

*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)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2018

Работа выполнена на кафедре инженерной теплофизики и гидравлики Академии государственной противопожарной службы МЧС России.

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук, профессор  
Пузач С. В.

Официальные оппоненты: Таранцев Александр Алексеевич  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский  
университет ГПС МЧС России»,  
профессор кафедры организации  
пожаротушения и проведения АСР

Однолько Андрей Андреевич  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический университет»,  
профессор кафедры техносферной и  
пожарной безопасности

Ведущая организация: Национальный исследовательский  
университет «Московский энергетический  
институт» (НИУ "МЭИ")

Защита состоится « 06 » декабря 2018 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/34a/34ad46c3c2f71f71b7853c549480f43d.pdf>

Автореферат разослан « 05 » октября 2018 г.

Отзыв на автореферат с заверенной подписью и печатью просим направлять в Академию ГПС МЧС России по указанному адресу.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



А. Б. Сивенков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Развитие экономики Вьетнама в последние годы сопровождается ростом потребности в электроэнергии на 10-15 % в год, и скоро Вьетнам окажется в серьёзной ситуации по дефициту электроэнергии (каждый год этот дефицит уже составляет около 1000-1500 МВт). Поэтому быстро строятся гидроэлектростанции (ГЭС), атомные электростанции (АЭС) и тепловые электростанции (ТЭС).

За 2006-2015 гг. на объектах энергетики (ОЭ) Вьетнама произошло много крупных пожаров, приведших к гибели людей и причинивших большой материальный ущерб. Например, на ГЭС зарегистрировано 16 пожаров, на ТЭС – 58, на электроподстанциях – 67. Погибло 5 чел., травмировано – 29 чел., суммарный ущерб составил 15,7 млн. долларов.

По статистике более чем в 80 % случаев причинами смерти людей на пожарах является отравление продуктами горения, среди которых монооксид углерода наиболее часто оказывает решающее негативное влияние. Поэтому обеспечение безопасности людей при пожарах на 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 B.C., 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 для человека значения на высоте органов дыхания. Однако при обосновании 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, Кошмаров Ю.А., 2010 г.) 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 (Пузач С.В., Акперов Р.Г., 2016 г. и Пузач С.В., Сулейкин Е.В., 2016 г.) 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 точности 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 являющиеся основой для выполнения расчета 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, 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 на ОЭ Вьетнама.

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 с целью обеспечения безопасной эвакуации и спасения людей при пожаре на ОЭ 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 объектов энергетики 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 объёмно-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

теплообмена, 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 объектов энергетики 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 расчетное 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 – 2018» (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:**

- создании 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 ОЭ 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 164 страницах текста, включает в себя 33 рисунка, 19 таблиц. Список литературы включает 93 наименования.

**ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, проанализированы объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна работы и ее научная и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, приведено краткое содержание работы.

**В первой главе** «Современное состояние проблемы расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре на объектах энергетики Вьетнама» проведен анализ литературных источников, посвященных особенностям пожарной опасности производственных зданий ОЭ Вьетнама, определению токсичности продуктов горения и методам расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения.

Доступные мощности национальной электроэнергетической системы Вьетнама составляет 26-28,2 тыс. МВт, потребность в электроэнергии возрастает каждый год на 10-15 % и скоро Вьетнам окажется в серьезной ситуации по дефициту электроэнергии. Поэтому быстро строятся ГЭС, АЭС и ТЭС.

В структуре национальной электроэнергетической системы Вьетнама 34,4 % электроэнергии вырабатывается на ГЭС, 62,8 % - на ТЭС и 2,8 % - на АЭС и т.д. (например, электроэнергия импорта).

В таблице 1 представлены данные по гибели и травмированию людей, а также по прямому ущербу при пожарах на ОЭ Вьетнама за 2006-2015 гг.

Таблица 1 – 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

Типовое производственное здание ОЭ состоит из следующих основных помещений: машинный зал (МЗ), парогенераторы (для ТЭС и АЭС), техническая этажерка, турбинные агрегаты, подагрегатное пространство и кабельные тоннели.

Пожарная опасность в производственных зданиях ОЭ обусловлена быстрым развитием пожара из-за наличия большого количества горючих веществ и материалов, а также быстрым распространением опасных факторов пожара. Основными горючими веществами являются турбинное и трансформаторное масло, изоляция кабелей, упаковка, строительные и отделочные материалы, бензин и т.д. У большинства используемых горючих материалов точный химический состав практически неизвестен.

Наиболее частыми местами возникновения пожаров на ОЭ являются основные производственные помещения, цеха, подсобные и вспомогательные помещения производств, кабельные проводки, туннели и полуэтажи, а также помещения котельной и другие вспомогательные устройства. МЗ характеризуется сложностью производственных процессов и отличаются повышенной пожарной опасностью из-за наличия значительных количеств ЛВЖ и ГЖ, сжиженных горючих газов, твердых сгораемых материалов и большой оснащенности электрическими установками (изоляция электрических кабелей), конструкционными материалами на основе пластмасс и т.п.



При оценке токсичности продуктов горения веществ необходимо учитывать наиболее опасные компоненты газовой смеси, преобладающие в количественном отношении и характеризующиеся высокой биологической активностью.

Проанализирован состав и токсичность продуктов горения характерных для ОЭ Вьетнама горючих веществ и материалов. Выделены наиболее опасные и часто встречающиеся на пожарах токсичные газы. Показано, что наиболее опасным токсикантом является монооксид углерода. Отмечена необходимость научно-обоснованного выбора критических величин концентраций токсичных газов для расчета критических продолжительностей пожара по токсичным газам.

Отмечено, что 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.

Рассмотрены принципы и методы оценки токсичности продуктов горения и выбора величин критических величин плотностей и токсодоз для токсичных газов. Показано, что оценка токсичности 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 математических моделей для определения критических продолжительностей пожара по токсичным газам.

Рассмотрены особенности воздействия монооксида углерода на организм человека. Показано, что концентрация карбоксигемоглобина в крови человека является критерием для оценки степени отравления организма человека монооксидом углерода.

Время блокирования путей эвакуации монооксидом углерода в современных методах расчета определяется по достижению концентрацией СО или токсодозой СО их критических для человека значений на высоте органов дыхания. Однако при выборе критических значений СО не учитываются увеличение концентрации карбоксигемоглобина в крови (степень интоксикации организма), а также повышенная скорость легочной вентиляции, характерная для условий пожара в помещении.

Проведен анализ математических моделей расчета термогазодинамики пожара. Показано, что существующие допущения и упрощения реальной термогазодинамической картины пожара во всех типах математических моделей приводят к значительному снижению точности расчета концентраций токсичных газов.

Обнаружено, что наиболее сложными и до конца нерешенными проблемами при расчете концентраций токсичных газов являются:

- ограниченность и недостаточное научное обоснование исходных данных по образованию токсичных газов при горении конкретных горючих веществ;
- недостаточное научное обоснование возможности использования коэффициентов образования токсичных газов, полученных в мелкомасштабных экспериментальных установках, при расчете пожара в полномасштабных помещениях.

В выводах по первой главе сформулирована цель диссертации и дана постановка задач исследования.

**Во второй главе** «Математические модели и методика расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре на объектах энергетики Вьетнама» диссертации представлены математические модели расчета термогазодинамики пожара и методика расчета времени блокирования путей эвакуации токсичными газами при пожаре в производственных зданиях ОЭ.

Представлены основные положения и уравнения интегральной и зонной математических моделей расчета динамики ОФП, которые служат основой разработки их модификаций в главе 4 данной диссертации.

Концентрации монооксида углерода находятся непосредственно из решения следующих дифференциальных уравнений:

- интегральная модель:

$$V \frac{d(X_{im}\rho_m)}{d\tau} = \eta L_i \Psi - X_{imпр} G_m; \quad (1)$$

- зонная модель:

$$\frac{d(\rho_i V_2)}{d\tau} = \Psi L_i, \quad (2)$$

где  $X_{im}$  – среднеобъемная массовая концентрация  $i$ -го продукта горения (в данном случае СО);  $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с;  $\rho_m$  – среднеобъемная плотность газовой среды помещения, кг/м<sup>3</sup>;  $L_i$  – удельный коэффициент образования  $i$ -го токсичного газа (в данном случае СО);  $\Psi$  – скорость газификации горючего материала, кг/с;  $\eta$  – полнота сгорания;  $X_{imпр} = a_i X_{im}$  – 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;  $G_m$  – массовый расходы вытекающих наружу газов при естественном газообмене через открытые проемы, кг/с;  $\rho_i$  – парциальная плотность  $i$ -го токсичного газа (в данном случае СО) в зоне припотолочного слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $V_2$  – объем зоны припотолочного слоя, м<sup>3</sup>.

Приведена полевая (дифференциальная) модель (Пузач С.В., 2005), дополненная уравнениями законов сохранения массы токсичных газов, характерных для пожаров в производственных зданиях ОЭ Вьетнама. Описаны основные особенности и упрощения термогазодинамической картины пожара, основные уравнения, дополнительные соотношения, условия однозначности, метод численного решения и методика расчета.

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.

В выводах по второй главе предложены направления по модификации

математических моделей термогазодинамики пожара и определения степени отравления организма человека, а также методики расчета, разработанные далее в главах 3 и 4 данной диссертации, для определения времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре в производственных зданиях ОЭ Вьетнама.

**В третьей главе** «Физико-математическая модель расчета критических продолжительностей пожара по монооксиду углерода в помещении» выполнено исследование непосредственного воздействия СО на организм человека во время его эвакуации и спасения при пожаре на ОЭ Вьетнама.

Показано, что токсическое действие СО на организм человека основано на взаимодействии его с гемоглобином крови и образовании карбоксигемоглобина (НbСО). Степень поражения организма человека монооксидом углерода определяется содержанием карбоксигемоглобина.

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. В присутствии повышенной концентрации  $CO_2$ , пониженной концентрации  $O_2$  и интенсивной работы, характерных для условий пожара, объемная скорость легочной вентиляции может достигать  $W=100-150$  л/мин. Вследствие этого происходит существенное увеличение поглощения СО организмом человека.

Разработана физико-математическая модель расчета содержания карбоксигемоглобина в крови человека при пожаре.

Рассматривается внешнее дыхание, состоящее из обмена воздуха между внешней средой и альвеолами легких и диффузией газов в легких. Лимитирующим процессом поступления в кровь СО является диффузия СО через альвеолярно-капиллярную мембрану, определяемая диффузионной способностью легких по СО.

При постоянной плотности СО в окружающей человека смеси продуктов горения и воздуха массовая доля НbСО в крови равна:

$$\bar{M}_{\text{HbCO}} = \frac{0,001k_W \rho_{\text{CO}} W \tau_3}{M_{\text{Hb}}} \left( \frac{\mu_{\text{Hb}}}{n\mu_{\text{CO}}} + 1 \right), \quad (4)$$

где  $\bar{M}_{\text{HbCO}}$  – массовая доля гемоглобина, перешедшего в НbСО;  $M_{\text{HbCO}}$  – масса НbСО, г;  $M_{\text{Hb}}$  – масса гемоглобина, г;  $k_W$  – коэффициент, равный отношению объемного расхода воздуха, поступающего в альвеолы легких, к объемной скорости вентиляции легких;  $\rho_{\text{CO}}$  – среднеобъемная плотность СО в смеси продуктов горения и воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – объемная скорость вентиляции легких, л/мин.;  $\tau_3$  – время экспозиции, мин.;  $\mu_{\text{Hb}}$  – молекулярная масса гемоглобина, кг/кмоль;  $\mu_{\text{CO}}$  – молекулярная масса СО, кг/кмоль;  $n$  – число молекул СО в одной молекуле НbСО.

В уравнении (4) при  $W \geq W_{\text{max}}$ :  $W = W_{\text{max}}$ , где  $W_{\text{max}}$  – объемная скорость вентиляции легких, соответствующая диффузионной способности легких по СО, л/мин.

Массовая доля НbСО в крови при изменяемой по времени плотности СО:

$$\bar{M}_{\text{HbCO}} = \frac{0,001k_w W}{M_{\text{Hb}}} \left( \frac{\mu_{\text{Hb}}}{n\mu_{\text{CO}}} + 1 \right) \int_0^{\tau} \rho_{\text{CO}} d\tau, \quad (5)$$

где  $\tau$  – время от начала пожара, с.

Предложены новые критерии для определения критических времен воздействия СО на человека при пожаре:

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

где  $\tau_{\text{кр.1}}$  – критическое время безопасной эвакуации людей по воздействию СО, с;  $\tau_{\text{кр.2}}$  – критическое время по воздействию СО для безопасного спасения людей, после которого люди, находящиеся в помещении без средств защиты от СО (самоспасателей и т.п.), с большой вероятностью неспособны самостоятельно покинуть помещение, с.

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

Исходные данные для численных экспериментов принимались следующими:

- средняя масса взрослого человека равна 75 кг,  $(M_{\text{Hb.o}})_{\text{cp}} = 135$  г/л и  $(M_{\text{Hb.o}})_{\text{min}} = 110$  г/л, где  $(M_{\text{Hb.o}})_{\text{cp}}$ ,  $(M_{\text{Hb.o}})_{\text{min}}$  – соответственно средняя и минимальная удельная масса гемоглобина в организме взрослого человека, г/л;

- при спокойном дыхании, когда нет дополнительных воздействий на дыхательный центр, принимаем, что частота дыхания  $f = 15$  1/мин.; дыхательный объем  $V_{\text{д}} = 0,5$  л; объем мертвого пространства  $V_{\text{м}} = 0,15$  л; объемная скорость вентиляции легких  $W = 5,25$  л/мин.;

- диффузионная способность легких по СО при спокойном дыхании равна  $D_{\text{л.СО}} = 20$  мл/(мм рт.ст.·мин.); при физической нагрузке составляет  $D_{\text{л.СО}} = 60$  мл/(мм рт.ст.·мин.).

Результаты сопоставления расчетного (формула (3)) процентного содержания карбоксигемоглобина с экспериментальными значениями (Матвиенко Н. Н. и др., 2006), полученными при воздействии СО на людей при спокойном дыхании в случае воздействия постоянной плотности СО, для времени экспозиции  $\tau_3 = 5$  мин. и  $\tau_3 = 10$  мин. представлены на рисунке 1. В расчетах принимались средняя масса гемоглобина в организме взрослого человека и  $n=1$ .

Анализ рисунка 1 показывает, что расчетные величины  $\bar{M}_{\text{HbCO}}$  совпадают с экспериментальными значениями с погрешностью, не превышающей 27%.

Результаты расчетов критических промежутков времени в случае постоянной концентрации СО при максимальной объемной скорости вентиляции легких, соответствующей диффузионной способности легких по СО, приведены в таблице 1.

В соответствии с «СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения» 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.

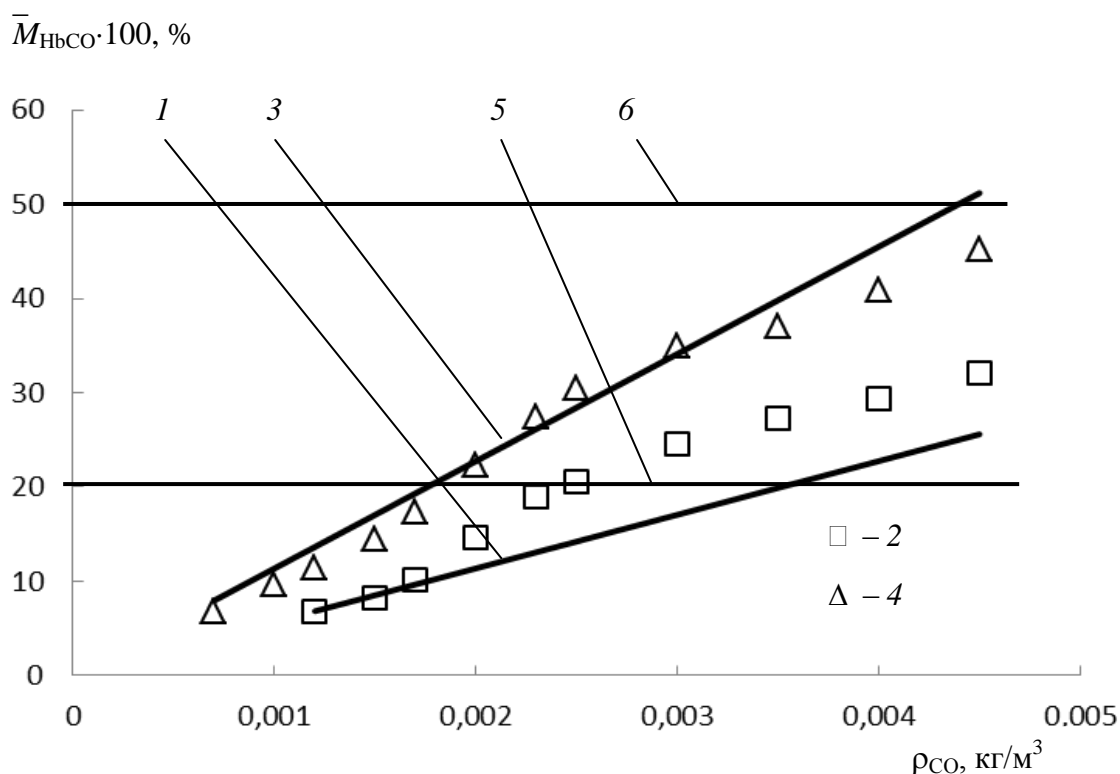


Рисунок 1 - Зависимости процентного содержания карбоксигемоглобина от плотности CO во вдыхаемом воздухе при спокойном дыхании:  $\tau_3=5$  мин.: 1 – расчет (формула (2)); 2 – эксперимент (Матвиенко Н. Н. и др., 2006);  $\tau_3=10$  мин.: 3 – расчет (формула (2)); 4 – эксперимент (Матвиенко Н. Н. и др., 2006); 5 – легкое отравление; 6 – среднетяжелое отравление

Таблица 1 – Критические времена воздействия постоянной концентрации CO при максимальной объемной скорости вентиляции легких, соответствующей диффузионной способности легких по CO.

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

Из таблицы 1 видно, что необходим более тщательный выбор величины критической плотности CO, так как при  $\rho_{CO,кр}$  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.

Таким образом, принятая в научной и нормативной литературе по пожарной безопасности величина критической плотности СО  $\rho_{\text{СО.кр}}=1,16 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> при повышенной объемной скорости легочной вентиляции, характерной для условий пожара, может сделать невозможной безопасную эвакуацию людей.

Выполнены численные эксперименты при повышенной объемной скорости вентиляции легких при переменной концентрации СО.

Зависимости плотности СО от времени с начала пожара при горении хвойных древесных строительных материалов представлены на рисунке 2, аналогичные графики в случае оболочки кабелей ПВХ и масла трансформаторного приведены в диссертации.

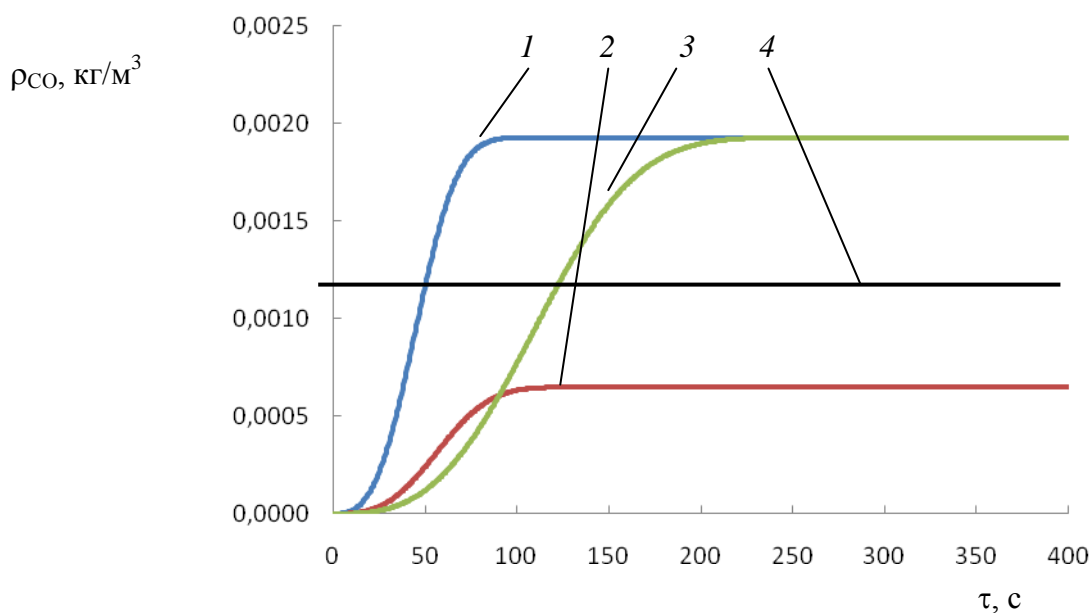


Рисунок 2 – Зависимости плотности СО от времени с начала пожара при горении хвойных древесных строительных материалов: 1 – помещение с размерами 4×5×3 м; 2 – 4×5×6; 3 – 24×12×3 м; 4 – критическое значение  $\rho_{\text{СО.кр}}$

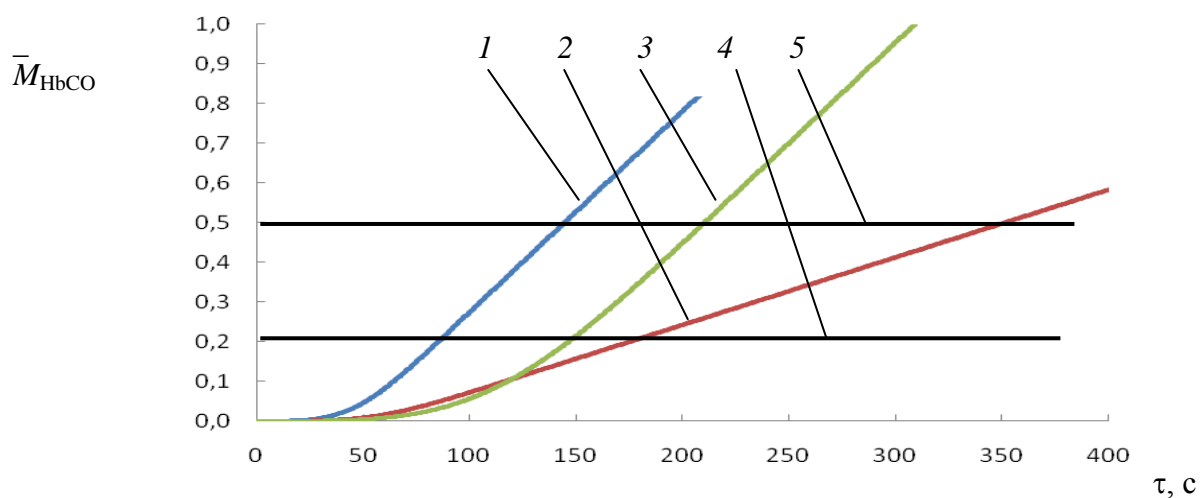


Рисунок 3 – Зависимости массовой доли карбоксигемоглобина от времени с начала пожара в случае средней массы гемоглобина в организме взрослого человека при горении хвойных древесных строительных материалов: 1 – помещение с размерами 4×5×3 м; 2 – 4×5×6; 3 – 24×12×3 м; 4 – легкое отравление; 5 – среднетяжелое отравление

Зависимости массовой доли карбоксигемоглобина в случае средней массы гемоглобина в организме взрослого человека от времени от начала пожара, рассчитанные с использованием формулы (3), показаны на рисунке 3 при горении хвойных древесных стройматериалов, аналогичные графики для оболочки кабелей ПВХ и масла трансформаторного приведены в диссертации.

В табл. 2 представлены результаты расчетов критической продолжительности пожара по СО, полученные с использованием традиционного подхода (уравнения (1, 2)) и по предложенному в настоящей статье подходу (уравнение (5)).

Таблица 2 – 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 2, а также рисунков 2 и 3 можно сделать следующие выводы:

- при использовании общепринятого подхода 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 уравнений (1) или (2), больше, чем соответствующая величина  $\tau_{кр.1}$ , определенная по предложенной формуле (5), 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 и, как следствие, к тяжелому отравлению или гибели людей во время эвакуации или спасения.

В выводах по третьей главе отмечена научная и практическая новизна и значимость полученных результатов.

**В четвертой главе «Экспериментально-теоретическая модель расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода на объектах энергетики Вьетнама при пожаре» представлена постановка задачи.**

Схема экспериментальной установки, разработанной Пузачем С. В., Акперовым Р. Г. и Сулейкиным Е. В., представлена на рисунке 4.

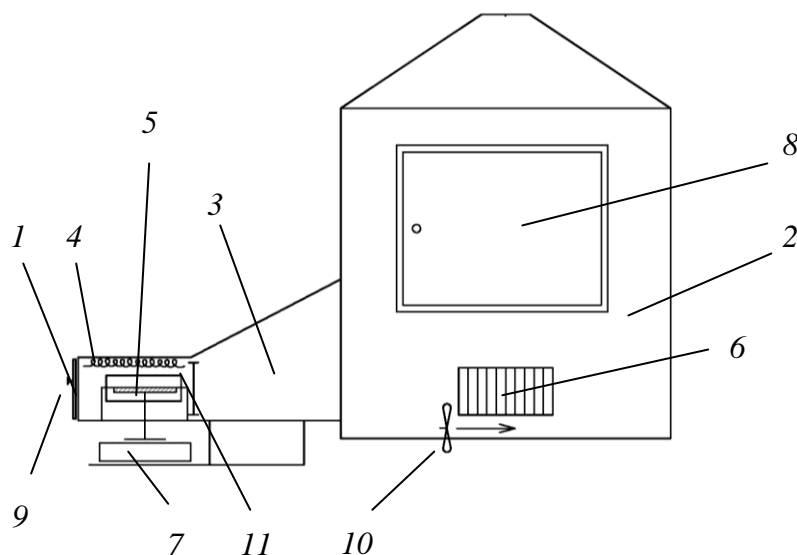


Рисунок 4 - Схема экспериментальной установки: 1 – камера сгорания; 2 – экспозиционная камера; 3 – переходной рукав; 4 – электронагревательный излучатель; 5 – держатель образца; 6 – шиберные отверстия; 7 – столик для весов; 8 – дверца экспозиционной камеры; 9 – дверца камеры сгорания; 10 – вентилятор;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

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  $\pm 10\%$ об.

Горючие материалы испытывались в режиме пламенного горения. Режим пламенного горения обеспечивается при температуре испытания  $750^{\circ}\text{C}$  (плотность падающего теплового потока  $60 \text{ кВт/м}^2$ ).

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

С момента выхода электронагревательного излучателя на стабилизированный режим открывают заслонку переходного рукава и дверцу камеры сгорания. Вкладыш с образцом без задержки помещают в держатель образца, после чего дверцу камеры сгорания закрывают.

В процессе испытаний в режиме постоянного мониторинга фиксируются показания концентраций  $\text{CO}$  (% об),  $\text{CO}_2$  (% об),  $\text{O}_2$  (% об), температуры и изменение массы образца.

Дифференциальные уравнение законов сохранения массы оксида углерода и кислорода в условно герметичном объеме имеют вид:



$$V \frac{d\rho_{CO}}{d\tau} = \eta L_{CO} \Psi ; \quad (6)$$

$$V \frac{d\rho_{O_2}}{d\tau} = -\eta L_{O_2} \Psi , \quad (7)$$

где  $V$  – внутренний объем установки,  $m^3$ ;  $\tau$  – время, с;  $\Psi$  – массовая скорость выгорания горючего материала,  $kg/s$ ;  $\eta$  – коэффициент полноты сгорания;  $\rho_{O_2}$  – среднеобъемная плотность  $O_2$ ,  $kg/m^3$ ;  $L_{O_2}$  – удельный коэффициент поглощения кислорода.

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

$$L_{CO} = \frac{V}{\eta \Psi} \frac{d\rho_{CO}}{d\tau} . \quad (8)$$

Зависимость плотности CO от плотности  $O_2$  в каждый момент времени от начала горения может быть получена из совместного интегрирования уравнений (6) и (7) от  $\tau=0$  до рассматриваемого момента времени  $\tau$ :

$$\rho_{CO} = \frac{L_{CO}}{L_{O_2}} (\rho_{O_2,в} - \rho_{O_2}) , \quad (9)$$

где  $\rho_{O_2,в}$  – плотность кислорода в атмосферном воздухе,  $kg/m^3$ .

Из выражения (9) видно, что для расчета плотности CO можно использовать только значения плотности  $O_2$  и удельных коэффициентов поглощения  $O_2$  и выделения CO вместо решения дифференциальных уравнений (1) и (2).

Будем рассматривать показатель токсичности по совместному влиянию концентраций CO и  $O_2$  в виде:

$$H_{\tau} = H_{\tau,CO} + H_{\tau,O_2} = \frac{\rho_{CO}}{\rho_{CO,кр}} + \frac{\rho_{O_2,в} - \rho_{O_2}}{\rho_{O_2,в} - \rho_{O_2,кр}} , \quad (10)$$

где  $H_{\tau}$  – показатель токсичности;  $\rho_{CO,кр}$  – предельно допустимая для человека (критическая) плотность монооксида углерода,  $kg/m^3$ ;  $\rho_{O_2,кр}$  – предельно допустимая для человека (критическая) плотность кислорода,  $kg/m^3$ ;  $H_{\tau,CO} = \rho_{CO} / \rho_{CO,кр}$  – показатель токсичности по действию CO;  $H_{\tau,O_2} = (\rho_{O_2,в} - \rho_{O_2}) / (\rho_{O_2,в} - \rho_{O_2,кр})$  – показатель токсичности по действию  $O_2$ .

Используя формулу (9), выражение (10) можно представить в виде зависимости  $H_{\tau}$  только от плотности кислорода:

$$H_{\tau} = (\rho_{O_2,в} - \rho_{O_2}) \left( \frac{L_{CO}}{L_{O_2}} \frac{1}{\rho_{CO,кр}} + \frac{1}{\rho_{O_2,в} - \rho_{O_2,кр}} \right) . \quad (11)$$

Рассматриваем следующие горючие материалы, наиболее распространенные на ОЭ Вьетнама: хвойные древесные стройматериалы, оболочка кабелей ПВХ и масло трансформаторное.

Эксперименты проводились до температур газовой смеси внутри помещений, не превышающих критического значения для человека, равного  $70^{\circ}C$ .

Средние по времени проведения экспериментов значения  $L_{CO}$  представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты экспериментов в мелкомасштабной установке

Горючие материалы	Условия проведения эксперимента	Средняя величина $L_{CO}$	$L_{CO}$ (Кошмаров Ю. А., 2010)	Газ*	$H_{т.кр}$
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 <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub>	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 5 в случае горения хвойных древесных стройматериалов. Аналогичные графики при горении трансформаторного масла и оболочки кабелей ПВХ приведены в диссертации.

Анализ результатов численных экспериментов показал, что теоретические значения среднеобъемной плотности CO, полученные с использованием выражения (9) 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 6 (оболочка кабелей ПВХ). Аналогичные графики при горении хвойных древесных стройматериалов и трансформаторного масла представлены в диссертации.

Теоретические величины  $\rho_{CO}$ ,  $H_t$ ,  $H_{т.CO}$  и  $H_{т.O_2}$  в начале процесса горения больше соответствующих экспериментальных значений (рисунки 5 и 6), так как в расчетах по формулам (9) и (11) используется средняя величина коэффициента  $L_{CO}$ , а локальное значение  $L_{CO}$  меньше среднего при плотности кислорода, близкой к ее плотности в атмосферном воздухе. Поэтому расчет с использованием выражений (9) и (11) дает некоторый запас по надежности расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода.

Проведены численные эксперименты по математическому моделированию пожара в полномасштабных помещениях ОЭ Вьетнама.

Зависимости среднеобъемной плотности CO от изменения среднеобъемной плотности кислорода при пожаре в помещении с закрытым проемом приведены на рисунке 7.

В таблице 4 приведены полученные с использованием предложенного и существующего методов расчета критические времена воздействия CO.

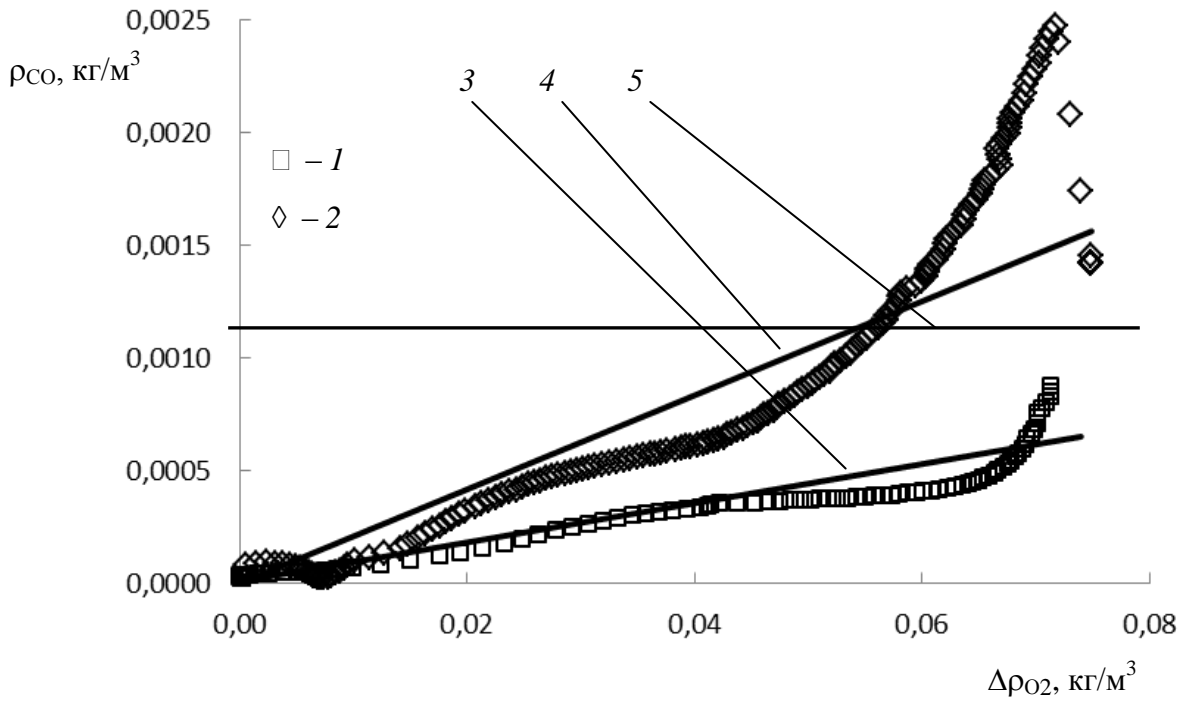


Рисунок 5 - Зависимости среднеобъемной плотности оксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода при горении хвойных древесных стройматериалов: экспериментальные значения: 1 –  $F=0,0145 \text{ м}^2$ ; 2 –  $F=0,0072 \text{ м}^2$ ; расчет по формуле (9): 3 –  $F=0,0145 \text{ м}^2$ ; 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,  $\text{кг/м}^3$

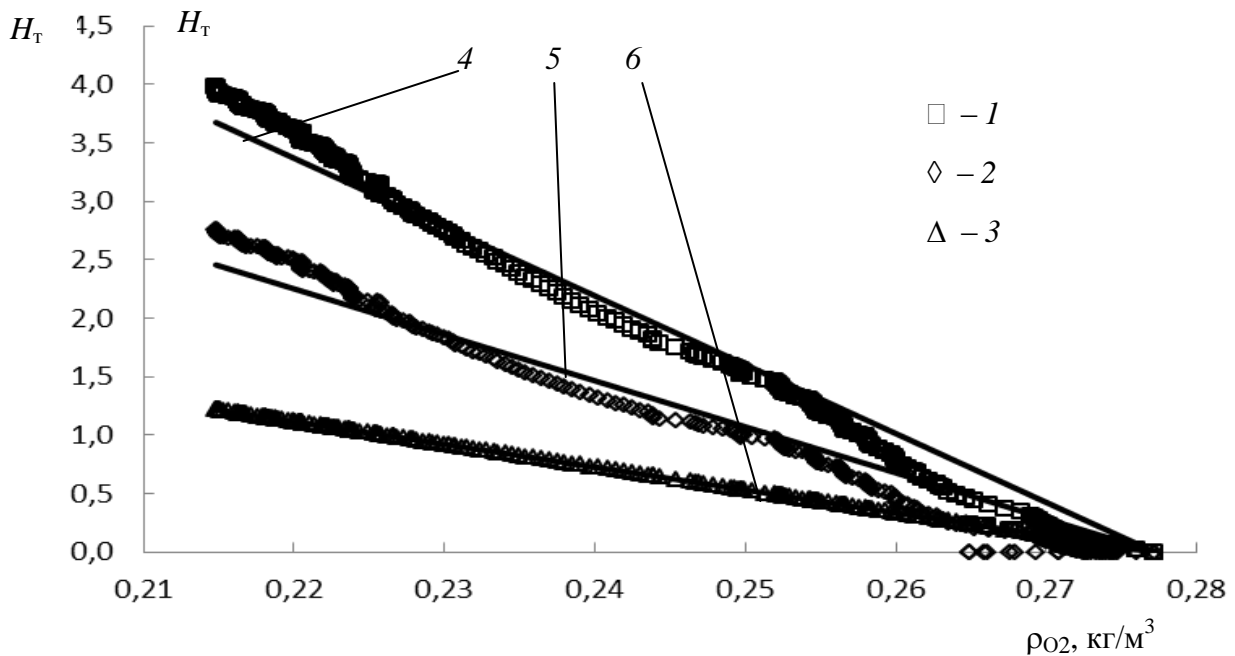


Рисунок 6 - Зависимости показателя токсичности от среднеобъемной плотности кислорода при горении оболочки кабелей ПВХ при  $F=0,0067 \text{ м}^2$ ; экспериментальные значения: 1 –  $H_t$ ; 2 –  $H_{t,\text{CO}}$ ; 3 –  $H_{t,\text{O}_2}$ ; расчет по формуле (11): 4 –  $H_t$ ; 5 –  $H_{t,\text{CO}}$ ; 6 –  $H_{t,\text{O}_2}$

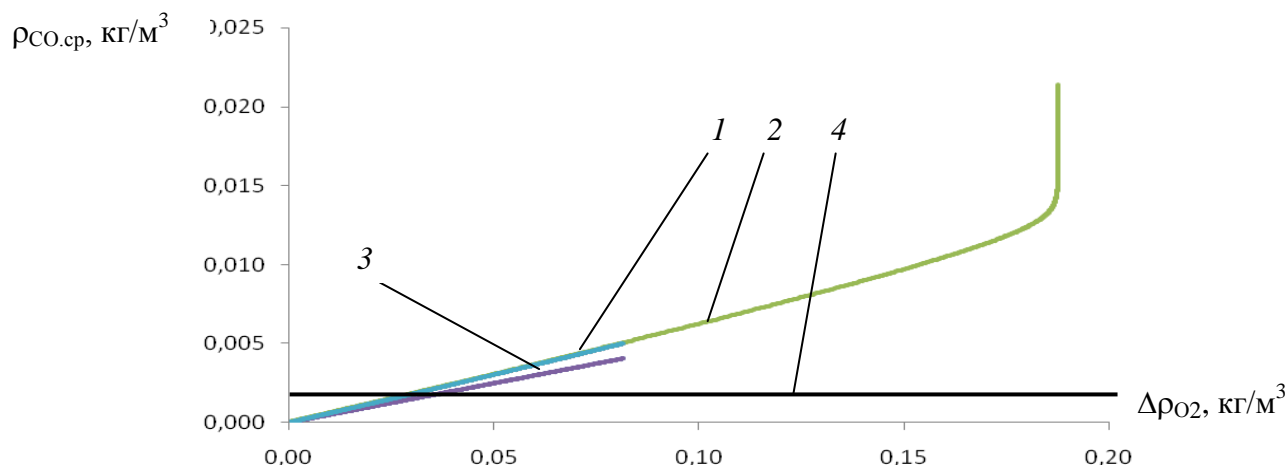


Рисунок 7 – Зависимости среднеобъемной плотности монооксида углерода от изменения среднеобъемной плотности кислорода: расчет по интегральной модели: 1 – кабельный зал 35×25×5,5 м; 2 – кабельный тоннель 30×2×3,1 м; 3 – расчет по формуле (9); 4 – критическое значение  $\rho_{\text{СО,кр}}$ ;  $\Delta\rho_{\text{O}_2} = \rho_{\text{O}_2,\text{в}} - \rho_{\text{O}_2}$  – изменение среднеобъемной плотности кислорода, кг/м<sup>3</sup>

Таблица 4. Критические времена воздействия СО

Помещения		Критические времена воздействия СО, мин			$\Delta\tau_1$ , мин	$\Delta\tau_2$ , мин
		$\tau_{\text{кр.1}}$	$\tau_{\text{кр.2}}$	$\tau_{\text{кр.3}}$		
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;

$\Delta\tau_1 = \tau_{\text{кр.3}} - \tau_{\text{кр.1}}$  – разница по времени между критическими временами эвакуации, полученными с использованием существующего и предложенного подходов;

$\Delta\tau_2 = \tau_{\text{кр.2}} - \tau_{\text{кр.1}}$  – промежуток времени перехода от легкой степени отравления к средней.

Из таблицы 4 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.

Время блокирования путей эвакуации монооксидом углерода ( $\tau_{\text{кр.3}}$ ), полученное с использованием существующего подхода, согласно таблице 4 может быть больше соответствующей величины  $\tau_{\text{кр.1}}$ , определенной на основе предложенного метода, на  $\Delta\tau_1 = 0,91$  мин.

Предложенный подход в случае кабельного зала с открытым проемом (таблица 4) 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.

Предложенный метод расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при использовании интегральной модели расчета динамики ОФП 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;

- определяется зависимость локальной плотности СО от времени на уровне рабочей зоны путей эвакуации с помощью коэффициента неравномерности концентрационных полей по высоте помещения;

- по величине локальной плотности СО рассчитывается накопление по времени массовой доли карбоксигемоглобина в крови человека с использованием уравнения (5);

- 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 СО относятся к зоне припотолочного слоя.

В таблице 5 приведены основные положения существующего и предложенного подходов к расчету времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода.

Разработаны практические рекомендации по обеспечению безопасности людей при пожарах на ОЭ Вьетнама. На примере ГЭС Шон Ла показано, что условие безопасной эвакуации людей из производственного здания выполняется только при условии использования самоспасателей с защитой от СО.

В выводах по четвертой главе отмечена научная и практическая новизна и значимость полученных результатов для расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода.

Таблица 5. Основные положения существующего и предложенного подходов к выполнению условия безопасной эвакуации и спасения людей по воздействию монооксида углерода

	Среднеобъемная плотность СО		
	Кошмаров Ю.А.	Пузач С.В., Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г.	Предложенный подход
Исходные данные**	$L_{CO}$	–	–
Расчетная зависимость	Уравнение закона сохранения массы СО в помещении	$\rho_{CO,cp}=f(T_{cp})^*$ или уравнение закона сохранения массы СО в помещении	$\rho_{CO,cp}=f(\rho_{O_2,cp})^*$
	Критическое значение СО		
	Кошмаров Ю.А.	Пузач С.В., Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г.	Предложенный подход
Эвакуация	$\rho_{CO,кр}=1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$	$\rho_{CO,кр}=1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$	$\bar{M}_{HbCO}=0,2$
Спасение	–	–	$\bar{M}_{HbCO}=0,5$

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

## 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.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих ведущих периодических изданиях, включенных в список ВАК РФ**

1. Нгуен, Тат Дат Критическое значение концентрации монооксида углерода при пожаре в помещении [Текст] / С. В. Пузач, Нгуен Дат Тат // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 6. — С. 5-11. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.5-11.

2. Нгуен, Тат Дат Критические времена воздействия монооксида углерода на человека при пожаре в помещении [Текст] / С. В. Пузач, Нгуен Дат Тат // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, № 11. — С. 27–34. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.27-34

3. Нгуен, Тат Дат Новый подход к расчету критических времен воздействия монооксида углерода на человека при пожаре в помещении [Текст] / С. В. Пузач, Нгуен Дат Тат // Безопасность жизнедеятельности. — 2017. — № 1(193). — С. 48-56.

4. Нгуен, Тат Дат Экспериментально-теоретический подход к расчету концентраций монооксида углерода и показателя токсичности при пожаре в условно герметичном помещении [Текст] / С. В. Пузач, Нгуен Дат Тат // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 2. — С. 36-43. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.36-43.

5. Нгуен, Тат Дат Новый подход к расчёту времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода при пожаре в помещении [Текст] / С. В. Пузач, Нгуен Дат Тат // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2018. — № 1. — С. 5-11. DOI 10.25257/FE.2018.1.5-12

**Остальные публикации по теме диссертации:**

6. Нгуен, Тат Дат Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении / С. В. Пузач, Доан В. М., Нгуен Т. Д., Е. В. Сулейкин, Р. Г. Акперов. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. - 129 с.

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

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

9. Нгуен, Тат Дат Особенности образования и распространения токсичных продуктов горения при пожарах в энергетических объектах Вьетнама [Текст] / Нгуен Дат Дат // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2016». — М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. — С. 27-30.

10. Нгуен, Тат Дат Критические времена воздействия монооксида углерода на человека при повышенной объемной скорости вентиляции легких при переменной концентрации монооксида углерода при пожаре [Текст] / Нгуен Дат Дат, С. В. Пузач // Материалы XI международной научно-практической конференции «Пожарная и аварийная безопасность». — Иваново: Ивановская пожарно-спасательная Академия

ГПС МЧС России, 2016. — С. 436-438.

11. Нгуен, Тат Дат Критическая концентрация монооксида углерода при пожаре в помещении [Текст] / Нгуен Тат Дат, С. В. Пузач // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы». — Воронеж: Воронежский институт ГПС МЧС России, 2016. — С. 181-183.

12. Нгуен, Тат Дат Методика расчета критической концентрации монооксида углерода при пожаре в помещении [Текст] / Нгуен Тат Дат, С. В. Пузач // Материалы 25-ой международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2016». — М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. — С. 192-194.

13. Нгуен, Тат Дат Экспериментально-теоретический подход к расчету концентраций монооксида углерода при пожаре в условно герметичном помещении [Текст] / Нгуен Тат Дат, С. В. Пузач // Материалы 6-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности». — М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. — С. 34-37.

14. Нгуен, Тат Дат Экспериментально-теоретический подход к расчету показателя токсичности при пожаре в условно герметичном помещении [Текст] / Нгуен Тат Дат, С. В. Пузач // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций». — Воронеж: Воронежский институт ГПС МЧС России, 2017. — С. 347-349.

15. Нгуен, Тат Дат Новый метод расчета времени блокирования путей эвакуации монооксидом углерода [Текст] / Нгуен Тат Дат, С. В. Пузач // Материалы 26-ой международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2017». — М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. — С. 150-153.

16. Нгуен, Тат Дат Критические условия возникновения "Plugholing" при работе системы дымоудаления с искусственным побуждением [Текст] / До Т. Т., Чань Т. М., Нгуен Тат Дат // Материалы 26-ой международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2017». - М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. - С. 140-143.

17. Нгуен, Тат Дат Опасности от токсичных продуктов горения при пожарах в энергетических объектах Вьетнама / Нгуен Тат Дат, До Тхань Тунг, Нгуен Ван Конг // Материалы IV международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности». — М.: Университет ВГТУ, 2017. — С. 37-39.

18. Нгуен, Тат Дат Экспериментально-теоретический подход к расчету плотности монооксида углеродана начальной стадии пожара в помещении [Текст] / С. В. Пузач, Е. В. Сулейкин, Р. Г. Акперов, Нгуен Тат Дат // Материалы международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики». — М.: МЭИ, 2017. — С. 213-215.

19. Нгуен, Тат Дат Новый метод расчета концентраций монооксида углерода при пожаре в помещении объектов энергетики Вьетнама/ Нгуен Тат Дат, С.В. Пузач // Материалы 7-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2018». — М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. — С. 7-10.

Подписано в печать 26.09.2018. Формат 60×84 1/16

Печать офсетная. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 032

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