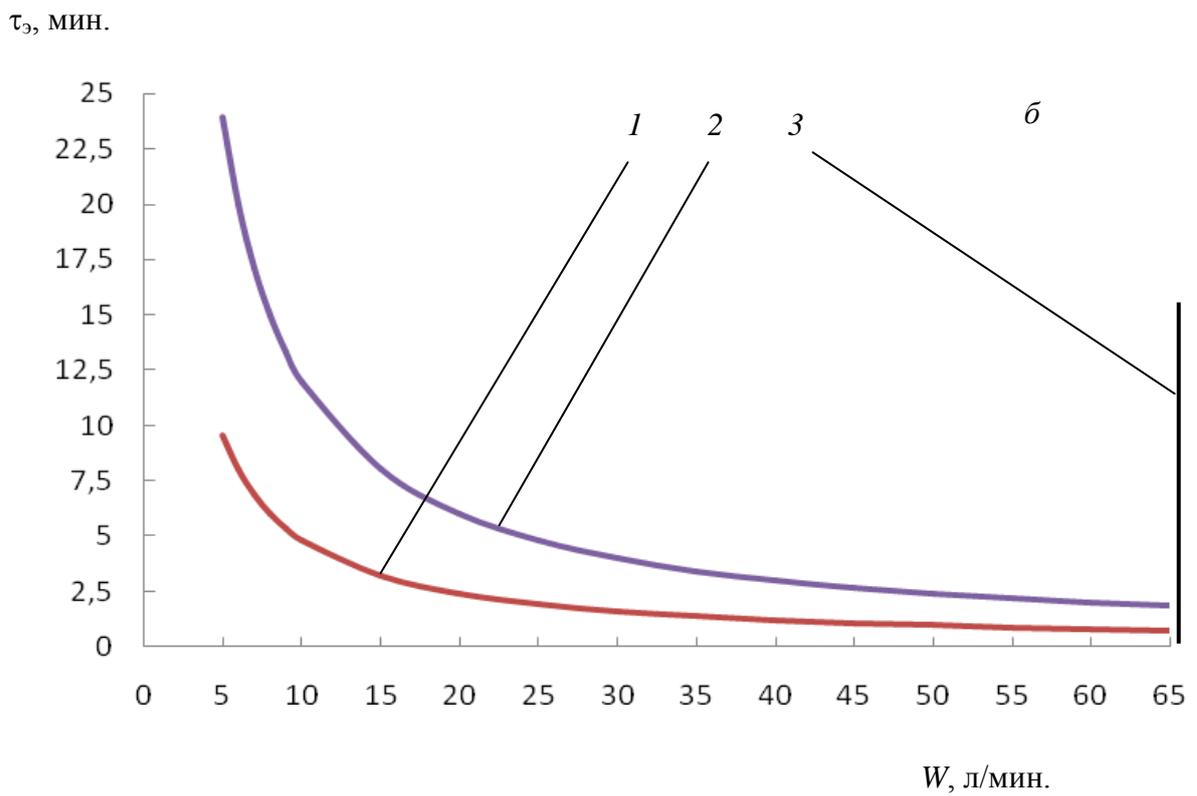
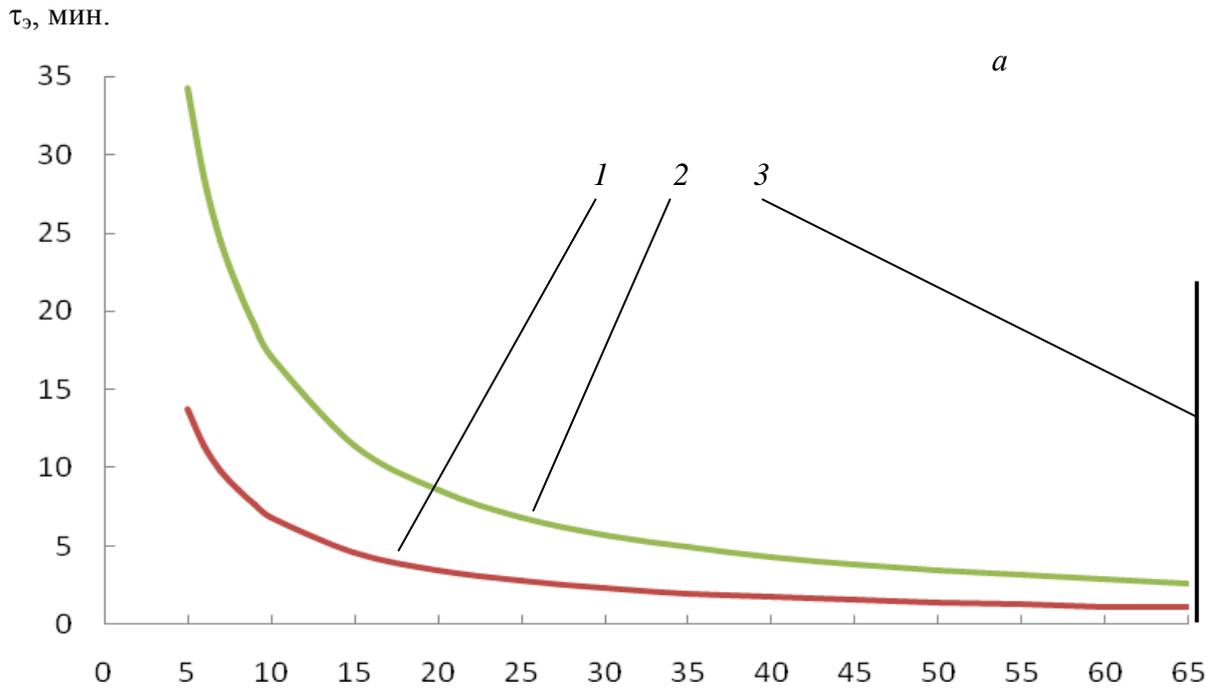


Рисунок 3.3 - Расчетные зависимости времени экспозиции от объемной скорости легочной вентиляции в случае $\rho_{CO}=0,0012$ кг/м³ при $(M_{Hb})_{cp}=708,75$ г (а) и $(M_{Hb})_{min}=495$ г (б):

1 – $\bar{M}_{HbCO}=0,2$; 2 – $\bar{M}_{HbCO}=0,5$; 3 – $W=W_{max}$

Результаты расчетов критических промежутков времени при максимальной объемной скорости вентиляции легких, соответствующей диффузионной способности легких по СО, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Критические времена воздействия постоянной концентрации СО при максимальной объемной скорости вентиляции легких, соответствующей диффузионной способности легких по СО.

Постоянная плотность СО ($\rho_{\text{СО}}$), кг/м ³	Степень интоксикации	Критические времена воздействия СО	
		Средний взрослый человек	Взрослый человек с минимальной массой гемоглобина
0,0007	легкое отравление	$\tau_{\text{кр.1}}=1,81$ мин.	$\tau_{\text{кр.1}}=1,26$ мин.
	среднетяжелое отравление	$\tau_{\text{кр.2}}=4,53$ мин.	$\tau_{\text{кр.2}}=3,16$ мин.
0,0012	легкое отравление	$\tau_{\text{кр.1}}=1,06$ мин.	$\tau_{\text{кр.1}}=0,74$ мин.
	среднетяжелое отравление	$\tau_{\text{кр.2}}=2,64$ мин.	$\tau_{\text{кр.2}}=1,84$ мин.

Из таблицы 3.2 видно, что временные пределы достижения легкой и среднетяжелой степени поражения организма человека показывают необходимость более тщательного выбора величины критической плотности монооксида углерода, так как при $\rho_{\text{СО.кр}}$ в случае минимальной массы гемоглобина взрослый человек примерно через $\tau_3=0,74$ мин. почувствует головную боль и слабость, а через $\tau_3=1,84$ мин. могут наступить кома, судороги, нарушения дыхания и сердечно-сосудистой деятельности.

3.7. Результаты и анализ численных экспериментов при повышенной объемной скорости вентиляции легких при переменной концентрации монооксида углерода

Исследуем влияние повышенной скорости легочной вентиляции на степень интоксикации организма человека при зависимости плотности СО от времени, соответствующей начальной стадии пожара в помещении (формула (3.9)).

Зависимости плотности СО от времени с начала пожара при горении хвойных древесных стройматериалов представлены на рисунке 3.4, *а*, в случае оболочки кабелей ПВХ приведены на рисунке 3.4, *б*, для масла трансформаторного – на рисунке 3.4, *в*.

Зависимости массовой доли карбоксигемоглобина в случае средней массы гемоглобина в организме взрослого человека от времени от начала пожара, рассчитанные с использованием формулы (3.8), показаны на рисунке 3.5, *а* при горении хвойных древесных стройматериалов, на рисунке 3.5, *б* – оболочки кабелей ПВХ и на рисунке 3.5, *в* – масла трансформаторного.

В таблице 3.3 представлены результаты расчетов критической продолжительности пожара по СО, полученные с использованием традиционного подхода (уравнение (3.9) [5]) и по предложенному в настоящей работе подходу (уравнение (3.8)).

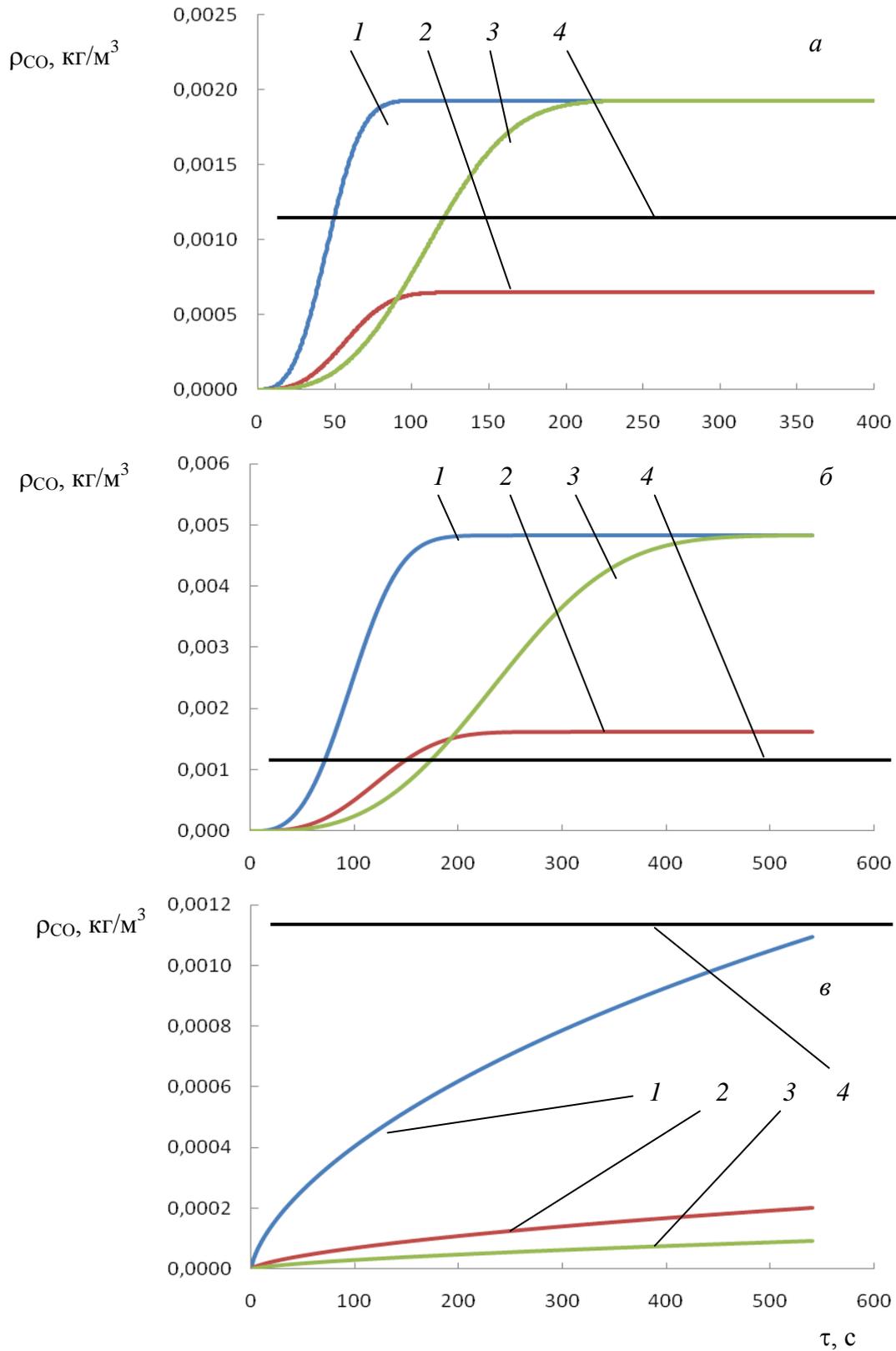


Рисунок 3.4 - Зависимости плотности CO от времени с начала пожара при горении хвойных древесных стройматериалов (*a*), оболочки кабелей ПВХ (*б*) и масла трансформаторного (*в*):

1 – помещение с размерами 4×5×3 м; 2 – 4×5×6; 3 – 24×12×3 м; 4 – $\rho_{CO,кр}$

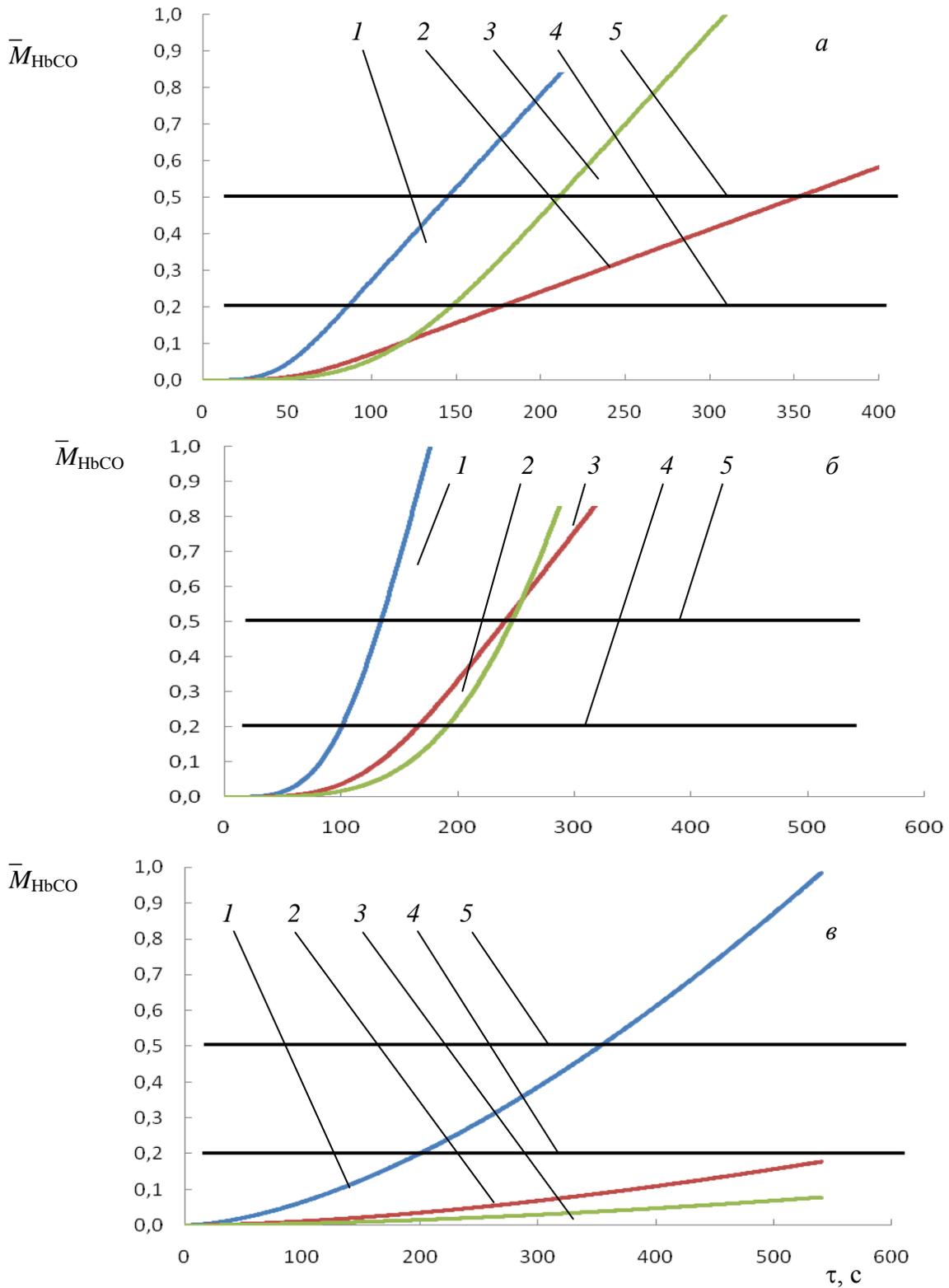


Рисунок 3.5 - Зависимости массовой доли карбокигемоглобина от времени с начала пожара при горении хвойных древесных стройматериалов (*a*), оболочки кабелей ПВХ (*б*) и масла трансформаторного (*в*): 1 – помещение с размерами 4×5×3 м; 2 – 4×5×6; 3 – 24×12×3 м; 4 – легкое отравление; 5 – среднетяжелое отравление

Таблица 3.3 - Критические времена воздействия СО в условиях пожара при максимальной объемной скорости вентиляции легких, соответствующей диффузионной способности легких по СО

Горючее вещество	Размеры помещения, м	Критические времена воздействия СО, мин.					
		Средний взрослый человек			Взрослый человек с минимальной массой гемоглобина		
		$\tau_{кр.1}$	$\tau_{кр.2}$	$\tau_{кр.3}$	$\tau_{кр.1}$	$\tau_{кр.2}$	$\tau_{кр.3}$
Хвойные древесные стройматериалы	4×5×3	1,42	2,41	0,83	1,22	1,92	0,83
	4×5×6	2,92	5,85	–	2,33	4,38	–
	24×12×3	2,44	3,50	2,03	2,18	3,00	2,03
Оболочка кабелей ПВХ	4×5×3	1,67	2,24	1,19	1,51	1,98	1,19
	4×5×6	2,76	4,00	2,48	2,45	3,40	2,48
	24×12×3	3,18	4,10	2,89	2,88	3,70	2,89
Масло трансформаторное	4×5×3	3,32	5,88	10,05	2,66	4,69	10,05
	4×5×6	>10	>10	–	7,76	>10	–
	24×12×3	>10	>10	–	>10	>10	–

Примечание: – - плотность СО не достигла критического значения за время пожара.

Из анализа таблицы 3.3, рисунков 3.4 и 3.5 можно сделать следующие выводы:

- при использовании общепринятого подхода [5, 18] в помещении размерами 4×5×6 м при горении хвойных древесных стройматериалов и масла трансформаторного плотность СО не достигает критического значения за рассматриваемое время пожара, в то время как расчеты по предложенной математической модели показали, что взрослый человек может погибнуть от отравления монооксидом углерода;

- критическая продолжительность пожара $\tau_{кр.3}$ по СО, полученная с использованием уравнения (3.9) [5, 18], больше, чем соответствующая величина $\tau_{кр.1}$, определенная по предложенной формуле (3.8), в случаях горения оболочки

кабелей в помещениях размерами 4×5×6 и 24×12×3 м и масла трансформаторного в помещении 4×5×3 м.

Таким образом, расчеты с использованием традиционного подхода могут привести к недооценке опасности отравления монооксидом углерода.

3.8. Выводы по третьей главе

1. Принятая в научной и нормативной литературе по пожарной безопасности величина критической плотности монооксида углерода $\rho_{\text{СО,кр}}=1,16 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ при повышенной объемной скорости легочной вентиляции, характерной для условий пожара, может сделать невозможной при определенных условиях безопасную эвакуацию людей.

2. Предложенные новые критерии для определения критических времен воздействия СО на человека во время его эвакуации и спасения на объектах энергетики с использованием разработанной физико-математической модели расчета концентрации карбоксигемоглобина в крови человека позволяют учесть повышенную скорость легочной вентиляции, характерную для условий пожара в помещении.

3. Предложенная в настоящей работе физико-математическая модель расчета накопления СО в организме человека в условиях пожара:

- позволяет более обоснованно, чем существующий подход [5, 18], определять время безопасной эвакуации людей при пожаре в помещении;

- впервые дает возможность рассчитать промежуток времени от начала пожара, после которого люди, находящиеся в помещении без средств защиты от СО (самоспасателей и т.п.), с большой вероятностью неспособны самостоятельно покинуть помещение, т.е. фактически определить время спасения людей.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ БЛОКИРОВАНИЯ ПУТЕЙ ЭВАКУАЦИИ МОНООКСИДОМ УГЛЕРОДА НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА ПРИ ПОЖАРЕ

4.1. Постановка задачи

Исходные данные по выделению токсичных продуктов горения представлены, например, в учебном пособии [5] и в монографии [4]. Удельные коэффициенты выделения токсичных газов приняты постоянными, не зависящими от термогазодинамической картины развития пожара (концентрации кислорода, температуры и т.д.).

Однако, в работах [6, 7] показано, что величины удельных коэффициентов выделения CO значительно изменяются от времени с начала горения, и их средние величины существенно зависят от периода осреднения по времени испытаний.

В статьях [6, 7] предложен новый подход к расчету концентраций токсичных продуктов горения, который заключается в определении среднеобъемных плотностей токсичных газов в каждый момент времени по их экспериментальным зависимостям от среднеобъемной температуры, полученным в разработанной экспериментальной установке. При этом отпадает необходимость в решении дифференциальных уравнений законов сохранения масс токсичных газов, и, следовательно, в определении удельных коэффициентов выделения газов.

Точность предложенного подхода [6, 7] в значительной степени зависит от погрешности определения коэффициента теплопотерь в экспериментальной мелкомасштабной установке и в реальном полномасштабном помещении.

В данной работе с использованием экспериментальных данных, полученных на мелкомасштабной установке [6, 7], предложен другой подход, в котором используются теоретические и экспериментальные зависимости среднеобъемных плотностей токсичных газов от среднеобъемной плотности кислорода. При этом

нет необходимости определять коэффициент теплопотерь и также решать дифференциальные уравнения законов сохранения масс токсичных газов.

Рассмотрим процесс горения в условно герметичном маломасштабном объеме (рисунок 4.1).

В качестве токсичного газа будем рассматривать монооксид углерода.

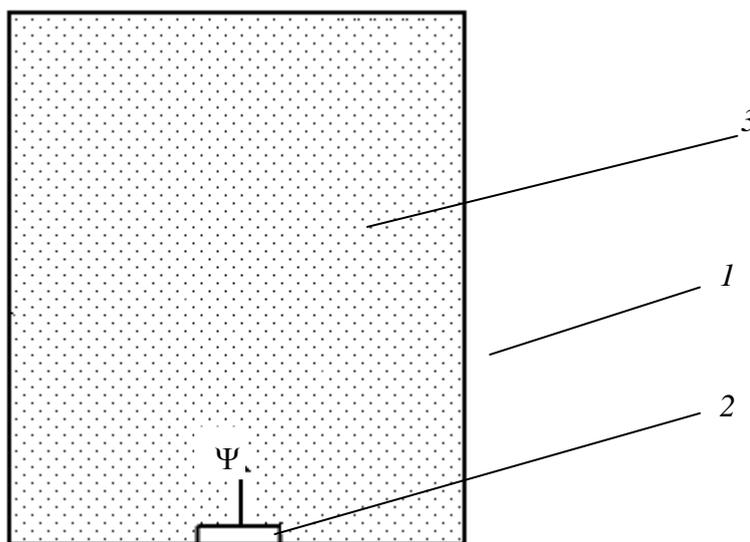


Рисунок 4.1 - Схема теплообмена в условно герметичном маломасштабном объеме: 1 – ограждающие конструкции; 2 – горючий материал; 3 – смесь продуктов горения и воздуха; Ψ – массовая скорость газификации горючего материала, кг/с

Необходимо для рассматриваемой мелкомасштабной экспериментальной установки получить экспериментальные и теоретические зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода и показателя токсичности по совместному воздействию CO и O₂ от среднеобъемной плотности кислорода.

4.2. Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Схема экспериментальной установки, приведенной в работах [6, 7], представлена на рисунке 4.2.

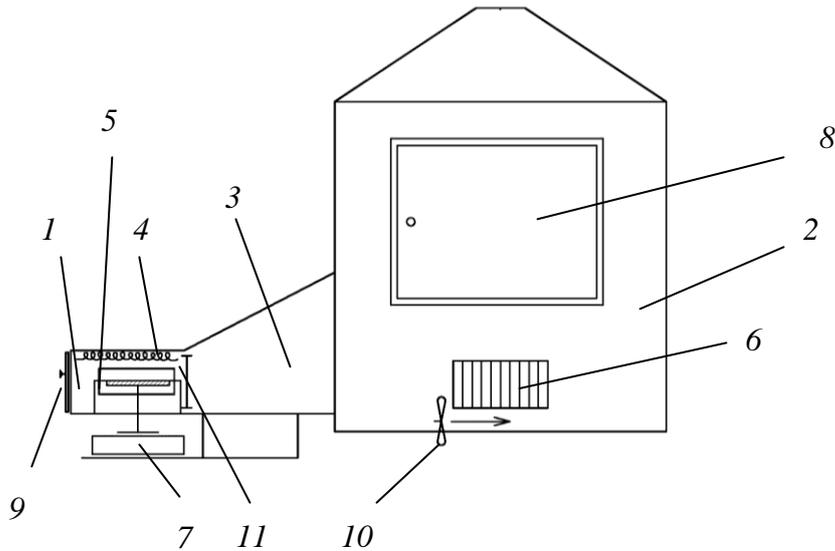


Рисунок 4.2 - Схема экспериментальной установки [6, 7]: 1 – камера сгорания; 2 – экспозиционная камера; 3 – переходной рукав; 4 – электронагревательный излучатель; 5 – держатель образца; 6 – шибберные отверстия; 7 – столик для весов; 8 – дверца экспозиционной камеры; 9 – дверца камеры сгорания; 10 – вентилятор; 11 – заслонка (перегородка) переходного рукава

Камера сгорания 1 соединена с экспозиционной камерой 2 переходным рукавом 3, оснащенный устройством теплового блокирования. В камере сгорания установлен экранированный электронагревательный излучатель 4 и держатель образца 5 на подвижной основе.

Камера сгорания выполнена из листовой нержавеющей стали толщиной $2,0 \pm 0,1$ мм объемом $3 \times 10^{-3} \text{ м}^3$. На боковой стенке камеры имеются окно из кварцевого стекла для наблюдения за образцом при испытаниях, а также шибберные отверстия 6, для изменения режимов испытания.

Экспозиционная камера представляет собой кубический объем ($V=0,5887 \text{ м}^3$) с конусообразной верхней частью.

На двух боковых стенках камеры установлены шибберные отверстия.

Держатель образцов размещен на электронных весах 7 с погрешностью не более $\pm 1 \text{ мг}$, расположенных на специальном подвижном столе.

Для непрерывного контроля температуры в экспозиционной камере использовались низко инерционные бронированные термопары в количестве 32

штук с диапазоном измерений от -40°C до $+1100^{\circ}\text{C}$ с погрешностью не более $\pm 1,5 \cdot t(^{\circ}\text{C})$. Для контроля плотности теплового потока, падающего на образец, подвергшийся испытаниям, используется водоохлаждаемый датчик типа Гордона и регистрирующий прибор с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ. Погрешность измерения плотности теплового потока не превышает $\pm 8\%$. Для непрерывного контроля состава газовой среды в экспозиционной камере используется многоканальный газоанализатор, измеряющий концентрацию оксида углерода с диапазоном измерений от 0 до 1%об и допустимой погрешностью $\pm 10\%$, диоксида углерода с диапазоном измерений от 0 до 5%об и допустимой погрешностью $\pm 10\%$, кислорода с диапазоном измерений от 0 до 21%об и допустимой погрешностью $\pm 10\%$.

Горючие материалы испытывались в режиме пламенного горения, который обеспечивался при температуре испытания 750°C и плотности падающего теплового потока 60 кВт/м^2 . Образец материала, предварительно взвешенный и имеющий комнатную температуру, помещался в держатель образца (вкладыш).

С момента выхода электронагревательного излучателя на стабилизированный режим заслонку переходного рукава и дверцу камеры сгорания открывают. Вкладыш с образцом помещают без задержки в держатель образца, затем дверцу камеры сгорания закрывают. В процессе испытаний в режиме постоянного мониторинга фиксируются показания концентраций CO (% об), CO_2 (% об), O_2 (% об), температуры и изменение массы образца.

4.3. Математическая модель

В работах [6, 7] показано, что зависимость плотности монооксида углерода от температуры имеет вид:

$$\rho_{\text{CO}} = \rho^* L_{\text{CO}}, \quad (4.1)$$

где ρ_{CO} – среднеобъемная плотность CO , кг/м^3 ; $\rho^* = K/Q_{\text{H}}^{\text{p}}$ – характерная плотность, зависящая только от схемы термогазодинамической картины пожара, теплофизических параметров пожара и горючего материала, кг/м^3 ; L_{CO} –

удельный коэффициент выделения монооксида углерода [5]; $K = f(T_{cp}, T_b, \varphi)$ – коэффициент пропорциональности между среднеобъемной плотностью токсичного газа и отношением L_{CO}/Q_n^p , Дж/м³; Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; T_{cp} – среднеобъемная температура газовой среды, К; T_b – температура воздуха в помещении, К; φ – коэффициент теплопотерь, равный доле теплоты, выделившейся в очаге горения и поступающей в ограждающие конструкции помещения из всего объема помещения.

Для рассматриваемой условно герметичной схемы пожара [13, 64]:

$$K = \frac{2,5 \cdot 10^5 (T_{cp} - T_b)}{(1 - \varphi) T_b}. \quad (4.2)$$

Формула (4.1), выражающая зависимость среднеобъемной плотности СО от среднеобъемной температуры, не содержит геометрических размеров помещения и поверхностей горючих материалов и, следовательно, является справедливой в условиях как мелкомасштабного, так и крупномасштабного пожара в помещении. Этот вывод экспериментально подтвержден в работе [7] на основе сопоставления результатов расчетов среднеобъемной плотности монооксида углерода, полученных для полномасштабного помещения с использованием аналитического решения интегральной модели и полной системы уравнений зонной математической модели, с экспериментальными данными по проточной схеме термогазодинамики пожара [7].

К основному недостатку такого подхода относится высокая погрешность определения коэффициента теплопотерь в экспериментальной мелкомасштабной установке и в реальном полномасштабном помещении. Получим зависимость плотности монооксида углерода от плотности кислорода в условно герметичном объеме.

Дифференциальное уравнение закона сохранения массы оксида углерода в герметичном объеме имеет вид [5]:

$$V \frac{d\rho_{CO}}{d\tau} = \eta L_{CO} \Psi, \quad (4.3)$$

где V – внутренний объем установки, м^3 ; τ – время, с; Ψ – массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с ; η – коэффициент полноты сгорания.

Удельный коэффициент выделения монооксида углерода в экспериментальной установке в каждый момент времени определяется из формулы (4.3):

$$L_{\text{CO}} = \frac{V}{\eta\Psi} \frac{d\rho_{\text{CO}}}{d\tau}. \quad (4.4)$$

Дифференциальное уравнение закона сохранения массы кислорода в герметичном объеме имеет вид [5]:

$$V \frac{d\rho_{\text{O}_2}}{d\tau} = -\eta L_{\text{O}_2} \Psi, \quad (4.5)$$

где ρ_{O_2} – среднеобъемная плотность O_2 , кг/м^3 ; L_{O_2} – удельный коэффициент поглощения кислорода.

Удельный коэффициент поглощения кислорода в экспериментальной установке рассчитывается с использованием выражения (4.5):

$$L_{\text{O}_2} = \left| \frac{V}{\eta\Psi} \frac{d\rho_{\text{O}_2}}{d\tau} \right|. \quad (4.6)$$

Зависимость плотности монооксида углерода от плотности кислорода в каждый момент времени от начала горения может быть получена из совместного интегрирования уравнений (4.3) и (4.5) от $\tau=0$ до рассматриваемого момента времени τ :

$$\rho_{\text{CO}} = \frac{L_{\text{CO}}}{L_{\text{O}_2}} (\rho_{\text{O}_2, \text{в}} - \rho_{\text{O}_2}), \quad (4.7)$$

где $\rho_{\text{O}_2, \text{в}}$ – плотность кислорода в атмосферном воздухе, кг/м^3 .

Из выражения (4.7) видно, что для расчета плотности СО необходимо использовать значения плотности кислорода и удельных коэффициентов поглощения O_2 и выделения СО.

Основным достоинством предложенной формулы (4.7) по сравнению с выражением (4.1) является отсутствие необходимости экспериментального или теоретического определения коэффициента теплопотерь ϕ .

Будем рассматривать показатель токсичности по совместному влиянию концентраций CO и O₂. В соответствии с работами [3, 65] можно записать:

$$H_T = H_{T.CO} + H_{T.O_2} = \frac{\rho_{CO}}{\rho_{CO.kp}} + \frac{\rho_{O_2.B} - \rho_{O_2}}{\rho_{O_2.B} - \rho_{O_2.kp}}, \quad (4.8)$$

где H_T – показатель токсичности; $\rho_{CO.kp}$ – предельно допустимая для человека (критическая) плотность монооксида углерода, кг/м³; $\rho_{O_2.kp}$ – предельно допустимая для человека (критическая) плотность кислорода, кг/м³; $H_{T.CO} = \rho_{CO} / \rho_{CO.kp}$ – показатель токсичности по действию CO; $H_{T.O_2} = (\rho_{O_2.B} - \rho_{O_2}) / (\rho_{O_2.B} - \rho_{O_2.kp})$ – показатель токсичности по действию O₂.

Критическое значение показателя токсичности больше единицы и требует обоснования [3, 65].

Используя формулу (4.7), выражение (4.8) можно представить в виде зависимости H_T только от плотности кислорода:

$$H_T = (\rho_{O_2.B} - \rho_{O_2}) \left(\frac{L_{CO}}{L_{O_2}} \frac{1}{\rho_{CO.kp}} + \frac{1}{\rho_{O_2.B} - \rho_{O_2.kp}} \right). \quad (4.9)$$

4.4. Исходные данные для численных и натуральных экспериментов

Рассматриваем следующие горючие материалы [5], наиболее распространенные на ОЭ Вьетнама:

- твердая горючая нагрузка:

хвойные древесные стройматериалы: $Q_H^P = 13,8$ МДж/кг, $\psi_{уд} = 0,0063$ кг/(м²·с), $L_{CO} = 0,024$; $L_{O_2} = 1,15$;

- оболочка кабелей ПВХ: $Q_H^P = 25$ МДж/кг, $\psi_{уд} = 0,0244$ кг/(м²·с), $L_{CO} = 0,109$; $L_{O_2} = 2,19$;

- жидкая горючая нагрузка – масло трансформаторное: $Q_H^P = 41,9$ МДж/кг, $\psi_{уд} = 0,03$ кг/(м²·с), $L_{CO} = 0,122$; $L_{O_2} = 2,82$;

где $\psi_{уд}$ – удельная массовая скорость выгорания горючего материала, кг/(м²·с).

Геометрические характеристики образцов принимались следующими:

- хвойные древесные стройматериалы: $F = 0,0072$ м² и $F = 0,0145$ м²;

- оболочка кабелей ПВХ: $F=0,0067 \text{ м}^2$ и $F=0,0122 \text{ м}^2$;

- масло трансформаторное: $F=0,01 \text{ м}^2$ и $\delta=1,15 \text{ мм}$; $F=0,01 \text{ м}^2$ и $\delta=7,3 \text{ мм}$.

где F – площадь поверхности образца, м^2 ; δ – толщина слоя трансформаторного масла в кювете, мм .

В соответствии с работой [5] критические значения равны $\rho_{\text{CO.кр}}=1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{\text{O}_2.\text{кр}}=0,226 \text{ кг/м}^3$.

Величины L_{CO} также определялись из результатов экспериментов осреднением по времени соответственно выражений (4.4) и (4.6).

4.5. Результаты численных и натуральных экспериментов и их анализ

Эксперименты проводились до температур газовой смеси внутри помещений, не превышающих критического значения для человека, равного 70°C [5]. Средние по времени проведения экспериментов значения L_{CO} представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты экспериментов

Горючие материалы	Условия проведения эксперимента	Средняя величина L_{CO}	L_{CO} из [5]	Газ*	$H_{\text{т.кр}}$
Хвойные древесные стройматериалы	$F=0,0072 \text{ м}^2$	0,024	0,024	CO	1,90
	$F=0,0145 \text{ м}^2$	0,011		O ₂	1,29
Оболочка кабелей ПВХ	$F=0,0067 \text{ м}^2$	0,100	0,109	CO	1,54
	$F=0,0122 \text{ м}^2$	0,096		CO	1,65
Масло трансформаторное	$F=0,01 \text{ м}^2$ $\delta=1,15 \text{ мм}$	0,056	0,122	CO	1,93
	$F=0,01 \text{ м}^2$ $\delta=7,3 \text{ мм}$	0,020		O ₂	1,57

Примечание: * - газ, плотность которого раньше другого газа достигла критического значения

Зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода представлены на рисунке 4.3 в случае горения хвойных древесных стройматериалов, на рисунке 4.4 – при горении трансформаторного масла и на рисунке 4.5 – оболочки кабелей ПВХ.

Из рисунков 4.3-4.5 видно, что теоретические значения среднеобъемной плотности CO , полученные с использованием выражения (4.7) и экспериментальных средних значений L_{CO} , достаточно точно для инженерного метода расчета совпадают с экспериментальными величинами для всех рассматриваемых горючих материалов.

Зависимости показателя токсичности от среднеобъемной плотности кислорода приведены на рисунке 4.6 (горение хвойных древесных стройматериалов), на рисунке 4.7 (трансформаторное масло) и на рисунке 4.8 (оболочка кабелей ПВХ).

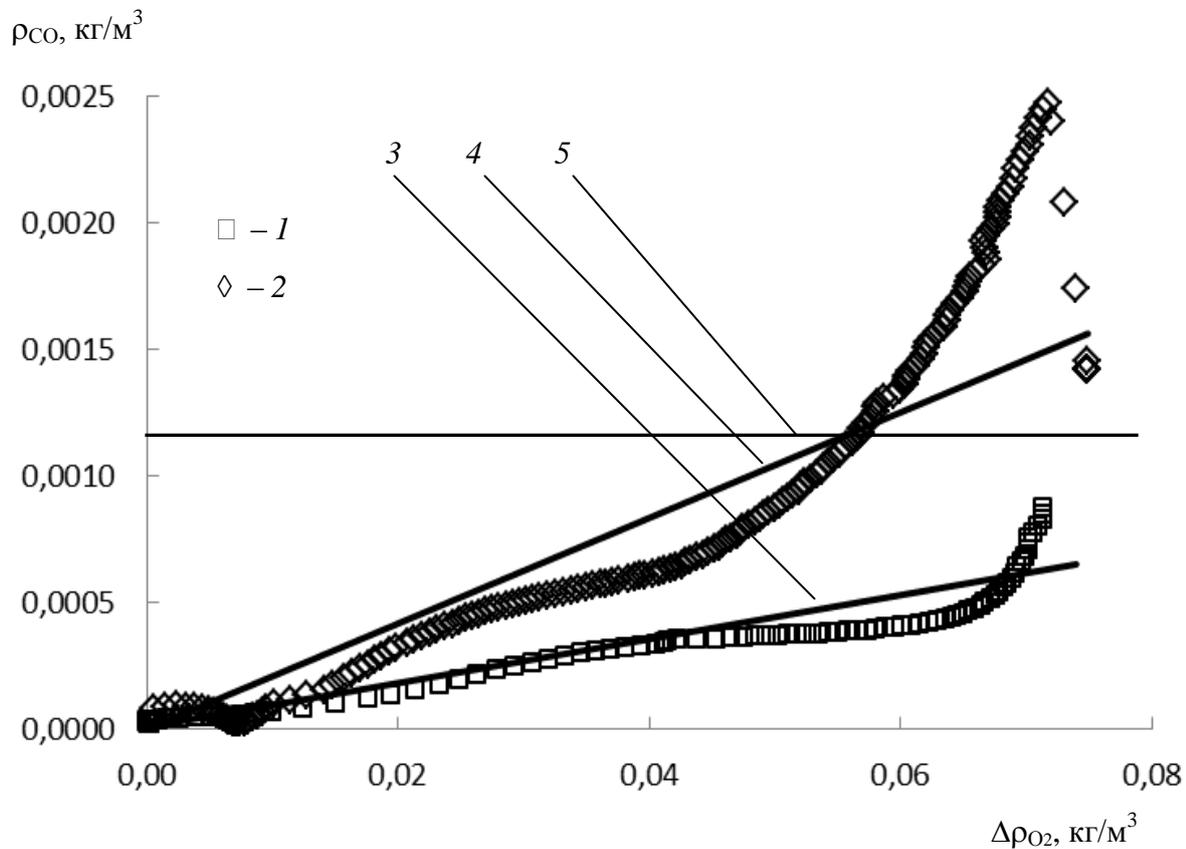


Рисунок 4.3 - Зависимости среднеобъемной плотности оксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода при горении хвойных древесных стройматериалов:

экспериментальные значения: 1 – $F=0,0145 \text{ м}^2$; 2 – $F=0,0072 \text{ м}^2$;

расчет по формуле (4.7): 3 – $F=0,0145 \text{ м}^2$; 4 – $F=0,0072 \text{ м}^2$; 5 – $\rho_{\text{CO,кр}}$; $\Delta\rho_{\text{O}_2} = \rho_{\text{O}_2,в} - \rho_{\text{O}_2}$ – снижение среднеобъемной плотности кислорода, кг/м^3

Из рисунков 4.6-4.8 видно, что теоретические значения показателей токсичности H_{T} , $H_{\text{T,CO}}$ и $H_{\text{T,O}_2}$, полученные с использованием формулы (4.9) и

экспериментальных средних значений L_{CO} , достаточно точно совпадают с соответствующими экспериментальными величинами при горении всех рассматриваемых материалов.

Теоретические величины ρ_{CO} , H_T , $H_{T,CO}$ и H_{T,O_2} в начале процесса горения больше соответствующих экспериментальных значений (см. рисунки 4.3-4.8), так как в расчетах по формулам (4.7) и (4.9) используется средняя величина коэффициента L_{CO} , а локальное значение L_{CO} меньше среднего при плотности кислорода, близкой к ее плотности в атмосферном воздухе (что видно из работ [6, 7]). Поэтому расчет с использованием выражений (4.7) и (4.9) дает некоторый запас по надежности оценки времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода.

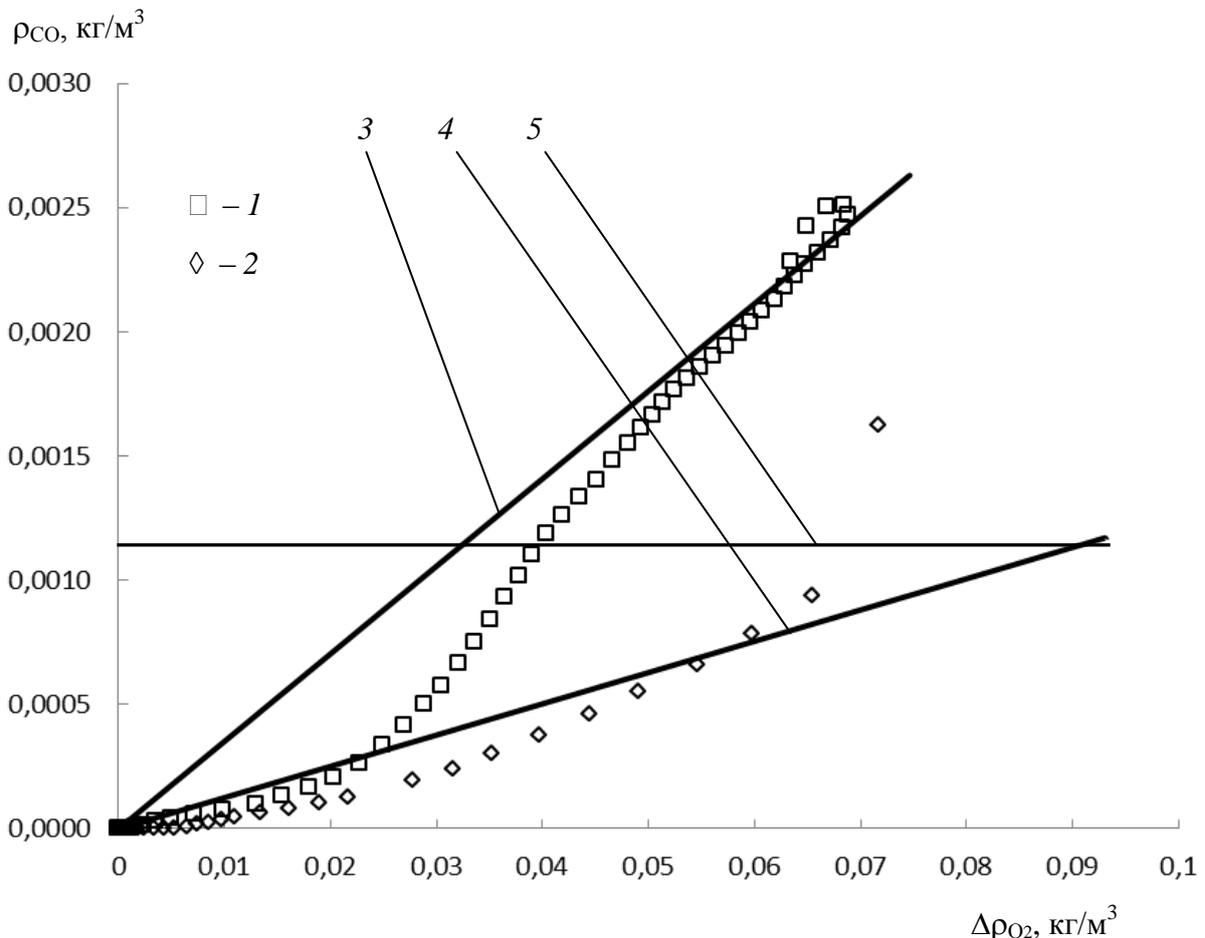


Рисунок 4.4 - Зависимости среднеобъемной плотности оксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода при горении трансформаторного масла ($F=0,01$ м²):

экспериментальные значения: 1 – $\delta=1,15$ мм; 2 – $\delta=7,3$ мм;

расчет по формуле (4.7): 3 – $\delta=1,15$ мм; 4 – $\delta=7,3$ мм; 5 – $\rho_{CO,кр}$

Критические значения показателя токсичности, полученные из экспериментов, приведены в таблице 4.1, где $H_{т.кр}$ – критическое значение показателя токсичности, при котором плотность CO или O₂ достигает критической величины.

Для рассматриваемых условий проведения экспериментов критическая величина показателя токсичности находится в диапазоне $H_{т.кр}=1,29\div 1,93$.

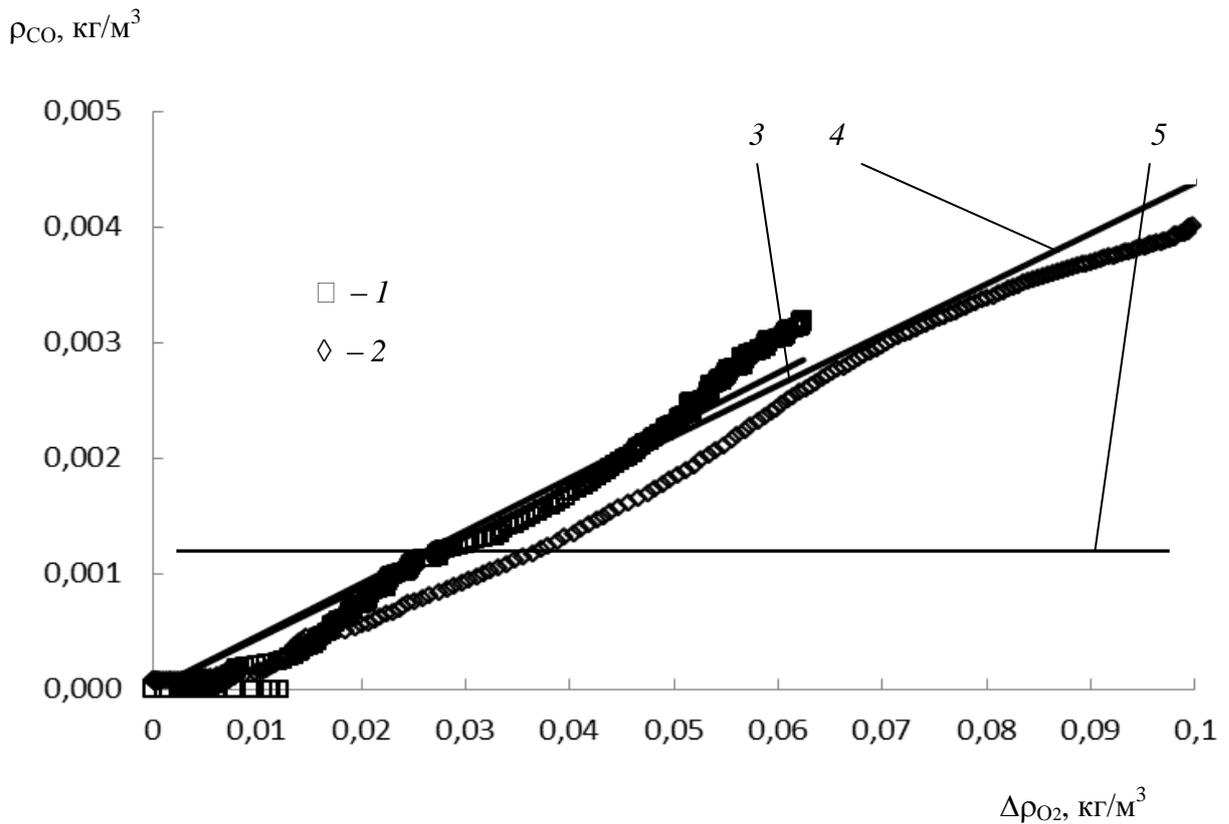


Рисунок 4.5 - Зависимости среднеобъемной плотности оксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода при горении оболочки кабелей ПВХ:

экспериментальные значения: 1 – $F=0,0067 \text{ м}^2$; 2 – $F=0,0122 \text{ м}^2$;

расчет по формуле (4.7): 3 – $F=0,0067 \text{ м}^2$; 4 – $F=0,0122 \text{ м}^2$; 5 – $\rho_{CO.кр}$

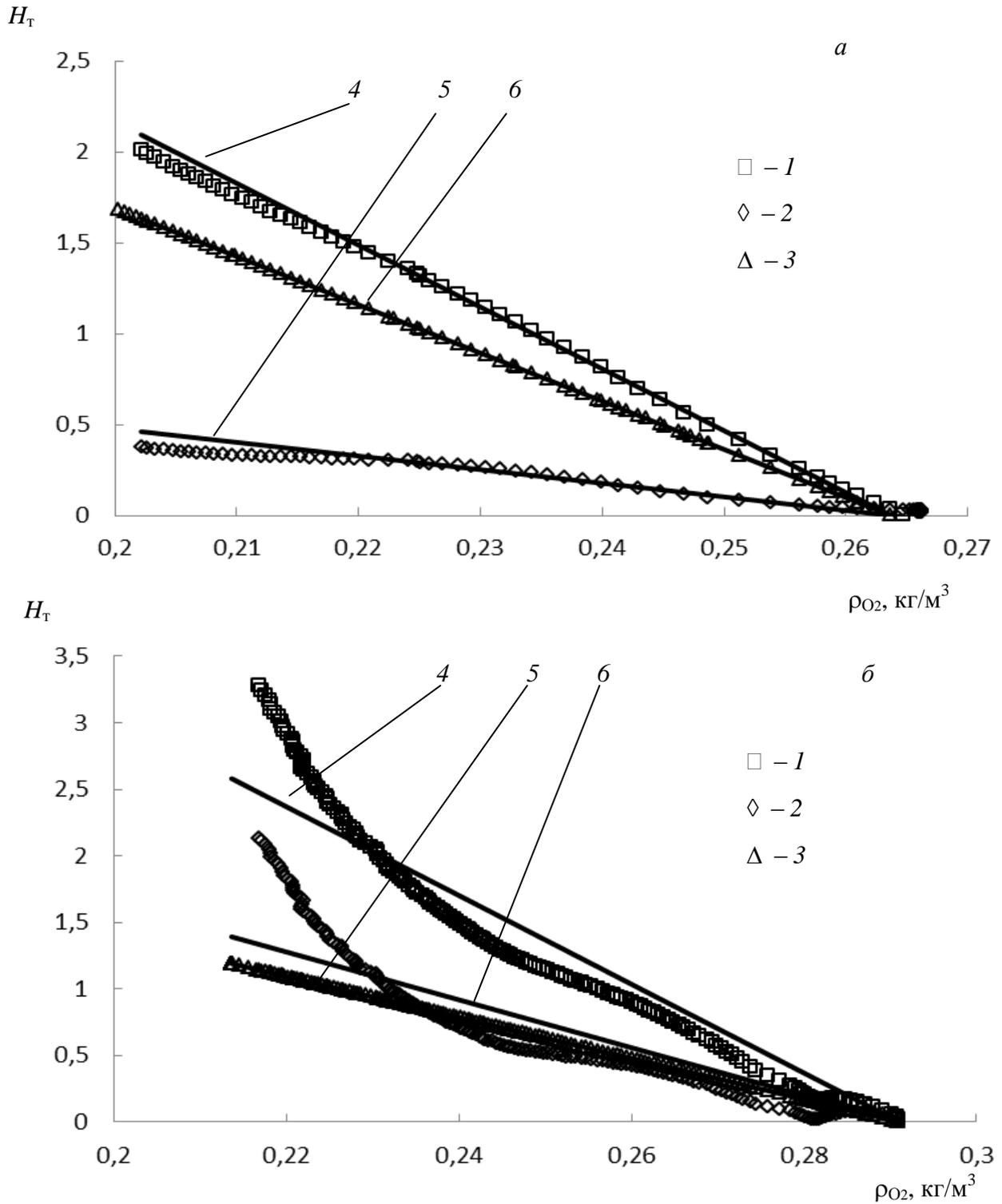


Рисунок 4.6 - Зависимости показателя токсичности от среднеобъемной плотности кислорода при горении хвойных древесных стройматериалов: *a* – $F=0,0145$ м²; *б* – $F=0,0072$ м²;
 экспериментальные значения: 1 – H_T ; 2 – $H_{T.CO}$; 3 – $H_{T.O_2}$;
 расчет по формуле (4.9): 4 – H_T ; 5 – $H_{T.CO}$; 6 – $H_{T.O_2}$

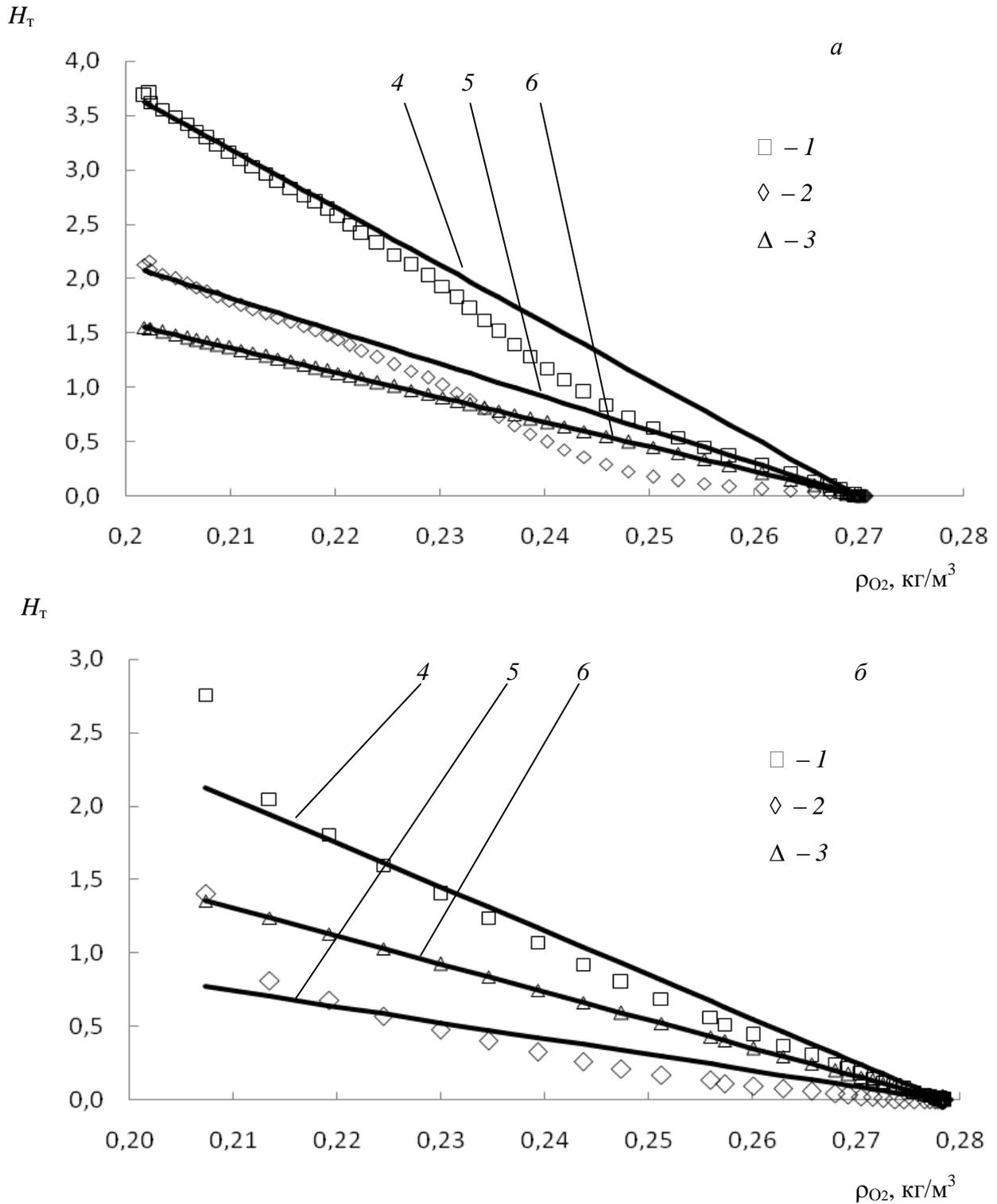


Рисунок 4.7 - Зависимости показателя токсичности от среднеобъемной плотности кислорода при горении трансформаторного масла ($F=0,01$ м²): *а* – $\delta=1,15$ мм; *б* – $\delta=7,3$ мм;
 экспериментальные значения: 1 – H_T ; 2 – $H_{T,CO}$; 3 – H_{T,O_2} ;
 расчет по формуле (4.9): 4 – H_T ; 5 – $H_{T,CO}$; 6 – H_{T,O_2}

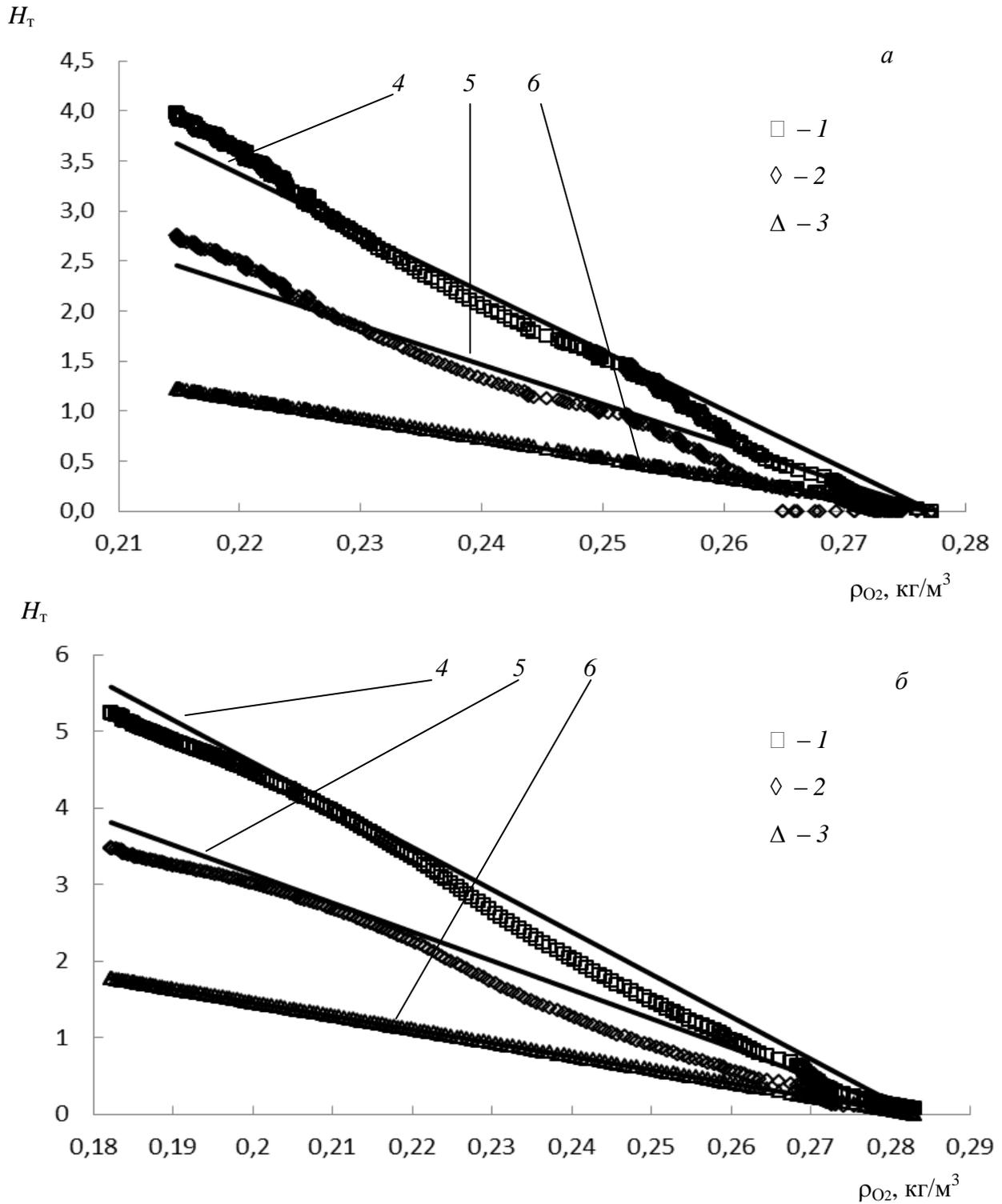


Рисунок 4.8 - Зависимости показателя токсичности от среднеобъемной плотности кислорода при горении оболочки кабелей ПВХ: *a* – $F=0,0067 \text{ м}^2$; *б* – $F=0,0122 \text{ м}^2$;
 экспериментальные значения: 1 – H_T ; 2 – $H_{T,CO}$; 3 – H_{T,O_2} ;
 расчет по формуле (4.9): 4 – H_T ; 5 – $H_{T,CO}$; 6 – H_{T,O_2}

Результаты экспериментов и сопоставление результатов расчетов с опытными данными показывают, что:

- среднеобъемная плотность монооксида углерода и показатель токсичности по совместному воздействию CO и O₂ при горении твердых и жидких веществ и материалов в условно герметичном объеме произвольных размеров могут быть рассчитаны с использованием только среднеобъемной плотности кислорода, а также удельных коэффициентов выделения CO и поглощения O₂;

- предложенная математическая модель позволяет вести расчет динамики изменения среднеобъемной плотности CO при пожаре в реальном полномасштабном помещении, не решая дифференциальное уравнение закона сохранения массы монооксида углерода и используя экспериментальную зависимость плотности CO от плотности O₂ и расчетные значения среднеобъемной плотности O₂.

4.6. Результаты и анализ численных экспериментов по математическому моделированию пожара в полномасштабных помещениях объектов энергетики Вьетнама

В научной литературе отсутствуют экспериментальные данные по одновременно измеренным полям температур и концентраций CO и O₂ в полномасштабных помещениях, которые позволяют обработать результаты в виде зависимостей $\rho_{CO,ср}=f(T_{ср})$ или $\rho_{CO,ср}=f(\rho_{O_2,ср})$. Поэтому проведем численные эксперименты по сравнению результатов расчетов $\rho_{CO,ср}$ по формулам (4.1) и (4.7), а также с использованием полных систем уравнений интегральной и зонной моделей [5] для типовых помещений ТЭС и ГЭС.

Также, в случае вышеуказанных помещений, выполним сравнение времен блокирования путей эвакуации CO по существующему [5, 18, 19] и предложенному методам расчета.

Рассмотрим типовые помещения ТЭС и ГЭС Вьетнама:

- ГЭС Лай Чау: кабельный зал 35×25×5,5 м;

- ТЭС Тхай Бинь: кабельный тоннель $30 \times 2 \times 3,1$ м.

Размеры открытого проема (двери) равны $1,8 \times 2$ м.

Рассматриваем в качестве горючего материала оболочку кабелей ПВХ [5]:

$$Q_n^P = 25 \text{ МДж/кг}; \psi_{уд} = 0,0244 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}); w_{л} = 0,0071 \text{ м/с}; L_{CO} = 0,109; L_{O_2} = 2,19.$$

где $\psi_{уд}$ – удельная массовая скорость выгорания горючего материала, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $w_{л}$ – линейная скорость распространения пламени по поверхности материала, м/с .

Критическое значение плотности CO по существующим методикам расчета равно $\rho_{CO,кр} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ [5].

При спокойном дыхании, когда нет дополнительных воздействий на дыхательный центр, принимаем для взрослого человека весом 75 кг $W = 5,25 \text{ л/мин}$ и $k_w = 0,7$ [40].

Диффузионная способность легких по CO равна [42]:

- при спокойном дыхании: $D_{л,CO} = 20 \text{ мл}/(\text{мм рт.ст.} \cdot \text{мин.})$;

- при физической нагрузке: $D_{л,CO} = 60 \text{ мл}/(\text{мм рт.ст.} \cdot \text{мин.})$.

Принимаем, что в организме взрослого человека средняя удельная масса гемоглобина равна 135 г/л , средний объем крови составляет $5,25 \text{ л}$, средняя масса гемоглобина в крови человека – $708,8 \text{ г}$ [40].

Молекулярная масса гемоглобина составляет $\mu_{Hb} = 68800 \text{ кг/кмоль}$ [40], для CO – $\mu_{CO} = 28 \text{ кг/кмоль}$.

При расчете с использованием полной системы уравнений интегральной модели (уравнения (2.7)-(2.11)) коэффициент теплопотерь ϕ не задается постоянным, а определяется в процессе расчета с использованием уравнения теплопроводности внутри ограждающей конструкции.

Зависимости среднеобъемной температуры от времени с начала пожара представлены на рисунке 4.9. На рисунке 4.10 приведены зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры.

Из рис. 4.10 видно, что, несмотря на существенное отличие размеров помещений кабельных тоннелей и, следовательно, значительное различие

температурного режима пожара (рисунок 4.9), зависимости среднеобъемных плотностей СО от среднеобъемной температуры, полученные с использованием решения полной системы уравнений интегральной модели (кривые 1, 2, 4, 5), а также уравнения (4.7) (кривая 3 и 6), совпадают друг с другом с погрешностью, не превышающей 15 %, в диапазоне температур 20-100°C. При температурах более 100°C отличие в результатах расчетов достигает 17% для условно герметичных помещений и более 40% в случае помещений с проемами.

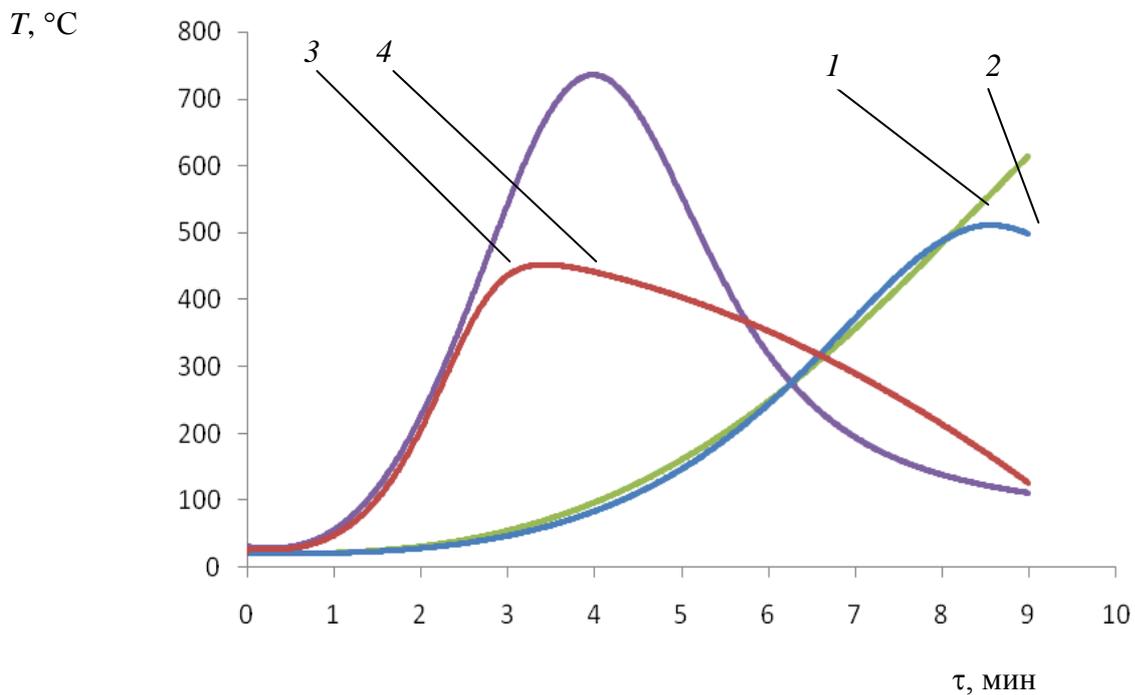


Рисунок 4.9 – Зависимости среднеобъемной температуры от времени с начала пожара: расчет по интегральной модели: кабельный зал 35×25×5,5 м: 1 – закрытый проем; 2 – открытый проем; кабельный тоннель 30×2×3,1 м: 3 – закрытый проем; 4 – открытый проем

Однако нас интересуют температуры, не превышающие критическую величину для человека 70°C. Поэтому совпадение плотности СО, полученной по формуле (4.1), с величинами, рассчитанными по полной системе уравнений интегральной модели, можно считать удовлетворительным для инженерного метода расчета.

Таким образом, масштабный фактор практически не влияет на точность расчета плотности СО по формуле (4.1).

Зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода приведены на рисунке 4.11.

Из рисунка 4.11, *а* видно, что, несмотря на существенное отличие размеров помещений кабельных тоннелей, зависимости среднеобъемных плотностей СО от изменения среднеобъемной плотности O_2 , полученные с использованием решения полной системы уравнений интегральной модели (кривые 1 и 2) для условно герметичных помещений, а также уравнения (4.7) (кривая 3), совпадают друг с другом с погрешностью, не превышающей 19 %.

В случае помещений с открытыми проемами (рисунок 4.11, *б*) вышеуказанная погрешность достигает 1100%. Это объясняется тем, что в помещениях с открытыми проемами выражение (4.7) несправедливо, так как граничные условия в этом случае существенно отличаются от аналогичных условий в условно герметичном помещении.

Таким образом, масштабный фактор практически не влияет на точность расчета плотности СО по формуле (4.7) только в случае условно герметичного помещения.

Зависимости массовой доли карбоксигемоглобина от времени с начала пожара в случае средней массы гемоглобина в организме взрослого человека представлены на рисунке 4.12.

На рисунке 4.13 приведены зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от времени с начала горения. Из рисунка 4.13 можно определить время блокирования путей эвакуации СО с использованием существующего метода расчета [5, 18, 19].

В таблице 4.2 приведены полученные с использованием предложенного и существующего [5, 18, 19] методов расчета критические времена воздействия СО.

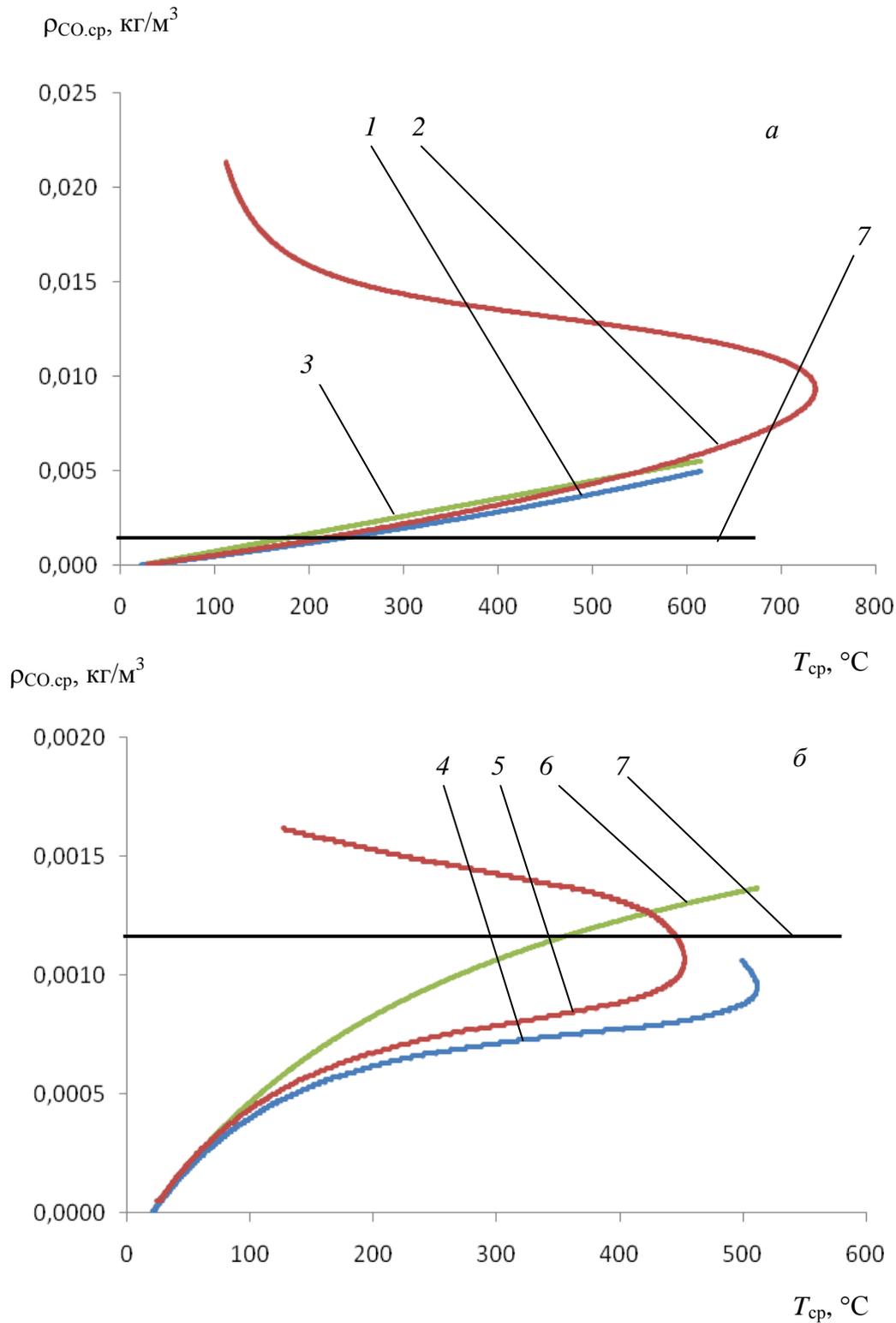


Рисунок 4.10 – Зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от среднеобъемной температуры: расчет по интегральной модели: *a* – закрытый проем: 1 – кабельный зал $35 \times 25 \times 5,5$ м; 2 – кабельный тоннель $30 \times 2 \times 3,1$ м; 3 – расчет по формуле (4.1) при $\varphi=0,6$; *б* – открытый проем: 4 – кабельный зал $35 \times 25 \times 5,5$ м; 5 – кабельный тоннель $30 \times 2 \times 3,1$ м; 6 – расчет по формуле (4.1) при $\varphi=0,3$; 7 – критическое значение $\rho_{CO, \text{кр}}$

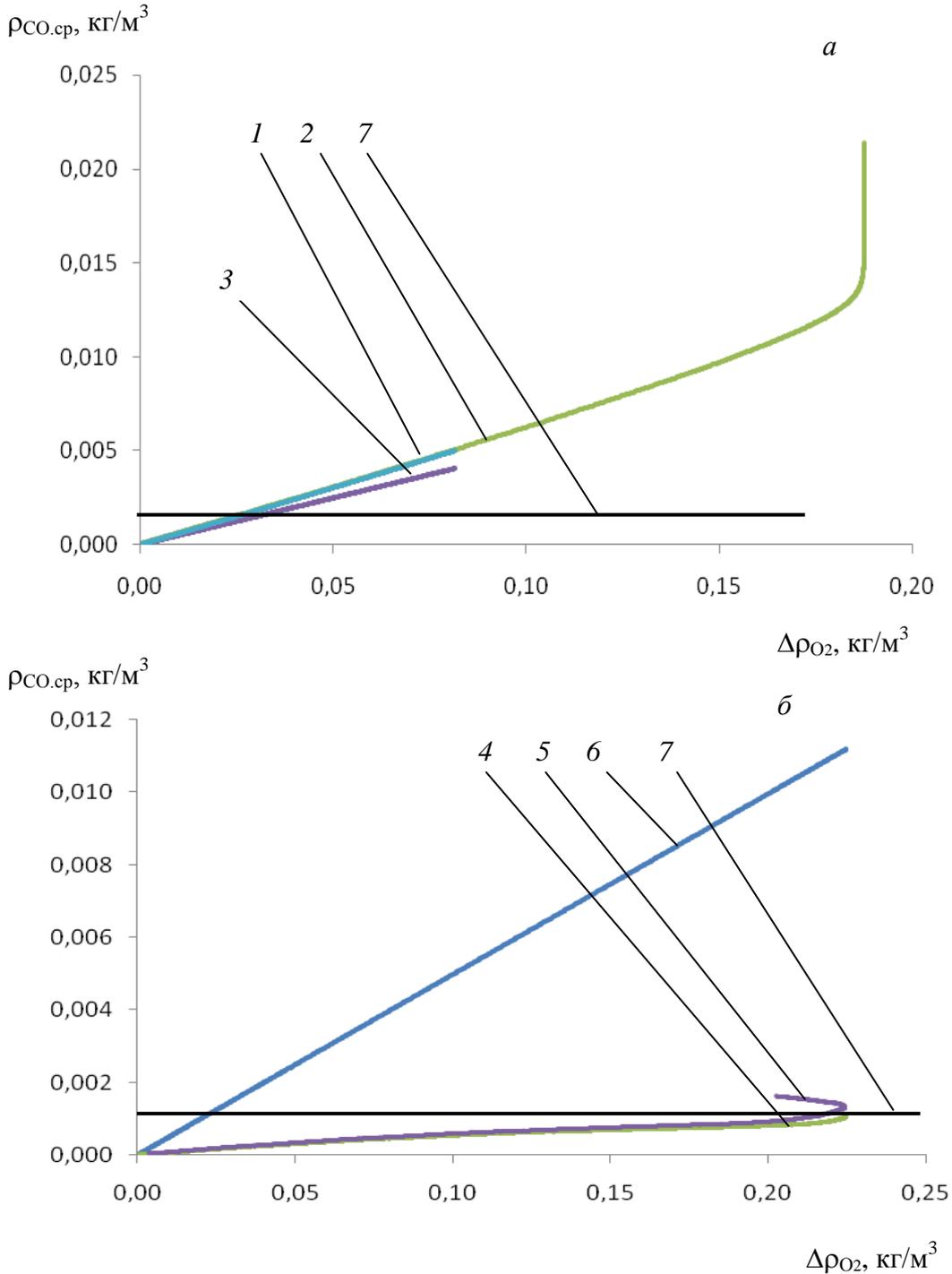


Рисунок 4.11 – Зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода: расчет по интегральной модели: *а* – закрытый проем: 1 – кабельный зал 35×25×5,5 м; 2 – кабельный тоннель 30×2×3,1 м; 3 – расчет по формуле (4.7); *б* – открытый проем: 4 – кабельный зал 35×25×5,5 м; 5 – кабельный тоннель 30×2×3,1 м; 6 – расчет по формуле (4.7); 7 – критическое значение $\rho_{CO,кp}$; $\Delta\rho_{O_2} = \rho_{O_2,в} - \rho_{O_2}$ – изменение среднеобъемной плотности кислорода, $кг/м^3$

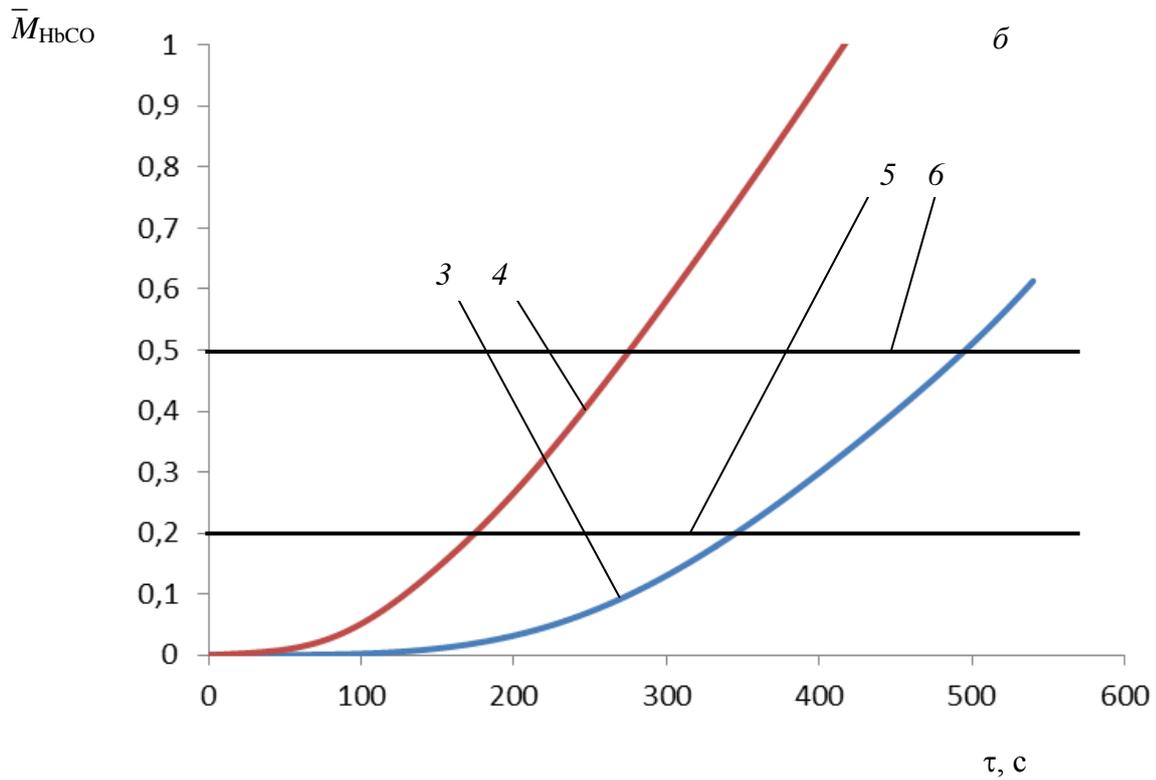
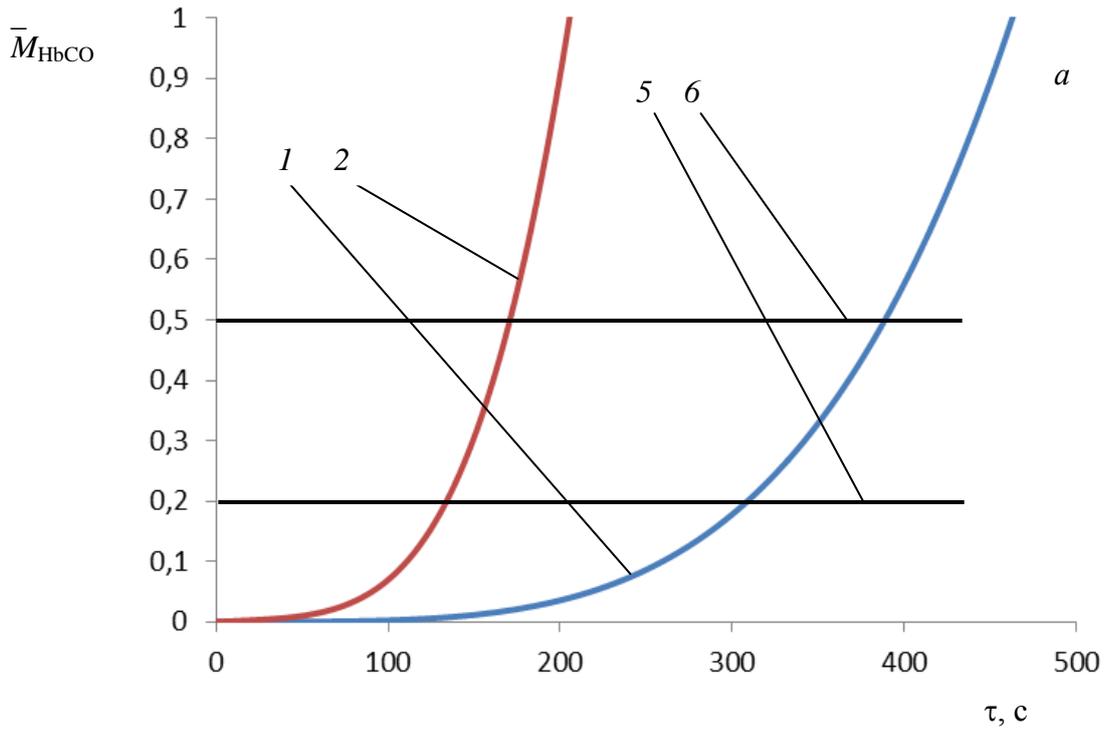


Рисунок 4.12 – Зависимости массовой доли карбоксигемоглобина от времени с начала пожара: *a* – закрытый проем: 1 – кабельный зал 35×25×5,5 м; 2 – кабельный тоннель 30×2×3,1 м; *б* – открытый проем: 3 – кабельный зал 35×25×5,5 м; 4 – кабельный тоннель 30×2×3,1 м; 5 – легкое отравление; 6 – среднетяжелое отравление

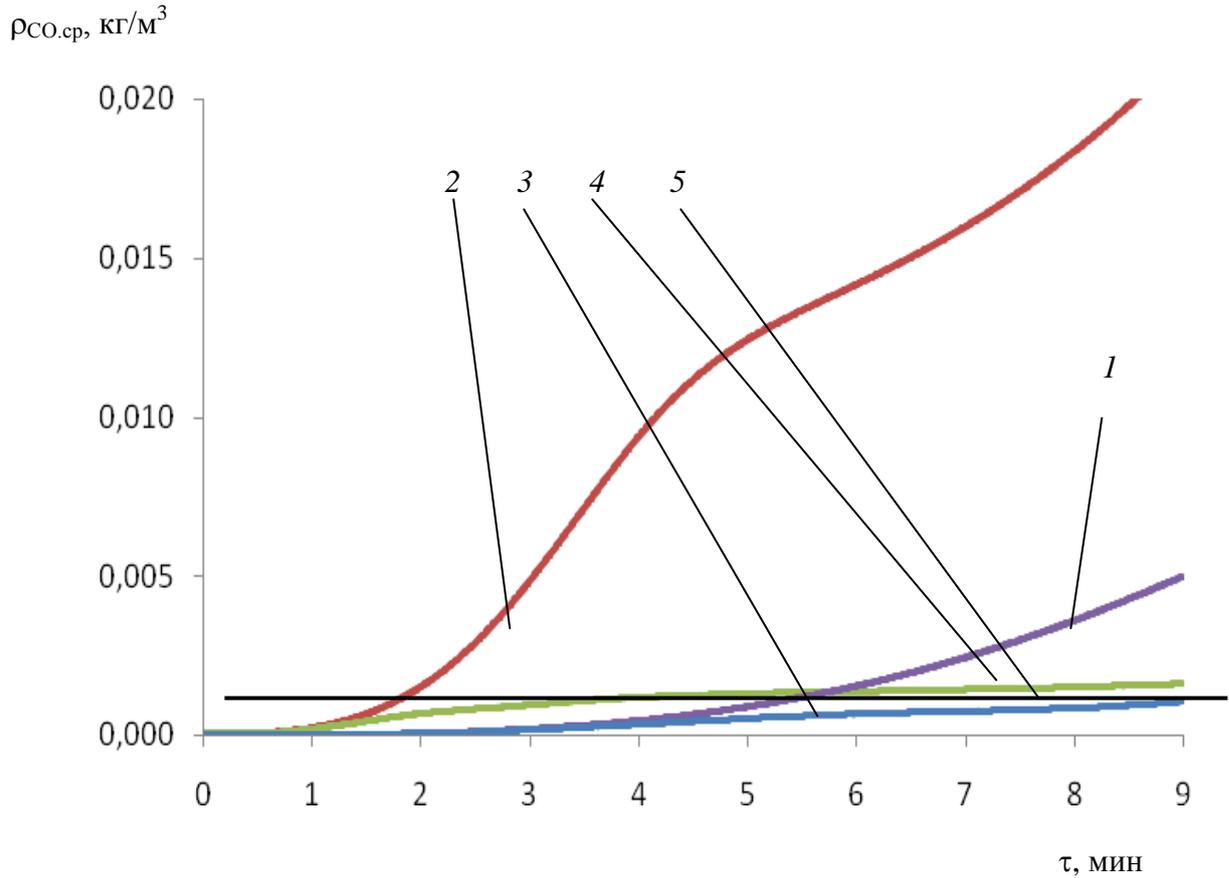


Рисунок 4.13 – Зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от времени с начала пожара с использованием расчета по интегральной модели: закрытый проем: 1 – кабельный зал $35 \times 25 \times 5,5$ м; 2 – кабельный тоннель $30 \times 2 \times 3,1$ м; открытый проем: 3 – кабельный зал $35 \times 25 \times 5,5$ м; 4 – кабельный тоннель $30 \times 2 \times 3,1$ м; 5 – критическое значение $\rho_{CO,кр}$

В соответствии с нормативной литературой [61] критические концентрации токсичных продуктов горения принимаются по литературным данным для условий одноразового 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.

Из таблицы 4.2 видно, что время перехода от легкой степени отравления к средней находятся в диапазоне $\Delta\tau_2 = 0,62 \div 2,51$ мин. Поэтому нормативное требование к критической концентрации СО не выполняется, так как менее, чем за 3 мин человек не сможет самостоятельно покинуть помещение.

Таблица 4.2. Критические времена воздействия СО

Помещения		Критические времена воздействия СО, мин			$\Delta\tau_1$, мин	$\Delta\tau_2$, мин
		$\tau_{кр.1}$	$\tau_{кр.2}$	$\tau_{кр.3}$		
Кабельный зал 35×25×5,5 м	закрытый проем	5,15	6,48	5,44	0,29	1,33
	открытый проем	5,76	8,27	–	–	2,51
Кабельный тоннель 30×2×3,1 м	закрытый проем	2,23	2,85	1,81	–0,42	0,62
	открытый проем	2,91	4,60	3,82	0,91	1,69

Примечания: – - плотность СО не достигла критического значения за время пожара; $\Delta\tau_1 = \tau_{кр.3} - \tau_{кр.1}$ – разница по времени между критическими временами эвакуации, полученными с использованием существующего и предложенного подходов; $\Delta\tau_2 = \tau_{кр.2} - \tau_{кр.1}$ – промежуток времени перехода от легкой степени отравления к средней.

Время блокирования путей эвакуации монооксидом углерода ($\tau_{кр.3}$), полученное с использованием существующего подхода [5, 18, 19], согласно таблице 4.2 может быть больше соответствующей величины $\tau_{кр.1}$, определенной на основе предложенного метода, на $\Delta\tau_1 = 0,91$ мин.

Кроме того, предложенный подход в случае кабельного зала с открытым проемом (таблица 4.2) показал, что может произойти отравление человека легкой и средней степени тяжести, в то время как согласно существующему методу расчета плотность СО не достигает критического значения за все время пожара.

Выводы

Предложенный новый теоретико-экспериментальный подход к расчету времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре в помещении в отличие от существующего [5, 18, 19] позволяет учесть реальные свойства горючих материалов, находящихся в помещении, а также характеристики процесса дыхания и поглощения СО организмом человека во время его эвакуации.

Использование существующего метода расчета [5, 18, 19], основанного на понятии критической плотности СО, может привести к качественно и количественно некорректным результатам по определению возможности безопасной эвакуации людей для конкретных объемно-планировочных решений зданий и сооружений.

Предложенный подход впервые дает возможность рассчитать промежуток времени от начала пожара, после которого люди, находящиеся в помещении без средств защиты от СО (самоспасателей и т.п.), с большой вероятностью неспособны самостоятельно покинуть помещение, и существует возможность их спасения при транспортировке в безопасную зону, т.е. фактически определить время спасения людей.

4.7. Методика расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре

Предложенный метод расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при использовании интегральной модели расчета динамики опасных факторов пожара проводится в соответствии с предложенной методикой, состоящей из следующих этапов:

- определяется расчетная зависимость от времени среднеобъемной плотности кислорода ($\rho_{O_2,cp}=f(\tau)$);
- находится зависимость среднеобъемной плотности СО от времени с использованием экспериментальной зависимости $\rho_{CO,cp}=f(\rho_{O_2,cp})$, полученной в мелкомасштабной экспериментальной установке [6, 7];
- определяется зависимость локальной плотности СО от времени на уровне рабочей зоны путей эвакуации с помощью коэффициента неравномерности концентрационных полей по высоте помещения [5];
- по величине локальной плотности СО рассчитывается накопление по времени массовой доли карбоксигемоглобина в крови человека с использованием уравнения (3.8);

- по достижению массовой долей карбоксигемоглобина величины, соответствующей отравлению легкой или средней степени тяжести, определяется соответственно безопасное время эвакуации ($\tau_{кр.1}$) или спасения ($\tau_{кр.2}$).

В случае использования зонной модели среднеобъемные величины температуры и плотностей O_2 и CO относятся к зоне припотолочного слоя.

В таблице 4.3 приведены основные положения существующего [5, 18, 19] и предложенного подходов к расчету времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода.

Таблица 4.3. Основные положения существующего и предложенного подходов к выполнению условия безопасной эвакуации и спасения людей по воздействию монооксида углерода

	Среднеобъемная плотность CO		
	Работы [5, 18, 19]	Работы [6, 7]	Предложенный подход
Исходные данные**	L_{CO}	–	–
Расчетная зависимость	Уравнение закона сохранения массы CO в помещении	$\rho_{CO,cp}=f(T_{cp})^*$ или уравнение закона сохранения массы CO в помещении	$\rho_{CO,cp}=f(\rho_{O_2,cp})^*$
	Критическое значение CO		
	Работы [5, 8]	Работы [6, 7]	Предложенный подход
Эвакуация	$\rho_{CO,кр}=1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$	$\rho_{CO,кр}=1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$	$\bar{M}_{НЬСО}=0,2$
Спасение	–	–	$\bar{M}_{НЬСО}=0,5$

Примечания: * – из эксперимента; ** – остальные исходные данные совпадают

4.8. Практические рекомендации по обеспечению безопасности людей от воздействия монооксида углерода при пожарах на объектах энергетики Вьетнама

При определении времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода, а также времени спасения людей при пожаре в ОЭ Вьетнама необходимо использовать разработанную методику расчета (п. 4.7 данной работы), которая учитывает следующие основные особенности процессов эвакуации и спасения в отличие от современных научных и нормативных методик расчета:

- свойства реальной горючей нагрузки, находящейся на ОЭ;
- параметры процесса дыхания и индивидуальные физиологические характеристики (вес, масса крови и т.п.) людей.

Для учета свойств реальных горючих веществ и материалов, находящихся в производственном здании, необходимо провести экспериментальные исследования этих горючих материалов в мелкомасштабной экспериментальной установке [6, 7] по методике, описанной в п. 4.2 данной работы, с целью получения экспериментальной зависимости $\rho_{CO,cp}=f(\rho_{O2,cp})$.

Для учета параметров процесса дыхания и индивидуальных физиологических характеристик людей необходимо провести индивидуальное тестирование персонала ОЭ.

После уточнения исходных данных по горючей нагрузке и персоналу, а также по объемно-планировочным решениям ОЭ с использованием методики расчета, описанной в п. 4.7 данной работы, определяется время блокирования путей эвакуации СО в условиях свободного развития пожара.

Если, после сравнения с расчетным временем эвакуации людей из ОЭ, условие безопасной эвакуации по повышенной концентрации СО не выполняется, то:

- выбирается тип, марка и характеристики самоспасателей с защитой от СО;

- выполняются расчеты времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода с учетом самоспасателей.

В качестве примера рассмотрим производственное здание ГЭС Шон Ла Вьетнама (рисунок 1.6 главы 1).

Эвакуация происходит от наиболее удаленной точки, расположенной на уровне -30.00 м, до выхода из машинного зала непосредственно наружу.

Характеристики персонала принимались в соответствии с данными п. 3.4 данной работы (человек массой 75 кг и т.д.).

По результатам расчетов с использованием разработанной методики, представленной в п. 4.7 данной работы, критические времена по воздействию монооксида углерода составляли:

- кабельный тоннель (горение оболочки кабелей ПВХ [5]): время блокирования путей эвакуации $\tau_{кр.1} = 3,2$ мин; время спасения $\tau_{кр.2} = 5,1$ мин;

- машинный зал (горение пролива турбинного масла [5]):

$\tau_{кр.1} = 2,9$ мин; $\tau_{кр.2} = 5,3$ мин.

Расчетное время (τ_p) находилось в случае отсутствия маломобильных групп населения.

Наиболее удаленным местом начала эвакуации является кабельный тоннель на отметке -30.00 м.

Плотность людского потока была меньше $D < 0,05 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Согласно [19, 92] скорость движения людского потока равна:

- горизонтальный путь: $v = 100$ м/мин.;

- лестница вниз: $v = 100$ м/мин.;

- лестница вверх: $v = 60$ м/мин.

Длины горизонтальных участков путей эвакуации на отметках -3.00, -6.00, -10.00 и -30.00 м шириной 3 м принимались равными 70 м, на отметках +5.00, +10.00, +15.00 и +20.00 м – 45 м.

Время начала эвакуации ($\tau_{нэ}$) согласно работе [19] принималось равным 0,5 мин для различных уровней машинного зала и 2 мин для уровней производственного здания ниже пола машинного зала.

Время движения составляло:

- по горизонтальным путям кабельных тоннелей: $\tau_p = 0,7$ мин;
- по лестнице вверх: $\tau_p = 1,5$ мин;
- до эвакуационного выхода из машинного зала: $\tau_p = 0,45$ мин.

Условие безопасной эвакуации для рассматриваемых сценариев развития пожара без самоспасателей не выполняется, так как:

- кабельный тоннель: $\tau_{кр.1} = 3,2$ мин. $< \tau_p + \tau_{нэ} = 2,2 + 2 = 4,2$ мин;
- машинный зал: $\tau_{кр.1} = 3,1$ мин. $< \tau_p + \tau_{нэ} = 2,65 + 2 = 4,65$ мин.

Выбираем универсальный фильтрующий малогабаритный самоспасатель (УФМС) «ШАНС» -Е с полумаской [93] с минимальным временем защитного действия 25 мин.

Вывод: условие безопасной эвакуации людей из производственного здания рассматриваемого ОЭ (ГЭС Шон Ла) Вьетнама выполняется только при условии использования самоспасателей.

4.9. Выводы по четвертой главе

1. Среднеобъемная плотность СО и показатель токсичности по совместному воздействию СО и O_2 при горении твердых и жидких веществ и материалов в условно герметичном объеме произвольных размеров могут быть рассчитаны с использованием только среднеобъемной плотности O_2 , а также удельных коэффициентов выделения СО и поглощения O_2 .

2. Разработанная математическая модель позволяет вести расчет динамики изменения среднеобъемной плотности СО при пожаре в реальном полномасштабном помещении ОЭ, не решая дифференциальное уравнение закона сохранения массы монооксида углерода и используя экспериментальную

зависимость плотности СО от плотности O_2 и расчетные значения среднеобъемной плотности O_2 .

3. Предложенный новый теоретико-экспериментальный подход к расчету времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре в помещении ОЭ в отличие от существующего [5, 18, 19] позволяет учесть реальные свойства горючих материалов, находящихся в помещении, а также характеристики процесса дыхания и поглощения СО организмом человека во время его эвакуации или спасения.

4. Использование существующего метода расчета [5, 18, 19], основанного на понятии критической плотности СО, может привести к качественно и количественно некорректным результатам по определению возможности безопасной эвакуации людей для конкретных объемно-планировочных решений зданий и сооружений.

5. Предложенный подход впервые дает возможность рассчитать промежуток времени от начала пожара, после которого люди, находящиеся в помещении без средств защиты от СО (самоспасателей и т.п.), с большой вероятностью неспособны самостоятельно покинуть помещение, и существует возможность их спасения при транспортировке в безопасную зону, т.е. фактически определить время спасения людей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Существующие методы расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода недостаточно обоснованно учитывают реальные свойства горючих материалов, находящихся в помещениях, и процесс интоксикации организма человека монооксидом углерода. Предложенный новый теоретико-экспериментальный подход к расчету времени блокирования путей эвакуации СО в отличие от существующих позволяет учесть реальные свойства горючих материалов, а также характеристики процесса дыхания и поглощения СО организмом человека во время его эвакуации или спасения.

2. Разработанные математические модели расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода на основе применения модифицированных интегральной и зонной моделей прогнозирования термогазодинамики пожара с использованием экспериментальных зависимостей среднеобъемной плотности СО от среднеобъемной плотности O_2 , а также по воздействию СО на организм человека, показали, что использование существующих в научной и нормативной литературе методов расчета приводит к существенному завышению времени блокирования путей эвакуации СО, т.е. повышению вероятности гибели людей во время эвакуации или спасения.

3. Предложенные новые критерии для определения критических времен воздействия СО на человека во время его эвакуации и спасения на ОЭ с использованием разработанной физико-математической модели расчета концентрации карбоксигемоглобина в крови человека позволяют учесть повышенную скорость легочной вентиляции, характерную для условий пожара в помещении, и более обоснованно, чем использование понятия критической концентрации или токсодозы, проводить расчет времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода на ОЭ Вьетнама.

4. Проведенные экспериментальные исследования в мелкомасштабной опытной установке зависимостей среднеобъемной плотности СО от среднеобъемной плотности O_2 при горении характерных для ОЭ горючих веществ

и материалов показали достаточную для практических целей точность разработанных модифицированных интегральной и зонной математических моделей. При этом, в вышеуказанных моделях отпадает необходимость решения дифференциальных уравнений закона сохранения массы СО, в которых входят недостаточно обоснованные значения удельного коэффициента выделения СО.

5. Выполненные численные эксперименты по определению времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода в типовых помещениях ОЭ Вьетнама с использованием предложенной и существующей математических моделей показали, что использование существующих методов расчета, основанных на понятии критической плотности СО, может привести к качественно и количественно некорректным результатам по определению возможности безопасной эвакуации людей для конкретных объемно-планировочных решений ОЭ.

6. Обеспечение безопасной эвакуации людей из ОЭ Вьетнама требует разработки дополнительных организационно-технических противопожарных мероприятий (например, использование самоспасателей), основанных на предварительном прогнозировании концентраций СО при пожаре с использованием предложенной методики расчета времени блокирования путей эвакуации СО с учётом их объёмно-планировочных и конструктивных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Статистика EVN (VietnamElectricity - Электричество Вьетнама), 31/12/2015.
URL: <http://www.evn.com.vn/News/Thong-cao-bao-chi.aspx>
2. Белешников, И. Л. Судебно-медицинская оценка содержания цианидов в органах и тканях людей, погибших в условиях пожара : автореф. дис. ... канд. мед. наук : 14.00.24 / Белешников Игорь Леонидович. — СПб., 1996. — 24 с.
3. Иличкин, В. С. Токсичность продуктов горения полимерных материалов: Принципы и методы определения [Текст] / В. С. Иличкин. — СПб. : Химия, 1993. — 136 с.
4. 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.
5. Кошмаров, Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении [Текст] / Ю. А. Кошмаров. — М. : Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
6. Пузач, С. В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении [Текст] / С. В. Пузач, Е. В. Сулейкин // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 2. — С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20.
7. Пузач, С. В. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования монооксида углерода при пожаре в помещении [Текст] / С. В. Пузач, Р. Г. Акперов // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т.25, №5. — С. 18-25. DOI: 10.18322/PVB. 2016.25.05.18-25.
8. Трухня, А. Д. Основы современной энергетики: 2 т. [Текст] / А. Д. Трухня А. А. Макаров, В. В. Клименко; под общ. ред. Е. В. Аметистова. — М. : Издательский дом МЭИ, 2008. ISBN 978 5 383 00162 2
9. Микеев, А. К. Противопожарная защита АЭС [Текст] / А. К. Микеев. — М. : Энергоиздат, 1990. — 432 с.

10. Саксон, Р. Атриумные здания [Текст] / Р. Саксон. — М. : Стройиздат, 1987. — 135 с.
11. Saxon, R. Atrium buildings: development and design / R Saxon. — London: The Architectural Press, 1986. — 136 p.
12. Могильнер, А. И. О некоторых методах решения задач контроля и диагностики аварийных состояний ЯЭУ [Текст] / А. И. Могильнер, В. П. Курдюк, А. О. Скоморохов, Д. М. Швецов. Препринт ФЭИ-588 в РГБ. — Обнинск. : 1975. — 25 с.
13. Доан, В. М. Методика расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре в производственных зданиях ГЭС Вьетнама [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03 / Доан Вьет Мань. — М., 2011. — 183 с.
14. Исаева, Л. К. Пожары и окружающая среда [Текст] / Л. К. Исаева. — М.: Изд. Дом «Калан», 2001. — 222 с.
15. Исаева, Л. К. Экологические последствия пожаров [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.03 / Исаева Людмила Карловна. — М., 2001. — 107 с.
16. 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.
17. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ: (в ред. от 10 июля 2012 г.) // Гарант: инф.-прав. об-ние. — Электрон. Дан. — М., 2017. — Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.
18. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [Электронный ресурс]: приказ МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382: (зарегистрировано в Минюсте РФ 06.08.2009 № 14486): (в ред. от 12.12.2011) // Гарант: инф.-прав. об-ние. — Эл. Дан. — М., 2017. — Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.

19. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс]: приказ МЧС России от 10 июля 2009 г №404: (зарегистрировано в Минюсте РФ от 17.08.2009 г №14541) // Гарант: инф.-прав. об-ние. — Эл. Дан. — М., 2017. — Доступ из локальной сети б-ки Академии ГПС МЧС России.
20. Изменения, вносимые в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности, утвержденную приказом МЧС России от 30.06.2009 № 382. Приложение к приказу МЧС России от 12.12.2011 №749. Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, № 13, 26.03.2012.
21. Изменения, вносимые в методику определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, утвержденную приказом МЧС России от 10.07.2009 № 404. Приложение к приказу МЧС России №649. Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти, № 8, 21.02.2011.
22. Abdulrhman, M. D. Ways of Analysis of Fire Effluents and Assessment of Toxic Hazards / M. D. Abdulrhman // Journal of Analytical Sciences, Methods and Instrumentation. — 2015. — vol. 5. — pp. 1-12
23. Симоненко, В. Б. Острые отравления: неотложная помощь [Текст] / В. Б. Симоненко, П. Г. Простакишин, С. Х. Сарманаев. — М. : Экономика и информатика, 2008. — 269 с.
24. Levin B. C. Toxicology of Fire and Smoke / B. C. Levin, E.D. Kuligovski. Inhalation Toxicology. 2nd Edition. Chapter 10, CRC Press (Taylor and Francis Group), Boca Raton, FL, Salem, H.; Katz, S. A., Editor(s). — 2005. — pp. 205-228.
25. Щеглов П.П. Продукты разложения и горения полимеров при пожаре [Текст] / П. П. Щеглов. — М. : ВИПТШ МВД СССР, 1981. — 70 с.
26. Щеглов, П. П. Исследование состава газообразных продуктов термоокислительного разложения некоторых полимерных строительных

- материалов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03 / Щеглов Павел Петрович. — М., 1967. — 124 с.
27. Матюшин, А.В. Исследование начальной стадии развития пожара в помещении с целью обоснования необходимого времени эвакуации людей из торговых залов универмагов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03 / Матюшин Александр Васильевич. — М., 1982. — 289 с.
28. Веселы, В. Исследование состава продуктов термоокислительного разложения и горения некоторых синтетических текстильных волокон с целью обоснования допустимого времени эвакуации людей из зданий при пожаре [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03 / Веселы Владимир. — М., 1978. — 213 с.
29. 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.
30. Смагин, А.В. Моделирование выделения и распространения токсичных газов при пожарах в зданиях и сооружения для обоснования их объёмно-планировочных решений с целью обеспечения безопасной эвакуации людей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03 / Смагин Александр Владимирович. — М., 2008. — 269 с.
31. Pauluhn, J. A. Retrospective Analysis of Predicted and Observed Smoke Lethal Toxic Potency Values / J. A. Pauluhn // *Journal of Fire Sciences*. — 1993. — vol. 11, no. 2. — pp. 109-130.
32. Дружинин, Г. А. // Специальная и клиническая физиология гипоксических состояний: тез. докл. [Текст] / Г. А. Дружинин, П. С. Ганжара, Е. И. Чинченко и др. — Киев : Здоровье, 1979. — С. 47-50.
33. Кустов, В. В. Комбинированное действие промышленных ядов при однократном воздействии [Текст] / В. В. Кустов, Л. А. Тиунов, Г. А. Васильев. — М.: Медицина, 1977. — 240 с.
34. Тиунов, Л. А. Токсикология окиси углерода [Текст] / Л. А. Тиунов, В. В. Кустов. — М. : Медицина, 1980. — 288 с.

35. Роберт Д. Трейтмен, Виллиам А. Бёргесс, Авраам Голд. Примеси вредных веществ в воздухе, с которыми встречаются пожарные // Департамент научных исследований окружающей среды и здоровья. Гарвардская школа общественного здоровья. Бостон, МА 02115.
36. Purser, D. A. The application of exposure concentration and dose to evaluation of the effects of irritants as components of fire hazard / D. A. Purser // Interflam 2007. Proceedings. — Royal Holloway College. University of London. — UK. — 3-5th September 2007. pp. 1033-1046.
37. Тараненко, Н. А. Оценка химического фактора при пожарах [Текст] / Н. А. Тараненко, В. Б. Дорогова, И. В. Колычева, В. А. Верзунов // Гигиена и санитария. — 2004. — № 1. — С. 37-39.
38. Vabrauskas, V. Toxic potency measurement for fire hazard analysis / V. Vabrauskas, B. C. Levin, R. G. Gann, M. Paabo, R. H. Harris, R. D. Peacock, and S. Yusa // NIST Special Publication 827. — National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg. — MD. — 1991.
39. ГОСТ 12.1.044-89. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения : офиц. текст. — М. : Изд. Стандартов, 1989. — 118 с.
40. Покровский, В. М. Физиология человека: учебник, 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В.М. Покровский, Г. Ф. Коротько. — М.: Медицина, 2003. — 656 с. — ISBN 5-225-04729-7.
41. Камкин, А.Г. Атлас по физиологии. В двух томах. Том 2: учебное пособие [Текст] / А. Г. Камкин, И. С. Киселева. — М. : ГЭОТАР-Медиа, 2013. — ISBN 9785970424193
42. Харрисон, Т. Р. Внутренние болезни: Т. 2 [Текст] / Е. Браунвальд, К. Дж. Иссельбахер, Р. Г. Петерсдорфа, Д. Д. Вилсон, Д. Б. Мартин, А. С. Фаучи. — М.: Медицина, 1992. — 1997.
43. Зобнин, Ю. В. Отравление монооксидом углерода (угарным газом) [Текст] / Ю. В. Зобнин. —СПб. : Тактик-Студио, 2011. — 86 с. — ISBN 978-5-91644-034-8.

44. Гильманов, А. Ж. Клиническое значение и современные методологические аспекты определения уровня карбокси- и метгемоглобина в крови [Текст] / Гильманов А. Ж. // Практическая медицина. — 2014. — №3. — С.17-21.
45. Кошмаров, Ю. А. Теплотехника [Текст] / Ю. А. Кошмаров. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2006. — 501 с.
46. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена [Текст] / С. С. Кутателадзе. — М.: Атомиздат, 1979. — 416с.
47. Иевлев, В. М. Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред [Текст] / В. М. Иевлев. — М. : Наука, 1975. — 256 с.
48. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1987. — 840 с.
49. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. — М.: Наука, 1974. — 540 с.
50. Гинзбург, В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? [Текст] / В. Л. Гинзбург // Успехи физических наук. — 1999. — Т. 169, № 4. — С. 420-441.
51. Леонтьев, А. И. Пути развития теории тепломассообмена [Текст] / А. И. Леонтьев // Известия РАН. Энергетика. — 1996. — № 2. — С. 22-27.
52. Кошмаров, Ю. А. Термогазодинамика пожаров в помещениях [Текст] / В. М. Астапенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский, А. Н. Шевляков. — М. : Стройиздат, 1986. — 370 с.
53. 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.
54. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. — М.: Наука, 1968. — 720 с.

55. Spalding, D. B. Older and newer approaches to the numerical modelling of turbulent combustion // 3-rd International Conference on Computers in Reciprocating Engines and Gas Turbines / D. B. Spalding. — London: IMochE, 1996. — p. 25-37.
56. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] / С. Патанкар. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
57. Welch, S. SOFIE: Simulation of Fires in Enclosures. User Guide. United Kingdom: Cranfield University / S. Welch, P. Rubini. — 1996. — 340 p.
58. Мак-Граттан, К. Руководство пользователя программы FDS (Версия 5) [Текст] / К. Мак-Граттан, Б. Клейн, С. Хостика, Д. Флойд. — Специальное издание НИИСТ 1019-5. — 2007. — 186 с.
59. Фаткуллин, К. В. Клиническое значение и современные методологические аспекты определения уровня карбокси- и метгемоглобина в крови [Текст] / К. В. Фаткуллин, А. Ж. Гильманов, Д. В. Костюков // Практическая медицина. — 2014. — Т. 79, №3. — С. 17-21.
60. Wilbur, S. Toxicological profile for carbon monoxide. — Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry / S. Wilbur, M. Williams, R. Williams. — 2012. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK153693/>.
61. СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения. Введ. 01.05.2009. [Текст] — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. — 14 с.
62. Матвиенко, Н. Н. Фильтрующие самоспасатели и защита от монооксида углерода [Текст] / Н. Н. Матвиенко, П. Ф. Поташников, Н. П. Федоров, М. В. Баюкин, А. Н. Матвиенко // Пожаровзрывобезопасность. — 2006. — Т. 15, №5. — С. 48-51.
63. Kuligowski, E. D. NIST Technical Note 1644. Compilation of data on the sublethal effects of fire effluent / E. D. Kuligowski. — Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2009. — 47 p.
64. Пузач, С. В. К определению показателя токсичности продуктов горения горючих веществ и материалов в помещении [Текст] / С. В. Пузач, В. Г. Пузач, В. М. Доан. // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 4. — С. 4–13.

65. Пузач, С. В. Влияние температуры и граничных условий теплообмена на величину показателя токсичности веществ и материалов при пожаре в помещении [Текст] / С. В. Пузач // Тепловые процессы в технике. — 2013. — Т. 5, №6. — С. 247-253.
66. Кутателадзе, С. С. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое [Текст] / С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 320 с.
67. Полозова, Е. В. Острые отравления угарным газом, осложненные термохимическим поражением дыхательных путей, в условиях пожаров [Текст] : дис. ... д-ра мед. наук : 14.03.04 / Полозова Елена Валентиновна. — СПб., 2011. — 267 с.
68. Монахов, В.Т. Показатели пожарной опасности веществ и материалов. Анализ и предсказание. Газы и жидкости [Текст] / В.Т. Монахов. — М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. — 248 с.
69. Уварова, В. А. Методологические основы контроля пожароопасных и токсических свойств шахтных полимерных материалов [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.03 / Уварова Варвара Александровна. — М., 2016. — 300 с.
70. Уварова, В. А. Инновационный метод оценки токсичности продуктов горения материалов [Текст] / В.А. Уварова // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2013. — № 1.2. — С. 174–178.
71. Молчадский, И. С. Пожар в помещении [Текст] / И. С. Молчадский — М. : ВНИИПО 2005. — 456 с.
72. You, F. Preliminary real-scale experimental studies on cable fires in plenum / F. You // Journal of Fire Sciences. — 2003. — vol. 21. — november. — pp. 465–484.
73. Hartzell, G. E. The fractional effective dose model for assessment of toxic hazards in fires / G. E. Hartzell, H. W. Emmons // Journal of Fire Sciences. — 1988. — no. 6. — pp. 356-362. DOI: 10.1177/073490418800600504.
74. Hartzell, G. E. Modeling of toxicological effects of fire gases: II. mathematical modeling of intoxication of rats by carbon monoxide and hydrogen cyanide / G. E.

- Hartzell, D. N. Priest, W. G. Switzer // *Journal of Fire Sciences*. — 1985. — no. 3. — pp. 115-128. DOI: 10.1177/073490418500300204.
75. Hirschler, M. M. Smoke toxicity measurements made so that the results can be used for improved fire safety // *Journal of Fire Sciences*. — 1991. — no. 9. — pp. 330-347. DOI: 10.1177/073490419100900407.
76. Alexeeff, G. V. Evaluation of smoke toxicity using concentration-time products / G. V. Alexeeff, S. C. Puckham // *Journal of Fire Sciences*. — 1984. — no. 2. — pp. 362-379. DOI: 10.1177/073490418400200504.
77. Christian, S. D. Safe tolerability limits for carbon monoxide? A review of the clinical and fire engineering implications of a single, acute, sub-lethal exposure / S. D. Christian, T. J Shields // *Journal of Fire Sciences*. — 2000. — no. 18. — pp. 308-323. DOI: 10.1177/073490410001800404.
78. Hartzell, G. E. Prediction of the toxic effects of fire effluents / G. E. Hartzell // *Journal of Fire Sciences*. — 1989. — no. 7. — pp. 179–193. DOI: 10.1177/073490418900700303.
79. Morikawa, T. Toxic hazards of acrolein and carbon monoxide during combustion / T. Morikawa // *Journal of Fire Sciences*. — 1984. — vol. 2, no. 2. — pp. 142-152.
80. Рыжов, А. М. Дифференциальное моделирование динамики пожаров и распространения их опасных факторов в помещениях [Текст] / А. М. Рыжов // *Пожаровзрывобезопасность*. — 1994. — Т. 3, № 4. — С. 21-34.
81. Снегирев, А. Ю. Численное моделирование турбулентной конвекции в помещении при наличии очага загорания [Текст] / А. Ю. Снегирев, Л. Т. Танклевский // *Теплофизика высоких температур*. — 1998. — Т. 36, № 6. — С. 973-983.
82. Джалурия, Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен. Пер. с англ. [Текст] / Й. Джалурия. — М. : Мир, 1983. — 400 с.
83. Сэбиси, Т. Конвективный теплообмен [Текст] / Т. Сэбиси, П. Брэдшоу. — М. : Мир, 1987. — 592 с.

84. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров [Текст] / Д. Драйздейл. — М. : Стройиздат, 1988. — 340 с.
85. Torvi, D. A. FIERAsystem: A fire risk assessment tool to evaluate fire safety in industrial buildings and large spaces / D. A. Torvi, G. Morinville, N. Benichou, A. H. Kashef, I. Reid, G. V. Hadjisophocleous // Journal of Fire Protection Engineering. — 2005. — Vol. 15. — August. — pp. 145-172. DOI: 10.1177/1042391505049437.
86. ISO/TS 13571, Life-threatening components of fire – guidelines for the estimation of time available for escape using fire data, International Organization for Standardization, First Edition, 2002.
87. ISO/DIS 13344, Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents, International Organization for Standardization, ISO/TC 92/SC 3, Draft Edition, 2004.
88. Life-threatening components of fire—guidelines for the estimation of time available for escape using fire data, ISO Technical Specification 13571, International Organization for Standardization, Geneva, 2002.
89. Peterson, J. E. Predicting the carboxyhemoglobin levels resulting from carbon monoxide exposures / J. E. Peterson, R. D. Stewart // Journal of Applied Physiology. — Vol. 39. — 1975. — pp. 633–638.
90. Babrauskas, V. The role of bench-scale test data in assessing real-scale fire toxicity / V. R. Babrauskas, R. H. Harris, Jr. E. Braun, B. C. Levin, M. Paabo, R.G. Gann. Technical Note 1284. National Institute of Standards and Technology. — 1991.
91. Richard, G. G. Estimating data for incapacitation of people by fire smoke / G. G. Richard // Fire Technology. — 2004. — Vol. 40. — pp. 201–207.
92. Холщевников, В. В. Людские потоки в зданиях, сооружениях и на территории их комплексов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.10 / Холщевников Валерий Васильевич. — М., 1983. — 486 с.
93. Универсальный фильтрующий малогабаритный самоспасатель (УФМС) «ШАНС» -Е с полумаской (базовая модель). ТУ 2568-001-62787335-2009. Сертификат соответствия С-RU.ЧС13.В.0005. — 24.07.2015.

Приложение.

Акты внедрения результатов диссертационного исследования

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель начальника Института
противопожарной безопасности МОБ СРВ,
к.т.н., доцент, старший полковник милиции



Бу Ван Винь

11. 05. 2018 г.

АКТ

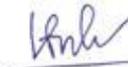
О внедрении результатов диссертационной работы, выполненной
лейтенантом милиции МОБ Вьетнама Нгуен Тат Датом

Мы нижеподписавшиеся, заместитель начальника факультета пожарной тактики, к.т.н., майор милиции НгуенТуан Ань; заместитель начальника отдела управления научными исследованиями и послевузовского образования, к.т.н., майор милиции НгуенКуангТханг; заместитель начальника учебного отдела, к.т.н., майор милиции НгуенСуанХынг; составили настоящий АКТ о том, что результаты диссертационного исследования лейтенанта милиции Нгуен Тат Дата на тему «Время блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре на объектах энергетики Вьетнама» внедрены на кафедре пожарной профилактики, а именно:

- при создании новой учебной дисциплины «Прогнозирование динамики опасных факторов пожара», которая будет использоваться в образовательном процессе высших учебных заведений и ИПБ Вьетнама для обучения магистров;

-при проведении научных исследований по совершенствованию методики расчета пожарных рисков.

Председатель комиссии
заместитель начальника кафедры ПТ,
к.т.н., майор милиции

 НгуенТуан Ань

заместитель начальника отдела УНИ и ПО,
к.т.н., майор милиции

 НгуенКуангТханг

заместитель начальника учебного отдела,
к.т.н., майор милиции

 НгуенСуанХынг

«УТВЕРЖДАЮ»

Начальник ГУПО и АСС МОБ СРВ,
к.т.н., генерал-майор милиции



Доан Вьет Мань

«23» 05 2018 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы, выполненной лейтенантом милиции МОБ Вьетнама Нгуен Тат Датом на тему: «Время блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре на объектах энергетики вьетнама»

Комиссия в составе: председателя - начальника отдела пожаротушения ГУПО и АСС Вьетнама, полковника милиции Данг Чан Виня и членов комиссии: начальника отдела исследования технических наук ГУПО и АСС Вьетнама, подполковника милиции Нгуен Ван Биня, начальника отдела проверки и подтверждения в области пожарной безопасности ГУПО и АСС Вьетнама, майора милиции Доан Ты Лапа составила настоящий АКТ о том, что результаты диссертационного исследования лейтенанта милиции Нгуен Тат Дата использованы при разработке нормативных документов для противопожарных требований Вьетнама и создании планов безопасной эвакуации людей при пожаре в объектах энергетики Вьетнама.

Председатель комиссии

Начальник отдела пожаротушения ГУПО и АСС Вьетнама
полковник милиции


Данг Чан Винь

Члены комиссии

Начальник отдела исследования технических наук
ГУПО и АСС Вьетнама,
подполковник милиции


Нгуен Ван Бинь

Начальник отдела проверки и подтверждения в области
пожарной безопасности ГУПО и АСС Вьетнама,
майор милиции


Доан Ты Лап

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор ОАО
«Гражданское строительство Ха Нинь»
(15 Фам Нгу Лао , г. Хо Ши Минь, Вьетнам)



 Нгуен Ван Винь
«18» 05 2018 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы, выполненной
Нгуен Тат Датом.

Комиссия в составе:

Председатель:

Нгуен Ван Винь – генеральный директор ОАО, «Гражданское
строительство Ха Нинь»

Члены:

1. Ву Туан Ань – заместитель генерального директора ОАО
«Гражданское строительство Ха Нинь»;
2. Ле Ван Хай – главный специалист по промышленной
безопасности;
3. Нгуен Вьет Ха – ведущий специалист по охране труда.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной
работы Нгуен Тат Дата использованы при разработке и создании плана
безопасной эвакуации людей при пожаре в ТЭС Фу Му 1, расположенном
по адресу: ТЭС Фу Му 1, район Тан Тхань, Ба Рйа – Вунг Тау.

Председатель комиссии



Нгуен Ван Винь

Члены комиссии



Ву Туан Ань



Ле Ван Хай



Нгуен Вьет Ха

УТВЕРЖДАЮ

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



М.В. Бедило

июня 2018 г.

внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук адъюнкта очного обучения Академии ГПС МЧС России лейтенанта милиции Нгуен Тат Дат на тему: «Время блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре на объектах энергетики Вьетнама» в учебном процессе Академии ГПС МЧС России.

Комиссия в составе: заместителя начальника учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве, полковника внутренней службы Злобнова Петра Викторовича, начальника учебно-методического центра, к.т.н., полковника внутренней службы Шныпко Виталия Сергеевича, доцента кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, к.т.н., доцента Лимонова Вячеслава Григорьевича, доцента кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, к.т.н., доцента Андреева Владимира Викторовича подтверждает, что результаты диссертационного исследования Нгуен Тат Дат внедрены в учебный процесс кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, а именно при разработке фондовых лекций, проведении лекционных, лабораторных и практических занятий со слушателями, курсантами и студентами Академии ГПС МЧС России по дисциплине «Прогнозирование опасных факторов пожара» по темам №2 «Основные понятия и уравнения интегральной математической модели пожара в помещении» и №6 «Основные положения зонного моделирования пожаров».

Заместитель начальника УНЦ ППБС
полковник внутренней службы

Злобнов П.В.

Начальник учебно-методического центра
к.т.н, полковник внутренней службы

Шныпко В.С.

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

Лимонов В.Г.

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

Андреев В.В.