

На правах рукописи



ЛЕБЕДЧЕНКО ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПАССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
СИСТЕМ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС
С ВОДО-ВОДЯНЫМИ РЕАКТОРАМИ**

2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» на кафедре инженерной теплофизики и гидравлики

Научный консультант:

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

Официальные оппоненты:

Хасанов Ирек Равильевич
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, научно-исследовательский центр нормативно-технических проблем пожарной безопасности, главный научный сотрудник

Барбин Николай Михайлович
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», кафедра промышленной безопасности и охраны окружающей среды, доцент

Самигуллин Гафур Халафович
доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Защита состоится «21» января 2025 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 04.2.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, д. 4.

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

<https://academygps.ru/upload/iblock/d5c/p14n78pdbmovxjdsfv6r9if25lzh7lso/Диссертация%20Лебедченко%20О.С..pdf>

Автореферат разослан «09» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

Соковнин А.И.

Актуальность темы исследования. Пожары на атомных электростанциях (АЭС) приводят к катастрофическим последствиям (АЭС «Браунс Ферри» 1975 г., Белоярской АЭС 1978 г., Игналинской АЭС 1988 г. и др.).

Радиационная и ядерная безопасность при пожарах на АЭС должна достигаться, в том числе, и с помощью систем противопожарной защиты. Основными инновациями в системах безопасности (СБ) технологического проекта «АЭС-2006» в соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2035 г. (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р) являются пассивные технологии систем безопасности. Это в полной мере относится и к системам противопожарной защиты.

Особое значение для пожарной безопасности АЭС с водо-водяными реакторами (ВВЭР) приобретают методы пассивной противопожарной защиты (ППЗ), поскольку активные системы пожарной безопасности (пожарная сигнализация, дымоудаление, пожаротушение, оповещение и управление эвакуацией и т.д.) могут быть разрушены в результате аварии.

К основным методам ППЗ, реализованным в СБ АЭС-2006 по сравнению с типовым проектом ВВЭР-1000, относятся система пассивного отвода тепла, пассивный залив активной зоны (гидроемкости первой и второй ступени), концепция глубоко эшелонированной защиты (2-4 канала СБ) и использование огнезащитных покрытий.

Методы ППЗ предусматривают минимальное влияние человеческого фактора (ошибочные действия персонала и т.п.) на показатели безопасности. Помимо этого снижается влияние отказов обеспечивающих и управляющих СБ (обесточивание в энергосистеме, отказ источников охлаждающей воды и т.д.) на показатели безопасности.

Таким образом, разработка теплофизических основ для создания комплексной системы пассивной противопожарной защиты зданий АЭС с ВВЭР, в которых расположено оборудование для безопасного останова и расхолаживания реакторной установки (в том числе каналы СБ) является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в обеспечение противопожарной защиты АЭС внес А.К. Микеев. В его трудах рассмотрены характерные особенности пожарной опасности, обусловленные использованием на АЭС водорода, натрия, масел, изоляционных материалов кабелей, приведены данные о пожарной опасности технологического цикла получения ядерной энергии, а также изложены основные принципы противопожарной защиты АЭС, приведены конструктивные и технические средства ее обеспечения, профилактические методы предотвращения пожаров на АЭС.

Работы, проведенные Д.И. Пуцевым (ВНИИПО) и реализованные на Тяньваньской АЭС в Китае, основаны на опыте проектирования, строительства и эксплуатации 20 действующих ядерных энергетических блоков ВВЭР-1000 (проект «АЭС-91») и содержат методику расчета динамики возможных пожаров на АЭС. Вышеуказанная методика позволила оценить опасность воздействия опасных факторов пожара (ОФП) на оборудование (в первую очередь СБ), строительные конструкции, а также выполнить расчет огнестойкости кабельных каналов АЭС и определить безопасные расстояния, которые гарантируют нераспространение пожара между кабельными трассами различных СБ.

Однако данные исследования относятся проекту «АЭС-91». В настоящее время действует проект «АЭС-2006», который отличается от вышеуказанного характеристиками систем ППЗ, новыми горючими материалами (не распространяющие горение (НГ) кабели), объемно-планировочными решениями и материалами ограждающих конструкций. Кроме того, проблема водородной безопасности АЭС не исследована в работах Пуцева Д.И.

Большой вклад в изучение термодинамики и теплопередачи в пожарном деле внесли Ю.А. Кошмаров и И.С. Молчадский. Методы расчета динамики ОФП в помещении разрабатывали Ю.А. Кошмаров, С.В. Пузач, Ю.С. Зотов.

Работы Т.Ю. Ереминой посвящены повышению эффективности огнезащитных свойств вспучивающихся покрытий для металлических конструкций.

В литературе, посвященной обеспечению водородной безопасности на АЭС, как правило, предложены варианты активной защиты от горения и взрыва водорода. Подавление горения и детонации водорода при аварии осуществляется за счет использования имеющихся на АЭС с РУ ВВЭР-1000 запасов воды, которые находятся в деаэраторах, при аварии в гермзоне. Распространение и гашение пламени в смесях, содержащих водород и инертные газы-разбавители, исследовали *G. A. Karim u V. P. Panlilio*.

В ИБРАЭ РАН проведены экспериментальные и теоретические исследования физических параметров процессов горения и детонации, стратификации и горения водородно-паровоздушных смесей в присутствии мелкодисперсных капель воды. В результате этих исследований проведено трехмерное компьютерное моделирование процесса стратификации водородно-паровоздушной смеси под защитной оболочкой АЭС.

Аварии с течами теплоносителя первого контура, сопровождающиеся наибольшими выбросами водорода в помещениях зоны локализации аварии, исследовали Д. И. Козлов и др. В ФГУП «Атомэнергопроект», г. Москва; в ИПБ ЯЭ РНЦ «Курчатовский Институт» и А. Н. Артеменко. *M. Dehjourian, R. Ghara-ri* и *S. Hostikka* исследовали способы снижения расхода водорода во время крупной аварии с потерей теплоносителя в двухконтурном водяном реакторе под давлением. Проблемы нормативного, экспериментального и расчетно-теоретического обеспечения безопасности водородной энергетики исследовали И. А. Кириллов, *N. Barilo* и др. Распространение, горение и детонация водородо-воздушной смеси в закрытых помещениях рассмотрены в работах Г.Е. Солдатова, О.С. Голодной, В. И. Макеева, В. С. Бабкина, *N. Agrawal, L. R. Boeck, F. M. Berger, J. Hasslberger, T. Sattelmayer, F. Liu*. Технологическая схема пассивной системы удаления водорода разработана на основании результатов анализа распространения, накопления и возможных режимов горения водорода при течи теплоносителя из первого контура (Институт «Атомэнергопроект» (г. Москва), А.Д. Ефанов, А.А. Лукьянов, П.Н. Мартынов ГНЦ ФЭИ (г. Обнинск)). Некоторые особенности пожаровзрывобезопасности при работе с водородом исследовал С.В. Пузач.

С.Г. Цариченко разработал комплекс инженерных методов расчета предельных условий дефлаграционного горения предварительно перемешанных водородосодержащих смесей при различных начальных параметрах среды. С.Г. Цариченко, Ю.Н. Шебеко и А.Я. Корольченко провели численное моделирова-

ние распространения детонации в газовом слое с учетом химической кинетики и рассчитали концентрационные пределы детонации в трубах для смесей водород-воздух-инертный газ. При этом, образование взрывопожароопасной водородно-воздушной смеси при натекании водорода в помещение, не предусмотренной технологическим процессом при безопасном останове и расхолаживании реакторной установки, не было исследовано.

В работах Г.И. Смелкова рассмотрены теория и инженерная практика определения пожарной опасности электроустановок и их причастности к пожарам на объектах при различного рода аварийных режимах. Им введено понятие «огнестойкость кабеля» как его работоспособность в условиях пожара.

Вклад в определение пожарной опасности электрических кабелей внесли Н.С.Ильченко, В.Н. Черкасов, В.И. Зыков, И.Ф. Поединцев, А.И. Рябиков, В.А. Пехотиков, А. А. Варламкин, И. Р. Хасанов и др. Специфика ППЗ АЭС для кабельных проходок границ пожарных зон исследована Д.Г. Ланиным, С.Г. Цариченко, А.А. Варламкиным и А.В. Чумаченко. *S. Hostikka* провел сравнительный анализ методов контроля состояния устаревших низковольтных кабелей на АЭС. Испытание электрооборудования на огнестойкость изучал *V. Finger* и *V. Babrauskas*.

Расчет огнестойкости кабельных каналов АЭС исследован в ряде работ Д.И. Пуцева и Н.А. Лобановой. Обоснованы требования к огнестойкости ограждающих конструкций кабельных помещений, помещений электротехнических устройств и щитов управления СБ. Определены безопасные расстояния, которые гарантируют нераспространение пожара между кабельными трассами различных СБ, сохранность шлюзов, кабельных, трубопроводных проходок и оболочки контеймента при горении кабельных потоков.

Кабели СБ АЭС, приводящие реакторную установку в безопасное состояние, должны сохранять работоспособность до завершения этого процесса. Поэтому важным моментом при выборе характеристик систем, выполняющих функции безопасности, является учет требуемой продолжительности работы. Поскольку по данным МАГАТЭ среднее время восстановления основных элементов систем безопасности (насосы, теплообменники, дизель-генераторы) составляет не менее 72 часов, то требуемое время функционирования для систем, выполняющих функции отвода тепла от активной зоны к конечному поглотителю, должно превышать это значение. Однако методики определения работоспособности силовых и сигнальных кабелей при реальном пожаре с учетом сохранения ими требуемых характеристик до настоящего времени нет.

Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для кабелей каналов СБ АЭС в условиях реального пожара также не была изучена.

В.С. Иличкин, С.В. Пузач, Р.Г. Акперов, Е.В. Сулейкин работали над экспериментальным определением удельных коэффициентов образования токсичных газов при пожаре в помещении и их воздействием на людей. При этом удельные коэффициенты образования токсичных газов, образующихся при горении кабелей, используемых на АЭС с ВВЭР (циановодорода и монооксида углерода), не были определены.

Анализ состояния проблемы позволил сформулировать общую концепцию исследования: разработка теплофизических основ для обоснования комплексной системы ППЗ зданий АЭС с ВВЭР, в которых расположено оборудование для безопасного останова и расхолаживания реакторной установки (в том числе каналы СБ).

Объектом исследования являются пассивные технологии систем пожарной безопасности АЭС с ВВЭР.

Предметом исследования являются тепло- и массообменные процессы при наиболее опасных сценариях развития пожара и/или натекания водорода в зданиях АЭС с каналами СБ в условиях выхода из строя активных систем пожарной защиты.

Цель и задачи работы. Разработка комплекса методов и методик расчета тепломассообмена, позволяющих обосновать параметры систем ППЗ АЭС с ВВЭР для выполнения безопасного останова и расхолаживания реакторной установки при реальном режиме пожара.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

– выполнить анализ существующих систем ППЗ пожарных зон зданий АЭС с ВВЭР;

– разработать методики расчета параметров системы ППЗ по проекту «АЭС-2006» для ВВЭР-1200, позволяющей выполнить безопасный останов и расхолаживание реакторной установки в условиях реального температурного режима пожара с учетом характерной нагрузки (НГ кабели), объемно-планировочных решений, материалов ограждающих конструкций, обработки огнезащитным составом, новых данных по токсичности кабелей НГ;

– разработать метод и методику математического моделирования работоспособности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального и стандартных режимов пожара, в том числе с использованием вспучивающих огнезащитных составов;

– разработать экспериментальный метод и методику проведения эксперимента, провести эксперименты по исследованию работоспособности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального температурного режима пожара;

– провести экспериментальные исследования токсичности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального температурного режима пожара;

– разработать методику, позволяющую определить не предусмотренное технологическим процессом образование взрывопожароопасной водородно-воздушной смеси;

– разработать практические рекомендации по повышению уровня системы ППЗ АЭС с ВВЭР.

Научная новизна заключается в следующем:

– рассчитаны на основе разработанных методик расчета параметров систем ППЗ по проекту «АЭС-2006» для ВВЭР-1200 температурные режимы реального пожара в основных зданиях АЭС с учетом новых данных по свойствам

горючей нагрузки (кабели НГ), что позволило определить огнестойкость пожарных зон и безопасные расстояния между элементами конструкций, в том числе кабельных коробов;

- разработан новый метод и методика математического моделирования работоспособности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях стандартных и рассчитанных реальных температурных режимов пожара, что позволило определить времена прогрева изоляции кабелей от начала возгорания до потери работоспособности кабелей;

- получены новые теоретические данные по максимальным величинам силы тока, позволяющим проводить корректно электрический сигнал по кабелю конструкции КПЭПнг(А)-НГ 24x2x0,6 в течение времени, необходимого для приведения реакторной установки в безопасное состояние, при температурах, характерных для начальной стадии реального температурного режима пожара;

- разработан экспериментальный метод и методика проведения эксперимента, позволяющая исследовать работоспособность силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС без и с огнезащитой, в условиях реального температурного режима пожара;

- получены результаты экспериментальных исследований работоспособности силовых и сигнальных кабелей, в том числе с использованием вспучивающего огнезащитного покрытия, позволяющие определить температуру и время наступления короткого замыкания кабелей каналов СБ АЭС в условиях реального температурного режима пожара;

- получены результаты экспериментальных исследований токсичности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального температурного режима пожара, которые необходимы для определения условий безопасной эвакуации персонала АЭС и выбора средств индивидуальной защиты для персонала, приводящего реакторную установку в безопасное состояние;

- разработана математическая зонная модель, позволяющая выявить не предусмотренное технологическим процессом образование взрывопожароопасной водородно-воздушной смеси и определить необходимую степень чувствительности приборов контроля концентрации водорода в реакторном здании АЭС, а также дать рекомендации по их оптимальному расположению.

Обоснованность и достоверность научных положений и основных результатов диссертации подтверждается:

- использованием при проведении экспериментальных исследований сертифицированных измерительных приборов и апробированных методик измерения;

- корректностью выбора исходных данных и условий для построения моделей;

- удовлетворительной сходимостью результатов теоретических расчетов и экспериментов, выполненных автором и приведенных в литературных источниках.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- обосновании температурных режимов реального пожара в зданиях АЭС;
- обосновании огнестойкости пожарных зон и безопасных расстояний

между элементами конструкций, в том числе кабельных коробов;

- выявлении температуры пожара в помещении, при которой происходит короткое замыкание кабелей, используемых на АЭС;
- обосновании эффективности применения огнезащитных вспучивающихся покрытий кабелей при реальном температурном режиме пожара в зданиях АЭС;
- получении аналитических решений модельных задач натекания водорода в помещение;
- обнаружении существования критического значения массового расхода газообразного водорода, натекающего в нижнюю часть помещения, при превышении которого резко увеличивается опасность возникновения горения и взрыва во всем гермообъеме реакторного здания АЭС.

Практическая значимость работы подтверждена использованием результатов исследования при:

- подтверждении (обосновании) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности энергоблока №1 Курской АЭС-2;
- подтверждении (обосновании) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности объектов Нововоронежской АЭС-2;
- подтверждении (обосновании) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности объектов АЭС «Руппур» в Народной Республике Бангладеш;
- подтверждении (обосновании) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности объектов АЭС «Аккую» в Турецкой республике;
- разработке актуализированной версии анализа влияния пожаров и их последствий на безопасный останов и расхолаживание реакторной установки, локализацию и контроль радиоактивных выбросов в окружающую среду энергоблока №1 Ленинградской АЭС-2;
- разработке Приказа МЧС России №533 от 26.06.2024 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах»;
- разработке фондовых лекций, проведении лекционных, лабораторных и практических занятий со специалистами, бакалаврами и магистрами Академии ГПС МЧС России по дисциплинам «Прогнозирование опасных факторов пожара» и «Теория динамики пожаров».

Методология и методы исследования. Используются современные интегральные, зонные и полевые модели расчета динамики ОФП, экспериментальные методы исследования параметров процессов горения веществ и материалов, экспериментальные и теоретические методы изучения работоспособности проводов и кабелей в условиях пожара, теоретические методы расчета концентраций водорода при его натекании в помещение.

Положения, выносимые на защиту:

- методики и результаты расчета режима реального пожара в основных зданиях АЭС с учетом новых данных по свойствам горючей нагрузки (кабели НГ), позволяющие определить параметры систем ППЗ по проекту «АЭС-2006»

для ВВЭР-1200, в частности, пределы огнестойкости пожарных зон, безопасные расстояния между кабельными каналами;

– метод, методика и результаты математического моделирования работоспособности силовых и сигнальных кабелей каналов СБ АЭС, в условиях стандартных и реальных температурных режимов пожара в зданиях АЭС;

– экспериментальный метод, методика проведения и результаты экспериментов по исследованию работоспособности силовых и сигнальных кабелей каналов систем безопасности АЭС в условиях реального температурного режима пожара без и с учетом обработки наружной поверхности изоляции огнезащитным вспучивающимся составом;

– результаты экспериментальных исследований токсичности не распространяющих горение силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального температурного режима пожара;

– комплекс математических моделей и аналитических решений, а так же результаты численных экспериментов, позволяющие определить образование локальной взрывопожароопасной водородно-воздушной смеси при не предусмотренным технологическим процессом натекании водорода.

Личный вклад автора в проведении исследований заключается в предложении концепции работы, в постановке задач исследования, непосредственном участии и проведении экспериментальных и теоретических исследований, анализе полученных результатов, формулировке основных положений и выводов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на XVI и XVII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (г. Санкт-Петербург, 2007) и (г. Жуковский, 2009); VI Минском международном форуме по тепло- и массообмену ММФ-2008; Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Академии ГПС МЧС России (г. Москва, 2013); Международной научно-практической конференции «Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области обеспечения пожарной безопасности» (г. Москва, 2018); Международных научно-технических конференциях Системы безопасности: 2009, 2019, 2020, 2021, 2022 (г. Москва); научно-практических конференциях «Ройтмановские чтения» (г. Москва, 2020, 2022); Ш-ей Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны (г. Москва, 2019); Всероссийских научно-практических конференциях (г. Москва, 2021 и 2022) «Актуальные проблемы комплексной безопасности в строительстве, тенденции развития в современных условиях» (г. Москва, МГСУ, 2021, 2022); Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 2022); Международной научно-практической конференции (г. Москва, АГЗ МЧС России, 2023); I-ой Международной научно-практической конференции (г. Санкт-Петербург, 2023); XI Международной конференции «Полимерные материалы пониженной горючести» (г. Волгоград, 2023).

Публикации. Результаты исследования опубликованы в 50 научных работах, в том числе, в 3-х монографиях и 25-и статьях в рецензируемых научных

журналах из перечня ВАК, из них 3 статьи в научном журнале, входящем в базу цитирования Scopus и 11 статей в базе цитирования Chemical Abstracts.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 263 наименований и приложения; изложена на 342 листах машинописного текста, содержит 132 рисунка и графика, 35 таблиц, 1 приложение.

Краткое содержание по главам

В первой главе «Современное состояние проблемы противопожарной защиты АЭС с водо-водяными реакторами» выполнен обзор литературных источников по теме диссертационного исследования.

Проанализированы причины аварий и пожаров на АЭС на протяжении всего периода использования атомной энергетики, что позволило сделать следующие основные выводы:

- пожар на АЭС, чаще всего, является результатом аварии, сопровождающейся разливом масла, выбросом водорода, либо короткого замыкания;
- аварии приводят к разрушению активных систем противопожарной защиты, таких как, система дымоудаления и автоматические установки пожаротушения, следовательно, противопожарная защита должна обеспечиваться, в первую очередь, пассивными мерами.

Состав комплексной системы ППЗ представлен на рисунке 1.

Для надежного проведения реакторной установки АЭС в безопасное состояние при возникновении аварии или пожара используют специально созданные каналы СБ, включающие контрольные, сигнальные и силовые кабели. Необходимо сохранить работоспособность силовых и сигнальных кабелей каналов СБ за исключением одного в соответствии с нормативными документами.



Рисунок 1 – Состав комплексной системы ППЗ АЭС с ВВЭР

Основную пожарную опасность помещений и зданий АЭС составляют изоляция силовых и контрольных электрических кабелей; масла, применяемые в системах турбоустановок, трансформаторах, системах смазки насосного оборудования и грузоподъемного оборудования; водород, выделяющийся в гермообъеме здания реактора при нормальных режимах работы станции и, особенно, в аварийных ситуациях; дизельное топливо и масла, применяемые в оборудовании блочных и резервных ДЭС; горючие материалы, содержащиеся в электротехническом оборудовании и средствах автоматики, фильтровальных установках; а также горючие радиоактивные отходы.

Пожар должен рассматриваться как исходное событие, в результате которого возможен выход из строя всего оборудования, расположенного в помещении, где возник этот пожар. На АЭС, в соответствии с требованиями СП 13.13130.2009 и ОПБ-88/15 одновременно рассматривается возникновение только одного пожара.

Уровень пассивной пожарной безопасности должен обеспечивать выполнение общих критериев безопасности на всех стадиях жизненного цикла энергоблока (строительство, работа, консервация) во всех режимах эксплуатации, включая проектные аварии, а именно:

- обеспечение безопасного останова реактора и поддержание его безопасности в состоянии останова во время и после соответствующих эксплуатационных и аварийных состояний;

- сведение к минимуму радиоактивных выбросов в окружающую среду в случае пожара и обеспечение не превышения выбросов против установленных пределов;

- обеспечение безопасности персонала в случае пожара на АЭС.

Зоны, где расположены элементы разных каналов СБ (например, гермообъем, блочный пункт управления (БПУ), резервный пункт управления (РПУ), представляют особую опасность с точки зрения потери более одного канала СБ при приведении реакторной установки в безопасное состояние.

Проведен анализ современных методов расчета динамики ОФП. Показано, что при математическом моделировании параметров систем ППЗ, позволяющих выполнить безопасный останов и расхолаживание реакторной установки в условиях реального пожара, необходимо учитывать новые виды пожарной нагрузки, уникальные объемно-планировочные решения для каждой АЭС с ВВЭР, материалы ограждающих конструкций с учетом обработки огнезащитным составом, а также данные по токсичности НГ кабелей.

Отсутствие методов экспериментального и математического моделирования работоспособности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального и стандартного режимов пожара, в том числе с использованием вспучивающихся огнезащитных составов, не позволяет спрогнозировать условия возникновения короткого замыкания (КЗ) и потери работоспособности кабелей.

Выявлены особенности водородной безопасности АЭС с ВВЭР. Показано, что необходимо разработать математическую модель расчета размеров и параметров локальных взрывопожароопасных водородно-воздушных смесей, образующихся при натекании водорода при различных режимах в объеме гермозоны АЭС при приведении реакторной установки в безопасное состояние, а также обосновать выбор минимального концентрационного предела измерений и расположения датчиков водорода. Обзор литературных источников позволил сформулировать необходимые методы и методики расчета, которые нужно использовать для обоснования основных параметров пассивных технологий АЭС с ВВЭР (рисунок 2).

В выводах к главе 1 представлены основные результаты анализа решаемой проблемы и выполнена постановка задач исследования.



Рисунок 2 – Методы и методики расчета, необходимые для обоснования основных параметров пассивных технологий АЭС с ВВЭР

Во второй главе «Моделирование параметров системы пассивной противопожарной защиты АЭС с ВВЭР, позволяющей выполнить безопасный останов и расхолаживание реакторной установки при пожаре» представлены математические модели и результаты расчета и анализа параметров систем ППЗ.

Показано, что существующие программы расчета динамики ОФП, например, PiroSim (FDS), ANSYS и т.д. не позволяют ввести напрямую исходные данные по горючей нагрузке, характерные для АЭС. Поэтому для получения достоверных результатов необходимо использовать программы, в которых напрямую вводятся экспериментальные данные по параметрам горючих материалов, например, INTMODEL, ZONMODEL, программы Пузача С.В. Это в первую очередь, связано с отсутствием информации о точных уравнениях реакций, протекающих при горении материалов.

Выполнено обоснование пределов огнестойкости пожарных зон с учетом температурных режимов пожара на примерах Ленинградской АЭС-2, «Аккую» и Нововоронежской АЭС-2.

На рисунке 3 представлены зависимости от времени с начала пожара характерных температур в пожарной зоне гермообъема в помещении участка главного циркуляционного насосного агрегата (ГЦНА) реакторного здания Ленинградской АЭС-2 при горении кабелей НГ. Из рисунка 3 видно, что при закрытых дверях КЗ произошло через 28,3 мин до достижения температуры воспламенения электротехнических материалов через 46,1 мин; температура арматуры не превысила 93,8°C; при открытых дверях соответственно - через 51,6 мин и 79,6 мин, а температура арматуры не превысила 231,7°C.

Таким образом, не происходит распространение ОФП за пределы пожарных зон (в том числе и через противопожарные двери и люки) через 180 мин от начала возгорания внутри пожарной зоны.

При этом работоспособность кабелей каналов СБ может быть нарушена при реальном режиме пожаре. Во всех рассматриваемых помещениях при реальном режиме пожара время достижения температуры КЗ кабелей НГ составила от 28 до 64 мин от начала возгорания внутри пожарной зоны.

Качественно аналогичные результаты получены при расчетном обосновании пределов огнестойкости ограждающих конструкций АЭС «Аккую» за исключением здания обращения с твердыми радиоактивными отходами с очень низким уровнем активности (ОНУА).

Ограждающие конструкции пожарной зоны помещения по обращению с ОНУА выполнены из навесных сэндвич панелей, крепящихся к вертикальным железобетонным колоннам, и стальных ферм покрытия. Подобные конструкции используются на АЭС впервые. Пожарной нагрузкой являются горючие материалы в конструкции электропогрузчика, твёрдые горючие радиоактивные вещества в герметичных металлических бочках на электропогрузчике.

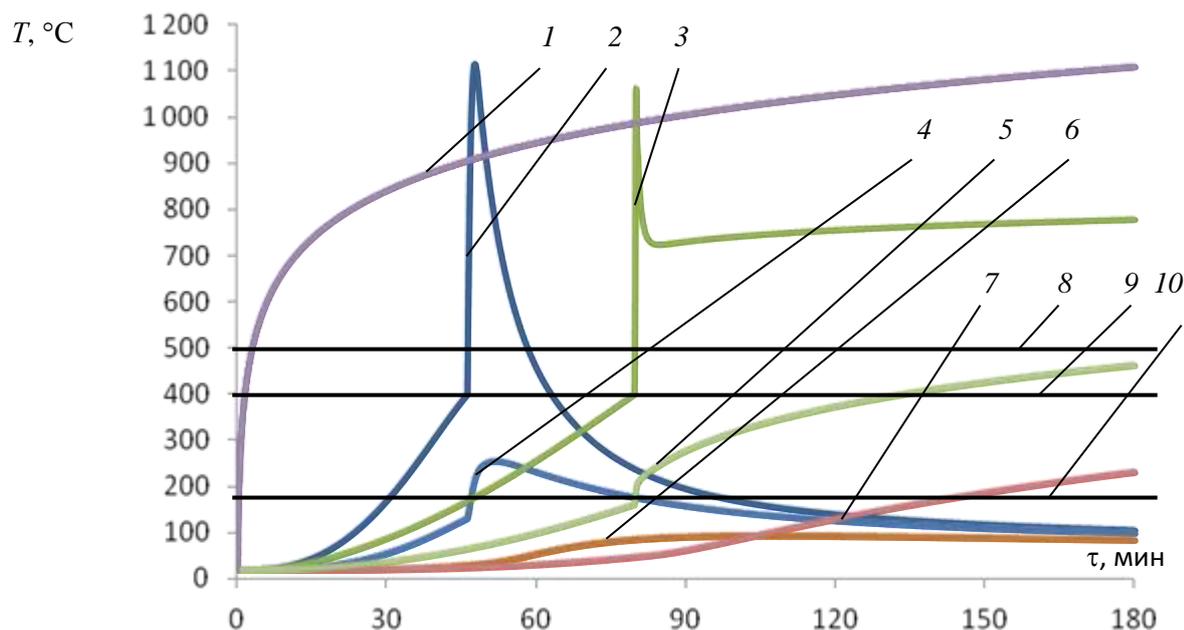


Рисунок 3 – Зависимости характерных температур от времени с начала пожара в помещении участка ГЦНА (гермообъем) реакторного здания при горении кабелей НГ: 1–среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре; 2–среднеобъемная температура при реальном пожаре (закрытые двери); 3–среднеобъемная температура при реальном пожаре (открытые двери); 4–температура на внутренней (огневой) поверхности перекрытия при реальном пожаре (закрытые двери); 5–температура на внутренней (огневой) поверхности перекрытия при реальном пожаре (открытые двери); 6–температура арматуры при реальном пожаре (закрытые двери); 7–температура арматуры при реальном пожаре (открытые двери); 8 – критическая температура арматуры (500°С); 9 – температура воспламенения электротехнических материалов (400°С); 10 – температура газовой среды, при которой происходит КЗ кабелей НГ (180°С)

На рисунке 4 приведены зависимости от времени с начала пожара характерных температур, в том числе, максимальной температуры металлического элемента крепления сэндвич-панели к элементам покрытия, расположенных над геометрическим центром пожарной нагрузки, в помещении при открытых дверях.

Предложена огнезащита элемента крепления сэндвич-панели с минимальной приведенной толщиной 10 мм из слоя минеральной ваты.

Анализ результатов расчетов показал, что:

– при «стандартном» пожаре: температура металлического элемента крепления через 90 мин от начала пожара равна 383,1°С; фактический предел

огнестойкости вышеуказанного элемента конструкции больше R90;

– при реальном пожаре: температура через 90 мин от начала пожара равна 297,2°С; максимальная температура металлического элемента крепления за полное время пожара равна 425,3°С; фактический предел больше R90.

Таким образом, для того, чтобы в помещении по обращению с ОНУА максимальная температура стальных элементов крепления сэндвич-панелей к железобетонным колоннам для наиболее опасных сценариев пожара была меньше критического значения $T_{кр}=500^{\circ}\text{C}$, необходимо использовать огнезащиту (слой минеральной ваты) и нанести огнезащитное силиконовое покрытие «Силотерм ЭП-6» на элементы стальной конструкции перекрытия.

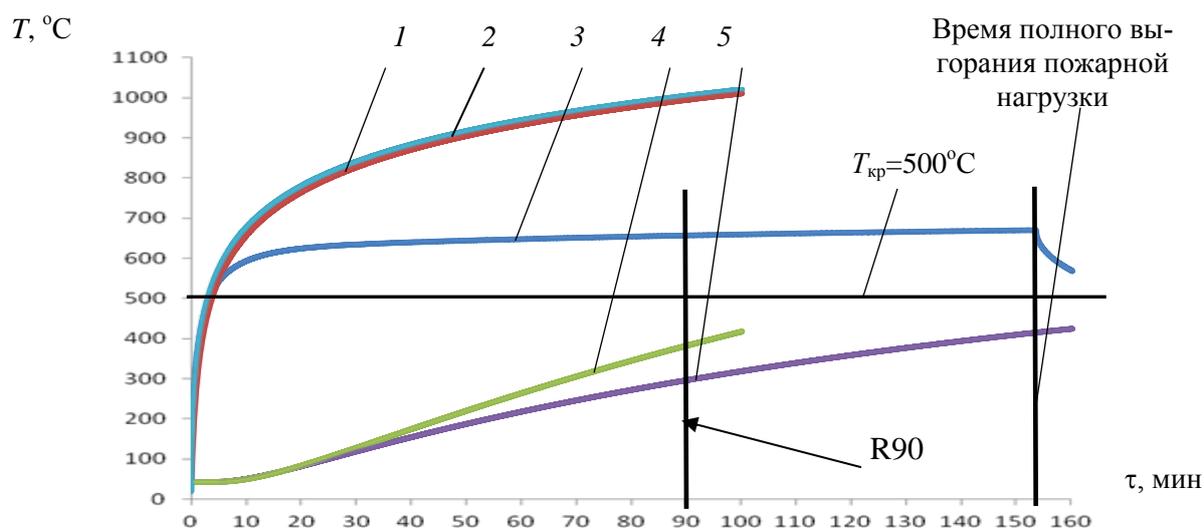


Рисунок 4 – Зависимости от времени характерных температур в случае металлического элемента крепления сэндвич-панели к элементам перекрытия, расположенного над геометрическим центром пожарной нагрузки, с нанесенным огнезащитным слоем минеральной ваты толщиной 30 мм: 1 – среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре; 2 – температура наружной поверхности огнезащиты при «стандартном» пожаре; 3 – температура наружной поверхности огнезащиты при реальном пожаре; 4 – температура поверхности металлического элемента крепления при «стандартном» пожаре; 5 – температура поверхности металлического элемента крепления при реальном пожаре

Аналогичные результаты, полученные при расчетном обосновании пределов огнестойкости ограждающих конструкций Нововоронежской АЭС-2, показали, что для предотвращения одновременного выхода из строя 1-го и 2-го каналов СБ в реакторном здании на отметке +4,950 в коридоре необходимо установить две противопожарные перегородки с пределом огнестойкости EI 60 с противопожарными дверьми с EI 60. Вышеуказанные перегородки должны отделять друг от друга смежные участки коридора, в которые выходят двери из трех помещений на отметке +5,000 кабельного этажа РПУ, помещений установок систем 1-го и 2-го каналов СБ.

При этом, нарушение работоспособности кабелей в помещении пожара может происходить начиная с 5 мин для кабелей, распространяющих горение (РГ), и, начиная с 14 мин, для кабелей НГ от начала пожара в кабельном этаже

РПУ, где расположены кабели всех каналов СБ и канала нормальной эксплуатации (НЭ).

Сформулированы требования к температуре вспучивания огнезащитных составов для обработки наружных поверхностей кабелей СБ: эта температура должна быть не более 150°C для кабелей РГ и 180°C для кабелей НГ.

Полученные зависимости времени наступления КЗ ($\tau_{кз}$, мин) от расстояния (x , м) от горящего соседнего кабельного канала на Ленинградской АЭС-2 (рисунок 5) позволяют определить время от начала пожара до наступления КЗ, если кабели работают под нагрузкой, или после их включения в работу.

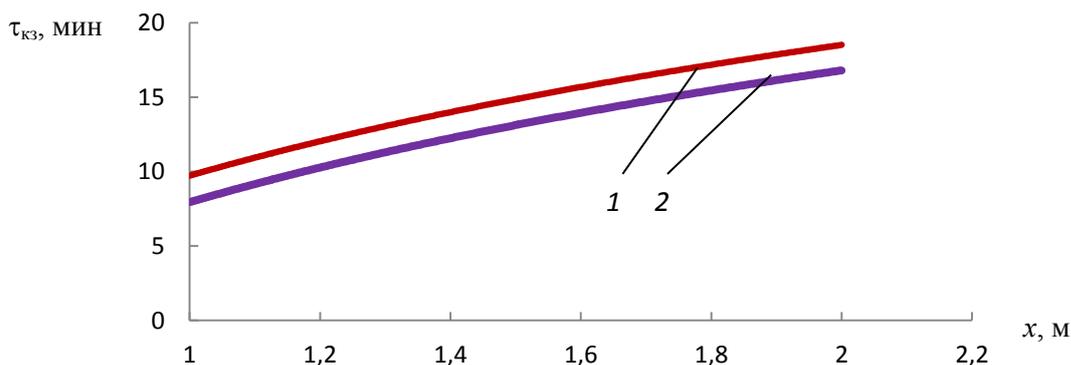


Рисунок 5 – Зависимости времени наступления КЗ в наиболее нагретом поперечном сечении кабеля одного канала СБ при воздействии на него теплового потока от открытого кабеля другого канала СБ от расстояния между кабелями: 1 – кабели НГ; 2 – кабели РГ

Из рисунка 5 видно, что время наступления КЗ при рассматриваемом сценарии находится в диапазоне 10-19 мин от начала пожара и 7,5-16,5 мин для кабелей НГ и РГ соответственно в зависимости от расстояния между кабелем и горящим открытым кабельным каналом. Результаты численного эксперимента можно аппроксимировать следующими формулами: для кабелей НГ:

$$\tau_{кз} = 12,676 \ln(x) + 9,7257, \text{ со среднеквадратичным отклонением } R^2=0,9832;$$

для кабелей РГ:

$$\tau_{кз} = 12,773 \ln(x) + 7,9441, \text{ со среднеквадратичным отклонением } R^2=0,9905.$$

Результаты расчетов позволили сформулировать требования к температуре вспучивания огнезащитных составов для обработки наружных поверхностей кабелей СБ: вышеуказанная температура должна быть не более 150°C для кабелей РГ и 180°C для кабелей НГ.

Доказано, что при расстояниях между открытыми кабелями двух СБ, меньших 2 м, наружные поверхности кабелей СБ необходимо обрабатывать огнезащитным составом с огнезащитной эффективностью не менее 120 мин.

Расчетное обоснование требуемых (минимальных) расстояний и пределов огнестойкости противопожарных преград между каналами СБ при размещении их в одной пожарной зоне для АЭС «Аккую» показало, что система пассивной огнезащиты СПО-Э-11, используемая для герметизации кабельных коробов, обеспечивает предотвращение одновременного выхода из строя нескольких каналов СБ, если вспучивание огнезащитного состава произойдет до достижения среднеобъемной температуры в помещении 180°C (глава 3 диссертации).

Проверка обеспечения безопасной эвакуации персонала из реакторного здания АЭС с ВВЭР проведена на примере Нововоронежской АЭС-2.

На основе анализа горючей нагрузки зданий и путей распространения ОФП проводится экспертный выбор сценариев пожара, при которых ожидаются наихудшие последствия для находящихся в здании людей.

Для обеспечения безопасности персонала, подлежащего эвакуации, необходимо провести его эвакуацию из здания в течение времени достижения ОФП критических для людей значений на путях эвакуации.

Для персонала, выполняющего функции по приведению энергоблока в безопасное состояние, необходимо обеспечить защиту помещений управления и путей эвакуации от воздействия ОФП в течение времени приведения реакторной установки в безопасное состояние.

Для обеспечения деятельности спасателей и работников пожарной охраны необходимо обеспечить устойчивость строительных конструкций здания в течение пожара с учетом мер по его тушению.

В качестве наиболее опасных сценариев пожара принимаем расчетные ситуации, перечисленные в таблице 2.15 диссертационного исследования. На рисунках 2.65-2.67 диссертации на планах этажей зданий Нововоронежской АЭС-2 показаны места расположения очагов пожара и эвакуационных выходов.

Пожарно-технические характеристики горючих материалов представлены в таблице 2.16 диссертационного исследования.

В качестве примера на рисунке 6 приведены сценарии динамики ОФП в помещениях БПУ и установок системы аварийной защиты реакторного здания.

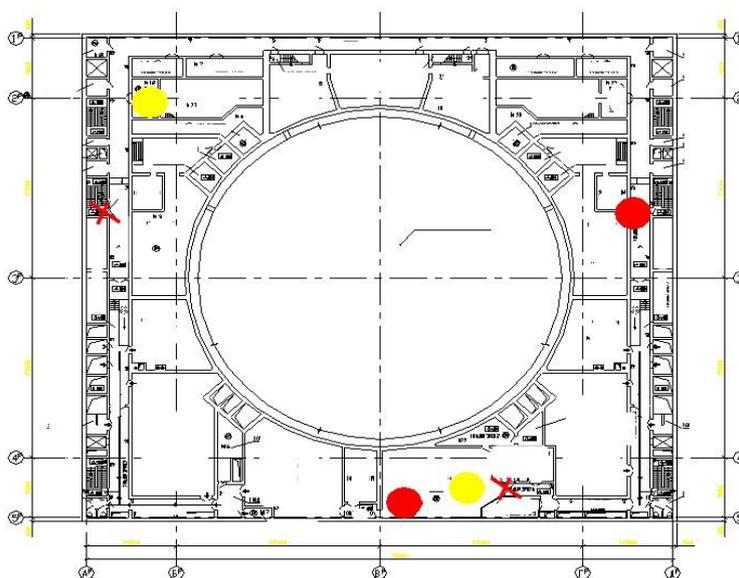


Рисунок 6 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено желтым) на отметках +3,600 и +4,950 реакторного здания. Красным цветом обозначены места расположения контрольных точек (эвакуационных выходов)

Для иллюстрации полученных результатов в случае распространения ОФП по коридорам реакторного здания (очаг возгорания находится в помещении установок системы аварийной защиты) на рисунках 7 и 8 представлены поля дальности видимости (в м) и температуры (в °С) на высоте рабочей зоны в случае свободного развития пожара через различные промежутки времени от

начала пожара при горении кабелей НГ и РГ. Координаты x и y на рисунках 7 и 8 направлены вдоль длины и ширины помещения соответственно.

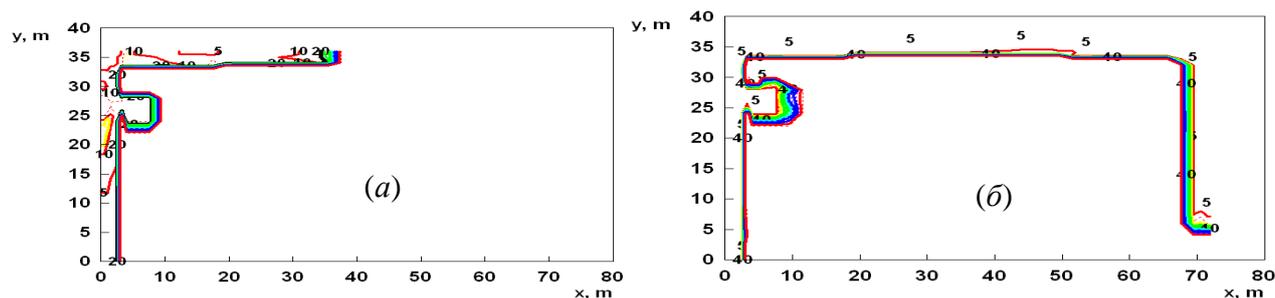


Рисунок 7– Поля дальности видимости на уровне рабочей зоны через 300 с от начала пожара при горении кабелей НГ (а) и РГ(б) (реакторное здание)

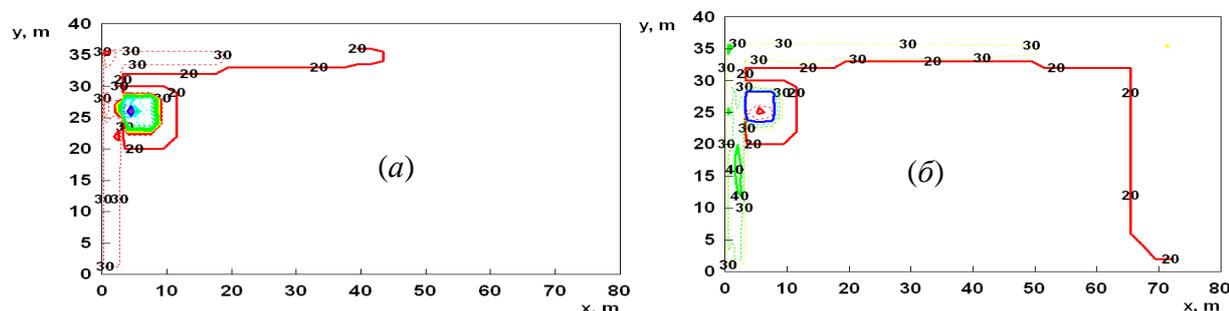


Рисунок 8– Поля температур на уровне рабочей зоны через 300 с от начала пожара при горении кабелей НГ (а) и РГ(б) (реакторное здание)

Результаты расчета показали, что при распространении ОФП в коридорах потеря дальности видимости при горении кабелей НГ наступает только за в 1,88 раза больший промежуток времени, чем в случае горения кабелей РГ. Это объясняется отличием в свойствах ГН кабелей НГ и РГ, а именно: удельная скорость выгорания кабелей и линейная скорость распространения пламени НГ ниже, чем у кабелей РГ, однако удельное тепловыделение у кабелей НГ выше, чем у РГ 1,9 раза (таблица 2.16 диссертации).

Для расчета времени блокирования путей эвакуации циановодородом впервые были использованы результаты по его образованию при горении НГ кабелей, полученные в главе 4 диссертационного исследования.

Для иллюстрации полученных результатов на рисунках 9 и 10 представлены соответственно зависимости среднеобъемных температур (T_m , °С), парциальных плотностей HCN ($\rho_{\text{HCN},m}$, кг/м³) и CO ($\rho_{\text{CO},m}$, кг/м³) от времени с начала пожара, полученные с использованием интегральной модели, при свободном развитии пожара в помещениях РПУ и БПУ (реакторное здание).

Результаты расчетов, полученные с использованием массовых коэффициентов образования CO и HCN (глава 4 диссертации), позволяют сделать вывод о том, что критические времена по температуре, HCN и CO имеют близкие значения. Поскольку токсичное действие смеси CO+HCN увеличивается путем суммирования эффектов, а повышенная температура приводит к увеличению частоты дыхания, то их воздействие на персонал БПУ и РПУ, приводящий реакторную установку в безопасное состояние в течении 72 часов, может привести к отравлению или гибели. Следовательно, в реакторном здании вышеука-

занный персонал, должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты органов дыхания от воздействия ОФП (в первую очередь от высокотоксичных газов HCN и CO и повышенной температуры).

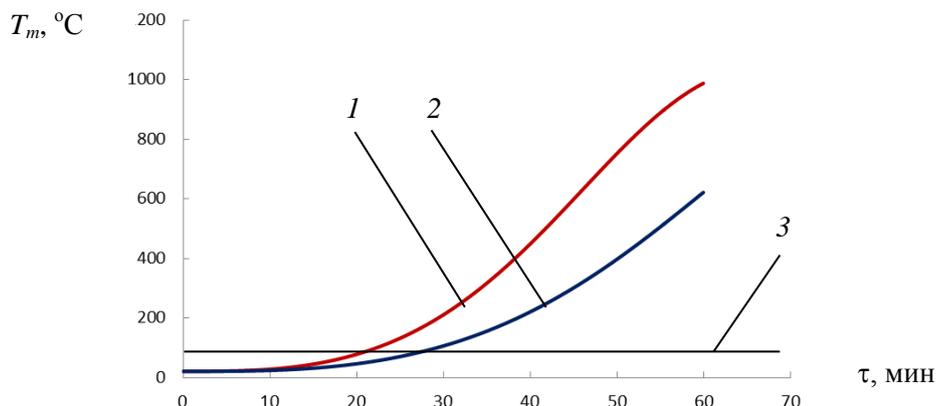


Рисунок 9 – Зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара: 1 – РПУ; 2 – БПУ (кабели НГ (свойства в гл.4 диссертации), герметичное помещение); 3 – критическая температура для человека $T_{кр}=70^{\circ}\text{C}$

Показано, что для обеспечения безопасной эвакуации людей из реакторного здания АЭС необходима наличие системы дымоудаления, средств индивидуальной защиты органов дыхания обслуживающего персонала от воздействия ОФП, а также разработка организационно-технических мероприятий по эвакуации персонала в условиях потери видимости.

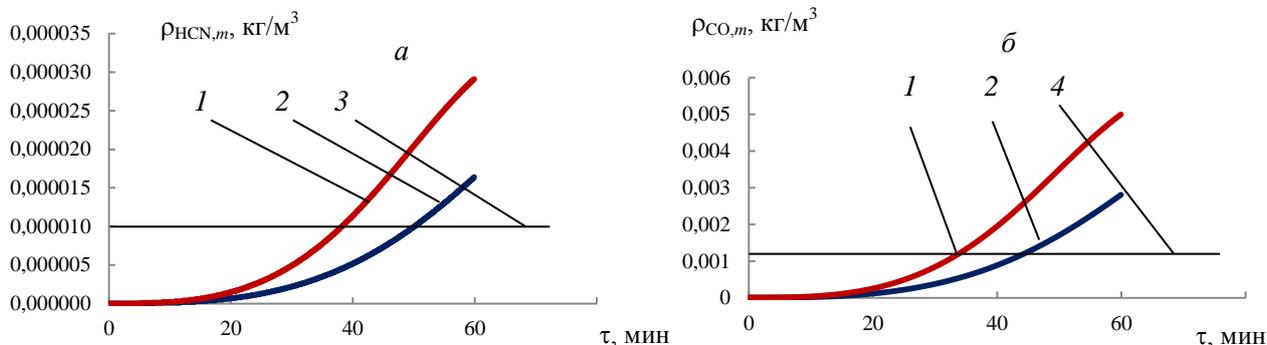


Рисунок 10 – Зависимости среднеобъемных парциальных плотностей циановодорода (а) и монооксида углерода (б) от времени с начала пожара: 1 – РПУ; 2 – БПУ (кабели НГ(свойства в гл.4 диссертации), герметичное помещение); 3 – критическая плотность HCN $\rho_{\text{HCNкр}}=10^{-5}\text{ кг/м}^3$; 4 – критическая плотность CO $\rho_{\text{COкр}}=1,16 \cdot 10^{-3}\text{ кг/м}^3$

По результатам, полученным в главе 2, сделаны основные выводы.

В третьей главе «Теоретическое и экспериментальное моделирование работоспособности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального и стандартных режимов пожара» представлены результаты теоретической и экспериментальной оценки работоспособности кабелей каналов СБ АЭС с ВВЭР. Проведена теоретическая и экспериментальная оценка работоспособности кабелей без огнезащиты и с использованием огнезащитных покрытий.

Выполнена теоретическая оценка функционирования сигнальных кабелей каналов СБ АЭС в условиях пожара. Проведенные теоретические исследования зависимости силы тока в электрическом кабеле от температуры газовой среды в помещении пожара при предельно допустимых температурах жил кабеля позволяют скорректировать приведенную в ПУЭ зону зависимости температуры в помещении от токовой нагрузки в сигнальных кабелях каналах СБ АЭС.

Проведена теоретическая оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов СБ АЭС с ВВЭР в условиях пожара при одновременном воздействии токовой нагрузки и различных температурных режимов пожара:

– стандартный, углеводородный и медленно развивающийся (тлеющий) (ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Альтернативные и дополнительные методы. Дата введения 2015-06-01);

– реальный температурный режим пожара в кабельном этаже АЭС с ВВЭР, в котором проходят, как минимум, 2 канала СБ.

Для определения распределения температур внутри многослойной изоляции токопроводящей жилы решается уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$; T – температура, К ; r – координата, направленная по толщине кабеля, м ; τ – время, с .

Уравнение (1) решается численным методом контрольных объемов (Патанкар С., 1984 г.).

Предполагаем одинаковую по периметру изоляции и длине кабеля плотность теплового потока от газовой среды помещения. Предполагаем идеальный тепловой контакт между слоями изоляции, изготовленными из различных материалов, а также слоем огнезащитного состава, что также является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева конструкции кабеля.

Для уравнения (1) задаются граничные условия 3-го рода.

При стандартных режимах пожара коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности изоляции (или огнезащиты при ее наличии) определяется из нормативных документов. При реальном режиме пожара коэффициент теплоотдачи находится в случае вертикального расположения кабеля, так как горизонтальное расположение кабеля менее опасно для его нагрева.

Для реального режима пожара температура в помещении определяется с использованием интегральной модели пожара (Пузач С.В., 2005 г.).

Среднеобъемная температура газовой среды в помещении пожара T_m находится из уравнения энергии и уравнения состояния:

$$\frac{V}{k_m - 1} \frac{dp_m}{d\tau} = \eta \Psi Q_n^p + c_{pa} T_a G_a - c_{pm} T_m G_m - Q_\Sigma - Q_{пр}, \quad (2)$$

$$p_m = \rho_m R T_m, \quad (3)$$

где τ – время, с; V – объем помещения, м³; p_m – среднеобъемное давление газовой среды, Па; ρ_m – среднеобъемная плотность газовой среды, кг/м³; Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания горючего материала, Дж/кг; η – полнота сгорания; Ψ – массовый расход продуктов газификации горючего материала, кг/с; G_a , G_m – массовые расходы поступающего воздуха и вытекающих наружу газов при естественном газообмене через открытые проемы, кг/с; $Q_{\Sigma} = Q_c + Q_w + Q_f$ – суммарный тепловой поток, отводимый в ограждающие конструкции от газовой среды, Вт; Q_c , Q_w , Q_f – суммарные тепловые потоки, отводимые соответственно в потолок, стены и пол, Вт; Q_{np} – тепловой поток, излучаемый через открытые проемы наружу, Вт; T_a – температура наружного воздуха, К; c_{pa} , c_{pm} – удельные изобарные теплоемкости воздуха и газовой среды, Дж/(кг·К); k_m – показатель адиабаты газовой среды в помещении; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

Зависимость удельного сопротивления проводника (медь) от температуры определяется по формуле:

$$\rho_o = \rho_o^* \cdot (1 + 0,0043 \cdot (T_c - 20)) , \quad (4)$$

где ρ_o – удельное электрическое сопротивление материала токопроводящей жилы при температуре токопроводящей жилы T_c (°С); $\rho_o^* = 0,0175$ Ом·мм²/м – удельное электрическое сопротивление медной токопроводящей жилы при 20°С.

Рассматривался силовой кабель ВВГнг(А)-LS 3х2,5 ТУ 16.К71-310-2001 изм. 4, используемый в каналах СБ АЭС с ВВЭР и предназначенный для передачи и распределения электрической энергии в стационарных установках при переменном и постоянном напряжении 1,0 кВ.

Кабель находится в кабельном этаже АЭС с площадью пола 102 м² и высотой 3,1 м. Горючим материалом являются кабели НГ. Сила тока принималась равной 6 А (максимальная согласно ПУЭ).

Критические температуры изоляции кабеля согласно «ГОСТ Р МЭК 60724-2009 Национальный стандарт Российской Федерации. Предельные температуры электрических кабелей на номинальное напряжение 1 Кв (1,2 Кв) и 3 Кв (3,6 Кв)» в условиях КЗ составляют: 150°С–200°С.

Свойства изоляции из ПВХ пластиката принималась: деструкция происходит при нагревании выше 140°С; температура текучести - 150-160°С, температура самовоспламенения составляет 400°С. Время воздействия до достижения критических температур определяется нагревом слоев кабеля от газовой среды помещения пожара. Температуры вспучивания огнезащитного состава принимались в диапазоне 180-250°С. При этом процесс вспучивания не рассматривался, расчеты проводились для оценок времени его начала.

Времена от начала пожара до достижения критических температур изоляции без огнезащиты и с огнезащитным составом приведены в таблице 1.

Температуры изоляции и наружной поверхности огнезащитного слоя при достижении критических температур изоляции кабеля представлены в таблице 2, где выделены ячейки с температурой наружной поверхности огнезащитного слоя, большей минимальной температуры вспучивания 180°С.

Таблица 1– Времена (мин) от начала пожара до достижения критических температур изоляции и жилы кабеля без огнезащиты и с использованием огнезащитного вспучивающегося состава

Режим пожара		Температура наружной поверхности изоляции без огнезащиты, °С				Температура наружной поверхности изоляции с использованием огнезащитного вспучивающегося состава, °С		
		120	150	200	400*	120	150	200
Стандартный		1,0	1,3	1,95	5,2	1,6	2,08	2,83
Стандартный углеводородный		0,34	0,43	0,6	1,5	0,7	0,92	1,08
Стандартный медленно развивающийся (тлеющий)		2,53	3,7	6,2	23,0	3,6	5,0	7,75
Реальный	Проемы открыты	41,9	47,9	56,8	83,5	43,3	49,25	58,17
	Проемы закрыты	31,3	34,7	39,5	54,4	32,5	35,83	40,67

Примечание: * - температура самовоспламенения изоляции.

Таблица 2– Температуры (°С) наружной поверхности огнезащитного слоя при достижении критических температур изоляции

Критические температуры изоляции, °С		120	150	200
Стандартный		163,1	199,8	248,9
Стандартный углеводородный		210	270,4	308,5
Стандартный медленно развивающийся (тлеющий)		138,1	167,0	212,5
Реальный	Проемы открыты	123,4	153,8	204,5
	Проемы закрыты	126,0	156,8	208,1

Температуры наружной поверхности огнезащитного состава (зеленый цвет) при температуре наружной поверхности изоляции 120°С (1 – начало деформации материала изоляции), 150°С (2 – начало плавления материала изоляции) и 200°С (3 – температура активной текучести материала изоляции), а также время ее достижения (красный цвет) при рассматриваемых режимах пожара представлены на рисунке 11.

Из таблицы 2 и рисунка 11 видно, что:

– при температуре изоляции 120°С только при углеводородном пожаре происходит вспучивание огнезащитного покрытия;

– при температуре изоляции 150°С происходит вспучивание огнезащитного покрытия только при стандартном и стандартном углеводородном режимах пожара;

– при температуре изоляции 200°C во всех рассматриваемых режимах происходит вспучивание.

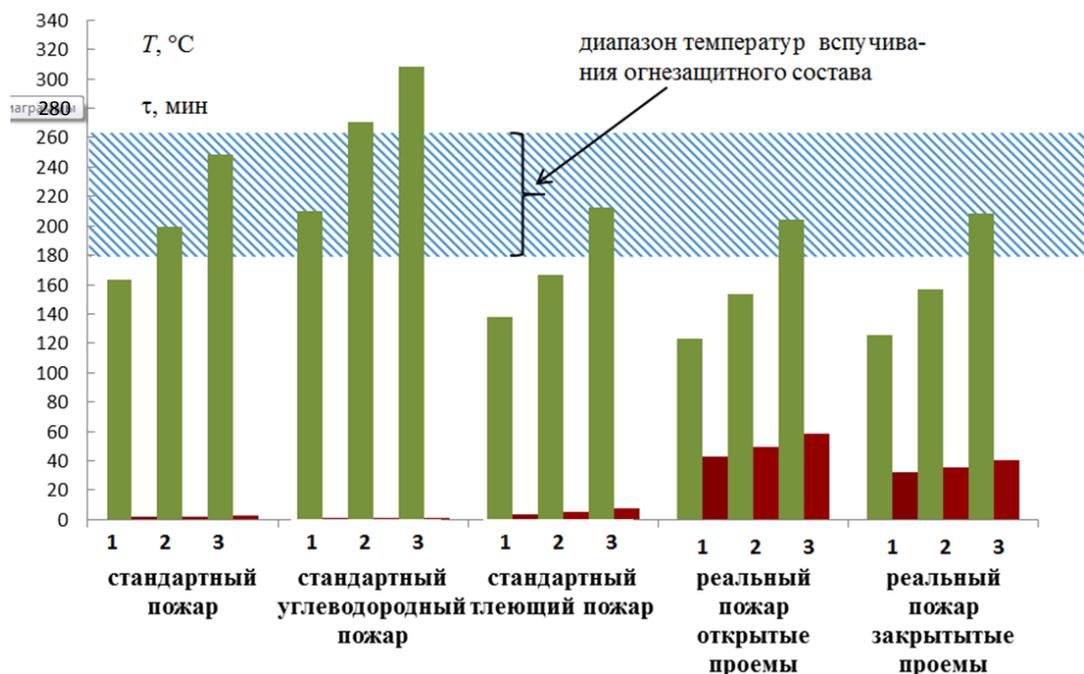


Рисунок 11 – Температуры наружной поверхности огнезащитного состава (зеленый цвет) при температуре наружной поверхности изоляции 120°C (1), 150°C (2) и 200°C (3), а также время ее достижения (красный цвет) при всех рассматриваемых режимах пожара

При реальных режимах пожара:

– время плавления изоляции до момента вспучивания огнезащитного покрытия (минимальная температура вспучивания 180°C) равно $\tau_{пл}=4,75$ мин при открытых проемах и $\tau_{пл}=3,0$ мин при закрытых проемах помещения;

– время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции составляет $\tau_d=6,0$ мин при открытых проемах и $\tau_d=3,33$ мин при закрытых проемах помещения.

При стандартном медленно развивающемся (тлеющем) режиме пожара:

– время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления равно 1,42 мин;

– время плавления изоляции до момента вспучивания огнезащитного покрытия равно 1,5 мин;

При стандартном режиме пожара:

– время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции равно 0,42 мин;

– время плавления изоляции до момента вспучивания огнезащитного покрытия (минимальная температура вспучивания 180°C) равно 0,5 мин.

Таким образом, при минимальной температуре вспучивания 180°C: максимальное время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции составляет 6,0 мин; максимальное время процесса плавления изоляции равно 4,75 мин.

Теоретическое обоснование параметров вспучивающихся огнезащитных составов с использованием стандартных режимов пожара показало, что может

произойти потеря изоляционными материалами силовых кабелей каналов СБ АЭС эксплуатационных свойств при реальном пожаре.

Поэтому далее было выполнено экспериментальное обоснование эффективности применения огнезащитных составов для кабелей с учетом реальных режимов пожара, особенно в помещениях, где, согласно технологическому процессу, сходятся два и более каналов СБ.

Для экспериментальной оценки работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки была разработана экспериментальная установка, позволяющая плавно изменять температуру окружающего кабель воздуха. В разработанной установке изучается не только возникновение КЗ, как при стандартных испытаниях, но и измерения амплитуды, фазы, частоты и формы сигнала, поступающего из испытуемого образца провода, что является необходимым для оценки прохождения сигнала по сигнальным кабелям.

Разработан экспериментальный стенд, функциональная схема которого представлена на рисунке 12. Фотография стенда приведена на рисунке 13.

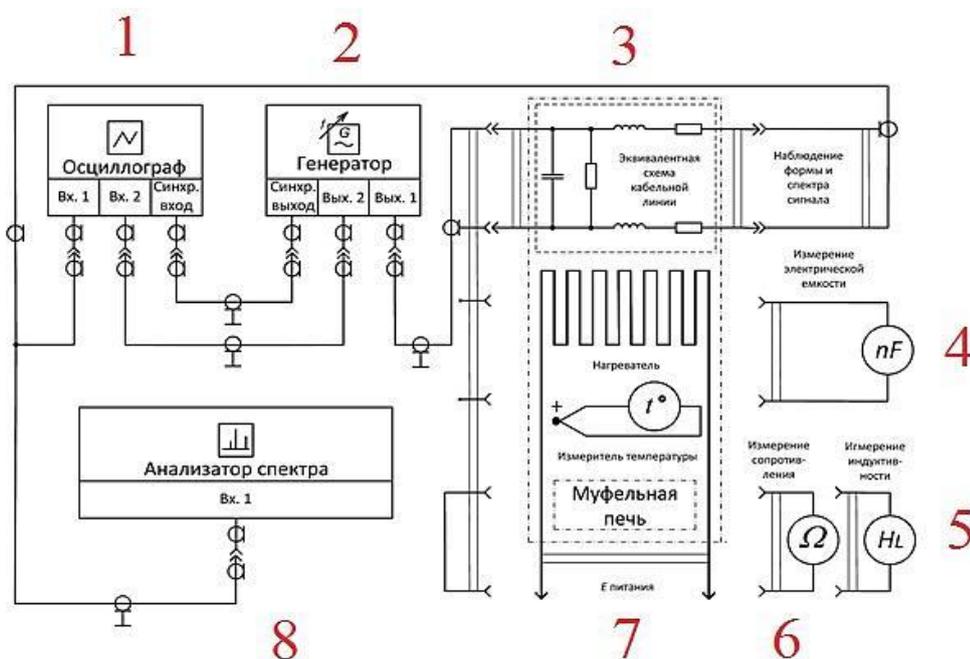


Рисунок 12 – Функциональная электрическая схема экспериментального стенда:

1 – осциллограф С1-64А; 2 – генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109; 3 – эквивалентная схема испытываемого образца кабеля; 4 – измеритель электрической емкости (тестер) Mastech MY62; 5 – измеритель электрической индуктивности (тестер) UNI-T UT58D; 6 – измеритель электрического сопротивления (тестер) UNI-T UT60A; 7 – муфельная печь ЭКПС-10/1250; 8 – анализатор спектра INSTEK GSM-810

Для примера в таблице 3 представлены результаты экспериментов с двухжильным нагревательным проводом типа ПНСВ 1x1,2. Из таблицы 3 видно, что при температуре 120°C начался сдвиг фазы синусоидального сигнала, при 170°C произошли скачки амплитуды сигнала на спектрограмме выходного сигнала, а при 180°C установился стабильный характер сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала на спектрограмме.



Рисунок 13 – Общий вид стенда для проведения испытаний проводов и кабелей

Таблица 3 – Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двужильного нагревательного провода типа ПНСВ 1х1,2 при воздействии температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$C, \text{пФ}$	$L, \text{мГн}$	Примечания	
20	5,7	0,398	1,37	Длина кабеля со стальными проводами: - в нагреваемом образце 15,0 м; Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 30,0 м. Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 15,0 м.	
40	7,1	0,399	1,38		
60	6,3	0,399	1,39		
80	6,8	0,398	1,39		
100	6,9	0,398	1,40		
110	7,3	0,397	1,40		
120	7,4	0,397	1,41		Сдвиг фазы синусоидального сигнала
130	7,7	0,398	1,42		
140	7,9	0,398	1,42		
150	8,1	0,411	1,43		
160	8,4	0,410	1,43		
170	8,9	0,440	1,44	Скачки амплитуды сигнала на спектрограмме	
180	9,1	0,440	1,43	Стабильный характер изменения амплитуды сигнала на спектрограмме	
190	3,8	0,23	0,38	Короткое замыкание проводников	
200	1,8-4,6	0,122	0,07		
220	2,5	0,26	0,09		
250	2,4-3,0	0,04	0,05		

Полученные результаты проведенных экспериментальных испытаний проводов и кабелей различных типов показали, что постепенный нагрев электрического кабеля приводит к искажению передаваемой информации по сигнальным кабелям в связи с сдвигом фазы и изменением амплитуды сигнала на спектрограмме и, в конечном итоге, к КЗ между его токопроводящими жилами и к невозможности дальнейшей передачи электрического сигнала.

Для защиты от воздействия пожара на электрические провода и кабели широко применяются вспучивающиеся огнезащитные покрытия. Механизм защиты заключается в многократном увеличении толщины покрытия под воздей-

ствием повышенных температур. С электропроводами и кабелями тех же марок, обработанными вспучивающейся водно-дисперсионной огнезащитной краской «Огнеза-ВД-К» (ТУ 2313-004-92450604-2013), были проведены аналогичные экспериментальные исследования. Как и в предыдущих экспериментах, приведенных ранее в параграфе 3.4 диссертации, в процессе визуального контроля формы и спектра сигнала в момент стабилизации температуры в камере муфельной печи последовательно проводится контроль емкости, индуктивности и сопротивления испытываемого образца. Так же проводился визуальный контроль состояния вспучивающегося покрытия, нанесенного на кабели.

Эффективность огнезащитной краски определяется по ГОСТ Р 59637-2021 «Национальный стандарт Российской Федерации. Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте» при стандартном режиме пожара, когда происходит быстрое нагревание краски и кабеля до температуры 600°C в течении 5 минут. Температура вспучивания краски составляет порядка 200-400°C для разных составов. При этом вспучивание краски должно происходить, когда температура изоляции не достигает температур ее терморазложения (130-170°C), и образующийся огнезащитный слой краски обеспечивает защиту изоляции и жилы кабеля от перегрева. Эффект вспучивания гарантировано достигается за счет воздействия высокой температуры в 600°C.

При реальных режимах пожара зависимость температуры в помещении, влияющей на нагрев вспучивающихся покрытий изоляции кабелей, от времени пожара существенно отличается от соответствующих зависимостей при различных стандартных режимах пожара, что показано в главе 2 диссертации. Поэтому начало деструкции изоляции может произойти до начала вспучивания покрытия.

Динамика изменения температуры внутри муфельной печи приближалась к температурному режиму реального пожара в блочном пункте управления АЭС с водо-водяными реакторами, что видно из рисунка 14.

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1x1,2, обработанного вспучивающимся покрытием «Огнеза-ВД-К», при воздействии температуры представлены в таблице 4. Температура начала вспучивания покрытия по данным производителя составляет 200°C.

Из таблицы 4 видно, что при температуре 120°C начался сдвиг фазы синусоидального сигнала, при 170°C произошли скачки амплитуды сигнала на спектрограмме выходного сигнала, а при 180°C установился стабильный характер сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала на спектрограмме.

Опыты показали, что для всех рассматриваемых кабелей КЗ произошло при температурах окружающей среды в диапазоне 180-230°C без увеличения в объеме огнезащитного покрытия до размеров, обеспечивающих защиту кабеля от внешнего теплового воздействия вспучиванием огнезащитного покрытия. При этом, из-за нарушения изоляции и возникновения КЗ, передача электрического сигнала по кабелю становится невозможной.

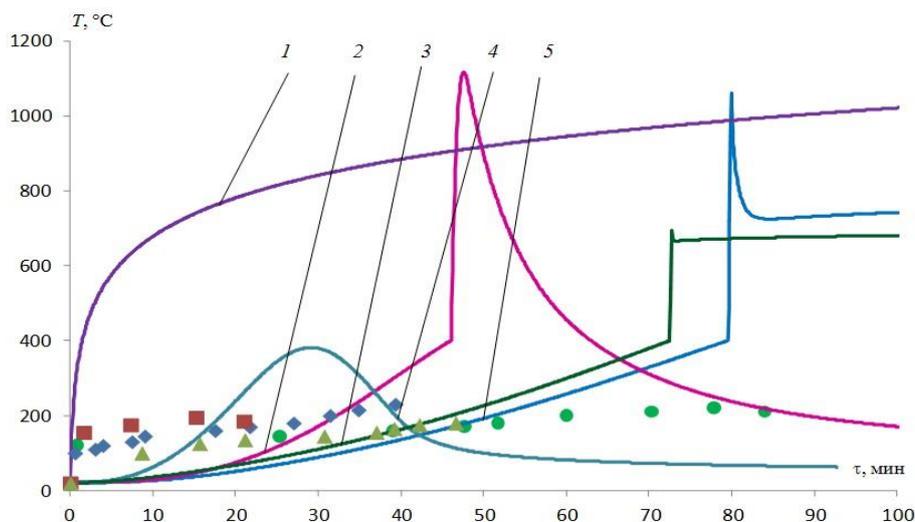


Рисунок 14 – Зависимости характерных температур от времени с начала пожара:
 – в помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре;
 2 – среднеобъемная температура при реальном режиме пожара (закрытые двери);
 3 – среднеобъемная температура при реальном режиме пожара (открытые двери);
 – в кабельном помещении 3-го канала безопасности на отметке здания безопасности при горении кабелей НГ: 4– среднеобъемная температура при реальном режиме пожара (закрытые двери); 5 – среднеобъемная температура при реальном режиме пожара (открытые двери);
 Маркерами показаны температурные режимы при проведении экспериментов с кабелями в муфельной печи

Таблица 4 – Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1х1,2 с огнезащитным покрытием при воздействии температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$C, \text{пФ}$	$L, \text{мГн}$	Примечание
20	5,3	0,510	0,242	Длина кабеля со стальными проводами: - в нагреваемом образце 15,0 м; общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 30,0 метров; общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 15,0 метров.
100	5,8	0,684	0,249	
110	5,8	1,088	0,256	
120	6,5	1,654	0,262	
130	6,4	1,658	0,265	Сдвиг фазы синусоидального сигнала. Огнезащитное покрытие не вспучилось. Диаметр проводника 1,2 мм Изоляция: виниловый пластикат Толщина изоляции 0,3 мм
145	6,5	1,639	0,269	
160	6,7	1,618	0,272	
170	7,0	1,599	0,277	
200	7,3	1,645	0,288	
215	7,8	1,846	0,294	Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось.
230	> 5,2	-	> 0,200	

Из рисунка 14 видно, что полученные экспериментальные зависимости имеют схожий характер с расчетными в случае реального пожара в помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания и в

кабельном помещении 3-го канала СБ здания безопасности, что подтверждает достоверность расчетов, выполненных во 2-й и 3-й главах диссертации.

На рисунке 15 представлен внешний вид образца кабельной линии типа КМВЭВ 1x2x1,5 при воздействии реального режима пожара. Вспучивание огнезащитного покрытия не произошло при нагреве до 300°C, а КЗ зафиксировано при 210°C. Огнезащитное покрытие при начале нагрева было целостное, в процессе нагрева покрытие лопнуло из-за температурного расширения и последующего плавления изоляции кабеля.

По результатам проведенных экспериментальных и теоретических исследований предложена методика обоснования эффективности применения огнезащитных составов для кабелей с учетом реальных режимов пожара без учета активных систем противопожарной защиты.



Рисунок 15 – Внешний вид образца кабельной линии типа КМВЭВ 1x2x1,5 при воздействии реального режима пожара с огнезащитным покрытием «Огнеза-ВД-К» при температуре 300°C

Последовательность проведения методики приведена на рисунке 16.

Сначала проводится анализ объемно-планировочных решений помещений и пожарных зон АЭС с ВВЭР для выявления помещений и зон, в которых проходят два и более каналов СБ, а так же анализ пожарной нагрузки данных помещений.

Затем проводится расчет реального режима пожара с использованием верифицированных программных продуктов, созданных на основе полевой, зонной или интегральной модели свободного развития пожара в помещении.

Определяются теплофизические свойства выбранного огнезащитного состава: плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности сухого и вспученных слоев огнезащитного состава.

Определяем распределение температур внутри многослойной стенки (жила кабеля, изоляция кабеля и огнезащитное покрытие), решая уравнение нестационарной теплопроводности для цилиндрической многослойной стенки.

Экспериментальным путем, используя приведенный выше стенд (рисунок 12 в реферате и рисунок 3.8, п.3.3.2, главы 3 диссертации) определяем температуру вспучивания огнезащитного покрытия, моделируя реальный температурный режим пожара.

Сопоставляя полученную при реальном пожаре температуру вспучивания огнезащитного состава и динамику изменения температуры изоляции кабеля делаем вывод о возможном времени наступления КЗ кабеля либо искажении модулированного сигнала, если температура термодеструкции и плавления материала изоляции кабеля наступает до температуры вспучивания огнезащитного материала, полученной при реальном режиме пожара. Используя получен-

ные данные, делаем вывод об эффективности применения огнезащитного покрытия в каждом конкретном случае.



Рисунок 16 – Методика обоснования эффективности применения огнезащитных составов для кабелей с учетом реальных режимов пожара

В выводах к главе 3 приведены основные результаты. В частности, показано, что обоснование параметров вспучивающихся огнезащитных составов с использованием стандартных режимов пожара может привести к потере изоляционными материалами силовых кабелей каналов СБ АЭС эксплуатационных свойств при реальном пожаре. Также выявлены ограничения в использовании огнезащитных вспучивающихся покрытий для защиты электрических проводов и кабелей. Поэтому, необходимо научное обоснование эффективности применения огнезащитных составов с учетом температурных режимов при реальных пожарах.

В четвертой главе «Токсичность не распространяющих горение силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального режима пожара» выполнены исследования токсичности силовых и сигнальных кабелей НГ, используемых на АЭС, в условиях реального режима пожара.

Проведена экспериментальная оценка токсичности газовой среды помещения при терморазложении силовых и сигнальных кабелей НГ в маломасштабной экспериментальной установке в условиях воздействия характерного для пожара в помещении теплового потока на изоляцию вышеуказанных кабелей, изготовленную из полимеров с огнезащитными добавками.

Наряду с сильнейшим токсикантом - монооксидом углерода, чаще всего приводящим к гибели и отравлению людей, при терморазложении негорючих полимеров выделяется чрезвычайно токсичное соединение - циановодород. Однако нет данных по удельному коэффициенту образованию циановодорода для электрических кабелей с изоляцией, изготовленной из полимеров с огнезащитными добавками (за исключением работы Пузач С. В., Акперов Р. Г., Лебедченко О. С., Болдрушкиев О. Б., 2022).

Обнаружено, что вышеуказанные кабели в условиях реального пожара могут выделять токсичные соединения (монооксид углерода и циановодород) в концентрациях, превышающих их предельно допустимые величины в условиях эвакуации людей из помещений АЭС. Получены экспериментальные зависимости парциальных плотностей циановодорода и монооксида углерода, а также удельных коэффициентов выделения этих газов от времени экспериментов в случае терморазложения современного сигнального негорючего кабеля марки «НГ LS FR HF E1180» и силового кабеля с медной жилой, изоляцией из ПВХ, оболочкой из ПВХ пониженной горючести «ВВГнг (А)-FRLS 2х1,5».

Согласно пункту 14.2 «Методических рекомендаций по проверке создания и обеспечения функционирования системы управления охраной труда», утвержденным приказом Федеральной службой по труду и занятости от 21 марта 2019 года №77, «должны учитываться не только штатные условия деятельности, но и случаи отклонений в работе, в том числе связанных с возможными авариями». Нормативно-правовых актов, содержащих государственные нормативные требования, предъявляемые к выявлению опасностей, оценке уровня и управлению рисками, на данный момент не утверждено. Вместе с тем, обязанность по управлению профессиональными рисками предусмотрена статьями 209, 212 ТК РФ.

Нормативный документ «ГОСТ 12.0.230-2007 Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Общие требования» в пункте 4.10.2.2 предполагает, что «перед любым изменением или применением новых приемов труда, материалов, процессов или оборудования должны быть выполнены определения опасностей и оценка рисков на рабочих местах». Следовательно, использование новых негорючих полимерных материалов в качестве изоляции кабелей необходимо оценить с точки зрения влияния на здоровье человека во время пожара.

Уровень токсичности газовой среды в помещении во время пожара является определяющим фактором для сохранения жизни и здоровья персонала.

В настоящее время широкое применение получили негорючие материалы, изготовленные из полимеров с огнезащитными добавками. Однако тепловое воздействие пожара на данные материалы с точки зрения выделения токсичных газов недостаточно изучено.

Удельные коэффициенты образования CO (L_{CO}) и HCN (L_{HCN}) были определены на экспериментальной установке (Пузач С.В., Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г. Патент Российской Федерации на полезную модель № 174688, 2017).

При проведении экспериментов непрерывно измеряются масса образца, плотность теплового потока, падающего на поверхность образца, температура в объеме экспозиционной камеры и концентрации CO, HCN и O₂.

Удельные коэффициенты образования CO (L_{CO}) и HCN (L_{HCN}), а также поглощения кислорода (L_{O_2}) рассчитываются по следующим выражениям:

$$L_{HCN} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{HCN}}{d\tau}, \quad (5)$$

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

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

где V – объем экспозиционной камеры, м³; Ψ – массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с; ρ_{HCN} , ρ_{CO} , ρ_{O_2} – среднеобъемные парциальные плот-

ности HCN, CO и O₂ в экспозиционной камере соответственно, кг/м³; τ – время от начала экспериментов, с.

В качестве объекта исследования принимаем сигнальный кабель марки нГ LS FR HF E1180, рекомендованный для прокладки в производственных помещениях, а также в зданиях, где при пожаре может оказаться много людей.

Перед проведением экспериментов кабель разрезается на части длиной 0,1 м и размещается на подложке размерами 0,1x0,1 м (рисунок 17).

В эксперименте №1 плотность теплового потока, падающего от нагревателя на поверхность образца, равнялась 35 кВт/м² в течение всего времени испытаний. Во время проведения эксперимента №2 плотность теплового потока изменялась ступенчато по времени до максимального значения при пожаре в помещении 45 кВт/м², выбранного из анализа литературных источников.



Рисунок 17 – Фотографии образцов до и после проведения экспериментов

Зависимости потери массы (m , кг) образцов от времени проведения экспериментов приведены на рисунке 18. На рисунке 19 представлены зависимости удельной массовой скорости выгорания образца ($\psi_{уд}$, кг/(с·м²)) от времени.

Зависимости парциальных плотностей CO и HCN в экспозиционной камере от времени испытаний показаны на рисунке 20. Из рисунка 20 видно, что парциальная плотность CO в обоих экспериментах превышает ее критическое значение. Парциальная плотность HCN не достигает ее критической величины. Однако, в зависимости от площади облучаемой тепловым потоком поверхности кабелей ρ_{HCN} может также превысить $\rho_{HCNкр}$.

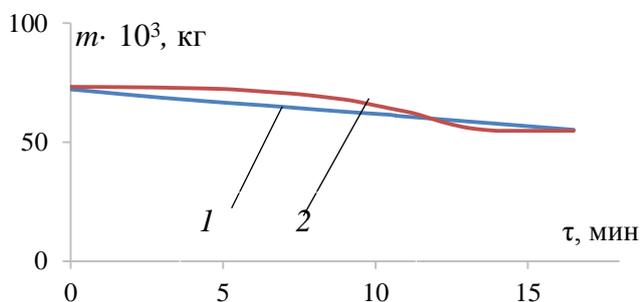


Рисунок 18 – Зависимости потери массы образцов и плотности лучистого теплового потока, падающего на поверхность образца, от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов

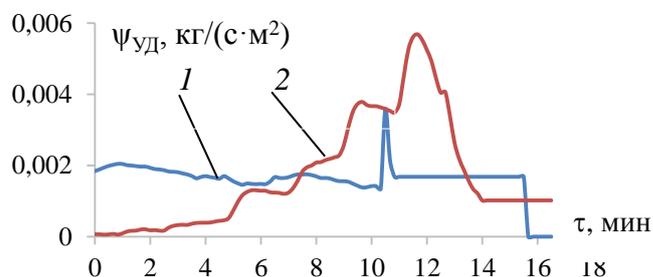


Рисунок 19 – Зависимость удельной массовой скорости выгорания образца от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов

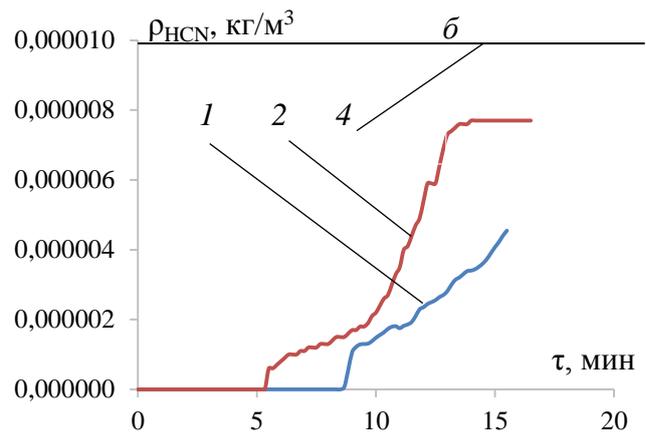
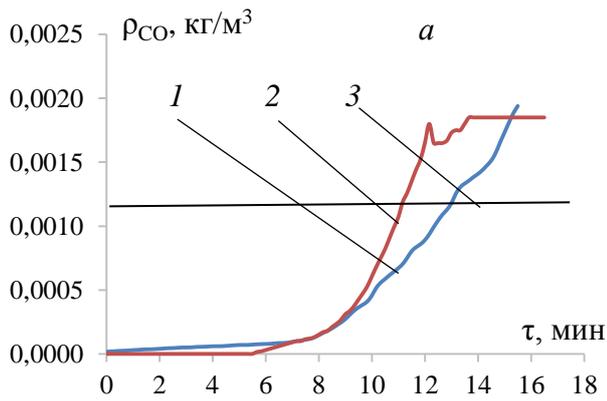


Рисунок 20 – Зависимости парциальной плотности монооксида углерода (а) и циановодорода (б) в экспозиционной камере от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов; 3, 4 – критические значения парциальной плотности CO и HCN соответственно.

На рисунке 21 представлены зависимости удельных массовых коэффициентов образования CO и HCN от времени проведения экспериментов.

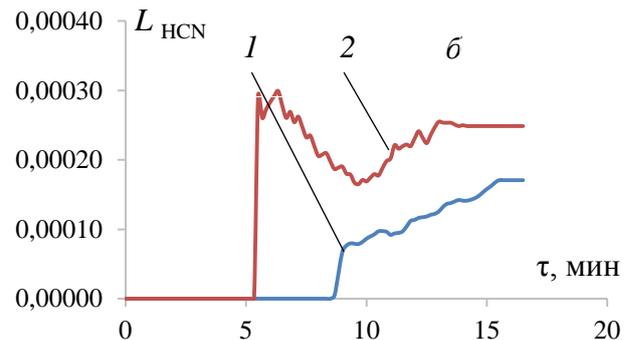
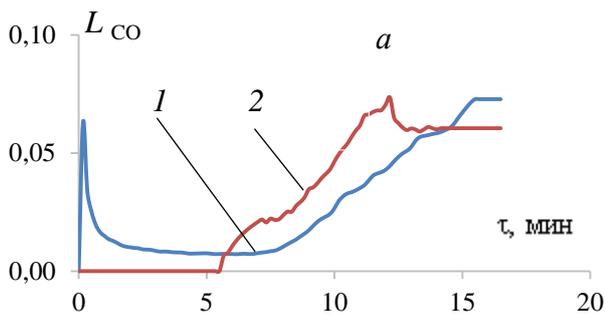


Рисунок 21– Зависимости удельных массовых коэффициентов образования монооксида углерода (а) и циановодорода (б) от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов

Для проведения эксперимента был выбран силовой кабель марки «ВВГнг(А)-FRLS 2х1,5» с медной жилой, изоляцией из ПВХ, оболочкой из ПВХ пониженной горючести.

На рисунке 22 приведены зависимости парциальной плотности монооксида углерода и циановодорода в экспозиционной камере от времени проведения экспериментов. Из рисунка 22 видно, что парциальная плотность CO в обоих экспериментах превышает ее критическое значение. Парциальная плотность HCN в обоих случаях также достигает ее критической величины.

На рисунке 23 представлены зависимости удельных массовых коэффициентов образования CO и HCN от времени проведения экспериментов.

Полученные в экспериментах величины удельных массовых коэффициентов образования CO и HCN, а также удельного массового коэффициента поглощения O₂ для силовых и сигнальных НГ кабелей могут использоваться в математических моделях для расчета динамики ОФП при определении времени блокирования путей эвакуации (пример расчета приведен в главе 2 в п.2.4).

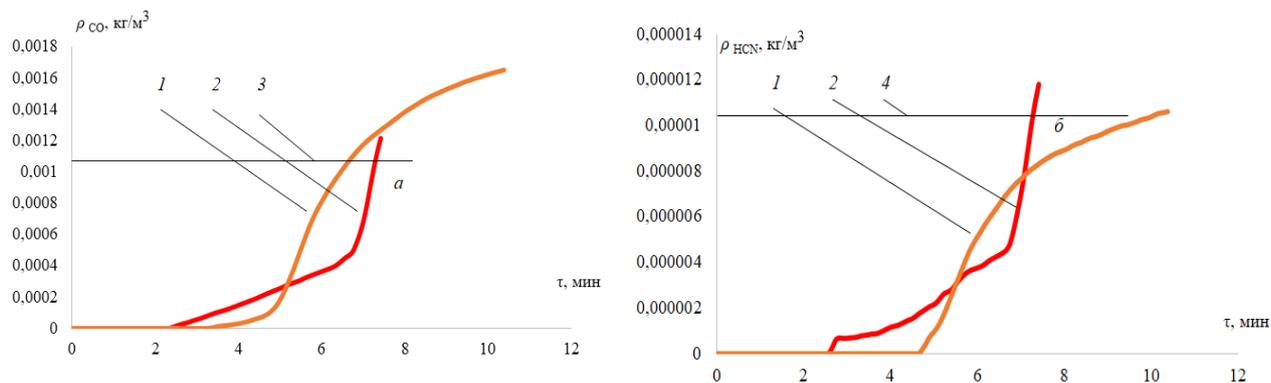


Рисунок 22 – Зависимости парциальной плотности монооксида углерода (а) и циановодорода (б) в экспозиционной камере от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов; 3 – критическое значение парциальной плотности CO; 4 – критическое значение парциальной плотности HCN

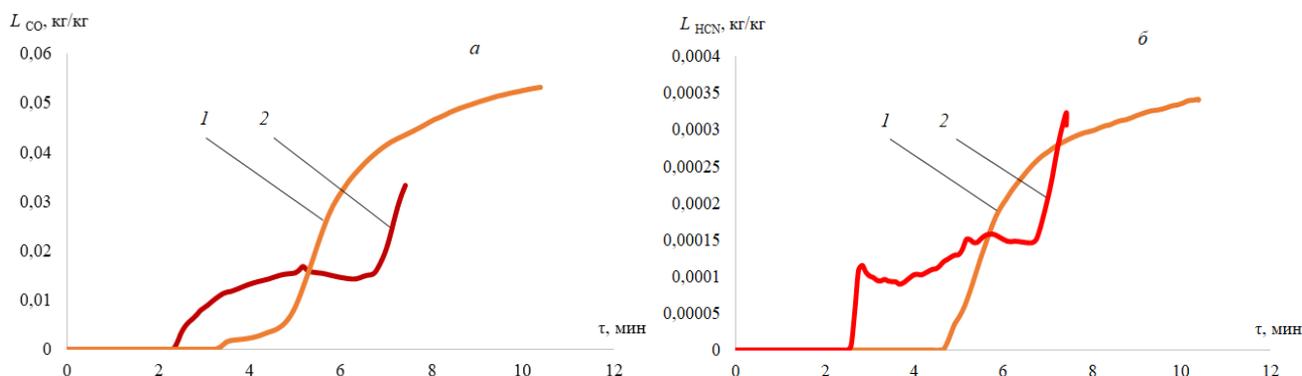


Рисунок 23 – Зависимости удельных массовых коэффициентов образования монооксида углерода (а) и циановодорода (б) от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов

Проведенные эксперименты показали, что вышеуказанные кабели в условиях реального пожара могут выделять высокотоксичные соединения (CO и HCN) в концентрациях, превышающих предельно допустимые величины, и оказывать отрицательное воздействие на здоровье людей и их возможность самостоятельно эвакуироваться. Это так же позволяет расширить существующую базу данных типовой пожарной нагрузки и проводить расчет времени блокирования путей эвакуации при совместном воздействии вышеуказанных газов.

В выводах по главе 4 приведены основные результаты. В частности, отмечено, что изоляция современных сигнальных и силовых кабелей НГ, используемых на АЭС, содержит антипирены, что приводит не только к положительному эффекту уменьшения удельной скорости выгорания, но повышает токсичность продуктов горения этих кабелей. Поэтому необходимо учитывать время блокирования путей эвакуации циановодородом.

В пятой главе «Обеспечение водородной безопасности при натекании водорода в реакторное здание АЭС с водо-водяными реакторами» на основе анализа водородной безопасности АЭС, выполненного в п. 1.5 диссертации, показано, что для решения всех задач безопасности, связанной с водородом, нуж-

но уметь рассчитать концентрационные поля водородно-воздушной смеси при различных аварийных ситуациях.

В общем случае эта задача является существенно нестационарной и трехмерной и требует численного решения исходной системы уравнений.

Применение трехмерной модели расчета натекания водорода в помещение наталкивается на ряд сложных проблем тепломассообмена, таких как, например, выбор модели турбулентности. Поэтому была проведена валидация трехмерной модели на известных экспериментальных данных.

Приведены возможные аналитические решения для расчета распределения концентраций водорода в случае ряда модельных задач натекания водорода, что позволило определить коэффициент участия водорода в горении и взрыве и использовать полученные решения для тестирования трехмерной модели.

Случаи утечки водорода в помещения АЭС можно представить в трех видах модельных задач (таблица 5).

Таблица 5 – Модельные задачи натекания водорода

Вариант натекания водорода	Модельная задача
Диффузия с поверхности или через стальную стенку аппарата	Стационарная одномерная концентрационная установившаяся диффузия водорода в водородно-воздушной смеси в случае отсутствия конвекции
Утечка через отверстие	Распространение водорода в области конвективной колонки, образующейся над источником его натекания в помещение
Совместное явление диффузии и работы вентиляционной системы	Распространение водорода в воздухе при ламинарной или турбулентной конвекции на горизонтальной поверхности, через которую натекает водород, при ее обдуве потоком воздуха

Концентрационная диффузии водорода рассматривалась в протяженном канале постоянного поперечного сечения длиной L , заполненный водородно-воздушной смесью. На одной границе канала при $x=0$ (вход, отверстие емкости, заполненной водородом) задана массовая концентрация водорода $X_h=X_1=1$, на второй границе при $x=L$ (выход, атмосфера) – $X_h=X_2$.

Распределение массовых концентраций водорода по длине канала показано на рисунке 24. Получено, что максимальные значения коэффициентов участия массы водорода, находящейся внутри канала, в горении и взрыве составляют: $Z_r=0,2743$; $Z_v=0,1279$.

Это означает, что при отсутствии конвекции для установившейся молекулярной диффузии 27,43% всей массы водорода образуют горючую водородно-воздушную смесь и 12,79% - взрывоопасную смесь. Таким образом, аналитическое решение модельной задачи одномерной стационарной концентрационной диффузии водорода из емкости через канал постоянного поперечного сечения в атмосферу показывает, что величина коэффициента участия водорода во взрыве в 7,8 раза меньше соответствующего значения в СП 12 131 30.2009.

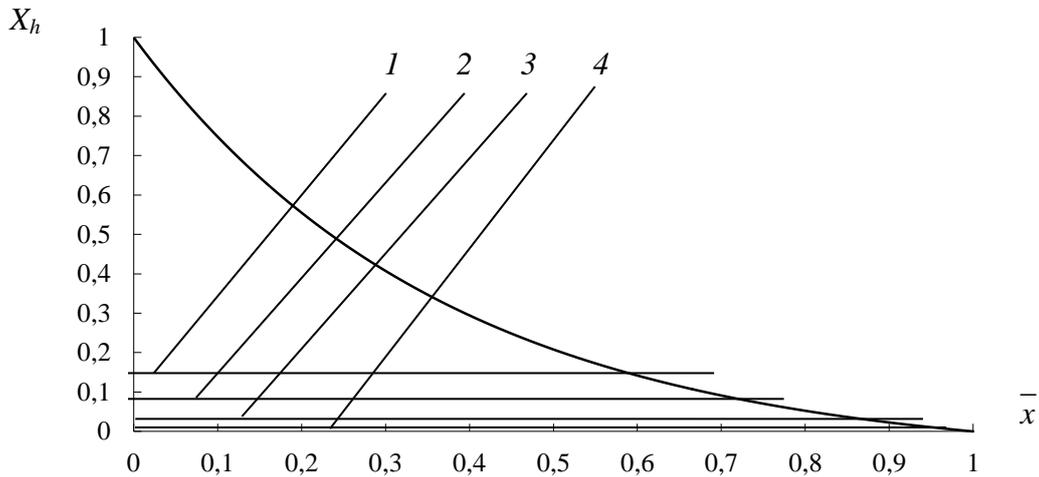


Рисунок 24 – Распределение массовой концентрации водорода по длине канала:
 1 – $X_h = X_{r2}$; 2 – $X_h = X_{d2}$; 3 – $X_h = X_{d1}$; 4 – $X_h = X_{r1}$, где $\bar{x} = x/L$ – безразмерная координата

При решении модельной задачи распространения водорода в воздухе при ламинарной или турбулентной конвекции на горизонтальной поверхности, через которую натекает водород, при ее обдуве потоком воздуха полученные зависимости концентрации водорода по толщине диффузионного пограничного слоя представлены на рисунке 25.

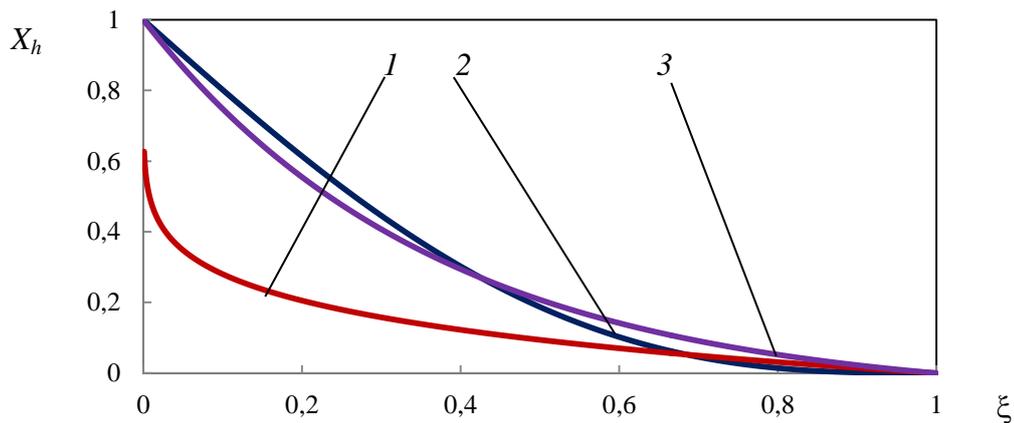


Рисунок 25 – Профиль массовых концентраций водорода по толщине пограничного слоя:
 1 – турбулентный режим; 2 – ламинарный режим; 3 – стационарная диффузия;
 где y – координата по толщине пограничного слоя; δ – толщина пограничного слоя;
 $\xi = y/\delta$ – безразмерная координата вдоль оси y

Получено, что доли суммарного количества массового расхода водорода, проходящего через поперечное сечение пограничного слоя и образующего горючие и взрывоопасные водородно-воздушные смеси, равны: ламинарный пограничный слой: $Z_r = 0,37$; $Z_b = 0,18$; турбулентный пограничный слой: $Z_r = 0,63$; $Z_b = 0,31$.

Таким образом, при конвекции коэффициенты участия водорода в горении и взрыве существенно выше, чем только при диффузии. Наличие конвекции, в том числе, вызванной вентиляцией, может приводить к более масштабным последствиям в случае горения и взрыва водородно-воздушной смеси.

Модельная задача распространения водорода в области конвективной колонки, образующейся над источником его натекания в помещении, решалась с заданием угла полуоткрытия колонки, в отличие от работы (Шевяков, Н. И. Савельева Г.Г., 2003), где в уравнении изменения расхода водородно-воздушной смеси по высоте конвективной колонки расход воздуха, вовлекаемого в колонку, определяется с использованием эмпирического коэффициента подмешивания.

Дифференциальное уравнение распределения концентраций водорода по высоте колонки имеет вид:

$$\frac{dX_h}{dz} = \left[\frac{B}{X_h(\mu_a - \mu_h) + \mu_h} - \rho_a \right] \frac{g(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)^4}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]} - \frac{2 \operatorname{tg} \gamma [(\mu_a - \mu_h) X_h - \mu_h]}{(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]} + \frac{2 p_0 (d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)^3 \operatorname{tg} \gamma \cdot X_h^2}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]}, \quad (8)$$

где $A = \frac{G_h^2}{\pi^2 B}$ – размерный параметр, $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль} / \text{с}^2$; $B = \frac{p_0 \mu_h \mu_a}{R_\mu T}$ – размерный параметр, $\text{кг}^2 / (\text{м}^3 \cdot \text{кмоль})$; μ_a, μ_h – молекулярные массы воздуха и водорода, соответственно, $\text{кг} / \text{кмоль}$; T – температура воздуха, К ; p_0 – давление воздуха на высоте $z=0$, Па ; R_μ – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж} / (\text{К} \cdot \text{кмоль})$.

Дифференциальное уравнение (8) решено численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности (Корн Г, Корн Т., 1968).

Для определения заранее неизвестного угла полуоткрытия конвективной колонки, входящего в дифференциальное уравнение (9), проведены тестовые расчеты. Угол γ подбирался таким образом, чтобы при решении уравнения (8) начало пожароопасного участка конвективной колонки соответствовало экспериментальным данным (Шевяков, Н. И. Савельева Г.Г., 2003).

Оценка распространения водорода в конвективной колонке, образующейся над источником его натекания в помещении показала, что при ламинарном ($\text{Re} < 2300$) и переходном ($2300 < \text{Re} < 10^4$) режимах истечения струи водорода из отверстия безразмерные координаты по высоте пожароопасных и взрывоопасных участков конвективной колонки существенно зависят от числа Рейнольдса, а при турбулентном режиме истечения ($\text{Re} > 10^4$) происходит стабилизация расположения и размеров пожароопасных и взрывоопасных участков. В случае турбулентного режима истечения безразмерная длина пожароопасной зоны находится в пределах $\xi_r = h_r/d = 141 \div 167$, а безразмерная длина взрывоопасной зоны - $\xi_b = h_b/d = 25,1 \div 28,7$.

Таким образом, в СП 12 131 30.2009 величина коэффициента участия водорода в горении и взрыве существенно завышена, что видно из решения вышеприведенных модельных задач.

Результаты численного исследования образования пожаровзрывоопасных зон при натекании газообразного водорода в условно герметичное помещение в трехмерной нестационарной постановке задачи показали, что в течение длительного времени (примерно 10 мин) существует «квазистационарная» пожароопасная зона внутри конвективной колонки, слабо меняющая свою высоту. Взрывоопасная зона расположена внутри пожароопасной зоны и также практи-

чески не меняет свою высоту. Анализ результатов численных экспериментов показал, что вышеуказанная зона является «квазистационарной» только при небольших расходах натекающего водорода $G_h < 0,0046$ кг/с. При этом весь остальной объем помещения не представляет пожаро- и взрывоопасности.

Поля массовых концентраций водорода в вертикальной плоскости, проходящей через центр пола, в различные промежутки времени от начала натекания водорода через отверстие диаметром $d=0,06$ м при массовом расходе водорода $G_h=0,000665$ кг/с представлены на рисунке 26. Координаты x и z на рисунке 26 направлены соответственно вдоль длины и высоты помещения. Черными линиями обозначены линии равной массовой концентрации $X_h=0,0029$ (нижний массовый концентрационный предел горения. Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Ковальчук Г. Н. и др., 1990).

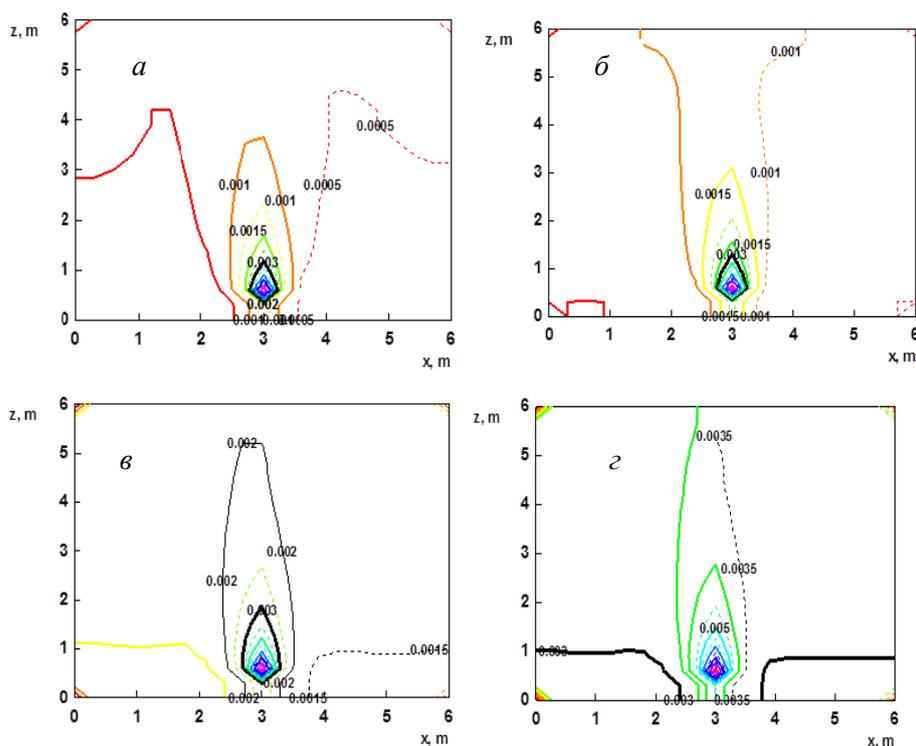


Рисунок 26 – Поля массовых концентраций водорода в вертикальной плоскости, проходящей через центр пола, через 120 (а), 300 (б), 600 (в) и 1140 с (г) от начала натекания водорода через отверстие с $d=0,06$ м при $G_h = 0,000665$ кг/с

Зависимости высоты пожароопасной зоны (массовая концентрация водорода равна нижнему концентрационному пределу его горения в воздухе), образующейся внутри конвективной колонки, от времени с начала натекания водорода при $d=0,06$ м и $G_h = 0,000665$ кг/с приведены на рисунке 27.

При небольших величинах массового расхода водорода существует длительный промежуток времени, в течение которого пожаро- и взрывоопасные зоны водородно-воздушной смеси ограничены областью конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода. При этом эти зоны являются «квазистационарными», для расчета высот которых так же можно использовать одномерный подход к расчету концентраций водорода по высоте стационарной конвективной колонки.

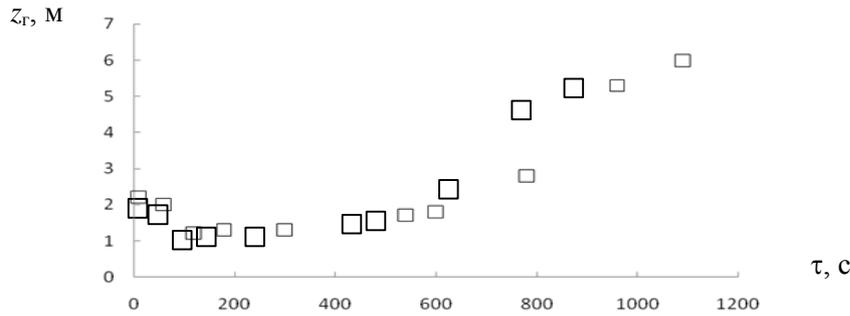


Рисунок 27 – Зависимости высоты пожароопасной зоны, образующейся внутри конвективной колонки, от времени с начала натекания водорода через отверстие с $d=0,06$ м при $G_h=0,000665$ кг/с; z_g – координата по оси z от до поперечного сечения колонки, где $X_h=0,0029$

Теоретическое исследование образования локальных пожаровзрывоопасных зон водородно-воздушной смеси, образующейся при натекании водорода в гермзоне реакторного здания, проводилось для обоснования выбора параметров концентрационных датчиков системы контроля концентрации водорода.

Распределения концентрации водорода в помещении, полученные с помощью обобщенного трехмерного нестационарного дифференциального уравнения законов сохранения массы, импульса и энергии, протестированы на экспериментальных данных (Шевяков, Н. И. Савельева Г.Г., 2003). Получено удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом. Однако, из-за больших размеров гермзоны и, соответственно, больших размеров конечно-разностной сетки расчет требует значительных затрат машинного времени (порядка 180 часов). Поэтому предложена более простая зонная модель, в которой помещение подобно зонной модели расчета динамики пожара (Пузач С.В., 2005) разбивается на 3 зоны: зона конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода, зона припотолочного слоя, содержащая водородно-воздушную смесь, и зона чистого воздуха.

Для расчета распределения массовой концентрации водорода по высоте конвективной колонки используется уравнение (8).

Для расчета параметров в зоне припотолочного слоя аналогично зонной модели динамики пожара решается уравнение закона сохранения массы:

$$\frac{d(\rho_c V)}{d\tau} = G_k, \quad (9)$$

где ρ_c – средняя плотность водородно-воздушной смеси в припотолочном слое, кг/м³; V – объем зоны припотолочного слоя, м³; G_k – расход газовой смеси в поперечном сечении конвективной колонки на высоте нижней границы припотолочного слоя z_k , кг/с.

Массовый расход (G , кг/с) водородно-воздушной смеси, проходящий через поперечное сечение конвективной колонки на высоте z , равен:

$$G = G_h + G_a, \quad (10)$$

или

$$G = G_h / X_h, \quad (11)$$

где G_a – массовый расход воздуха, подмешивающегося в конвективную колонку до высоты z , кг/с, а X_h находится из уравнения (8).

Объем зоны припотолочного слоя равен:

$$V = \int_{z_k}^H F dz, \quad (12)$$

где H – высота, отсчитываемая от уровня выходного сечения отверстия, через которое водород поступает в помещение, до максимально высокой точки купола гермзоны, м; F – переменная площадь поперечного сечения гермзоны, m^2 .

Интегро-дифференциальное уравнение для определения скорости опускания нижней границы припотолочного слоя после преобразования уравнения (9) с учетом уравнений (10), (11) и (12) имеет вид:

$$\frac{d}{d\tau} \left(\rho \int_{z_k}^H F dz \right) = G_k. \quad (13)$$

Высота нижней границы припотолочного слоя в различные моменты времени определяется из численного решения уравнения (13) методом итераций с помощью разработанной компьютерной программы на языке программирования Fortran.

Компьютерные программы для реализации полевой модели и расчета распределения массовой концентрации водорода по высоте конвективной колонки (уравнение (8)) верифицированы на экспериментальных данных (Шевяков, Н. И. Савельева Г.Г., 2003).

Модельная задача решена для наиболее опасного с точки зрения выделения водорода в реакторном здании натекания водорода в подкупольное пространство гермзоны реакторного здания АЭС на отметке +26,300 м из-под крышки реактора в соответствии с данными (Рабенков Е.С., 2014). Внешний вид подкупольного пространства и место натекания водорода представлены на рисунке 28.

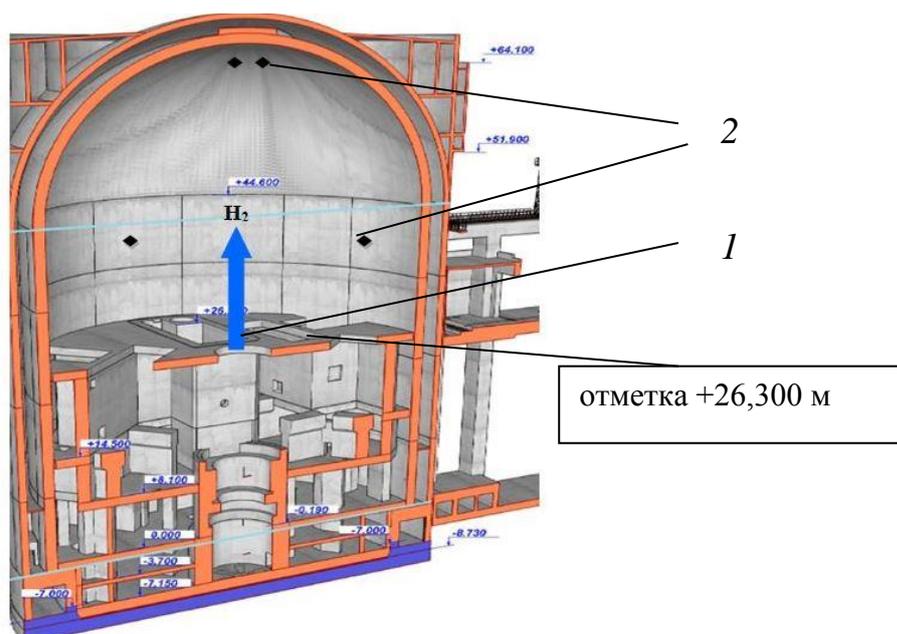


Рисунок 28 – Подкупольное пространство гермзоны АЭС с ВВЭР: 1– место возможного поступления водорода в гермзону; 2– датчики системы контроля концентрации водорода

Расчеты по полевой модели и предложенной зонной модели проводились для эквивалентного диаметра отверстия натекания водорода $d=1$ м и расхода водорода $G_h=0,00116$ кг/с в соответствии с опытными значениями (Козлов Д. И., 2007).

На рисунке 29 представлены схемы течения и поля массовых концентраций водорода в продольном сечении, проходящем через место истечения водорода в подкупольном пространстве. Координаты x, y, z направлены вдоль длины, ширины и высоты подкупольного пространства выше отметки $+26,300$ м.

Из рисунка 29 видно, что на начальной стадии натекания водорода под куполом гермзоны образуется припотолочный слой (водородно-воздушная смесь) с достаточно четко выделенной нижней границей. Поэтому предложенное допущение в разработанной зонной модели об образовании зоны припотолочного слоя адекватно физической картине натекания водорода в помещение большого объема. При этом параметры в конвективной колонке практически не меняются по времени процесса.

Расчет распределения объемных концентраций водорода (X_{ho}) по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия показан на рисунке 30, из которого видно, что расчет объемных концентраций водорода с использованием предложенной зонной модели и полевой модели показал удовлетворительную сходимость при высоте, большей 4 м.

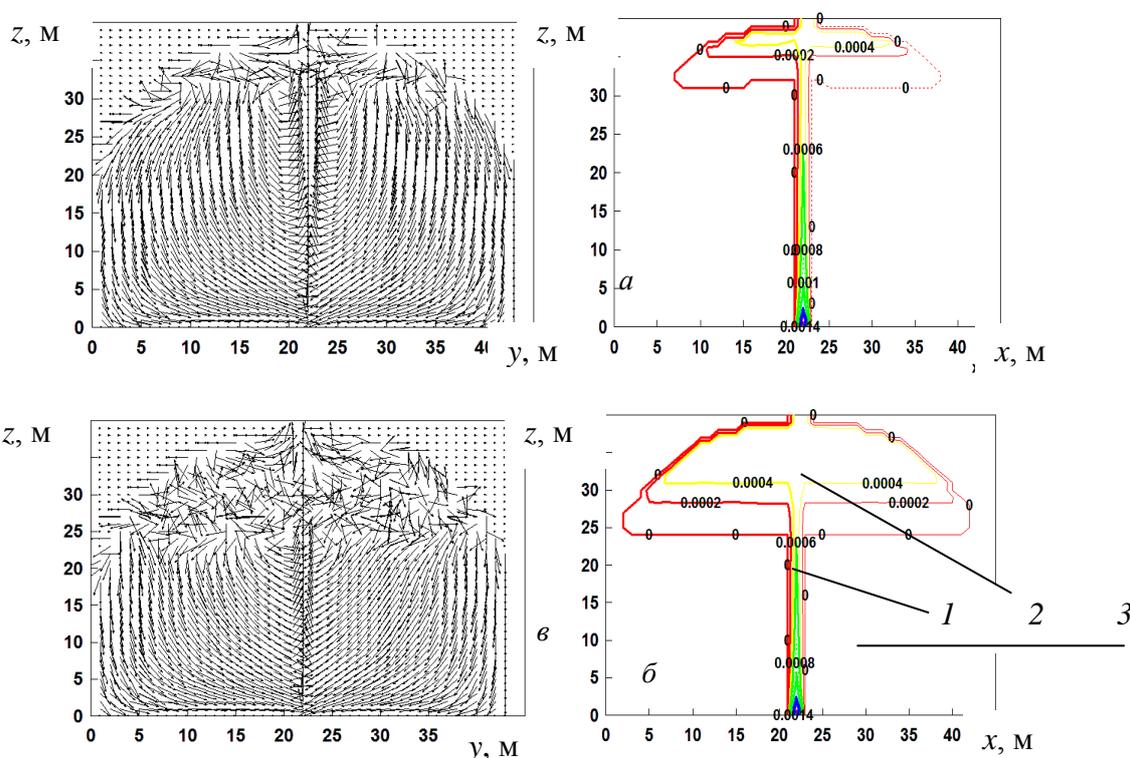


Рисунок 29 – Схемы течения и поля массовой концентрации водорода в вертикальном сечении, проходящем через место натекания водорода: *a* – через 10 мин от начала истечения водорода; *б* – через 1 час; *1* – зона конвективной колонки; *2* – зона припотолочного слоя; *3* – зона чистого воздуха

Динамика опускания нижней границы припотолочного слоя над конвективной колонкой, образовавшейся при натекании водорода в подкупольное пространство, показана на рисунке 31.

Из рисунка 31 видно, что расчет высоты нижней границы припотолочного слоя с использованием предложенной зонной модели и полевой модели показал удовлетворительную сходимость. Отличие вышеуказанной высоты, обусловлено тем, что в зонной модели пренебрегаем работой расширения, совершаемой водородно-воздушной смесью в конвективной колонке.

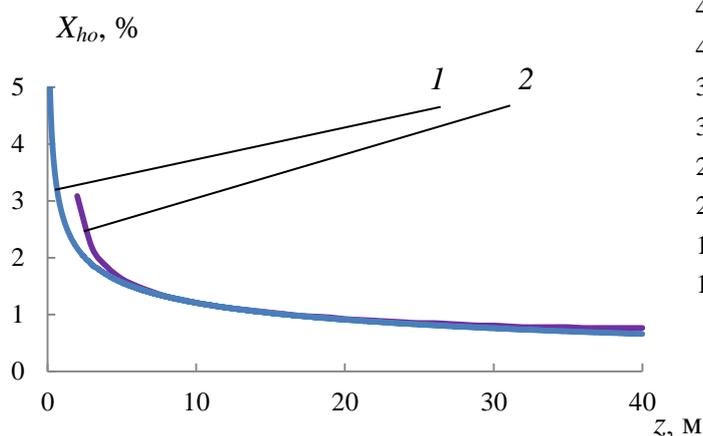


Рисунок 30 – Распределения объемных концентраций водорода по высоте конвективной колонки при $d=1,0$ м и $G_h=0,00116$ кг/с: расчет: 1 – зонная модель; 2 – полевая модель

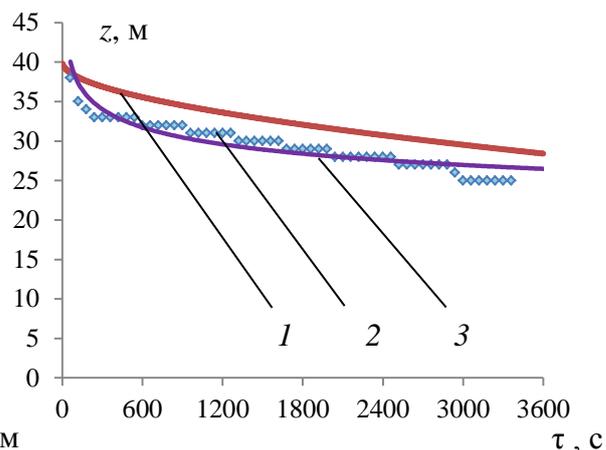


Рисунок 31– Зависимость высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство при $d=1,0$ м и $G_h=0,00116$ кг/с: 1 – расчет по зонной модели; 2 – расчет по полевой модели; 3 – линия тренда значений, полученных по полевой модели

Число Рейнольдса определялось как

$$\text{Re} = \frac{\rho_h w d}{\mu}, \quad (14)$$

где ρ_h – плотность водорода в отверстии истечения водорода, кг/м^3 ; w – средняя скорость течения в отверстии истечения водорода, м/с; μ – коэффициент динамической вязкости водорода, $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$.

Произведение средней скорости на плотность водорода в уравнении (14) находится из величины расхода натекания водорода. С учетом этого числа Рейнольдса равны: при $d=1$ м: $\text{Re}=167,9$ (ламинарный режим течения); при $d=0,1$ м: $\text{Re}=1679$ (ламинарный режим течения); при $d=0,01$ м: $\text{Re}=16790$ (турбулентный режим течения).

Расчет распределения концентраций водорода по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия представлен на рисунке 32, из которого видно, что наиболее опасным случаем является натекание водорода через отверстие с $d=0,1$ м. В этом случае пожаро- и взрывоопасная водородно-воздушная смесь занимает почти весь объем конвективной колонки.

На рисунке 33 приведены зависимости высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное про-

странство. На рисунке 34 представлена зависимость объемной концентрации водорода X_{hc} в верхней точке купола (место расположения концентрационных датчиков водорода) от числа Рейнольдса.

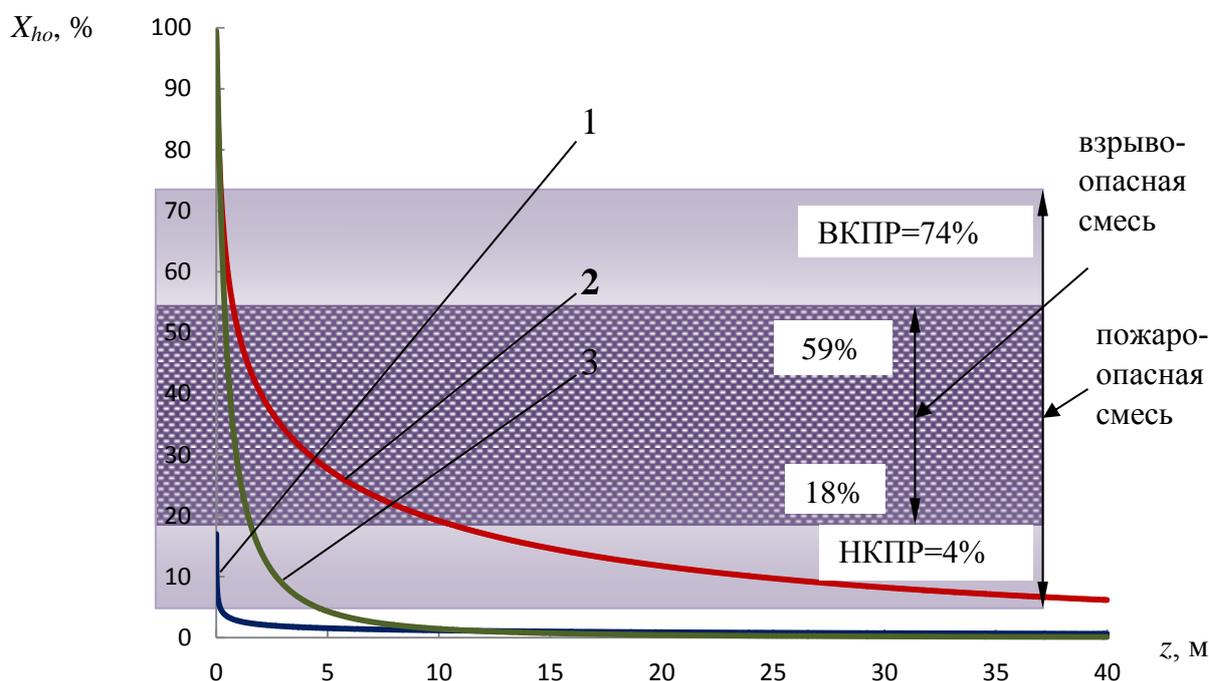


Рисунок 32 – Распределения объемных концентраций водорода по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия: 1 – $d=1$ м; 2 – 0,1 м; 3 – 0,01 м; НКПР, ВКПР – нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени; 18%–59% – концентрационные пределы детонации водорода в воздухе

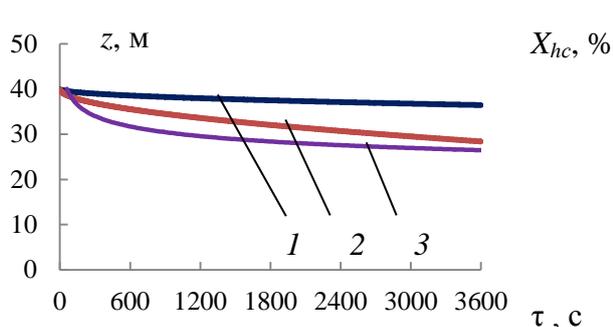


Рисунок 33 – Зависимости высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство для различных диаметров отверстия: расчет по зонной модели:
1 – $d=1$ м; 2 – 0,1 м; 3 – 0,01 м

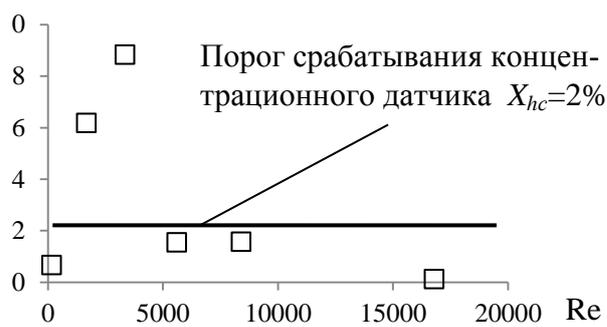


Рисунок 34 – Зависимость объемной концентрации водорода в верхней точке купола (место расположения концентрационных датчиков водорода) от числа Рейнольдса

Из рисунка 34 видно, что концентрационные датчики водорода могут диагностировать аварийный режим натекания водорода в подкупольное пространство только в узкой области чисел Рейнольдса $Re=900\div 5000$.

Кроме того, существует режим натекания ($Re=3358$), при котором образуется максимальная объемная концентрация водорода в месте расположения концентрационных датчиков при максимальных размерах пожаро- и взрывоопасных зон в водородно-воздушной смеси (рисунок 34).

Проведенные численные эксперименты показали, что используемые датчики концентрации водорода в подкупольном пространстве реакторного здания АЭС с ВВЭР могут не обнаружить водород в верхней точке купола при пороге чувствительности в 2% об. При этом по высоте конвективной колонки образуются пожаро- и взрывоопасные водородно-воздушные смеси, а не только в припотолочной области, как принято в существующих нормах.

В выводах по пятой главе приведены основные результаты. В частности, полученные аналитические решения модельных задач натекания водорода показали, что в СП 12 131 30.2009 величина коэффициента участия водорода в горении и взрыве сильно завышена.

Заключение

На основании выполненных экспериментальных и теоретических исследований разработан комплекс методов и методик расчета тепломассообмена, позволяющих обосновать параметры систем ППЗ АЭС с ВВЭР для выполнения безопасного останова и расхолаживания реакторной установки при реальном режиме пожара.

Основные научные выводы и практические результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ существующих систем ППЗ пожарных зон зданий АЭС с ВВЭР, который показал, что при математическом моделировании параметров систем пассивной противопожарной защиты необходимо учитывать особенности объемно-планировочных решений и пожарной нагрузки каждой АЭС.

2. Разработанные методики математического моделирования параметров систем пассивной противопожарной защиты по проекту «АЭС-2006» для ВВЭР-1200 позволяют обосновать безопасный останов и расхолаживание реакторной установки в условиях реального температурного режима пожара с учетом характерной горючей нагрузки (НГ кабели), объемно-планировочных решений основных зданий АЭС, материала ограждающих конструкций, обработки огнезащитным составом, а также новых данных по токсичности кабелей НГ.

Полученные расчетные температурные режимы реального пожара показали, что во всех рассматриваемых помещениях при реальном пожаре время достижения температуры короткого замыкания кабелей НГ находится в диапазоне от 14 до 64 мин от начала возгорания внутри пожарной зоны или пожарного отсека.

3. Разработанные методы и методики математического моделирования работоспособности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального и стандартного температурных режимов пожара, в том числе с использованием вспучивающих огнезащитных составов:

– позволили оценить влияние температуры в помещении АЭС при пожаре на способность сигнального кабеля СБ АЭС передавать неискаженный электрический сигнал;

– скорректировали приведенную в ПУЭ зону зависимости температуры в помещении от токовой нагрузки в сигнальных кабелях СБ безопасности АЭС;

– показали, что теоретическое обоснование параметров вспучивающихся огнезащитных составов с использованием стандартных режимов пожара может привести к потере изоляционными материалами силовых кабелей каналов СБ АЭС эксплуатационных свойств при реальном температурном режиме пожара;

– показали, что одновременное воздействие пожара и токовой нагрузки на провода и кабели может привести к искажению передаваемого сигнала (сигнальные кабели) и к короткому замыканию в диапазоне температур, в котором не происходит вспучивание огнезащитных вспучивающихся покрытий.

4. Разработан экспериментальный метод и методика проведения эксперимента по исследованию работоспособности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС. Создана экспериментальная установка, которая позволяет моделировать тепловое воздействие реального температурного режима пожара для обоснования эффективности применения огнезащитных вспучивающихся составов.

5. Проведенные экспериментальные исследования токсичности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального температурного режима пожара показали, что при горении НГ кабелей в помещениях АЭС кроме выделения оксида углерода образуется высокотоксичное соединение - циановодород. Поэтому необходимо при определении условия безопасной эвакуации из помещений АЭС и выборе средств индивидуальной защиты для персонала, приводящего реакторную установку в безопасное состояние, учитывать время блокирования путей эвакуации циановодородом.

6. Разработана методика расчета, позволяющая рассчитать параметры взрывопожароопасной водородно-воздушной смеси при натекании водорода в помещения АЭС, что позволило:

– выявить, что существует критическое значение числа Рейнольдса газобразного водорода, натекающего в нижнюю часть помещения, в зависимости от размеров помещения, диаметра отверстия натекания и расхода водорода, при котором резко увеличивается опасность возникновения горения и взрыва во всем объеме помещения;

– показать, что используемые датчики концентрации водорода в подкупольном пространстве реакторного здания АЭС с ВВЭР могут не обнаружить водород в верхней точке купола при пороге чувствительности в 2 % об.

7. Разработаны практические рекомендации по повышению уровня систем ППЗ АЭС с ВВЭР:

– использование огнезащитных вспучивающихся покрытий для защиты проводов и кабелей требует научного обоснования эффективности их применения с учетом реальных температурных режимов пожара;

– элементы стальной конструкции покрытия в помещении по обращению с ОНУА пожарной зоны необходимо обработать покрытием огнезащитным силиконовым «Силотерм ЭП-6»;

– нарушение работоспособности кабелей (КЗ) в помещении пожара может происходить начиная с 5 минуты для кабелей РГ и начиная с 14 минуты для кабелей НГ с начала пожара в кабельном этаже РПУ, где расположены кабели всех каналов СБ и канала НЭ; таким образом возможен выход из строя более одного канала СБ, необходимого для безопасного останова реакторной установки;

– в случае нахождения оборудования разных каналов СБ в одном помещении необходимо обработать наружные поверхности кабельных коробов и металлических креплений кабельных коробов огнезащитным составом с огнезащитной эффективностью 120 мин;

– огнезащитный состав для обработки наружных поверхностей кабелей СБ должен иметь температуру вспучивания не более 150°C для кабелей РГ и 180°C для кабелей НГ;

– для обеспечения безопасной эвакуации людей из реакторного здания Нововоронежской АЭС-2, необходима работа системы дымоудаления, наличие СИЗОД у персонала АЭС от воздействия ОФП, разработка организационно-технических мероприятий по эвакуации персонала в условиях потери видимости.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Лебедченко, О. С. Токсичность газовой среды в помещениях блочного и резервного пультов управления АЭС при пожаре / О. С. Лебедченко // Безопасность жизнедеятельности. – 2024. – № 6(282). – С. 52-56.

2. Лебедченко, О. С. Обоснование безопасного расстояния между размещенными в одной пожарной зоне кабелями каналов безопасности атомных электростанций с водо-водяными реакторами / О. С. Лебедченко // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 1. – С. 68-73. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-1-68-73.

3. Пузач, С. В. Влияние режима пожара на огнестойкость несущих строительных конструкций машинных залов ГРЭС / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, О. Ю. Маламут // Безопасность труда в промышленности. – 2024. – № 5. – С. 48-52. – DOI 10.24000/0409-2961-2024-5-48-52.

4. Лебедченко, О. С. Комплексный подход к определению параметров пожаровзрывоопасных зон при натекании водорода в реакторном здании АЭС с ВВЭР / О. С. Лебедченко // Естественные и технические науки. – 2024. – № 1(188). – С. 258-265. – DOI 10.25633/ETN.2024.01.23.

5. Пузач, С. В. Математическое моделирование натекания водорода в гермзоне реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200 / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – Т. 32, № 2. – С. 9-17. – DOI 10.22227/0869-7493.2023.32.02.9-17.

6. Экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, В. И. Зыков [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – Т. 32, № 5. – С. 49-59. – DOI 10.22227/0869-7493.2023.32.05.49-59.

7. Оценка токсичности не распространяющих горение сигнальных кабелей при пожаре в производственных помещениях / С. В. Пузач, Р. Г. Акперов, О. С. Лебедченко, О. Б. Болдрушкиев // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 5. – С. 75-80. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-5-75-80.

8. Оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, В. И. Зыков, Т. И. Чистяков // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31, № 6. – С. 56-67. – DOI 10.22227/0869-7493.2022.31.06.56-67.

9. Лебедченко, О. С. Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций в условиях пожара / О. С. Лебедченко, С. В. Пузач, В. И. Зыков // По-

жаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30, № 4. – С. 36-47. – DOI 10.22227/0869-7493.2021.30.04.36-47.

10. Пузач, С. В. Анализ причин аварий и особенностей пожаров на АЭС / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, В. П. Спиридонов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2021. – № 3(131). – С. 73-79.

11. Лебедченко, О. С. Оценка функционирования сигнальных кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара / О. С. Лебедченко, В. И. Зыков, С. В. Пузач // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29, № 4. – С. 51-58. – DOI 10.22227/PVB.2020.29.04.51-58.

12. Пузач, С. В. Обоснование технологии пассивной противопожарной защиты основных зданий АЭС с водо-водяными реакторами на основе расчёта огнестойкости ограждающих конструкций / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, С. В. Сизухин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 1. – С. 22-29. – DOI 10.25257/FE.2020.1.22-29.

13. Влияние неоднородного распределения температур по высоте помещения на высоту плоскости равных давлений при пожаре / С. В. Пузач, И. В. Ситников, О. С. Лебедченко [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27. – № 7-8. – С. 24-31. – DOI 10.18322/PVB.2018.27.07-08.24-31.

14. Особенности образования пожаро- и взрывоопасных зон при натекании газообразного водорода в нижнюю часть условно герметичного помещения / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, В. Г. Пузач, М. Д. Меляшинский // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 2. – С. 58-63. – DOI 10.25257/FE.2018.2.58-63.

15. Пузач, С. В. Расположение взрыво- и пожароопасных участков водородно-воздушной смеси по высоте конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода в помещение / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 1. – С. 18-24. – DOI 10.18322/PVB.2017.26.01.18-24.

16. Временной механизм воздействия опасных факторов пожара на персонал АЭС и комплексная защита от них / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, А. Д. Ищенко, И. С. Фогилев // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 8. – С. 15-24. – DOI 10.18322/PVB.2017.26.08.15-24.

17. Пузач, С. В. Некоторые особенности расчета величины пожарного риска в машинных залах гидроэлектростанций / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, В. П. Спиридонов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2016. – № 2(100). – С. 68-73.

18. К расчету безопасной эвакуации людей из машинных залов гидроэлектростанций / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, И. В. Деревяшкин, В. П. Спиридонов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 6(98). – С. 66-73.

19. Пузач, С. В. Коэффициенты участия водорода в горении и взрыве при ламинарной и турбулентной конвекции на горизонтальной пластине / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, Е. Н. Болдырев // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 6. – С. 26-30.

20. Расчет величины пожарного риска в машинных залах гидроэлектростанций / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, Е. С. Абакумов [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2014. – № 2. – С. 109-118.

21. Пузач, С. В. Неоднородность температурного поля в газовом задымлен-

ном нагретом припотолочном слое при модельном пожаре в кинотеатре / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, Нгуен Тхань Хай // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 2. – С. 31-32.

22. Оценка токсикологической обстановки при возникновении пожара в салоне самолета и помещениях аэропортов / С. В. Пузач, А. В. Смагин, В. М. Доан, О. С. Лебедченко // Тепловые процессы в технике. – 2009. – Т. 1, № 12. – С. 531-535.

23. Сравнительный анализ методов расчета массовых расходов системы дымоудаления при пожаре в помещении / С. В. Пузач, И. Е. Фролов, О. С. Лебедченко [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17. – № 4. – С. 34-41.

24. Пузач, С. В. Неоднородность температурного поля в припотолочном газозоудушном слое при пожаре в помещении / С. В. Пузач, Нгуен Тхань Хай, О. С. Лебедченко // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 5(21). – С. 1.

25. Пузач, С. В. Модельная задача определения коэффициентов участия водорода в горении и взрыве / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, Н. С. Воробьев // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16, № 5. – С. 16-18.

Статьи в иных изданиях:

26. Роль динамики опасных факторов пожара в патогенезе отравления человека на пожаре / С. В. Пузач, А. В. Смагин, О. С. Лебедченко [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2010. – № 1(11). – С. 4-10.

27. Оценка опасности акролеина, синильной и соляной кислоты при пожаре / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, А. В. Смагин [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2009. – № 1(9). – С. 71-75.

28. Пузач, С.В. Новые представления об очередности наступления опасных факторов пожара во время эвакуации людей из зданий / С.В. Пузач, А.В. Смагин, О. С. Лебедченко // Химическая и биологическая безопасность – 2007. – № 4 -5. – С.14-21.

Монографии:

29. Пузач, С.В. Математическое моделирование динамики опасных факторов пожара при пассивной противопожарной защите в основных зданиях атомных электростанций с водно-водяными реакторами / С.В. Пузач, О.С. Лебедченко. Монография. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – 304 с.

30. Пузач, С.В. Некоторые особенности пожаровзрывобезопасности при работе с водородом / С.В. Пузач, О.С. Лебедченко. Монография. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – 69 с.

31. Новые представления о расчете необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах / С.В. Пузач, А.В. Смагин, О. С. Лебедченко, Е.С. Абакумов. Монография. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 222 с.

Публикации в материалах конференций:

32. Лебедченко, О. С. Особенности натекания водорода в гермзону реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200 / О. С. Лебедченко, С. В. Пузач // Общественные проблемы инженерной подготовки кадров МЧС России : Сборник трудов международной науч.- практ. конф. – Химки: АГЗ МЧС России, 2023. – С. 138-142.

33. Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических кабелей при пожаре / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, Т. И. Чистяков, С. А. Беляев // Огнезащита материалов и конструкций SPBPU FPM-2023: Сборник тезисов докладов I международной науч.-практ. конф. –

СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2023. – С. 174-177.

34. Токсичность изоляции не распространяющих горение силовых кабелей оборудования систем безопасности АЭС при пожаре в помещениях / С. В. Пузач, Р. Г. Акперов, О. С. Лебедченко, О. Б. Болдрушкиев // Полимерные материалы пониженной горючести: Сборник материалов XI международной конференции. – Волгоград: ВГТУ, 2023. – С. 181-185.

35. Лебедченко, О. С. Модельные задачи расчета коэффициентов участия водорода в горении и взрыве при обеспечении водородной безопасности АЭС / О.С. Лебедченко, С. В. Пузач // Актуальные проблемы комплексной безопасности в строительстве, тенденции развития в современных условиях : Сборник докладов Всероссийской науч.- практ. конф. – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. – С. 23-27.

36. Оценка эффективности вспучивающихся огнезащитных составов для силовых кабелей каналов безопасности атомных станций с водо-водяными реакторами в условиях пожара / О. С. Лебедченко, С. В. Пузач, В. И. Зыков, Т. И. Чистяков // Ройтмановские чтения: Сборник материалов 10-й науч.-практ. конф. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 99-103.

37. Лебедченко, О.С. Экспериментальные исследования воздействия пожара на провода и кабели / О. С. Лебедченко, Пузач С.В., В. И. Зыков, Т. И. Чистяков // Системы безопасности: Материалы 31-й международной науч.-техн. конф. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2022. – С. 271-276.

38. Образование токсичных газов при терморазложении негорючих сигнальных кабелей во время пожара в помещении / О. С. Лебедченко, С. В. Пузач, Р. Г. Акперов, О. Б. Болдрушкиев // Материалы 8-й Российской национальной конференции по теплообмену. В 2 т. Т. 1. – М.: МЭИ, 2022. – С. 226-227.

39. Лебедченко, О.С. Особенности обоснования безопасных расстояний внутри пожарных зон зданий атомных станций без действия систем активной противопожарной защиты / О. С. Лебедченко, Пузач С.В. // Системы безопасности: Материалы 30-й международной науч.-техн. конф. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 294-299.

40. Лебедченко, О.С. Оценка работоспособности в условиях пожара силовых кабелей каналов безопасности атомных станций, обработанных вспучивающимися огнезащитными покрытиями / О.С. Лебедченко, С.В. Пузач, В.И. Зыков // Актуальные проблемы комплексной безопасности в строительстве, тенденции развития в современных условиях [Электронный ресурс]: сб. научн. тр. – М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. – Режим доступа: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/> – С. 30-33.

41. Лебедченко, О. С. Оценка обеспечения корректной работы кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара / О. С. Лебедченко // Ройтмановские чтения: Сборник материалов VIII научно-практической конференции, Москва, 05 марта 2020 года / Под редакцией Б.Б. Серкова. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 72-75.

42. Лебедченко, О. С. Расчетное обоснование пределов огнестойкости ограждающих конструкций пожарных зон здания обращения с твердыми радиоактивными отходами АЭС / О. С. Лебедченко, Пузач С.В., Николаев А.Н. // Системы безопасности: Материалы 29-й Международной науч.- техн. конф. – М.:

Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 145-151.

43. Меляшинский, М. Д. Особенности образования пожаро- и взрывоопасных зон при натекании газообразного водорода в нижнюю часть машинных залов электростанций / М. Д. Меляшинский, С. В. Пузач, О. С. Лебедченко // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : Материалы III международной науч.- практ. конф., посвященной Всемирному дню гражданской обороны. В 3 ч. Часть II. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 241-249.

44. Особенности расчета динамики опасных факторов пожара в основных зданиях АЭС / С. В. Пузач, О. Ю. Маламут, С. К. Кудояров, О. С. Лебедченко // Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности : Сборник тезисов докладов материалов международной науч.- практ. конф. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 679-683.

45. Лебедченко, О. С. Особенности обоснования технологии пассивной противопожарной защиты основных зданий атомных электростанций с водородными реакторами / О. С. Лебедченко // Системы безопасности: Материалы 28-й Международной науч.-техн. конф. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 291-297.

46. Пузач, С.В. О подобии процессов тепло- и массообмена при пожаре в помещении / С. В. Пузач, Е.В. Сулейкин, О.С. Лебедченко, Р.Г. Акперов // Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области обеспечения пожарной безопасности: Материалы международной науч.- практ. конф., посвященной 80-летию Академии ГПС МЧС России. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2013. – С. 157–162.

47. Нгуен, Т.Х. Сравнительный анализ методов расчета массовых расходов систем дымоудаления из атриумных зданий / Т.Х. Нгуен, А.А. Сударушкин, О.С. Лебедченко, С.В. Пузач, Е.В. Витовщик // Системы безопасности: Материалы 18-й Международной науч.-техн. конф. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – С. 140-142.

48. Математическое моделирование токсикологической обстановки при возникновении пожаров на объектах аэрокосмического комплекса/ Доан Вьет Мань, С.В.Пузач, А.В.Смагин, О.С. Лебедченко // Труды XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов. – М.: МЭИ, 2009. – С. 425-428.

49. Новые представления об очередности наступления критических значений опасных факторов пожара в помещениях/ Пузач С.В., Смагин А.В., Лебедченко О.С и др. // Труды VI Минского международного форума по тепло- и массообмену ММФ-2008 – Минск, 2008.–Т.1. – С. 234-235.

50. Пузач, С.В. Распределение концентраций токсичных газов при пожаре в помещении/ С.В.Пузач, А.В.Смагин, О.С. Лебедченко //Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках : Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов. В 2 т. Т. 1. М.: МЭИ, 2007. – С. 277-279.