

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

Академия Государственной противопожарной службы

на правах рукописи



Лебедченко Ольга Сергеевна

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

Специальность: 2.10.1. Пожарная безопасность
(технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора технических наук

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

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ АЭС С ВОДО-ВОДЯНЫМИ РЕАКТОРАМИ.....	19
1.1 Причины аварий и пожаров на АЭС	19
1.2 Анализ системы пассивной противопожарной защиты АЭС с ВВЭР	28
1.3 Современные методы математического моделирования для расчета динамики опасных факторов пожара в помещениях АЭС с ВВЭР	37
1.4 Особенности водородной безопасности АЭС с ВВЭР	41
1.5 Выводы по первой главе.....	52
ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПАССИВНОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ АЭС С ВВЭР, ПОЗВОЛЯЮЩЕЙ ВЫПОЛНИТЬ БЕЗОПАСНЫЙ ОСТАНОВ И РАСХОЛАЖИВАНИЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ПОЖАРЕ	55
2.1 Математические модели обоснования системы пассивной противопожарной защиты	55
2.1.1 Интегральная математическая модель.....	55
2.1.2 Полевая математическая модель	58
2.2 Обоснование пределов огнестойкости пожарных зон с учетом реальных температурных режимов пожара.....	66
2.2.1 Расчетное обоснование пределов огнестойкости ограждающих конструкций Ленинградской АЭС-2	66
2.2.2 Расчетное обоснование пределов огнестойкости ограждающих конструкций АЭС «Аккую»	84
2.2.3 Определение пределов огнестойкости ограждающих конструкций Нововоронежской АЭС-2	119
2.3 Расчетное обоснование требуемых (минимальных) расстояний и пределов огнестойкости противопожарных преград между каналами систем безопасности АЭС при размещении их в одной пожарной зоне	129

2.3.1 Расчетное обоснование требуемых (минимальных) расстояний и пределов огнестойкости противопожарных преград между каналами систем безопасности АЭС при размещении их в одной пожарной зоне Ленинградской АЭС-2	129
2.3.2 Расчетное обоснование требуемых (минимальных) расстояний и пределов огнестойкости противопожарных преград между каналами систем безопасности АЭС при размещении их в одной пожарной зоне АЭС «Аккую»	142
2.4 Обеспечение безопасной эвакуации персонала из реакторного здания АЭС с ВВЭР	148
2.5 Выводы по главе 2.....	176
ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ И СИГНАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА АЭС, В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОГО И СТАНДАРТНЫХ РЕЖИМОВ ПОЖАРА	178
3.1. Теоретическая оценка функционирования сигнальных кабелей каналов безопасности АЭС в условиях пожара.....	178
3.1.1. Постановка задачи	178
3.1.2 Математическая модель	181
3.1.3 Результаты расчетов	182
3.2 Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций в условиях пожара.....	185
3.2.1 Постановка задачи	185
3.2.2 Математическая модель	188
3.2.3 Исходные данные для проведения численного эксперимента.....	191
3.2.4 Результаты расчетов	193
3.3 Экспериментальная оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки	201
3.3.1 Постановка задачи	201
3.3.2 Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента	204

3.3.3 Исходные данные для проведения экспериментов	208
3.3.4 Результаты экспериментов.....	209
3.4 Экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки	213
3.4.1 Постановка задачи	213
3.4.2 Исходные данные для проведения экспериментов	215
3.4.3 Результаты экспериментов и их анализ.....	218
3.5 Методика обоснования эффективности применения огнезащитных составов для кабелей с учетом реальных режимов пожара.....	225
3.6 Выводы по главе 3.....	227
ГЛАВА 4 ТОКСИЧНОСТЬ НЕ РАСПРОСТРАНЯЮЩИХ ГОРЕНИЕ СИЛОВЫХ И СИГНАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА АЭС, В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА	230
4.1 Постановка задачи	230
4.2 Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов.....	231
4.3 Токсичность не распространяющих горение сигнальных кабелей	234
4.3.1 Исходные данные для проведения экспериментов	234
4.3.2 Результаты экспериментов и их анализ	236
4.4 Токсичность не распространяющих горение современных силовых кабелей.....	241
4.4.1 Исходные данные.....	241
4.4.2 Результаты экспериментов и их анализ.....	244
4.5 Выводы по главе 4.....	249
ГЛАВА 5 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ НАТЕКАНИИ ВОДОРОДА В РЕАКТОРНОЕ ЗДАНИЕ АЭС С ВОДО- ВОДЯНЫМИ РЕАКТОРАМИ	250
5.1 Постановка задачи	250
5.2 Стационарная одномерная концентрационная диффузия водорода в воздухе.....	252

5.3 Ламинарная и турбулентная конвекция на горизонтальной пластине при натекании водорода.....	257
5.4 Конвективная колонка, образующаяся над источником..... натекания водорода в помещение	262
5.5 Особенности образования пожаро- и взрывоопасных зон при натекании газообразного водорода в нижнюю часть условно герметичного помещения.	270
5.6 Математическое моделирование натекания водорода в гермзоне реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200.....	276
5.7 Выводы по 5 главе.....	287
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	290
Список сокращений и условных обозначений.....	293
Список литературы	295
Приложение А (обязательное)	331

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Пожары, произошедшие на объектах атомной энергетики - в 1975 г. на АЭС «Браунс Ферри», в 1978 г. на Белоярской АЭС, в 1988 г. на Игналинской АЭС и на других атомных станциях вызвали тяжелые экономические и экологические последствия и сопровождались человеческими жертвами.

Радиационная и ядерная безопасность при пожарах на атомных электростанциях (АЭС) должна достигаться, в том числе и с помощью систем противопожарной защиты согласно Стандартам безопасности МАГАТЭ и законодательству Российской Федерации [198, 206, 207]. Основными инновациями в системах безопасности технологического проекта «АЭС-2006» являются пассивные технологии систем безопасности [22, 38, 224, 225]. Это, в полной мере, относится и к системам противопожарной защиты [8].

Согласно энергетической стратегии России на период до 2035 года (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р), основными инновациями в системах безопасности являются пассивные технологии систем безопасности [223, 224, 225].

К основным методам пассивной защиты, реализованным в системах безопасности АЭС-2006 по сравнению с типовым проектом ВВЭР-1000, являются следующие [76, 107, 224]:

- система пассивного отвода тепла;
- пассивный залив активной зоны (гидроемкости первой и второй ступени);
- концепция глубоко эшелонированной защиты (2-4 канала безопасности);
- использование огнезащитных покрытий.

Особое значение для пожарной безопасности АЭС приобретают методы пассивной противопожарной защиты [8, 224], поскольку активные системы пожарной безопасности (пожарная сигнализация, дымоудаление, пожаротушение, оповещение и управление эвакуацией и т.д.) могут быть разрушены в результате аварии.

Методы пассивной защиты [76, 120] предусматривают минимальное влияние человеческого фактора (ошибочные действия персонала) на показатели безопасности. Помимо этого снижается влияние отказов обеспечивающих и управляющих систем безопасности (обесточивание в энергосистеме, отказ источников охлаждающей воды и т.д.) на показатели безопасности.

Наряду с этим, объемно-планировочные и конструктивные решения каждой АЭС имеют существенные различия. Поэтому обоснование системы пассивной противопожарной защиты необходимо проводить для каждой АЭС отдельно.

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 системы безопасности (СБ)) является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в обеспечение противопожарной защиты АЭС внес А.К. Микеев. Его труды не потеряли своей актуальности и сегодня [88, 89]. Им 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. На примере аварий и пожаров на ядерных энергетических установках (Три-Майл-Айленд, Чернобыльская АЭС), показаны тяжесть последствий таких событий. А.К. Микеевым изложены основные принципы противопожарной защиты АЭС, приведены конструктивные и технические средства, используемые для ее обеспечения, профилактические методы предотвращения пожаров на АЭС.

Развитием системы нормирования пожарной безопасности атомных электростанций занимались Ю. И. Дешевых, А. Н. Гилетич [166].

Работы, проведенные Д.И. Пуцевым, реализованные на Тяньваньской АЭС в Китае и основанные на опыте проектирования, строительства и эксплуатации 20 действующих ядерных энергетических блоков ВВЭР-1000 по проекту «АЭС-91», содержат: методику расчета динамики возможных пожаров на атомных станциях;

оценку опасности воздействия опасных факторов пожара на оборудование, в первую очередь, систем безопасности, и строительные конструкции АЭС; расчет огнестойкости кабельных каналов АЭС; определение безопасных расстояний, которые гарантируют не распространение пожара между кабельными трассами различных систем безопасности; оборудование локализации проливов горючих жидкостей, которое предназначено для защиты от пожара элементов систем безопасности, в основном, для реакторного здания [81, 94, 161- 164].

Однако, данные исследования [81, 94, 161- 164] относятся проекту «АЭС-91». В настоящее время действует проект «АЭС-2006», характеризующийся: системой пассивной противопожарной защиты; новыми видами пожарной нагрузки, такими как, не распространяющие горение кабели, техническое масло пониженной горючести; новыми объемно-планировочными решениями «ядерный остров» и материалами ограждающих конструкций, ранее не использовавшимися для зданий АЭС.

Помимо этого, отсутствуют в [81, 94, 161- 164] данные по времени потери работоспособности кабелей каналов СБ в результате теплового воздействия реального температурного режима пожара.

Так же проблема обеспечения водородной безопасности АЭС не была исследована в работах Пуцева Д.И.

Большой вклад в изучение термодинамики и теплопередачи в пожарном деле внесли Ю.А. Кошмаров [65-67] и И.С. Молчадский [91-92].

Методы расчета динамики ОФП в помещении разрабатывали: Ю.А. Кошмаров [65], С.В. Пузач [149 -155], Ю.С. Зотов [49].

Большое количество работ С. В. Пузача, например [129, 131, 134, 154, 156, 158-160, 167], посвящено определению огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального температурного режима пожара.

Работы Т.Ю. Ереминой посвящены проблемам и перспективам повышения эффективности контроля огнезащитных свойств вспучивающихся покрытий, предназначенных для защиты металлических конструкций на стадии эксплуатации

[41-43]. Определение требуемой толщины вспучивающегося огнезащитного покрытия на стальных конструкциях приведено в работе Ю. Н. Шебеко [217].

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 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 и V. P. Panlilio* [247]. В ИБРАЭ РАН проведены экспериментальные и теоретические исследования физических аспектов процессов горения и детонации, исследования процессов стратификации и горения водородо-паровоздушных смесей в присутствии мелкодисперсных капель воды. В результате этих исследований проведено трехмерное компьютерное моделирование процесса стратификации водородно-паровоздушной смеси под защитной оболочкой АЭС [20].

Аварии с течами теплоносителя первого контура, сопровождающиеся наибольшими выбросами водорода в помещения ЗЛА исследовали: Д. И. Козлов и др. в ФГУП «Атомэнергопроект» (Москва); в ИПБ ЯЭ РНЦ «Курчатовский Институт» [101] и А. Н. Артеменко [9]. *M. Dehjourian* [237], *R. Gharari* [241] и *S. Hostikka* [242] 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 [62, 63, 112], *N. Barilo* [231] и др.

Распространение, горение и детонация водородо-воздушной смеси в закрытых помещениях рассмотрены в работах Г.Е. Солдатова и О.С. Голодной [25, 195], В. И. Макеева [83], В. С. Бабкина [187], *N. Agrawal* [228], *L. R. Boeck*, *F. M. Berger*, *J. Hasslberger*, *T. Sattelmayer* [239], *F. Liu* [248].

Технологическая схема пассивной системы удаления водорода представляет собой распределение рекомбинаторов по помещениям зоны локализации аварии. Состав и производительность технологических групп, места установки отдельных рекомбинаторов выбраны на основании результатов анализа распространения, накопления и возможных режимов горения водорода при течи теплоносителя из первого контура и определены в работе В.М. Берковича и Ю.Г. Давыдова (Институт «Атомэнергопроект», Москва), а так же А. Д. Ефановым, А.А. Лукьяновым, П.Н. Мартыновым и Е.С. Рабенковым (ГНЦ ФЭИ, Обнинск) [12, 165].

Некоторые особенности пожаровзрывобезопасности при работе с водородом исследовал С. В. Пузач [135, 147, 254].

С. Г. Цариченко разработал комплекс новых, более точных и универсальных инженерных методов расчета предельных условий дефлаграционного горения предварительно перемешанных водородосодержащих смесей при различных начальных параметрах среды. С.Г. Цариченко, Ю.Н. Шебеко, А.Я Корольченко. провели численное моделирование распространения детонационной среды в газовом слое с детальным учетом химической кинетики, а так же рассчитали концентрационные пределы детонации в трубах для смесей водород-воздух-инертный газ [53, 215- 217].

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.

Основателем научной школы в сфере пожарной безопасности электроустановок является Г.И. Смелков. В его работах рассмотрены теория и инженерная практика определения их пожарной опасности и причастности к пожарам на объектах при различного рода аварийных режимах с использованием современных методов. Г.И. Смелков научно обосновал положения нормативных документов, регламентирующих пожарную безопасность электропроводок в монографии «Пожарная безопасность электропроводок» и других своих работах.

Г.И. Смелков и пишет о необходимости рассматривать понятие «огнестойкость кабеля» как его работоспособность в условиях пожара [55, 56, 96, 190-193]. Вклад в определение пожарной опасности кабелей внесли ученые – В. Н. Черкасов, В. И. Зыков, И.Ф. Поединцев, А.И. Рябиков, В.А. Пехотилов, А.А. Варламкин и И.Р. Хасанов [5-7, 17, 19, 46, 50, 56, 99, 125-127, 191, 213]. Специфика пассивной противопожарной защиты атомных электрических станций для кабельных проходок границ пожарных зон исследована Д.Г. Ланиным, С.Г. Цариченко, А.А. Варламкиным и А.В. Чумаченко [194].

S. Hostikka провел сравнительный анализ методов контроля состояния устаревших низковольтных кабелей на атомных электростанциях [243, 244], так же этой теме посвящена работа [258]. Испытание электрооборудования на огнестойкость изучали V. Finger [240] и V. Babrauskas [230].

Однако методики определения работоспособности силовых и сигнальных кабелей в условиях реального температурного режима пожара с учетом сохранения ими требуемых характеристик (частота, амплитуда и фаза передаваемого сигнала; электрическое сопротивление и емкость) до настоящего времени не было представлено. Кабели системы безопасности АЭС приводящие реакторную установку в безопасное состояние должны сохранять работоспособность на протяжении всего времени этого процесса. Поэтому важным моментом при выборе характеристик систем, выполняющих функции безопасности, является учет требуемой продолжительности их 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 быть не менее 72 часов [16]. Так же эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий кабелей каналов систем безопасности АЭС в условиях реального пожара не была изучена.

В.С. Иличкин, С.В. Пузач, Р.Г. Акперов, Е.В. Сулейкин работали над экспериментальным определением удельных коэффициентов образования

токсичных веществ при пожаре в помещении и их воздействием на людей [4, 14, 51, 52, 133, 143, 145, 153, 155, 157, 249, 250]. При этом удельные коэффициенты образования токсичных веществ, образующихся при горении кабелей, используемых на АЭС с ВВЭР, таких как циановодород и монооксид углерода, не были определены.

Анализ состояния проблемы позволил сформулировать общую концепцию исследования: разработка теплофизических основ для обоснования 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).

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 данные 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)-HF 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 объектов 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 тепломассообмена 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); III-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.

Монографии: «Новые представления о расчете необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах» – 2007, «Некоторые особенности пожаровзрывобезопасности при работе с водородом» – 2017, «Математическое моделирование динамики опасных факторов пожара при пассивной противопожарной защите в основных зданиях атомных электростанций с водяными реакторами» – 2019.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти 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.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ АЭС С ВОДО-ВОДЯНЫМИ РЕАКТОРАМИ

1.1 Причины аварий и пожаров на АЭС

В качестве обоснования современного состояния проблемы противопожарной защиты АЭС проведен анализ причин аварий и особенностей пожаров на АЭС [130].

Основными инновациями в системах безопасности технологического проекта «АЭС-2006» являются пассивные технологии систем безопасности [224, 225]. Это, в полной мере, относится и к системам противопожарной защиты [8].

К основным методам пассивной защиты, реализованным в системах безопасности АЭС-2006 по сравнению с типовым проектом ВВЭР-1000, являются следующие [76, 225]:

- система пассивного отвода тепла;
- пассивный залив активной зоны (гидроемкости первой и второй ступени);
- концепция глубоко эшелонированной защиты (2-4 канала безопасности);
- использование огнезащитных покрытий.

Особое значение для пожарной безопасности АЭС приобретают методы пассивной противопожарной защиты [8, 224, 225], поскольку активные системы пожарной безопасности (пожарная сигнализация, дымоудаление, пожаротушение, оповещение и управление эвакуацией и т.д.) могут быть разрушены в результате аварии.

Методы пассивной защиты предусматривают минимальное влияние человеческого фактора (ошибочные действия персонала) на показатели безопасности. Помимо этого снижается влияние отказов обеспечивающих и управляющих систем безопасности (обесточивание в энергосистеме, отказ источников охлаждающей воды и т.д.) на показатели безопасности [120] .

Изучение причин и особенностей пожаров на АЭС [262] на протяжении

всего периода использования атомной энергетики позволяет сделать вывод, что пожар на АЭС является результатом аварии, сопровождающейся разливом масла, выбросом водорода, либо короткого замыкания.

Горючей нагрузкой чаще всего выступают изоляция кабелей; трансформаторное масло; масло, используемое в насосных системах, а так же водород, используемый в генераторах или образующийся в результате нарушения производственного процесса и при воздействии радиационного излучения на воду первого контура теплообмена в реакторном здании. Этот вывод подтверждают следующие аварии, сопровождающиеся пожарами [93, 226].

20 марта 1975 г. США, штат Алабама, г. Декатур, АЭС «Браунс Ферри». Пожар на одной из крупнейших американских атомных электростанций, продолжавшийся 7 часов и причинивший прямой материальный ущерб в 10 млн. долл. Два реакторных блока были выведены из строя более чем на год, что принесло дополнительные убытки еще в 10 млн. долл.

Причиной возникновения пожара стало несоблюдение мер безопасности при работах по герметизации кабельных вводов, проходивших через стену реакторного зала. Проверку этой работы осуществляли самым примитивным способом - по отклонению пламени горящей стеариновой свечи. В результате произошло воспламенение материалов изоляции кабельных отверстий, а затем огонь проник в помещение реакторного зала.

Этот пожар считается до сих пор одним из самых крупных как по ущербу, так и по риску возможных последствий. Пожаром, возникшем в кабельном канале, были выведены из строя аварийные системы управления реактором и охлаждения активной зоны, а так же автоматические системы пожаротушения.

Пожар продолжался свыше 7 часов. Сгорело около 2000 обособленных контрольных, сигнальных и силовых кабелей, уничтожено более 1800 кг кабелей с полихлорвиниловой изоляцией, в результате чего в реакторный зал выделилось более 630 кг хлора. Огонь повредил или уничтожил более 1600 кабельных линий, из которых не менее 600 относились к системам управления защитой станции.

До этого пожара на построенных в США АЭС вероятность аварий

конструкторами реакторов оценивалась в миллиардную долю, и их считали просто невозможными. Надежность такого рода оценок была поколеблена пожаром на АЭС «Браунс Ферри».

Из опубликованного официального заключения комиссии о причине этого пожара можно выделить несколько характерных черт этого происшествия.

Пожар возник под помещением, где находится центр управления электростанцией. Произошло возгорание изоляции кабелей. Причина пожара - свеча, посредством которой рабочий старался обнаружить утечку из трубы, по которой подводился сжатый воздух. Через 15 мин после возгорания, когда имеющимися средствами пожар потушить не удалось, вызвали пожарную команду. Через 1 час после возгорания прибыла пожарная команда. В связи с отсутствием инструкций по тушению пожара на ядерной электростанции тушение начали только через 6 часов водой, что оказалось вполне успешным.

Было установлено, что поскольку аварийное водоснабжение было выведено из строя, то, если бы пожар не был потушен, через непродолжительное время элементы в реакторе перестали бы охлаждаться водой, что привело к расплавлению активной зоны атомного реактора и произошла бы катастрофа.

АЭС «Браунс Ферри» находится в густонаселенном районе. Поскольку предусмотренные меры по эвакуации населения не были приняты, то по количеству погибших и отравленных людей эта катастрофа была бы сравнима с катастрофой Хиросимы.

Этот пожар показал, что математические методы расчетов не учитывают вероятности того, что происходит из-за ошибок в поведении людей: рабочего со свечей, неправильно записанного номера телефона пожарной охраны, отсутствия инструкции для тушения пожара на атомных станциях. В данном случае ситуацию могли бы улучшить меры пассивной защиты от аварий и пожаров.

31 декабря 1978 г. сгорел второй блок Белоярской АЭС. Пожар возник от падения плиты перекрытия машинного зала на маслбак турбины. Выгорел весь контрольный кабель. Реактор оказался без контроля. При организации подачи аварийной охлаждающей воды в реактор восемь человек получили повышенные

дозы радиации.

1981 г. Пожар в помещении сепараторов на четвертом блоке Ленинградской АЭС. Жертв нет.

1981 г. Пожар на АЭС «Сан Онофре» (США) из-за повреждения маслопровода на дизельном генераторе. Вслед за пожаром произошел взрыв из-за возгорания водорода в системе обработки газообразных отходов. Произошел выброс радиоактивных продуктов.

15 октября 1982 г. СССР, г. Медзамор, Армянская АЭС. Взрыв генератора на первом энергоблоке Армянской АЭС. Машинный зал серьезно пострадал от пожара. Большая часть персонала в панике покинула станцию, оставив реактор без надзора. Прибывшая самолетом с Кольской АЭС оперативная группа помогла операторам, оставшимся на своём рабочем месте, спасти реактор. Сгорели кабели на площади 400 м², повреждено оборудование в машинном зале на площади 300 м². Ущерб составил 1 млн. руб. (в ценах 1982г.). Для ликвидации пожара потребовалось почти 7 часов. В тушении участвовали 110 работников пожарной охраны.

27 января 1984 г. СССР, г. Энергодар, Запорожская АЭС. Пожар на первом энергоблоке в период подготовки его к пуску. После самовозгорания одного из блоков реле огненный вал в течение 18 часов метался по 50-метровой кабельной шахте. Причиной пожара стало использование на станции полихлорвиниловой изоляции, которая воспламенялась, плавилась и, обрываясь, поджигала пучки кабелей на нижних отметках. Выгорела вся начинка шахты: свыше 4 тыс. блоков управления, 41 электродвигатель, 700 км различных кабелей.

1984 г. Взрыв водорода в системе охлаждения турбогенератора с последующим пожаром на АЭС Ранчо Секо (США). Произошел выброс радиоактивного пара из поврежденного парогенератора. Повреждено вспомогательное оборудование.

1985 г. Пожар на АЭС «Маанынань» (о. Тайвань) продолжался 3 часа. Серьезно повреждено оборудование, причинен ущерб на сумму 25 млн. долл. Пожар возник после того, как разрушившиеся 8 лопаток турбины повредили

герметичность водородных резервуаров.

26 апреля 1986 г. СССР, Украина, Киевская область, г. Припять, Чернобыльская АЭС. Крупнейшая радиационная катастрофа в мировой истории (событие седьмого уровня по международной шкале INES) [86, 100]. На четвёртом блоке Чернобыльской АЭС при проведении проектных испытаний одной из систем обеспечения безопасности прозвучало два мощных взрыва, разрушивших часть реакторного блока и машинного зала. Тротиловый эквивалент этих взрывов оценивается величиной около 100-250 т. тротила. В период с 26 апреля по 10 мая 1986 года, когда разрушенный реактор был окончательно заглушен, по официальной информации, в атмосферу было выброшено около 190 т радиоактивных веществ (примерно 4% общей активности топлива в реакторе). По другим оценкам, из реактора было выброшено от 90 до 100% топлива.

Из-за того, что выброс радионуклидов происходил более 10 суток при меняющихся метеоусловиях, зона основного загрязнения имеет всерный, пятнистый характер. Кроме 30-километровой зоны, на которую пришлась большая часть выброса, в разных местах в радиусе до 250 км были выявлены участки, где загрязнение достигло 200 Ки/кв. км. Общая площадь «пятен» с активностью более 40 Ки/кв. км составила около 3,5 тыс. кв. км, где в момент аварии проживало 190 тыс. человек. Всего радиоактивным выбросом с Чернобыльской АЭС в разной степени было загрязнено 80% территории Белоруссии, вся северная часть Правобережной Украины и 19 областей России.

1987 г. Пожар в зале по управлению электроникой строящейся атомной электростанции (Германия). Повреждены 33 электронных шкафа, 2 ЭВМ с периферийными аппаратами и 250 кабелей.

1988 г. Пожар на Игналинской АЭС (СССР). Повреждено около 650 кабелей. Ущерб составил 4 тыс. руб. (в ценах 1988 г.). Пожар был ликвидирован автоматической системой пожаротушения.

19 октября 1989 г. Испания, г. Ванделлос, АЭС «Ванделлос». Крупнейшая авария в истории атомной энергетики Испании (событие третьего уровня по шкале INES). Пожар на первом энергоблоке АЭС. Из-за внезапной остановки

одной из турбин произошли перегрев и разложение смазочного масла. Образовавшийся при этом водород взорвался, что и стало причиной возгорания турбины. Пожар вызвал серьезное повреждение в кабельном хозяйстве и привел к подтоплению фундамента реакторного корпуса. Поскольку на станции не работала система автоматического пожаротушения, были вызваны пожарные подразделения соседних городов, находившихся на расстоянии до 100 км.

Борьба с огнем продолжалась более 4 час. За это время серьезно пострадали системы энергоснабжения турбин и охлаждения реактора. Работавшие на станции пожарные рисковали жизнью. Они не знали расположения и функций ее объектов, не были знакомы с планом аварийных действий на АЭС. Применяли для тушения электрических систем воду вместо пены, что могло привести к поражению их электрическим током. Кроме того, пожарных не предупредили о риске работы в зонах с повышенным уровнем радиации. Через три года после аварии на Чернобыльской АЭС пожарные, уже в другой стране, стали заложниками опасной ситуации на атомной станции. К счастью, на этот раз никто из них сильно не пострадал.

11 октября 1991 г. Украина, Киевская область, г. Припять, Чернобыльская АЭС. В результате короткого замыкания в электрокабеле произошел пожар в машинном зале второго энергоблока. Произошло обрушение кровли машинного зала на площади 2448 м², поврежден турбогенератор (ТГ-4), кабели в районе ТГ-4, шинопроводы и другое технологическое оборудование, находящиеся в машинном зале. Для ликвидации пожара потребовалось 5 час 57 мин. В тушении участвовали 175 работников пожарной охраны. Как и при аварии на четвёртом блоке Чернобыльской АЭС в апреле 1986 года, развитие пожара стимулировало использование при её строительстве горючих материалов - термопластобетона, рубероида и битума. Были разрушены девять пролетов крыши, выведено из строя турбинное оборудование.

5 сентября 2003 г. ранним утром в г. Лилле (Франция) на АЭС произошел пожар. Причина - неисправность электропроводки. Пострадавших нет.

20 декабря 2005. Смоленская АЭС. Произошло короткое замыкание на

трансформаторе тока открытого распределительного устройства мощностью 330 кВт. За взрывом последовало возгорание, которое вскоре было ликвидировано. В четверг, 8 декабря, в результате срабатывания автоматической защиты был остановлен турбогенератор второго энергоблока.

26 ноября 2006 г. Южно-Украинская АЭС, Украина. Из-за возгорания масла в реакторном отделении операторы были вынуждены аварийно остановить энергоблок №2.

14 ноября 2006 г. АЭС Рингхалс, Швеция. Вспыхнул пожар, приведший к аварийной остановке одного из 4-х реакторов электростанции. Пожар вспыхнул около полуночи после взрыва трансформатора на территории АЭС.

25 июля 2006 г. На АЭС «Форсмарк» произошла самая серьезная со времен Чернобыля авария на АЭС, которая могла привести к разрушению активной зоны реактора. Авария произошла вследствие нештатной работы систем обеспечения безопасности при аварийном выключении реактора, которое было инициировано коротким замыканием на распределительной подстанции за пределами самой АЭС, в 130 км к северу от Стокгольма. При этом, автоматически включились только 2 из 4 дизельных генераторов, которые должны были обеспечить работу систем защиты для охлаждения реактора. Остальные удалось включить вручную через 20 минут. Таким образом, могло произойти расплавление тепловыделяющих элементов в активной зоне реактора.

11 марта 2011 года произошёл основной толчок землетрясения магнитудой 9 единиц с эпицентром, расположенным в 180 км от АЭС Фукусима-Дайити. В это время энергоблоки № 1–3 работали на номинальной мощности, а энергоблоки № 4–6 были остановлены на перегрузку топлива и обслуживание. Землетрясение привело к немедленной автоматической остановке работавших реакторов. Вызванные землетрясением разрушения высоковольтного оборудования и опор линий электропередачи привели к потере внешнего энергоснабжения станции, после чего были автоматически запущены резервные дизельные электрогенераторы. Анализ работы станции до прихода волны цунами показал, что АЭС в целом выдержала воздействие сейсмических толчков [260, 261].

В результате смещения горных пород произошла деформация морского дна с его подъёмом на 7-10 метров, что вызвало несколько волн цунами. Первая волна высотой 4 метра достигла станции через 40 минут после основного толчка, а в 15 часов 35 мин пришла вторая волна высотой 14-15 метров, что превысило высоту защитной дамбы, рассчитанной на волну в 5,5 метров, и уровень самой площадки АЭС. Волна цунами смыла стоявшие снаружи тяжёлые резервуары, оборудование и автомобили и дошла до удалённых от берега зданий, оставив после себя множество обломков конструкций (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Радиационная авария на АЭС Фукусима-1 в Японии в 2011г.

Затопление подвальных помещений, где располагались распределительные устройства, резервные генераторы и батареи, привело к полному обесточиванию станции и отказу систем аварийного охлаждения. Произошли расплавление ядерного топлива в реакторах энергоблоков № 1-3, накопление водорода в результате пароциркониевой реакции и взрывы гремучей смеси на энергоблоках № 1, № 3 и № 4. В окружающую среду попали в основном летучие радиоактивные элементы, такие как изотопы йода и цезия, объём выброса которых, составил до 20 % от выбросов при аварии на Чернобыльской АЭС. Затопление привело к человеческим жертвам: два сотрудника, находившиеся в турбинном здании четвёртого энергоблока, были настигнуты нахлынувшей водой и погибли.

В течение нескольких лет после эвакуации из-за физического и психологического стрессов и плохого медицинского обслуживания наступили 2304 преждевременные смерти.

В декабре 2013 года АЭС была официально закрыта. На территории станции продолжаются работы по ликвидации последствий аварии. По оценке Токийской электроэнергетической компании (ТЕРСО), на приведение объекта в стабильное, безопасное состояние может потребоваться до 40 лет. Прогнозируемые затраты на весь комплекс мероприятий, включая компенсации эвакуированным, составят, по официальным оценкам, до 22 триллионов иен.

29 апреля 2019 г. на территории Ровенской атомной электростанции вспыхнул пожар из-за неисправности трансформатора. Вследствие возгорания аварийно отключился третий энергоблок (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Пожар трансформатора на площадке Ровенской АЭС

Таким образом, пожар на АЭС может привести к катастрофическим последствиям для целых регионов и стран.

Изучение причин и особенностей пожаров на АЭС на протяжении всего периода использования атомной энергетики позволяет 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, автоматические установки пожаротушения и системы охлаждения реактора, следовательно, противопожарная защита должна обеспечиваться пассивными мерами, повышению эффективности которых посвящена монография [134].

Государственная политика обеспечения безопасности населения и объектов топливно-энергетического комплекса должна базироваться прежде всего на профилактике возможных проявлений аварий, чрезвычайных ситуаций и экологических катастроф, не ограничиваясь ликвидацией их последствий, на что, как правило, требуются усилия и средства, во много раз превышающие первоначально затраты на мероприятия по предотвращению негативных последствий этих процессов.

1.2 Анализ системы пассивной противопожарной защиты АЭС с ВВЭР

Целью создания системы обеспечения пожарной безопасности АЭС является предотвращение пожара, обеспечение безопасного останова и расхолаживания реакторной установки при пожаре, обеспечение радиационной безопасности персонала, населения и окружающей среды, защита людей и имущества при пожаре [79, 177].

Система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты включает в себя систему предотвращения пожара, систему противопожарной защиты, комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

В соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации: № 116-ФЗ [208], № 384-ФЗ [209], №184-ФЗ [211], № 69-ФЗ [212], СП 8.13130.2009 [186], СП 13.13130.2009 [177], а так же руководящих документов [171-173]

атомная станция удовлетворяет требованиям пожарной безопасности, если:

- радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду в случае пожара не приведет к превышению установленных доз облучения персонала и населения, нормативов по выбросам и сбросам, содержанию радиоактивных веществ в окружающей среде;

- реализована защита персонала от воздействия опасных факторов пожара.

Класс функциональной пожарной опасности зданий, сооружений и пожарных отсеков – классификационная характеристика зданий, сооружений и пожарных отсеков, определяемая назначением и особенностями эксплуатации указанных зданий, сооружений и пожарных отсеков, в том числе особенностями осуществления в указанных зданиях, сооружениях и пожарных отсеках технологических процессов производства [177, 180, 181, 184-186], определяется в соответствии со статьей 32 Федерального закона № 123-ФЗ [210].

Степень огнестойкости здания определяется огнестойкостью его строительных конструкций и отражает сопротивляемость воздействию пожара. Степень огнестойкости зданий назначается в зависимости от категории здания по пожарной опасности, высоты здания, этажности, площади этажа, классов конструктивной и функциональной пожарной опасности, с учетом категории сейсмостойкости и категории по условиям их ответственности за радиационную и ядерную безопасность. Основными нормативными документами, на базе которых определяется степень огнестойкости здания, являются статья 87 Федерального закона № 123-ФЗ [210], СП 2.13130 [181], СП 4.13130.2013 [182], СП 5.13130.2009 [184].

Например, на Ленинградской АЭС-2 высоты здания реактора (69,500 м) и здания управления (37,100 м) превышают допустимое нормативное значение 36 метров, как для зданий категории пожарной опасности В, имеющих помещения категории В1, занимающие площадь более половины площади этажа, I-ой степени огнестойкости, класса конструктивной пожарной опасности С0 (в соответствии с примечанием к таблице 6.1 СП 2.13130.2012 [181] максимальная высота 48 метров должна быть снижена на 25%, то есть не должна превышать 36 метров). Высота этих зданий обусловлена технологическим процессом и габаритами

оборудования, расположенного в нем [114]. Нормативные требования для таких зданий отсутствуют, поэтому принимают дополнительные противопожарные мероприятия, например:

1. Здания «ядерного острова» Ленинградской АЭС-2, сблокированные непосредственно вокруг здания реактора (реакторное, паровой камеры, безопасности, вспомогательный корпус, управления, хранения топлива и отходов, ядерного обслуживания), одинаковые по степени огнестойкости, категории пожарной опасности, классу функциональной пожарной опасности и классу конструктивной пожарной опасности, выделяются противопожарными стенами 1 типа с пределом огнестойкости не ниже REI 150 в отдельные пожарные отсеки площадью не более 3000 м² каждый, и приняты не ниже 1 степени огнестойкости [81, 161-164].

2. Пожарные отсеки разделены на пожарные зоны с пределом огнестойкости границ пожарных зон не ниже REI 90 [81, 161-164] с установкой в ограждающих конструкциях границ пожарных зон противопожарных дверей и уплотнений коммуникационных проходов с таким же пределом огнестойкости. Предусматривается контроль закрытого состояния указанных дверей и положения противопожарных клапанов, установленных в ограждающих конструкциях границ пожарных зон, с вынесением соответствующих сигналов на БПУ, РПУ через систему контроля и управления противопожарной защиты (СКУПЗ).

3. Все элементы границ пожарных зон (строительные конструкции границ пожарных зон и уплотнения проемов в них) и другие элементы пассивной противопожарной защиты пожарных зон отнесены к элементам, важным для безопасности АЭС.

Категории помещений основных зданий АЭС по взрывопожарной и пожарной опасности относят к В1-В4 и Д, степень огнестойкости зданий I, II; классы их конструктивной опасности С0 и функциональной опасности Ф 5.1, Ф5.2, Ф 4.3.

Основную пожарную опасность помещений и зданий составляют:

— 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 дизельных электростанций;
- масла, применяемые в системах турбоустановки, трансформаторах, системах смазки насосного оборудования и грузоподъемного оборудования;
- изоляция силовых и контрольных электрических кабелей;
- горючие материалы, содержащиеся в электротехническом оборудовании и средствах автоматики;
- горючие материалы фильтровальных установок;
- горючие радиоактивные отходы [81].

Пожар должен рассматриваться как исходное событие (зависимый отказ, являющийся следствием другого исходного события), в результате которого возможен выход из строя всего оборудования, расположенного в помещении, где возник этот пожар, что следует рассматривать как единичный отказ по общей причине по отношению к исходному событию [8].

На АЭС, в соответствии с требованиями СП 13.13130.2009 [177] и «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15) [207], а также [199] одновременно рассматривается возникновение только одного пожара.

Комплекс противопожарных мероприятий при пожарах должен обеспечивать: целостность строительных конструкций, выделенных ограждающими конструкциями пожарных зон; работоспособность контрольно-измерительных приборов, электрических кабелей и другого оборудования, важного для безопасности, расположенного в помещениях, как не охваченных пожаром, так и в помещении пожара если в нем присутствуют два и более каналов СБ, в течение времени необходимого для приведения реакторной установки в безопасное состояние; безопасность персонала станции.

Локализация пожара предполагает, что в ходе пожара могут сгореть все горючие материалы, находящиеся в пожарной зоне, при этом огнестойкие ограждающие конструкции пожарной зоны (или безопасные расстояния) обеспечат локализацию пожара до полного его затухания [81]. Локализация пожара исключает возможность распространения пожара на другие пожарные

зоны через вентиляционные системы, общие дренажные системы, взаимосвязанную электросеть и другие общие коммуникации [8].

Таким образом, необходимо проанализировать пожарную опасность помещений, входящих в пожарные зоны, определить требования к минимальным пределам огнестойкости границ пожарных зон и безопасным расстояниям между пожароопасными элементами различных каналов систем безопасности, обосновать возможность обеспечения их пожарной безопасности функционирования с помощью пассивной защиты [81].

В соответствии с требованиями СП 13.13130 [177] для обеспечения пожарной безопасности АЭС пассивный принцип действия систем и элементов противопожарной защиты является основным. Поэтому противопожарная защита строится на основе локализации пожара в пределах пожарной зоны очага пожара. При этом активные системы пожаротушения в расчет не принимаются.

СППЗ пожарных зон предотвращает распространение ОФП из пожарной зоны, где возник пожар, в смежные зоны. При этом рассматривается полное свободное развитие пожара без учета воздействия на пожар систем пожаротушения, за исключением пассивных устройств самотушения проливов горючих жидкостей.

Элементы СППЗ пожарных зон должны быть способны выполнять свои функции с учетом воздействий природных явлений, техногенных событий, возможных механических, тепловых, химических и прочих воздействий проектных аварий.

Ограждающие конструкции зон могут одновременно являться несущими элементами здания, в связи с чем, их предел огнестойкости должен устанавливаться также не ниже указанного в таблице № 21 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [210] для соответствующей степени огнестойкости здания.

Конструктивная огнезащита строительных конструкций, применяемая в случаях, когда огнестойкости основных строительных конструкций не достаточно, выбирается из материалов, сертифицированных в области пожарной

безопасности. При этом требуемая огнестойкость обеспечивается совместной работой строительной конструкции и конструктивной огнезащиты.

Обоснование минимального предела огнестойкости границ пожарных зон необходимо проводить с учетом: новых материалов (НГ кабели); уникальных объемно-планировочных решений («ядерный остров» на Ленинградской АЭС-2 или блочная компоновка зданий АЭС); материалов ограждающих конструкций (ж/б конструкции с различной глубиной залегания арматуры, различие в физических свойствах бетона, использование не ж/б ограждающих конструкций - сэндвич-панели здания обращения с твердыми радиоактивными отходами с очень низким уровнем активности АЭС «Аккую» [75]). Также токсичность новых материалов при пожаре необходимо учитывать при расчете выполнения условия безопасной эвакуации персонала и выборе средств индивидуальной защиты.

Исследования, проведенные Пуцевым Д.И. [161-164] относятся к проекту «АЭС-91», тогда как в настоящее время действует проект «АЭС-2006», характеризующийся системой пассивной противопожарной защиты,

Таким образом, в состав СППЗ пожарных зон входят следующие элементы:

- ограждающие конструкции границ пожарных зон (строительные конструкции стен и перекрытий);
- противопожарные двери и люки;
- конструктивная огнезащита строительных конструкций, кабельных коробов, каналов и др. оборудования;
- оборудование локализации проливов горючих жидкостей (пассивные устройства самотушения проливов);
- противопожарные клапаны, устанавливаемые на воздуховодах при пересечении ими ограждающих конструкций помещений, являющихся границами пожарных зон;
- уплотнения коммуникационных проходов через ограждающие конструкции границ пожарных зон;
- противопожарные разрывы;

Активные элементы системы – электроприводы противопожарных клапанов, устанавливаемых на воздуховодах при проходе их через стены и

перекрытия, являющиеся границами пожарных зон.

Конструктивная огнезащита кабельных коробов, каналов и другого оборудования пожарных зон принимается с пределом огнестойкости не менее RI 90 и выбирается из материалов, сертифицированных в области пожарной безопасности. При этом опорные конструкции коробов выполняются с пределом огнестойкости не ниже R 90. Для сохранения работоспособности кабелей каналов безопасности при их расположении в одной пожарной зоне не достаточно сохранения их целостности при пожаре. При нагревании кабелей при пожаре выше их критических рабочих температур может произойти короткое замыкание или искажение передаваемого сигнала.

Кабели системы безопасности АЭС, приводящие реакторную установку в безопасное состояние, должны сохранять работоспособность на протяжении всего времени этого процесса. Поэтому важным моментом при выборе характеристик систем, выполняющих функции безопасности, является учет требуемой продолжительности работы этих систем. 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 быть не менее 72 часов [16]

В монографии «Пожарная безопасность электроустановок» [191] Г. И. Смелков пишет о необходимости рассматривать понятие «огнестойкость кабеля» как его работоспособность в условиях пожара.

Однако методики определения работоспособности силовых и сигнальных кабелей в условиях реального температурного пожара на АЭС с учетом сохранения ими требуемых характеристик (частота, амплитуда, фаза передаваемого сигнала, электрическое сопротивление и емкость) до настоящего времени не было представлено.

Работоспособность кабельной продукции проверяют в соответствии ГОСТ Р 53316 – 2021 «Электропроводки. Сохранение работоспособности в условиях стандартного температурного режима пожара. Методы испытаний» п. 4.3.1 [34].

В процессе испытания в испытательной установке должен быть создан стандартный температурный режим [36]. Температура при «стандартном пожаре» менее чем за 30 с достигает 200°C и сразу инициирует вспучивание огнезащитного состава, защищающего кабель. Так же работоспособность кабельной продукции проверяют в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60331-21-2003 [35] воздействием пламени с температурой выше 750°C . Такая высокая температура сразу инициирует вспучивание огнезащитного состава, защищающего кабель. Для проверки работоспособности кабельной продукции с огнезащитным покрытием используют нормативный документ [33].

Однако при реальном режиме пожара температура газовой среды помещения может нарастать медленно. Как показано в работе [78, 109, 234] и главе 3 диссертационного исследования, в этом случае может не произойти вспучивание состава, что приводит к терморазложению материала изоляции кабелей и последующему короткому замыканию.

В случаях реальных режимов пожара зависимость температуры в помещении, влияющей на нагрев изоляции кабелей, существенно отличается от соответствующих зависимостей при различных стандартных режимах пожара. Поэтому начало деструкции изоляции может произойти до начала вспучивания покрытия.

Кроме того, в стандартной установке изучается только возникновение короткого замыкания без измерения амплитуды, фазы, частоты и формы сигнала, поступающего из испытуемого образца провода, что является необходимым для оценки прохождения сигнала по сигнальным кабелям.

В стандартных испытаниях не проводилась оценка влияния температуры нагреваемой окружающей среды на электрические параметры проводов и кабелей, такие как, удельное сопротивление, индуктивность и емкость.

Поэтому необходима разработка экспериментальной установки, позволяющей плавно изменять температуру окружающего кабель воздуха.

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 в гермзоне проводится за счет использования имеющихся на АЭС с РУ ВВЭР-1000 запасов воды, которые находятся в деаэраторах. В ИБРАЭ РАН проведены экспериментальные и теоретические исследования физических аспектов процессов горения и детонации, исследования процессов 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 [20].

Аварии с течами теплоносителя первого контура, сопровождающиеся наибольшими выбросами водорода в помещения ЗЛА, исследованы в ФГУП «Атомэнергопроект» [101], ИПБ ЯЭ РНЦ «Курчатовский Институт» [45] и ФГУП ОКБ «Гидропресс» [68, 103].

Распространение, горение и детонация водородно-воздушной смеси в машинных залах рассмотрены в работах Солдатов Г.Е. и Голодновой О.С. [195].

Технологическая схема пассивной системы удаления водорода представляет собой распределение рекомбинаторов по помещениям зоны локализации аварии. Состав и производительность технологических групп, места установки отдельных рекомбинаторов выбраны на основании результатов анализа распространения, накопления и возможных режимов горения водорода при течи теплоносителя из первого контура при проектной аварии определены в работе Института «Атомэнергопроект» (Москва) [101], а так же в ГНЦ ФЭИ (Обнинск) [12].

С. Г. Цариченко разработал комплекс новых, более точных и универсальных инженерных методов расчета предельных условий дефлаграционного горения предварительно перемешанных водородосодержащих смесей при различных начальных параметрах среды. С.Г. Цариченко, Ю.Н. Шебеко, А.Я. Корольченко провели численное моделирование распространения детонационной среды в газовом слое с детальным учетом химической кинетики, а так же рассчитали концентрационные пределы детонации в трубах для смесей водород-воздух-инертный газ [53, 215, 216].

При этом, образование взрывопожароопасной водородно-воздушной смеси, не предусмотренной технологическим процессом при безопасном останове и расхолаживании реакторной установки, не было исследовано. Расположение, количество и технические характеристики каталитических рекомбинаторов водорода должны быть выбраны с учетом возможного образования взрывопожароопасной водородно-воздушной смеси при натекании водорода в гермзону реакторного здания при приведении реакторной установки в безопасное состояние.

Таким образом, выбор характеристик элементов СППЗ требует научного обоснования с учетом особенностей объемно-планировочных и конструктивных решений и технологического процесса для каждой АЭС с ВВЭР.

1.3 Современные методы математического моделирования для расчета динамики опасных факторов пожара в помещениях АЭС с ВВЭР

Определение динамики процесса развития пожара в помещениях АЭС может быть выполнено с использованием натурного эксперимента или математического моделирования развития пожара в помещении. Сложность натурного моделирования для определения динамики ОФП в помещении заключается в необходимости создания модели в натуральную величину. Подобие термодинамических процессов должно удовлетворять теории подобия [72].

Выполнить условия подобия для модели меньшего размера, чем реальное помещение, не представляется возможным поскольку:

- в соответствии с теорией подобия должно соблюдаться геометрическое подобие; расположение проемов и горючего материала должно быть соответственным;

- в соответствии со второй теоремой подобия решение задачи о теплоотдаче при пожаре должно быть представлено в виде критериальной зависимости;

– площадь горючей нагрузки определяет режим течения (турбулентный или ламинарный), а также режим пожара (пожар, регулированный нагрузкой, или пожар, регулируемый вентиляцией) [67];

– в соответствии с первой теоремой подобия у подобных теплофизических процессов все одноименные числа подобия соответственно равны друг другу.

Невозможно обеспечить, например, равенства чисел Грасгоффа для реального помещения и его модели. Так при изменении размера модели в десять раз, вязкость газовой среды в модели должна измениться соответственно в $10^{1,5}$ раза, что физически невозможно для газовой среды.

Таким образом, создание натурной модели помещения, удовлетворяющей теории подобия, с размерами, существенно меньшими размеров реального помещения, невозможно.

Учитывая уникальные объемно-планировочные решения зданий и помещений АЭС, развитые вертикальные пространства, большое количество вертикальных и горизонтальных связей, необходимо применять математическое моделирование развития пожара в помещении.

Математические модели пожара позволяют спрогнозировать изменение во времени параметров состояния газовой среды в помещении, а также температуры строительных конструкций этого помещения и различных элементов технологического оборудования.

Современные математические модели расчета динамики ОФП при пожаре в помещении можно разделить на три группы, различающиеся по степени детализации термогазодинамической картины пожара [65]:

- интегральные;
- зонные;
- полевые (дифференциальные).

Основные уравнения каждой из моделей являются математическими выражениями основных законов физики – законы сохранения массы, импульса и энергии.

В наиболее простых в математическом описании интегральных моделях

искомыми параметрами являются среднеобъемные параметры газовой среды помещения, средние температуры ограждающих конструкций и параметры тепломассообмена через открытые проемы.

Основным достоинством интегральных моделей является возможность проведения на ЭВМ быстрого расчета динамики ОФП. Однако область корректного применения вышеуказанной модели до сих пор является до конца нерешенной проблемой [158].

Кроме того, существует аналитическое решение системы уравнений интегральной модели, которое широко используется при решении практических задач пожарной безопасности и вошло в нормативные документы (Методика определения расчетных величин пожарных рисков [123], ГОСТ 12.1.004–91 [28], СП 11.13130.2009, приложение А (рекомендуемое) [179]). Однако область достоверного применения аналитических формул ограничена существенными упрощениями термогазодинамической картины пожара.

В зонных моделях помещение разбивается на отдельные зоны, в которых для расчета тепломассообмена используются соответствующие уравнения законов сохранения. Искомыми параметрами являются среднезонные величины характеристик газовой среды помещения, тепломассообмена через открытые проемы и теплоотвода в ограждающие конструкции [65].

Зонные модели позволяют устранить ряд недостатков, присущих интегральным моделям [158].

Однако, в случае сложной термогазодинамической картины пожара (например, в многосвязных пространствах) основные предположения зонного подхода (равномерно прогретый припотолочный слой и т.д.) не соответствуют реальным условиям и приведут к значительной погрешности расчета.

Наиболее подробное описание процессов тепломассообмена при пожаре в помещении дают полевые (дифференциальные) модели, в которых искомыми параметрами являются поля параметров газовой среды и частиц дыма по всему объему помещения в каждый момент времени развития пожара [65].

Полевые модели являются наиболее сложными в математическом

выражении. В отличие от интегральных и зонных моделей, состоящих из систем обыкновенных дифференциальных уравнений, система уравнений полевой модели состоит из трехмерных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных [158].

В дифференциальных моделях появляется необходимость нахождения параметров сложнейших физических процессов, таких как, турбулентный теплообмен, лучистый теплоперенос в оптически неоднородной двухфазной газовой среде. В сложных термогазодинамических условиях развития пожара точность расчета величин ОФП зависит от адекватности используемых, например, моделей турбулентности.

Кроме того, практически во всех методах расчета используется модель непрерывного односкоростного и однотемпературного континиума (локальные и средние скорости и температуры газовой среды и частиц дыма одинаковы). Обоснование такого подхода требует проведения дополнительных исследований.

Использование полевой модели в виде программных продуктов требует больших затрат времени на ввод исходных данных, проведение расчета на ЭВМ и анализ полученных результатов.

Непрерывное развитие полевых моделей позволяет повысить их точность. Однако это не отменяет использование интегральных и зонных моделей, которые позволяют проводить быстрый многовариантный расчет динамики ОФП с достаточной точностью, основанной на полуэмпирических моделях процесса терморазложения горючего материала, теплоотвода в ограждающие конструкции помещения и теплообмена через открытые проемы.

Используемые в настоящее время специализированные программные продукты, созданные на основе полевой модели для условий пожара (например, FDS, PHOENICS, ANSYS, STAR-CD и др.), требуют валидации на экспериментальных данных, которые близки к характеристикам рассматриваемого помещения по пожарной нагрузке, объемно-планировочным и конструктивным решениям.

Необходимо отметить, что основные дифференциальные уравнения всех

математических моделей пожара основаны на фундаментальных законах физики – законах сохранения массы, импульса и энергии. Например, дифференциальные уравнения интегральной модели пожара могут быть получены из соответствующих уравнений полевой модели, которые можно проинтегрировать по объему помещения. Поэтому результаты расчета величин ОФП должны иметь одинаковую степень достоверности. Однако большое количество дополнительных соотношений каждой модели, например, использование полуэмпирических формул расчета тепловых потоков, поступающих в ограждающие конструкции помещения, требует проведения валидации на экспериментальных данных.

Выбор математической модели расчета динамики пожара в помещениях АЭС будет определяться конкретной задачей.

Анализ литературных источников показал:

- для расчета пределов огнестойкости строительных конструкций можно использовать более простую интегральную модель;
- для расчета времени блокирования путей эвакуации необходимо применить полевую модель.

1.4 Особенности водородной безопасности АЭС с ВВЭР

Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции [119] устанавливают основные принципы взрывозащиты и требования к взрывозащите, реализуемые при проектировании и эксплуатации с целью предупреждения и ослабления проектных и запроектных аварий, сопровождающихся взрывом водородсодержащих смесей.

Переход дефлаграции в детонацию в большом замкнутом объеме обедненных водородно-воздушных смесей исследован в работе [236].

Закономерности образования взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в верхнюю часть помещения большого объема изучены достаточно широко [48]. Характерное время

выравнивания концентраций водорода по всему объему помещения при этом составляет порядка нескольких часов [48]. При натекании водорода в нижнюю часть помещения это время составляет порядка нескольких минут, что описывается в работе [48] без приведения каких-либо экспериментальных данных. Это связано со сложностью точного измерения быстроизменяющихся концентраций этого газа [24, 189]. Поэтому актуальной задачей является изучение закономерностей образования локальных взрыво- и пожароопасных концентраций при натекании газа в нижнюю часть помещения [137].

В случаях проектных и запроектных аварий в зоне локализации аварии (ЗЛА) для обеспечения водородной взрывобезопасности предусмотрена система контроля и удаления водорода из защитной оболочки, которая предотвращает образование взрывоопасных водородно-воздушных смесей в ЗЛА, поддерживая объемную концентрацию водорода на безопасном уровне. При этом вышеуказанная система разделена на подсистему удаления водорода из защитной оболочки и подсистему контроля концентрации водорода, являющуюся пассивной системой безопасности.

Система контроля концентрации водорода обеспечивает непрерывный контроль концентрации водорода в ЗЛА во всех режимах эксплуатации АЭС, а также во время проектных и запроектных аварий в возможных местах его скопления с представлением информации на БПУ и РПУ. Это позволяет в случае проектной аварии при превышении в контрольных точках заданного в проекте значения концентрации водорода формировать соответствующие сигналы на средства сигнализации расположенные на БПУ и РПУ.

При запроектной аварии система передает на БПУ и РПУ информацию о наличии либо отсутствии горючих смесей и формирует соответствующие сигналы на средства сигнализации, расположенные на БПУ и РПУ для каждого из возможных режимов горения (медленное горение, быстрое горение, детонация). Полученная информация помогает оператору предотвратить режимы горения водорода (быстрое горение, детонация), которые могут вызвать нарушение целостности защитной оболочки.

Однако отсутствуют исследования по обоснованию минимального

концентрационного предела измерений датчиков водорода, что может привести к образованию пожаровзрывоопасных водородно-воздушных смесей внутри помещений, например, гермзоны. Особенную опасность представляют вышеуказанные смеси при аварийном отключении одной из активных систем водородной безопасности – удаления водорода при помощи вентиляции.

Анализ процессов распространения водорода, его накопления и возможных режимов горения водорода в помещениях позволяет определить количество точек контроля концентрации водорода. Поэтому необходимы математические модели по определению полей концентраций водорода при его натекании в объем помещения.

Наибольшие выбросы водорода происходят при авариях с течами теплоносителя первого контура. При этом источниками образования водорода в помещениях ЗЛА являются пароциркониевая реакция; выделение водорода, растворенного в теплоносителе; радиолиз теплоносителя в первом контуре; радиолиз воды в топливном бассейне; радиолиз воды в баках-приямках; разложение гидразина и аммиака; радиационное разложение полимерных лакокрасочных покрытий; коррозия металлических конструкций и покрытий [12, 16, 45, 101].

Во время приведения реакторной установки в безопасное состояние при проектных авариях может произойти выделение водорода, растворенного в теплоносителе; радиолиз теплоносителя в первом контуре; радиолиз воды в топливном бассейне; радиолиз воды в баках-приямках [12, 16, 45, 101].

Таким образом, может происходить недооценка опасности образования водородно-воздушных смесей при приведении реакторной установки в безопасное состояние.

При анализе образования пожаровзрывоопасных водородно-воздушных смесей необходимо знать массу и время натекания водорода в помещение.

При проектных авариях за счет пароциркониевой реакции выделяется приблизительно 10 кг водорода за первые 25 с аварии [101].

Оценка суммарной массы натекающего в помещения водорода из всех

источников при максимальной проектной аварии за 24 часа и в течение 30 суток послеаварийного периода показала значение приблизительно 100 кг [101].

Данные по массе натекающего водорода, полученные в [101], были использованы для проведения численного эксперимента (глава 5 диссертационного исследования) по определению положения пожаровзрывоопасных зон при натекании водорода в гермзону реакторного здания. При проведении численного эксперимента предполагали постепенное натекание водорода в помещение гермзоны, в отличие от условий проектной аварии, предполагающей единовременное поступление основной массы водорода в объем гермзоны.

При запроектных авариях образуются большие объемы водорода в помещениях, что вызвано интенсивными пароциркониевой и паростальной реакциями. Запроектные аварии можно разделить по массе теплоносителя и водорода, поступающих в помещения ЗЛА, на две основных группы:

- аварии с малой течью характеризуются продолжительным выходом теплоносителя в течь при небольшой интенсивности выброса и наибольшими интегральными выходами водорода (по предварительным оценкам суммарный выход водорода составляет 800 - 1000 кг) [101];

- аварии с большой течью теплоносителя отличаются большей интенсивностью выброса на отдельных временных интервалах и меньшими интегральными выходами водорода; по предварительным оценкам суммарный выход водорода составляет 250 - 500 кг [101].

Система удаления водорода из защитной оболочки является пассивной системой безопасности. В составе системы отсутствуют активные функциональные элементы, требующие управления и подвода энергии от внешних источников. Высокую степень надежности вышеуказанной системы обеспечивает пассивный принцип действия, а также независимость функциональных элементов системы удаления водорода от других систем энергоблока и друг от друга [62].

Система удаления водорода обеспечивает:

- в случае проектных аварий: поддержание концентраций водорода в смеси с водяным паром и воздухом меньше нижнего концентрационного предела распространения пламени в помещениях ЗЛА;

- при запроектных авариях: поддержание концентрации водорода в концентрационных пределах, исключающих детонацию, включая локальную, и возникновение быстрого горения в больших объемах, которые соизмеримы с размерами основных помещений ЗЛА.

В состав системы входит 44 пассивных автокаталитических рекомбинатора водорода. Моделирование режима запуска пассивного автокаталитического рекомбинатора водорода показано в [255]. В зависимости от расположения и производительности рекомбинаторы объединены в восемь технологических групп.

Анализ результатов расчета распространения, накопления и возможных режимов горения водорода в помещениях ЗЛА позволяет выбрать состав и производительность технологических групп, а также места установки отдельных рекомбинаторов. Это определяет необходимость разработки математических моделей по определению локальных пожаровзрывоопасных зон при натекании водорода в объем гермзоны.

Для того чтобы обеспечить системе максимальную эффективность, рекомбинаторы размещают равномерно в помещениях ЗЛА в местах, где концентрация водорода во время проектной или запроектной аварии может достигать наибольшей величины. Однако при приведении реакторной установки в безопасное состояние натекание водорода в гермзону при определении мест размещения рекомбинаторов не учитывается.

Проблема водородной безопасности АЭС сохраняет свою актуальность, что показала, например, авария на АЭС «Фукусима Дайичи» в марте 2011 г., которая сопровождалась взрывами водорода с последующим выбросом радионуклидов в атмосферу [134].

В большинстве работ, посвященных водородной безопасности, рассматривается распространение, горение и детонация водородно-

паровоздушной смеси [20].

В ИБРАЭ РАН [20] проводятся экспериментальные и теоретические исследования процессов горения, детонации и стратификации водородно-паровоздушных смесей в присутствии мелкодисперсных капель воды. В качестве основных результатов этих исследований можно отметить: проведение трехмерного компьютерного моделирования стратификации водородно-паровоздушной смеси под защитной оболочкой АЭС; определение критериев обоснования водородной безопасности АЭС с реакторными установками с водным теплоносителем (ВВЭР, PWR, BWR); получение количественных оценок параметров системы предотвращения горения и детонации водорода с учетом конкретных технических характеристик оборудования АЭС с РУ ВВЭР-1000; разработку методики подавления горения и детонации водорода при аварии РУ ВВЭР-1000 за счет разбавления водорода паром и включения экспериментально выявленного механизма подавления горения вследствие образования мелкодисперсных капель воды. Однако, помимо этих процессов возможно распространение, горение и детонация водородно-воздушной смеси в отсутствие пара и капель воды [1-3, 187].

В литературе, посвященной обеспечению водородной безопасности на АЭС, как правило, предложены варианты активной защиты от горения и взрыва водорода. Использование имеющихся на АЭС с РУ ВВЭР-1000 запасов воды, которые находятся в деаэраторах при температуре 165°C и давлении 0,65 МПа, позволяет прекратить горение и детонацию водорода при аварии в гермоне [20, 104].

Система удаления водорода из защитной оболочки функционально независима от других систем АЭС. Элементы этой системы также функционально независимы друг от друга. Основные функциональные элементы - пассивные автокаталитические рекомбинаторы водорода – включаются в работу в случае образования повышенной концентрации водорода 2% об. в помещении и работают до снижения концентрации водорода до безопасного значения.

Для обеспечения максимальной эффективности работы рекомбинаторы устанавливаются в местах, где концентрация водорода во время аварии может

достигать наибольшего значения, а также на путях перемещения парогазовой среды, полученных комплексом расчетов КУПОЛ-М, базовые модули которого содержат модели, описывающие теплогидравлические, термодинамические и физикохимические процессы в ЗЛА с учетом функционирования системы каталитического удаления водорода из ЗЛА [12].

Большинство находящихся на АЭС турбогенераторов имеют водородное охлаждение, поэтому необходимо предусмотреть меры пожарной и водородной безопасности в машинном зале. На сегодняшний день известны десятки происшедших крупных пожаров в машинных залах тепловых и атомных станций, в том числе с обрушением крыш машинных залов, что приводило к выходу из строя технологического оборудования и значительным материальным потерям [195, 232].

Использование пассивных каталитических рекомбинаторов водорода, их преимущества и недостатки описаны в [62, 63, 84, 255].

Производительность системы удаления водорода определяется из условия выделения в помещениях ЗЛА в случае тяжелой аварии в течение 45 часов до 1000 кг водорода. За это время происходит внутрикорпусная стадия тяжелой аварии, которая сопровождается максимальной скоростью выхода водорода [101].

Суммарная производительность системы при давлении 0,15 МПа и объемной концентрации водорода 4% составляет приблизительно 188,48 килограмм водорода в час [101].

Рекомбинаторы достаточно равномерно распределены по помещениям ЗЛА. Исключение составляют помещения парогенераторов. Расположение концентрационных датчиков системы контроля водорода и каталитических рекомбинаторов системы удаления водорода Ленинградской АЭС-2 приведены на рисунке 1.3.

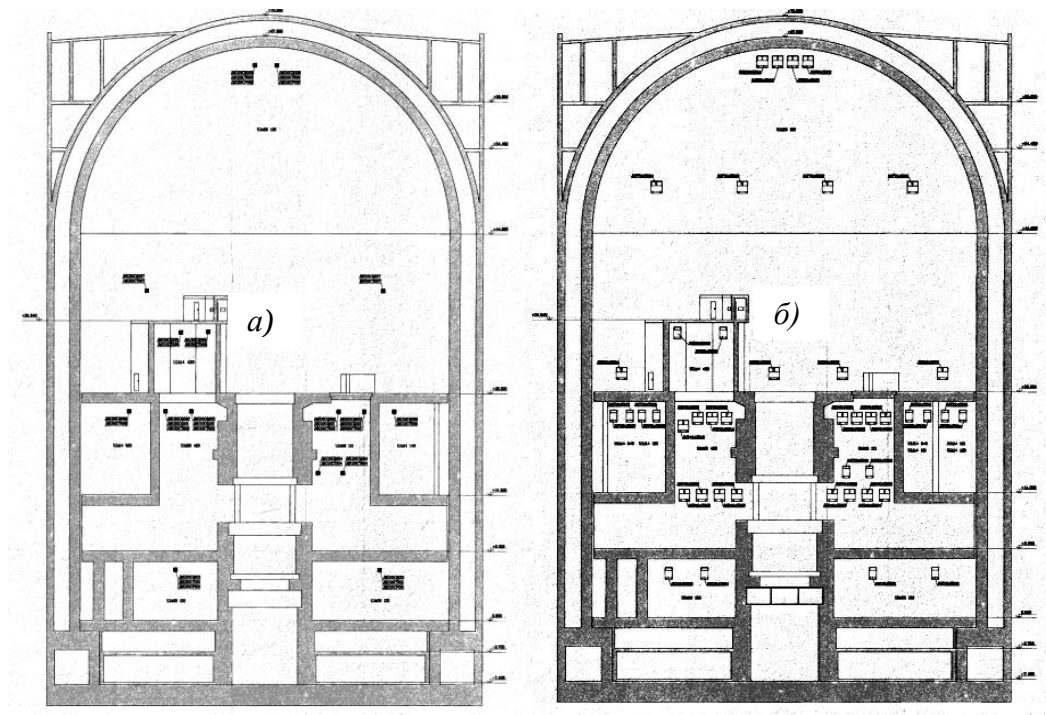


Рисунок 1.3 – Расположение концентрационных датчиков (а) и каталитических рекомбинаторов водорода (б) ЛАЭС-2

В помещениях парогенераторов установлено наибольшее по сравнению с остальными помещениями количество рекомбинаторов. Это связано с тем, что в этих помещениях при аварии с течью теплоносителя концентрация водорода достигает максимальных значений. Кроме того, высока вероятность выхода из строя рекомбинаторов под воздействием струй и летящих предметов.

В составе системы удаления водорода из защитной оболочки отсутствуют активные функциональные элементы, требующие внешнего контроля и управления. Пассивный принцип действия, а также независимость функциональных элементов системы удаления водорода от других систем энергоблока и друг от друга обеспечивают ей высокую степень надежности.

В режиме нормальной эксплуатации источниками водорода в помещениях являются неорганизованные протечки теплоносителя первого контура, радиолиз воды в топливном бассейне и радиолиз воды в баках-приямках.

Вентиляционная система осуществляет быструю продувку объема защитной

оболочки, не позволяя скопиться в зоне локализации аварии значительному количеству водорода [62, 63, 84, 200, 255].

Приведение реакторной установки в безопасное состояние при холодном или горячем останове может сопровождаться увеличением натекания водорода в гермзону в связи с падением давления в первом контуре и, как следствие снижением растворимости водорода в воде первого контура теплоносителя.

Система контроля концентрации водорода в ЗЛА должна работать при нормальной эксплуатации и в условиях проектной и запроектной аварии. В помещениях, расположенных за пределами защитной оболочки, в которых размещено оборудование системы контроля концентрации водорода, должны поддерживаться параметры окружающей среды, необходимые для работы оборудования.

Кроме того, работа оборудования системы контроля концентрации водорода, расположенного за пределами защитной оболочки, должна обеспечиваться работой системы вентиляции и охлаждения помещений, которая должна поддерживать параметры окружающей среды, необходимые для работы оборудования системы контроля концентрации водорода.

К компоновке и взаимному расположению элементов системы контроля концентрации водорода должны предъявляться следующие требования:

- точки контроля должны размещаться внутри защитной оболочки;
- оборудование разных измерительных каналов, расположенное за пределами защитной оболочки, должно размещаться в отдельных помещениях, изолированных огнестойкими физическими барьерами;
- точки контроля должны быть равномерно распределены по помещениям ЗЛА, при выборе мест размещения используются результаты анализа распространения, накопления и возможных режимов горения водорода;
- отказы в системах нормальной эксплуатации не должны приводить к выходу из строя оборудования системы;
- единичные отказы находящихся в составе измерительного канала системы средств измерения не должны приводить к потере канала измерения в

целом;

- расположенное в помещениях ЗЛА оборудование системы должно быть защищено от летящих предметов и воздействия струй теплоносителя, возникающих при разрывах трубопроводов;

- размещение точек контроля и трассировка кабельных линий разных измерительных каналов, по возможности, должны быть выполнены на максимальном удалении друг от друга для исключения их одновременного выхода из строя;

- к оборудованию системы расположенному в зоне локализации аварии и за пределами герметичной оболочки необходимо обеспечить доступ для обслуживания и ремонта [62, 63, 84, 200, 255].

В состав каждого канала системы контроля входит шесть газоанализаторов водорода, два газоанализатора водорода-кислорода, два датчика давления, восемь датчиков температуры среды и аппаратно-программный анализатор данных. При этом газоанализаторы водорода работают постоянно, во всех режимах функционирования АЭС, а газоанализаторы кислорода, включаются в работу автоматически по факту достижения концентрации водорода в 2 % об.

Пример расположения концентрационных датчиков и каталитических рекомбинаторов приведен на рисунке 1.3 для Ленинградской АЭС-2 (ЛАЭС-2).

Выходные сигналы от датчиков газоанализаторов водорода и кислорода транслируются по кабельным линиям связи через гермопроходки к измерительным блокам, расположенным за пределами гермзоны, в щитах управления.

Вторичные сигналы от измерительных блоков газоанализаторов водорода и кислорода, а также сигналы датчиков давления и температуры направляются в блоки аппаратно-программных анализаторов. Информация по концентрации водорода, кислорода, температуры и давлению в помещениях под герметичной оболочкой, полученная прямым измерением, и концентрации пара, полученная расчетным путем передается в блочную АСУ ТП.

На основании анализа отмеченных проблем для обеспечения водородной взрывобезопасности на данном этапе представляется актуальным решение

следующих задач: разработка критериев количественной оценки уровня взрывобезопасности пароводородновоздушных газовых смесей в герметичном ограждении с явным учетом их стратификации; разработка свода правил или рекомендаций по проектированию систем мониторинга и контроля водорода [62].

В заключении параграфа можно сделать вывод о необходимости проведения исследований по обоснованию минимального концентрационного предела измерений датчиков водорода, их количеству и расположению в объеме гермзоны.

Кроме того, необходимо провести исследования по определению локальных зон помещения, где концентрация водорода во время проектной или запроектной аварии максимальна, а так же может достигать наибольшего значения в случае приведения реакторной установки в безопасное состояние. Расположение рекомбинаторов в этих зонах позволит обеспечить системе удаления водорода максимальную эффективность.

Таким образом, необходимо:

- разработать математическую модель расчета размеров и параметров локальных взрывопожароопасных водородно-воздушных смесей, образующихся при натекании водорода при различных режимах в объем гермзоны АЭС при приведении реакторной установки в безопасное состояние (представлена в главе 5 диссертационного исследования);

- провести численные эксперименты и анализ полученных результатов по определению размеров и параметров локальных взрывопожароопасных водородно-воздушных смесей, образующихся при натекании водорода при различных режимах в объем гермзоны АЭС при приведении реакторной установки в безопасное состояние (приведены в главе 5 диссертационного исследования).

1.5 Выводы по первой главе

1. Проведенный анализ литературных источников и элементов пассивной противопожарной защиты современного проекта АЭС-2006 с водо-водяными реакторами позволил объединить вышеуказанные элементы в комплексную систему ППЗ, схема которой представлена на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Состав комплексной системы ППЗ АЭС с ВВЭР

2. Для разработки практических рекомендаций по повышению уровня ППЗ АЭС с ВВЭР предложено разработать и использовать комплекс методов и методик расчета основных параметров пассивных технологий ППЗ АЭС с ВВЭР, согласно схеме, приведенной на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Методы и методики расчета, необходимые для обоснования основных параметров пассивных технологий АЭС с ВВЭР

3. При математическом моделировании параметров систем ППЗ по проекту «АЭС-2006» для ВВЭР-1200, позволяющих выполнить безопасный останов и расхолаживание реакторной установки в условиях реального температурного режима пожара, необходимо учитывать новые виды пожарной нагрузки (НГ кабели), уникальные объемно-планировочные решения для каждой АЭС с ВВЭР, материалы ограждающих конструкций с учетом обработки огнезащитным составом, а также новые данные по токсичности НГ кабелей.

4. Необходима разработка методов математического моделирования работоспособности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального и стандартных температурных режимов пожара, в том числе с использованием вспучивающих огнезащитных составов.

5. Необходимо разработать экспериментальный метод и методику по исследованию работоспособности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС; создать экспериментальную установку, которая позволит плавно изменять температуру окружающего кабель воздуха в условиях реального температурного режима пожара, в том числе и с использованием вспучивающихся огнезащитных покрытий.

6. Необходимо получение экспериментальных данных по токсичности силовых и сигнальных НГ кабелей (содержащих антипирены), используемых на АЭС, в условиях реального температурного режима пожара, которые необходимы для обеспечения безопасной эвакуации персонала и выбора средств индивидуальной защиты для персонала, обеспечивающего безопасный останов реакторной установки.

7. Необходимо разработать методику, позволяющую исключить не предусмотренные технологическим процессом образования взрывопожароопасной водородно-воздушной смеси при натекании водорода в гермзону реакторного здания при приведении реакторной установки в безопасное состояние.

8. Необходимо проведение исследования по обоснованию минимального концентрационного предела измерений датчиков водорода, их количеству и

расположению в объеме гермзоны. Существующие методы расчета позволяют рассчитать последствия только тех проектных аварий, при которых происходит выход теплоносителя первого контура в объем гермзоны с горением и детонацией водорода при аварии.

9. Необходимо разрабатывать практические рекомендации по повышению уровня пассивной противопожарной защиты АЭС с ВВЭР для каждой АЭС с ВВЭР с использованием предложенных математических моделей.

ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПАССИВНОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ АЭС С ВВЭР, ПОЗВОЛЯЮЩЕЙ ВЫПОЛНИТЬ БЕЗОПАСНЫЙ ОСТАНОВ И РАСХОЛАЖИВАНИЕ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ПОЖАРЕ

2.1 Математические модели обоснования системы пассивной противопожарной защиты

2.1.1 Интегральная математическая модель

Интегральный метод расчета динамики ОФП основан на фундаментальных законах природы – законах сохранения массы, импульса и энергии.

Принципиальная схема тепломассообмена в помещении для интегральной модели имеет вид, показанный на рисунке 2.1 [65]. Тепловой поток от очага горения 5 отводится в ограждающие конструкции (Q_c , Q_w , Q_f – суммарные (конвекция и излучение) тепловые потоки, поступающие в потолок, стены и пол, Вт), а также в окружающую среду через проемы ($Q_{пр}$ – тепловой поток, излучаемый через открытые проемы наружу, Вт). Выше нейтральной плоскости 6 смесь горячих газов выходит наружу, ниже нее – наружный воздух поступает внутрь. Остальные обозначения на рисунке 2.1 следующие: 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; W_a , W_m – объемные расходы приточной вентиляции и дымоудаления, м³/с; $G_{ов}$ – массовый расход подачи огнетушащего вещества, кг/с.

Рассматриваем модификацию [158] интегральной модели. Отличие используемой модели от приведенной в [65] заключается в следующем:

- прогрев строительных конструкций помещения выполняется с использованием нестационарных двухмерных уравнений теплопроводности;
- распределение температуры по высоте помещения учитывается более полно [18].

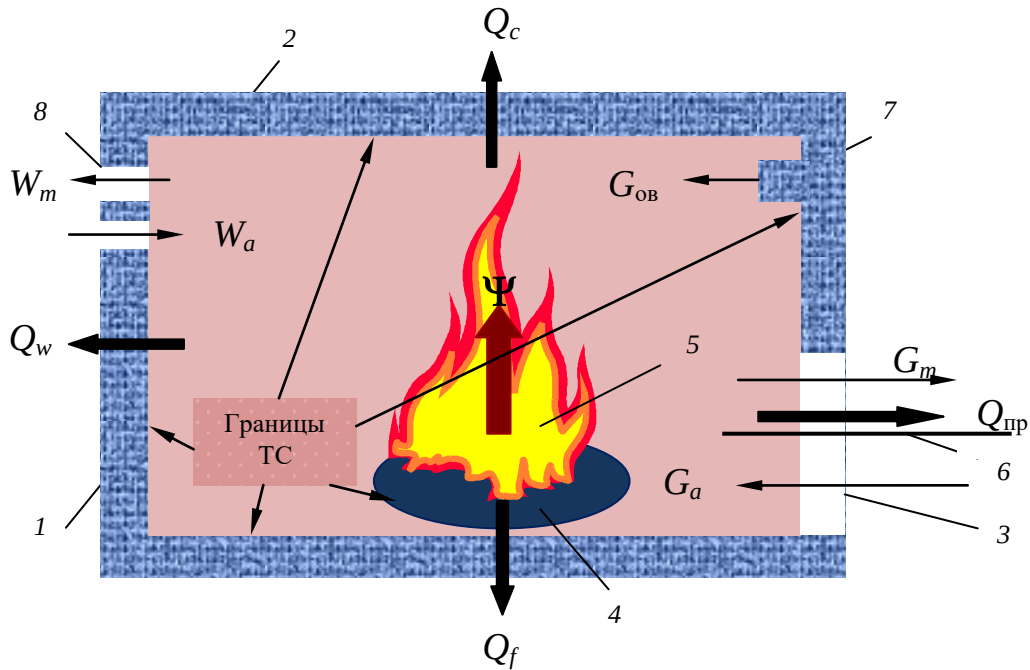


Рисунок 2.1– Схема расчета тепломассообмена в помещении:

1 – стены; 2 – перекрытие; 3 – открытый проем; 4 – горючий материал; 5 – очаг горения; 6 – нейтральная плоскость; 7 – система пожаротушения; 8 – механическое дымоудаление и приточная вентиляция

Основные уравнения модели, полученные на основе законов сохранения массы и энергии с учетом влияния систем противодымной и приточной вентиляции, следующие:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \Psi + G_a + \rho_a W_a - G_m - \rho_m W_m, \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} \left(\frac{p_m V}{k_m - 1} \right) = & \Psi \eta Q_{\text{н}}^{\text{п}} + c_{pa} T_a (G_a + \rho_a W_a) - \\ & - c_{pm} T_{m\text{пр}} (G_m + \rho_m W_m) - Q_s - Q_{\text{пр}}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$V \frac{d(X_{\text{O}_2 m} \rho_m)}{d\tau} = -\eta L_{\text{O}_2} \Psi + X_{\text{O}_2 a} (G_a + \rho_a W_a) - X_{\text{O}_2 m\text{пр}} (G_m + \rho_m W_m), \quad (2.3)$$

где τ – время от начала пожара, с; Ψ – скорость (массовая) газификации горючего вещества, кг/с; G_a , G_m – расходы (массовые) наружного воздуха и смеси продуктов горения и воздуха через проемы, кг/с; W_a , W_m – расходы (объемные)

противодымной и приточной вентиляции, $\text{м}^3/\text{с}$; V – объем рассматриваемого помещения, м^3 ; ρ_a – плотность атмосферного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_m – плотность (среднеобъемная) смеси газов в помещении; p_m – давление (среднеобъемное) в помещении, Па; k_m – показатель адиабаты смеси газов помещения; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – рабочая низшая теплота сгорания пожарной нагрузки Дж/кг, ; η – полнота горения; Q_s – тепловой (суммарный) поток, поступающий в стены, перекрытие и пол, Вт; $Q_{\text{пр}}$ – лучистый тепловой поток, проходящий через проемы наружу Вт; $T_{\text{мпр}} = a_T T_m$ – температура (средняя) смеси газов, выходящих наружу через открытые проемы, К; a_T – коэффициент, показывающий отличие средней температуры выходящих наружу смеси газов от температуры (среднеобъемной) газовой смеси в помещении; T_a – температура атмосферного воздуха, К; c_{pa} , c_{pm} – изобарные удельные теплоемкости воздуха и газовой смеси, Дж/(кг·К) ; L_{O_2} – коэффициент потребления кислорода, кг/кг; X_{O_2m} – массовая (среднеобъемная) концентрация кислорода в помещении; X_{O_2a} – массовая (среднеобъемная) концентрация кислорода в атмосферном воздухе; $X_{\text{O}_2\text{мпр}} = a_{\text{O}_2} X_{\text{O}_2m}$ – массовая (средняя) концентрация кислорода в смеси газов, выходящей наружу через открытые проемы; a_{O_2} – коэффициент, показывающий отличие концентрации (среднемассовой) кислорода в смеси выходящих наружу газов от ее среднеобъемной концентрации в газовой смеси помещения.

Мощность тепловыделения определяется из формулы [65]:

$$Q_{\text{пож}} = \eta \psi_{\text{уд}} Q_{\text{н}}^{\text{р}} F_{\text{г}}, \quad (2.4)$$

где $Q_{\text{пож}}$ – мощность тепловыделения, Вт; $\psi_{\text{уд}}$ – удельная массовая скорость газификации горючего вещества, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $F_{\text{г}}$ – площадь поверхности горения горючего вещества, м^2 .

Полнота сгорания определяется массовой концентрацией кислорода и в первом приближении определяется из формулы [65]:

$$\eta = \eta_0 (2\bar{X} - \bar{X}^2), \quad (2.5)$$

где η_0 – полнота сгорания в атмосферном воздухе; $\bar{X} = (X_{\text{O}_2m} - X_{\text{O}_2\text{min}}) / (X_{\text{O}_2a} - X_{\text{O}_2\text{min}})$; $X_{\text{O}_2\text{min}} = 0,14$ – максимальная концентрация (массовая) кислорода при прекращении пламенного горения.

Когда высота нейтральной плоскости находится в диапазоне $z_H < z^* < z_B$ («смешанный» режим газообмена), расход (массовый) смеси газов, выходящей наружу через проем, определяется по формуле [65]:

$$G_m = 2/3 \sqrt{2g\rho_m(\rho_a - \rho_m)} \xi b_{\text{пр}} (z_B - z^*)^{1,5}, \quad (2.6)$$

где ξ – коэффициент, учитывающий гидравлическое сопротивление открытого проема; g – ускорение свободного падения, м/с²; z – вертикальная координата, начало которой находится на уровне пола помещения, м; z_B, z_H – соответственно координаты верхнего и нижнего краев открытого проема помещения, м; z^* – высота плоскости равных давлений, м; $b_{\text{пр}}$ – ширина открытого проема, м.

В работе [158] представлены условия однозначности задачи (начальные, геометрические, физические и граничные) условия и метод численного решения дифференциальных уравнений.

2.1.2 Полевая математическая модель

Пожар, развивающийся в помещении, является сложным термогазодинамическим процессом [111], в течение которого происходит одновременное воздействие возмущающих течение факторов: неизотермичность; вдув на стенке (внутренняя деструктуризация материалов строительных конструкций и тепло- и массообменная защита конструкций вызывают поступление в помещение водяного пара и т.д.); лучистый теплоперенос; химические реакции; многофазность (газы + твердые мелкодисперсные частицы дыма + жидкость); кривизна и шероховатость поверхностей строительных конструкций; турбулентность; поперечный и продольный градиенты давления; переход ламинарного течения в турбулентный поток.

Термогазодинамическая картина пожара в помещении имеет следующие основные особенности:

- наибольшая разница давлений в различных частях помещения имеет порядок 2-20 Па (в случае отсутствия детонационного горения);

- скорость движения смеси газов в помещении мала по сравнению со скоростью звука (в случае отсутствия детонационного горения);
- тепловой режим в помещении определяется тепловыми эффектами химических реакций;
- процессы турбулентной диффузии необходимо учитывать.

Основные упрощения и допущения реальной физической картины пожара в помещении принимаем следующими:

- можно использовать равновесное уравнение состояния, так как локальное термодинамическое и химическое равновесие существует во всех частях помещения;
- смесь газов в помещении является идеальной в диапазонах изменения температур и давлений, характерных для дефлаграционного горения в помещении;
- используем односкоростную и однотемпературную модель динамики сплошных сред, пренебрегающую межфазным взаимодействием (температурный скачок и «скольжение» фаз друг относительно друга пренебрежимо малы), в которой локальные скорости и температуры компонентов смеси газов, твердых и жидких частиц равны друг другу в каждой точке помещения [85];
- химическая реакция горения рассматривается как одноступенчатая и необратимая;
- ионизация и диссоциация смеси газов при высоких температурах пренебрежимо мала;
- теплофизические свойства среды не подвержены влиянию турбулентных пульсаций;
- взаимное влияние турбулентности и лучистого потока пренебрежимо мало;
- удельная скорость газификации горючего вещества определяется на основе экспериментальных данных без учета обратного влияния пламенной зоны на скорость газификации;
- термо- и бародиффузия пренебрежимо мала.

Таким образом, смесь газов, находящихся в помещении, является

сжимаемым, вязким, теплопроводным идеальным газом.

Уравнения, лежащие в основе полевой модели расчета динамики ОФП, являются выражениями фундаментальных физических законов – законов сохранения энергии, массы и импульса. Запишем основные дифференциальные уравнения полевой модели в случае ортогональной системы координат. Координатную ось x направим вдоль длины помещения, ось y – параллельно ширине помещения и ось z – по высоте помещения.

Используемые в полевой модели основные дифференциальные уравнения [158], являющиеся нестационарными и трехмерными, имеют приведенный далее вид.

Уравнение неразрывности для смеси газов:

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho w_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w_z) = 0, \quad (2.7)$$

где ρ – плотность, кг/м^3 ; τ – время, с ; w_x, w_y, w_z (м/с) – проекции скорости на оси x, y и z соответственно.

Проекция уравнения движения на координатные оси:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right); \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_y}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right); \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_z}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - (\rho - \rho_o)g + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left((\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.10)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м})$; p – статическое давление, Па ; μ_t – коэффициент турбулентной вязкости, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м})$; ρ_o – плотность чистого воздуха, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Уравнение энергии в случае смеси газов можно записать в виде:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda + \lambda_{\tau} + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\lambda + \lambda_{\tau} + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\lambda + \lambda_{\tau} + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (2.11)$$

где T – локальная температура смеси газов, К; c_p – изобарная удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); λ – коэффициент молекулярной теплопроводности смеси газов, Вт/(м·К); λ_p (Вт/(м·К)) – коэффициент радиационной теплопроводности в смеси газов; λ_{τ} – коэффициент турбулентной теплопроводности в смеси газов, Вт/(м·К); q_v – мощность внутренних источников (стоков) теплоты, Вт/м³, ($q_v = q_{vk} + q_{vp}$, где q_{vp} – мощность внутренних источников теплоты вследствие радиационного теплообмена, Вт/м³; q_{vk} – мощность внутренних источников теплоты других физических процессов, Вт/м³).

Для расчета массовых концентраций компонентов газовой смеси используется уравнение неразрывности в виде:

$$\rho \frac{\partial X_i}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial X_i}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial X_i}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial X_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho (D + D_{\tau}) \frac{\partial X_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho (D + D_{\tau}) \frac{\partial X_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho (D + D_{\tau}) \frac{\partial X_i}{\partial z} \right) + m_i, \quad (2.12)$$

где X_i – концентрация (массовая) i -го газа газовой смеси; D – коэффициент молекулярной диффузии i -го газа смеси газов, м²/с; D_{τ} – коэффициент турбулентной диффузии в смеси газов, м²/с; m_i – мощность внутренних источников (или стоков) массы, появляющихся вследствие образования (или исчезновения) молекул i -го газа из-за присутствия химических реакций, кг/(с·м³).

Для расчета оптической плотности дыма используется дифференциальное уравнение закона ее сохранения [158]:

$$\frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial x} + w_y \frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial y} + w_z \frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial z} = m_{\text{оп}}, \quad (2.13)$$

где $D_{\text{опг}}$ – дымообразующая способность горючего вещества, Нп·м²/кг; $D_{\text{оп}}$ – оптическая плотность дыма, Нп/м; $m_{\text{оп}} = D_{\text{опг}} \Psi_{\text{г}} / \Delta V$ – мощность внутренних

источников по образованию оптической плотности дыма вследствие протекания реакций горения, Нп/(м·с); ΔV – объем смеси газов, внутри которой располагается источник (или сток) рассматриваемого параметра, м³.

Так как количество искоемых параметров, находящихся в системе дифференциальных уравнений (2.7)-(2.13), больше числа уравнений, то для решения системы уравнений необходимо ввести дополнительные соотношения.

Уравнение состояния газовой смеси используется для локальных параметров:

$$p = \rho R T, \quad (2.14)$$

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

Теплофизические параметры смеси газов определяются из уравнений:

$$\rho = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i; \quad R = \sum_{i=1}^n g_i R_i; \quad c_p = \sum_{i=1}^n g_i c_{pi}, \quad (2.15)$$

где i – номер газа в смеси газов; n – количество газов в смеси; r_i , g_i , R_i , c_{pi} , ρ_i – массовая и объемная доли, газовая постоянная, изобарная удельная теплоемкость и плотность i -ого газа в смеси газов.

Теплоёмкости отдельных газов задаются постоянными или в виде их зависимости от температуры смеси газов, k - ε модель турбулентности [82] используется для расчета турбулентного тепло- и массообмена при пожаре. Турбулентная вязкость рассчитывается по формуле Колмогорова [82] (формула 2.16), так же турбулентную вязкость можно определять по [259].

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.16)$$

где $k = \frac{1}{2} (w_x'^2 + w_y'^2 + w_z'^2)$ – кинетическая энергия турбулентного движения, м²/с²;

$\varepsilon = \nu \left[\left(\frac{\partial w_x'}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_y'}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_z'}{\partial z} \right)^2 \right]$ – скорость диссипации кинетической

энергии турбулентного движения, м²/с³; w_x' , w_y' , w_z' – проекции вектора пульсаций скорости на оси x , y , z , м/с; $C_\mu = 0,09$ – эмпирическая константа; ν_t , ν – соответственно коэффициенты кинематической турбулентной и молекулярной

вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

В общепринятой k - ε модели турбулентности эмпирические константы равны $C_1=1,44$; $C_2=1,92$; $\sigma_k=1,0$; $\sigma_\varepsilon=1,3$. Принимаем, что в конвективной колонке $C_1=1,6$.

Для расчета коэффициентов турбулентной теплопроводности в газовой смеси λ_t , входящего в уравнение энергии (2.11) и турбулентной диффузии каждого газа смеси D_t , входящего в уравнения неразрывности (2.7), применяется тройная аналогия Прандтля: если числа Прандтля и Льюиса равны единице ($\text{Pr}=\text{Le}=1$) и отсутствует градиент давления в потоке смеси газов ($dp/dx=0$, $dp/dy=0$, $dp/dz=0$), то уравнение энергии (2.11), движения (2.8)-(2.10) и диффузии (2.12) имеют тождественный вид, то есть при подобии граничных условий есть подобие полей температур, скоростей и концентраций отдельных газов смеси.

Принимаем турбулентное и диффузионное числа Прандтля равными единице: $\text{Pr}_t=\text{Pr}_d=1$. В этом случае величину коэффициента турбулентной теплопроводности можно найти из выражения [72]:

$$\lambda_t = \frac{c_p \mu_t}{\text{Pr}}; \quad (2.17)$$

а коэффициент турбулентной диффузии составляет:

$$D_t = \mu_t / \rho \text{Pr}_d. \quad (2.18)$$

С помощью решения дифференциальных уравнений (2.7)-(2.18) можно найти коэффициенты турбулентной теплопроводности, вязкости и диффузии, которые входят в уравнения дифференциальной модели (2.11)-(2.18).

Наиболее часто при моделировании термогазодинамики пожара используются четыре приближенных математических подхода к расчету лучистого теплопереноса [158]:

- неизлучающий оптически прозрачный газ;
- приближение с помощью оптически тонкого слоя газа;
- приближение с помощью оптически толстого слоя газа;
- диффузионный метод (или метод моментов).

В каждом из этих методов предполагается существование локального

термодинамического равновесия внутри излучающего объема смеси газов.

В случае приближения неизлучающего оптически прозрачного газа в уравнении энергии (2.13) принимается:

- коэффициент лучистой теплопроводности равен $\lambda_p=0$;
- источниковый член $q_{vp}=0$.

В случае приближения оптически толстого слоя при его оптической толщине $\tau_o \gg 1$, когда средняя длина свободного пробега фотона пренебрежимо меньше характерного размера задачи, $q_{vp}=0$, а величина коэффициента лучистой теплопроводности составляет:

$$\lambda_p = \frac{16}{3} \frac{\sigma T^3}{k_p}, \quad (2.19)$$

где k_p – локальный интегральный коэффициент ослабления лучистой энергии, 1/К; σ – константа абсолютно черного тела: $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T – локальная температура газового слоя, К.

В случае гетерогенной среды, характерно для пожара, также возникает необходимость выполнять расчет процессов образования, движения и коагуляции твердых частиц дыма с целью нахождения концентрации и размеров частиц, что, главным образом, определяет поглощательную, излучательную и пропускательную способности смеси газов. В этом случае величину коэффициента ослабления излучения можно рассчитать как

$$k_p = \frac{n \pi d^2}{4}, \quad (2.19a)$$

где d – средний эффективный диаметр твердых частиц дыма, м; n – объемная концентрация твердых частиц дыма, 1/м³.

При оптически тонком слое, когда $\tau_o \ll 1$, принимаем, что величина $\lambda_p=0$, и источниковый член в уравнении энергии записывается в виде:

$$q_{vp}=4\pi\epsilon_p\sigma T^4, \quad (2.20)$$

С помощью рассчитанной оптической плотности дыма находятся величины коэффициентов ослабления и поглощения излучения [158]:

$$k_p=\lambda^* D_{оп}, \quad (2.21)$$

где $D_{\text{оп}}$ – локальное значение оптической плотности дыма, Нп/м;

λ^* – коэффициент, с помощью которого проводится пересчет оптического диапазона излучения в инфракрасный, 1/Нп.

Значительная неоднородность твердых частиц дыма по размерам и форме, процессы коагуляции, дробления и горения частиц при их распространении определяют чрезвычайную сложность расчета локальных характеристик смеси газов с частицами дыма (поглощательная, испускательная и рассеивающая способности).

Пламенная зона задается с помощью внутренних источников энергии и массы или с использованием экспериментально измеренных полей температур и других параметров смеси газов.

Характеристики процесса газификации горючего вещества и условия однозначности рассчитываются в соответствии с работой [65].

При решении трехмерных нестационарных уравнений в частных производных полевой модели используется конечно-разностный метод контрольных объемов [158].

Для достоверного расчета при использовании рассмотренных математических моделей необходимо иметь исходные данные по пожарной нагрузке, находящейся на АЭС. Необходимо отметить, что данные по пожароопасным свойствам вышеуказанной нагрузки могут отсутствовать в литературных источниках и нормативных документах.

Существующие программы расчета динамики ОФП, например, PiroSim (FDS), ANSYS и т.д. не позволяют ввести напрямую исходные данные, характерные для АЭС. Поэтому для получения достоверных результатов необходимо использовать программы, в которых напрямую вводятся экспериментальные данные горючих материалов, например, INTMODEL, ZONMODEL [49], программы Пузача С.В. [129, 131, 151, 154]. Это в первую очередь, связано с отсутствием информации о точных уравнениях реакций, протекающих при горении материалов.

2.2 Обоснование пределов огнестойкости пожарных зон с учетом реальных температурных режимов пожара

2.2.1 Расчетное обоснование пределов огнестойкости ограждающих конструкций Ленинградской АЭС-2

Расчету пределов огнестойкости ограждающих конструкций на объектах энергетики и АЭС с ВВЭР-100 посвящены работы [134, 142, 144]. Однако в качестве основной горючей нагрузкой использовались кабели РГ. Поэтому замена вышеуказанных кабелей на кабели НГ требует научного обоснования.

Для определения распределения температур в многослойной стенке ограждающих конструкций решается уравнение теплопроводности [72]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right); \quad (2.22)$$

где ρ – плотность материала конструкции, кг/м^3 ; c – удельная теплоемкость материала конструкции, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; T – температура, К ; λ – коэффициент теплопроводности материала конструкции, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$; y – координата, направленная по толщине материала, м ; τ – время, с .

Уравнение (2.22) решается численным методом контрольных объемов [113].

Предполагаем идеальный тепловой контакт между слоями стенки, изготовленными из различных материалов, что также является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева конструкции.

Граничные условия к уравнению (2.22) являются граничными условиями 2-го рода. На границах расчетной области задается плотность теплового потока:

$$q_{\text{гр}} = f(\tau). \quad (2.22 \text{ а})$$

Плотность теплового потока на внешней (огневой) границе стенки определяется из решения моделей расчета термогазодинамики пожара или по формулам расчета лучистого теплового потока [72].

За наступление предела огнестойкости строительной конструкции перехода

принимается момент времени от начала пожара, когда температура хотя бы в одном месте конструкции достигает критического значения.

Расчет температурных режимов пожара выполнялся с использованием программных продуктов [131]. Рассматривались два варианта развития пожара при каждом сценарии его развития:

- двери помещения закрыты (закрытая термодинамическая система);
- двери помещения открыты (единичный отказ системы безопасности, открытая термодинамическая система).

Расчет прекращался через 180 мин от начала пожара или до момента времени, когда концентрация кислорода становилась меньше концентрации, при которой прекращается горение.

В таблице 2.2 представлены характеристики рассматриваемых сценариев пожара. По степени огнестойкости каждого здания в соответствии с таблицей 2.1 [210] находятся по нормам пожарной безопасности требуемые пределы огнестойкости строительных конструкций помещений. Противопожарные двери и люки, устанавливаемые в ограждающих конструкциях пожарных зон, в обязательном порядке оснащаются доводчиками и принимаются с пределом огнестойкости EI 90.

Пожарно-технические характеристики горючих веществ и материалов, находящихся в зданиях объекта, для рассматриваемых сценариев развития пожара определялись по типовой базе пожарной нагрузки [65,158] и приведены в таблице 2.1.

Так как не все свойства изоляции кабелей НГ предоставлены АО «Атомэнергопроект», то недостающие выбирались по наихудшему варианту свойств кабелей, выбранных из базы данных [65, 158].

Температура самовоспламенения электротехнических материалов равна:

– полистирол: 371-496°C;	– поливинилхлорид: 454-495°C;
– фторопласт: 600°C;	– бумага: 230°C; – резина: 350°C.
– полиэтилен: 390-422°C;	– гетинакс: 480°C;
– текстолит: 500°C;	– каучук натуральный: 375°C;

Принимаем, что при температуре газовой среды помещения, равной 180°C,

может произойти короткое замыкание кабелей НГ под токовой нагрузкой, находящихся в помещении, как представлено в гл. 3 диссертационного исследования или работе [109].

Принимаем, что при температуре газовой среды помещения, равной 400°C, происходит воспламенение всех кабелей НГ, находящихся в помещении.

Толщины несущих железобетонных конструкций равны:

– реакторное здание: перекрытия: внутри гермообъема: толщина $\delta=0,5\div 1,05$ м; снаружи гермообъема: $\delta=0,45\div 0,65$ м; несущие стены: внутри гермообъема: толщина $\delta=0,8\div 2,6$ м; снаружи гермообъема: $\delta=0,4\div 2,0$ м;

– остальные здания: минимальная толщина несущих перекрытий, стен и колонн равна $\delta_{\min} = 0,3$ м.

Минимальная толщина защитного слоя арматуры в железобетонных конструкциях всех зданий равна 40 мм.

Теплофизические свойства железобетонных конструкций принимались следующими по [65, 66, 158]:

Бетон тяжелый на гранитном щебне: плотность $\rho=2330$ кг/м³; удельная теплоемкость $c=481+0,84 T$ Дж/(кг·К); коэффициент теплопроводности $\lambda=1,3-3,5\cdot 10^{-4} T$ Вт/(м·К), где T – температура, К.

Критические температуры для железобетонных конструкций равны [169, 170]: арматура - $T_{кр} = 500^\circ\text{C}$.

Параметры воздуха в помещении принимались следующими: температура 20°C; давление $1,013\times 10^5$ Па.

Исходные данные при сценарии 1 пожара (таблица 2.2) в зале реактора гермообъема на отметке +26.300 реакторного здания в случае горения кабелей НГ:

- объем гермозоны: $V = 40831$ м³;
- максимальный объем горючей массы внутри короба: $V_r = 7$ л/м;
- максимальная длина участка разгерметизации короба: $L = 20$ м.

Максимальное время полного выгорания (τ_n , с) слоя изоляции толщиной δ_n

кабеля НГ равно:

$$\tau_n = \frac{\delta_n \rho_n}{\psi_{уд}}, \quad (2.23)$$

где $\rho_{\text{и}}$ – плотность материала изоляции кабеля НГ, кг/м^3 ; $\psi_{\text{уд}}$ – удельная массовая скорость выгорания кабеля НГ, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$.

При $\psi_{\text{уд}}=0,0067 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, $\rho_{\text{и}}=1600 \text{ кг/м}^3$ и $\delta_{\text{и}}=0,005 \text{ м}$: $\tau_{\text{и}}=1194 \text{ с}=19,9 \text{ мин}$.

Значения параметров окружающей среды и начальные значения параметров внутри помещений задавались следующими: температура $t_o=20^\circ\text{C}$; давление $p=101300 \text{ Па}$.

На основе анализа горючей нагрузки зданий и путей распространения ОФП проводится экспертный выбор сценариев пожара, при которых:

- ожидаются наихудшие последствия для поведения ограждающих и строительных конструкций;
- происходит выход ОФП из пожарной зоны или пожарного отсека очага пожара и воздействие ОФП одновременно на два канала систем безопасности.

Для предотвращения выхода ОФП из пожарной зоны очага пожара и воздействия ОФП одновременно на несколько каналов систем безопасности необходимо обеспечить фактические пределы огнестойкости ограждающих конструкций помещений, превышающие требуемые по нормам, а также время свободного развития пожара до полного выгорания пожарной нагрузки.

В качестве наиболее опасных сценариев пожара для рассматриваемых зданий энергоблока №1 Ленинградской АЭС-2 принимаем расчетные ситуации, перечисленные в таблице 2.2.

Объем помещения при одинаковой пожарной нагрузке определяет температурный режим пожара, так как:

- при закрытых дверях помещения процесс горения происходит до выгорания кислорода, находящегося в воздухе помещения, до концентрации, меньшей низшего концентрационного предела горения;
- при открытых дверях помещения пожар, регулируемый нагрузкой, продолжается до момента времени выгорания кислорода, находящегося в воздухе помещения, до концентрации, меньшей низшего концентрационного предела горения; затем процесс горения определяется массовым расходом воздуха, поступающего через открытую дверь в помещение снаружи (пожар, регулируемый вентиляцией).

Таблица 2.1 – Свойства пожарной нагрузки

№	Наименование ПН	Низшая рабочая теплота сгорания Q_H^P , МДж/кг	Удельная скорость выгорания $\psi_{уд}$, кг/(м ² ·с)	Потребление кислорода при горении, L_{O_2}	Удельное вы- деление окиси углерода, L_{CO}	Удельное вы- деление дву- окиси углерода, L_{CO_2}	Удельное выделение хлор- водорода, L_{HCL}	Удельное дымовыделение $W_{уд}$, Нп·м ² /кг	Линейная ско- рость распрос- транения пламе- ни $W_{пл}$, м/с
1	Кабели, не распространяющие горение (НГ)	22,5 32 ^{**}	0,0067 ^{**}	-2,19 [*]	0,15 [*]	0,903 [*]	0,0245 [*]	635 [*]	0,000333 ^{**}
3	Теплоноситель; турбинное масло ТП-22	41,9	0,03	-2,82	0,122	0,70	0	243	—
4	Индустриальное масло	42,7	0,043	-1,589	0,122	1,07	0	480	—
5	Трансформаторное масло ГК	43,5	0,043 [*]	-1,589 [*]	0,122 [*]	1,07 [*]	0	480 [*]	—

Примечания: * - по наихудшему варианту свойств ПН, выбранному из соответствующих свойств близких ПН в базе данных [65, 158];

** - данные предоставлены АО «Атомэнергопроект»

Таблица 2.2 – Характеристики рассматриваемых наиболее опасных сценариев пожара

№ сценария пожара	Здание	Пожарная зона	Помещение первичного очага пожара	Степень огнестойкости здания	Категория по пожарной и взрывопожарной опасности	Горючие вещества и материалы	Площадь пола, м ²	Высота помещения, м
1	Реакторное здание	гермообъем	центральный зал здания реактора на отметке +26,300	I	B1	Электрические кабели, электродвигатели арматуры	1330,0	36,4
2			участок ГЦНА на отметке +14,550		B1	Электродвигатель ГЦНА, электродвигатели арматуры, электрические кабели, масло	68,5	6,2
3		межоболочное пространство	кабельный тоннель (канал СБ-3) в галерее натяжения на отметке –7,400		B1	Электрические кабели, масло	133,9	3,3
4	Здание пункта управления	кабельное помещение блочного пункта управления	кабельное помещение блочного пункта управления на отметке +19,800	I	B1	Электрические кабели	421,7	3,4

На рисунках 2.2-2.5 на планах этажей зданий показаны места возникновения начальных очагов пожара.

В реакторном здании в пожарной зоне гермообъема рассмотрены сценарии 1-3 (рисунки 2.2-2.4). Объем помещений первичного очага возгорания в здании реактора изменяется от $424,7 \text{ м}^3$ до 48412 м^3 [134].

При сценарии 1 (рисунок 2.2) пожар возникает в центральном зале на отметке +26,300. Пожарной нагрузкой является кабели НГ. Принимаем, что максимальная длина участка разгерметизации короба равна 20 м и максимальный объем горючей массы изоляции кабелей НГ внутри короба составляет 7 л/м.

При сценарии 2 (рисунок 2.3) пожар возникает на участке ГЦНА на отметке +14,550 реакторного здания. Пожарной нагрузкой являются кабели НГ, масло.

В реакторном здании в пожарной зоне межоболочного пространства рассмотрен сценарий 3 (рисунок 2.4). Пожарной нагрузкой являются кабели НГ.

В здании пункта управления выполнен анализ следующих сценариев:

- сценарий 4: пожар возникает в пожарной зоне в кабельном помещении БПУ на отметке +19,800 (рисунок 2.5), пожарной нагрузкой являются кабели НГ;

Объем помещений первичного очага возгорания в здании пункта управления изменяется от $63,2 \text{ м}^3$ до $1433,8 \text{ м}^3$ [134].

Объемы помещений при горении кабелей НГ во всех рассматриваемых сценариях развития пожара изменяется в диапазоне от $29,6 \text{ м}^3$ до 40831 м^3 [134]. Результаты расчета остальных сценариев приведены в монографии [134].

Результаты расчета пределов огнестойкости строительных конструкций при рассматриваемых наиболее опасных сценариях пожара представлены в таблице 2.3.

Продолжительность $\tau_{\text{экв}}$ эквивалентного «стандартного» пожара определялась из равенства площадей под температурной зависимостью реального температурного пожара от времени до 120 мин от начала горения и под соответствующей зависимостью «стандартного» пожара с продолжительностью $\tau_{\text{экв}}$ [170]:

$$F_{\text{ст}} = F_p, \quad (2.23 \text{ а})$$

где $F_p = \int_0^{120} T d\tau$ – площадь под кривой «температура-время» реального температурного пожара в течение 120 мин; $F_{\text{ст}} = \int_0^{\tau_{\text{ЭКВ}}} T d\tau$ – площадь под кривой «температура-время» «стандартного» температурного пожара в течение $\tau_{\text{ЭКВ}}$ мин.

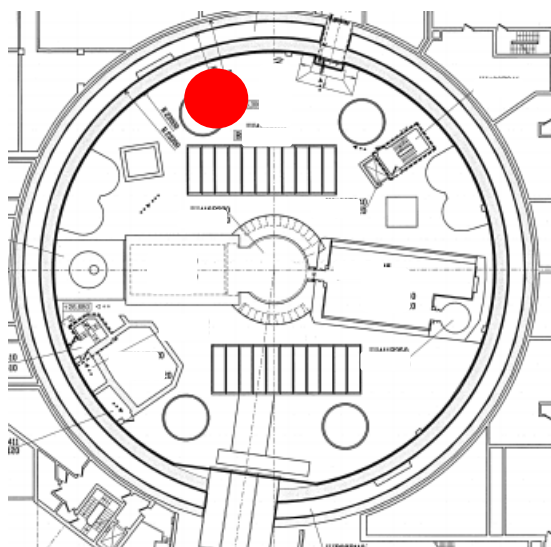


Рисунок 2.2 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено красным) в центральном зале здания реактора на отметке +26,300 (сценарий 1) реакторного здания

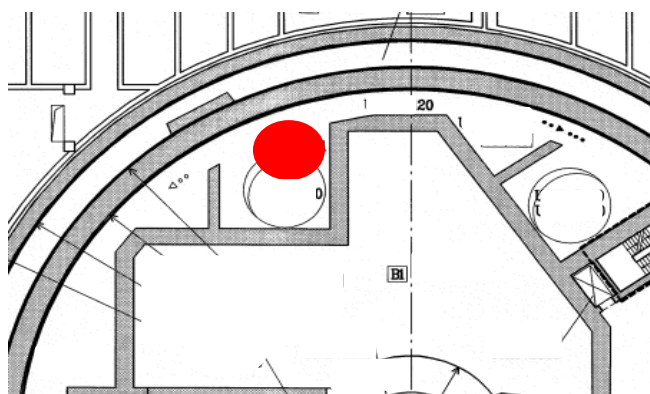


Рисунок 2.3 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено красным) на участке ГЦНА на отметке +14,550 (сценарий 2) реакторного здания

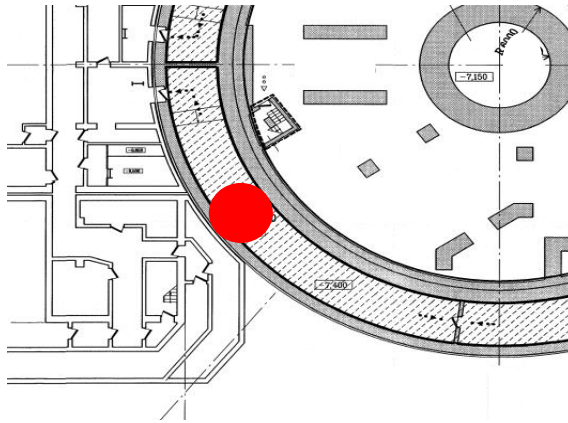


Рисунок 2.4 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено красным) в кабельном тоннеле (канал 3 СБ) в галерее натяжения на отметке -7,400 (межболочное пространство) (сценарий 3) реакторного здания

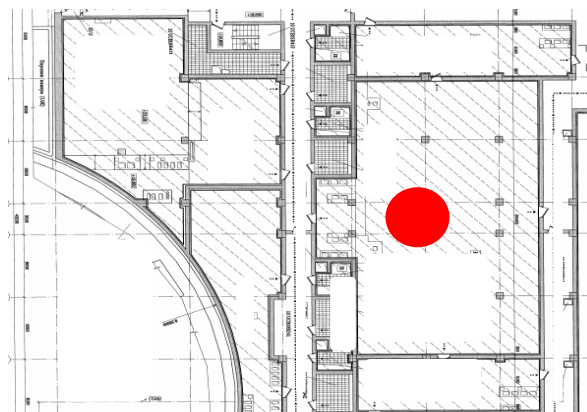


Рисунок 2.5 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено красным) в кабельном помещении БПУ на отметке +19,800 (сценарий 4) здания пункта управления

На рисунке 2.6 приведены зависимости от времени от начала пожара характерных температур, на рисунке 2.7 - среднеобъемной плотности кислорода, на рисунке 2.8 – давления внутри гермообъема, на рисунке 2.9 - сгоревшей массы (ΔM) кабелей НГ при сценарии 1 (таблица 2.2) в центральном зале гермообъема на отметке +26.300 реакторного здания в случае горения кабелей НГ.

Результаты расчета показали, что в течение 117 мин происходит полное выгорание пожарной нагрузки (изоляции кабелей НГ) участка разгерметизации кабельного короба (рисунок 2.9). За все время пожара среднеобъемная температура не превысила $152,7^{\circ}\text{C}$ (рисунок 2.6), а давление повысилось на 0,45 атмосфер (рисунок 2.8).

На рисунке 2.10 представлены зависимости от времени с начала пожара характерных температур, на рисунке 2.11 - среднеобъемной плотности кислорода при сценарии 2 (таблица 2.2) в пожарной зоне (гермообъем) в помещении участка ГЦНА на отметке +14,550 реакторного здания при горении кабелей НГ.

Из рисунка 2.10 и 2.11 видно, что:

- при закрытых дверях температура постепенно увеличивалась до температуры короткого замыкания НГ кабелей 180°C через 28,3 мин; достижения температуры воспламенения электротехнических материалов 400°C через 46,1 мин; резкий рост температуры в помещении до максимальной величины $1116,4^{\circ}\text{C}$ (кривая 2, рисунок 2.10) из-за воспламенения всей массы пожарной нагрузки пожар продолжался до выгорания массы кислорода в помещении до концентрации O_2 , меньшей нижнего концентрационного предела горения 14% по массе, до 48,0 мин от начала горения (рисунок 2.11); температура арматуры не превысила $93,8^{\circ}\text{C}$;

- при открытых дверях температура постепенно увеличивалась до температуры короткого замыкания НГ кабелей 180°C через 51,6 мин; достижения температуры воспламенения электротехнических материалов 400°C через 79,6 мин; резкий рост температуры в помещении до максимальной величины $1061,8^{\circ}\text{C}$ (кривая 3, рисунок 2.10) продолжался до выгорания массы кислорода в помещении до концентрации O_2 , меньшей нижнего концентрационного предела горения 14% по массе, до 81,1 мин от начала горения (рисунок 2.11); после этого режим пожара являлся пожаром, регулируемым вентиляцией; процесс газификации горючих материалов продолжался до 107,9 мин; после этого

момента времени вся пожарная нагрузка сгорела; температура арматуры не превысила 231,7°C.

На рисунке 2.12 представлены зависимости от времени с начала пожара характерных температур, на рисунке 2.13 - среднеобъемной плотности кислорода при сценарии 3 (таблица 2.2) в пожарной зоне (межоболочное пространство) в кабельный тоннель (канал 3-СБ) в галерее натяжения на отметке –7,400 реакторного здания при горении кабелей НГ.

Из рисунков 2.12 и 2.13 видно, что:

- при закрытых дверях температура постепенно увеличивалась до температуры короткого замыкания НГ кабелей 180°C через 30,7 мин; достижения температуры воспламенения электротехнических материалов 400°C через 51,5 мин; резкий рост температуры в помещении до максимальной величины 967,2°C (кривая 2, рисунок 2.12) из-за воспламенения всей массы пожарной нагрузки продолжался до выгорания массы кислорода в помещении до концентрации O_2 , меньшей нижнего концентрационного предела горения 14% по массе, до 52,6 мин от начала горения (рисунок 2.13); температура арматуры не превысила 85,9°C;

- при открытых дверях температура постепенно увеличивалась до температуры короткого замыкания НГ кабелей 180°C через 48,3 мин; достижения температуры воспламенения электротехнических материалов 400°C через 81,7 мин; резкий рост температуры в помещении до максимальной величины 1249,2°C (кривая 3, рисунок 2.12) продолжался до выгорания массы кислорода в помещении до концентрации O_2 , меньшей нижнего концентрационного предела горения 14% по массе, до 82,0 мин от начала горения (рисунок 2.13); после этого режим пожара являлся пожаром, регулируемым вентиляцией; процесс газификации горючих материалов продолжался до 101,9 мин; после этого момента времени вся пожарная нагрузка сгорела; температура арматуры не превысила 171,0°C.

На рисунке 2.14 представлены зависимости от времени с начала пожара характерных температур, на рисунке 2.15 - среднеобъемной плотности кислорода при сценарии 4 (таблица 2.2) в пожарной зоне кабельного помещения БПУ на отметке +19,800 здания пункта управления при горении кабелей НГ.

Из рисунков 2.14 и 2.15 видно, что:

- при закрытых дверях температура достигает температуры короткого замыкания НГ кабелей 180°C через 49,1 мин; не достигает величины температуры воспламенения электротехнических материалов 400°C и через 83,0 мин равна максимальной величине $357,5^{\circ}\text{C}$ (кривая 2, рисунок 2.14) из-за воспламенения всей массы пожарной нагрузки продолжался до выгорания массы кислорода в помещении до концентрации O_2 , меньшей нижнего концентрационного предела горения 14% по массе, до 109,7 мин от начала горения (рисунок 2.15); температура арматуры не превысила $80,7^{\circ}\text{C}$;

- при открытых дверях температура постепенно увеличивалась до температуры короткого замыкания НГ кабелей 180°C через 64,3 мин; до достижения температуры воспламенения электротехнических материалов 400°C через 134,3 мин; рост температуры в помещении до максимальной величины $656,0^{\circ}\text{C}$ (кривая 3, рисунок 2.14) продолжался до выгорания массы кислорода в помещении до концентрации O_2 , меньшей нижнего концентрационного предела горения 14% по массе, до 134,5 мин от начала горения (рисунок 2.15); после этого режим пожара являлся пожаром, регулируемым вентиляцией; процесс газификации горючих материалов продолжался до 154,2 мин; после этого момента времени вся пожарная нагрузка сгорела; температура арматуры не превысила $127,2^{\circ}\text{C}$.

Из таблицы 2.3 видно, что температура арматуры в железобетонных стенах и перекрытиях помещений зданий для всех рассматриваемых наиболее опасных сценариев развития пожара не достигает критического значения.

Таблица 2.3 – Результаты расчета пределов огнестойкости ограждающих конструкций при рассматриваемых наиболее опасных сценариях пожара

№ сценария пожара	Пожарная зона	Помещение первичного очага пожара	Пожар при закрытых дверях (герметичное помещение)				Пожар при открытых дверях (открытое помещение)				Пределы огнестойкости		τ _{ЭКВ} , мин	
			Максимальная температура, °С		Время достижения максимальной температуры, мин	Продолжительность пожара (выгорание кислорода), мин	Максимальная температура, °С		Время достижения максимальной температуры, мин	Продолжительность пожара (выгорание пожарной нагрузки), мин	Требуемые	Фактические	Пожар при закрытых дверях	Пожар при открытых дверях
			Газовая среда	Арматура			Газовая среда	Арматура						
1	гермообъем	центральный зал здания реактора на отметке +26,300	152,7	32,1	117,0	117**	–	–	–	–	REI 120	> REI 180	11,4	–
2		участок ГЦНА на отметке +14,550	1116,4	93,8	47,6	48,0	1061,8	231,7	78,8	107,9	REI 120	>REI 180	40,6	54,7
3	межблочное прост-ранство	кабельный тоннель (канал 3) в галерее натяжения на отметке –7,400	967,2	85,9	52,3	52,6	1249,2	171,0	82,0	101,9	REI 120	>REI 180	37,0	44,4
4	кабельное помеще-ние БПУ	кабельное помеще-ние БПУ на отметке +19,800	357,5	80,7	83,0	109,7	656,0	127,2	134,5	154,2	REI 120	>REI 180	32,1	32,4

Примечания: пожарная нагрузка: без верхнего индекса – кабель НГ; ** – полное выгорание ПН участка разгерметизации короба.

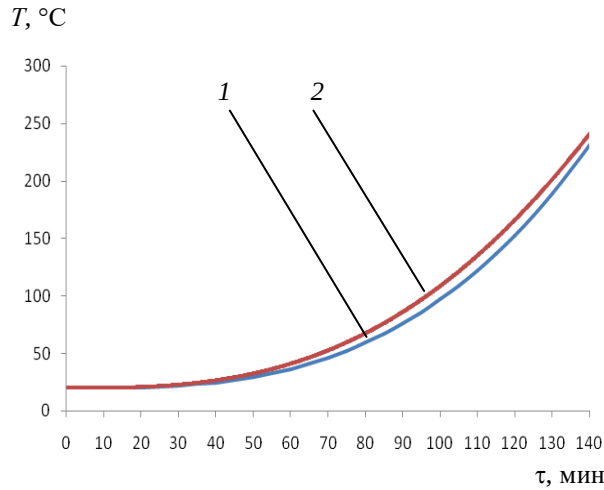


Рисунок 2.6 – Зависимость среднеобъемной температуры газовой среды в гермозоне от времени с начала пожара при сценарии 1 (таблица 2.2) в центральном зале гермообъема на отметке +26.300 реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – аналитическое решение; 2 – интегральная модель

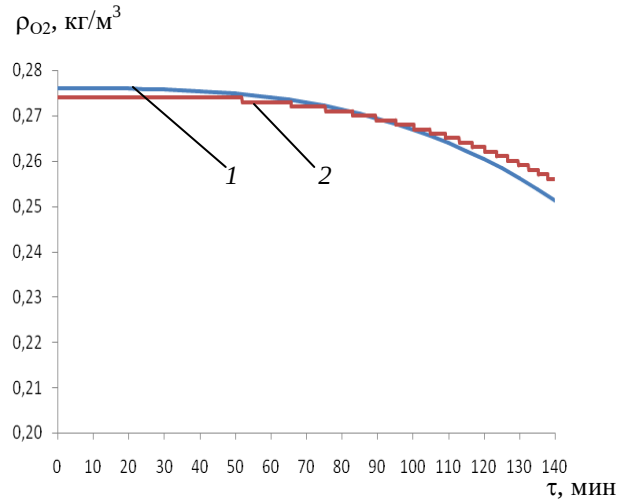


Рисунок 2.7 – Зависимость среднеобъемной плотности кислорода в гермозоне от времени с начала пожара при сценарии 1 (таблица 2.2) в центральном зале гермообъема на отметке +26.300 реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – аналитическое решение; 2 – интегральная модель

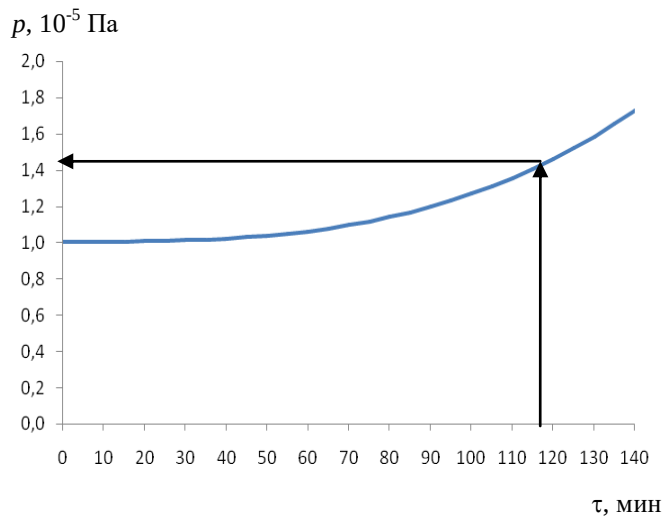


Рисунок 2.8 – Зависимость среднеобъемного давления от времени с начала пожара при сценарии 2 (таблица 2.2) в центральном зале гермообъема на отметке +26.300 реакторного здания при горении кабелей НГ

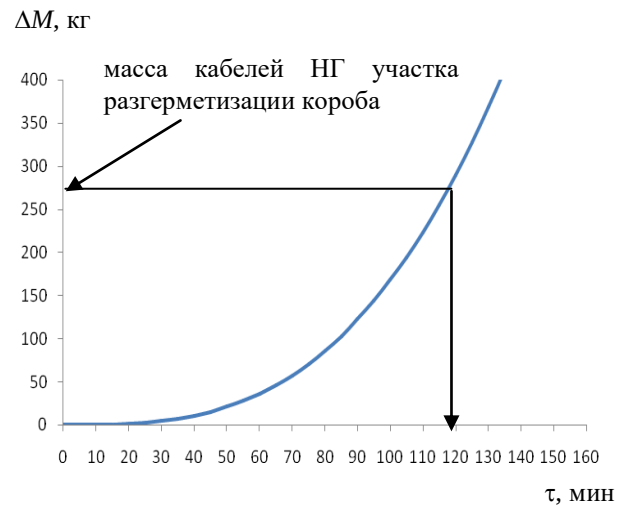


Рисунок 2.9 – Зависимость сгоревшей массы (ΔM) кабелей НГ от времени с начала пожара при сценарии 1 (таблица 2.2) в центральном зале гермообъема на отметке +26.300 реакторного здания

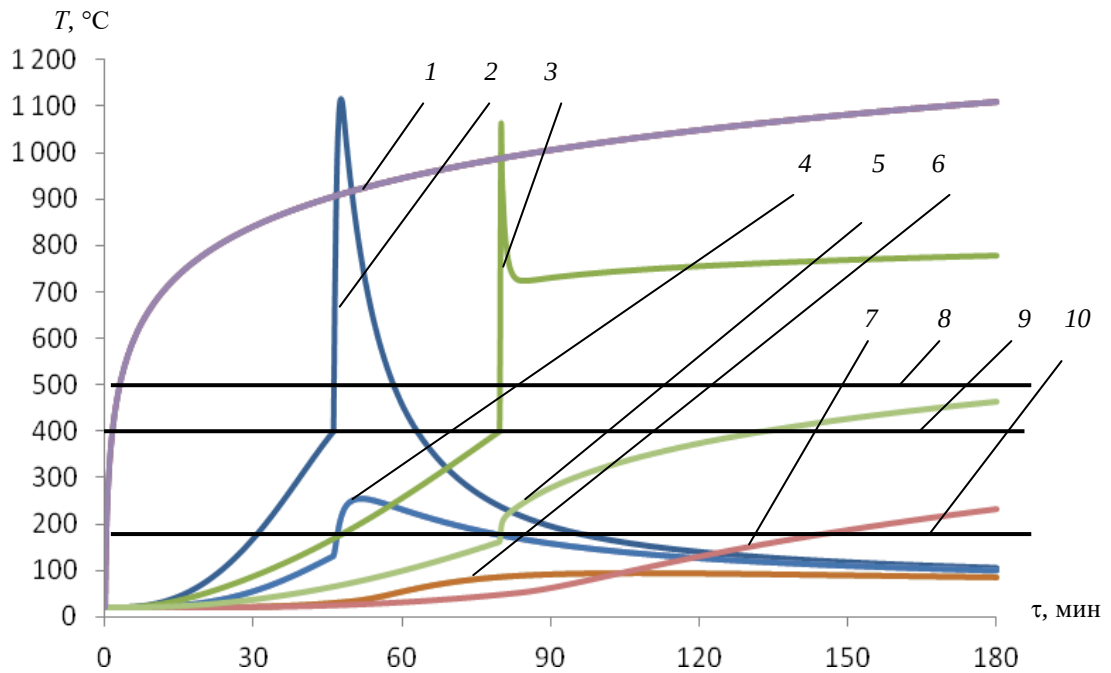


Рисунок 2.10 – Зависимости характерных температур от времени с начала пожара при сценарии 2 (таблица 2.2) в помещении участка ГЦНА на отметке +14,550 пожарной зоны (гермообъем) реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре; 2 – среднеобъемная температура 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 [170]; 9 – температура воспламенения электротехнических материалов; 10 – температура газовой среды, при которой происходит КЗ кабелей НГ

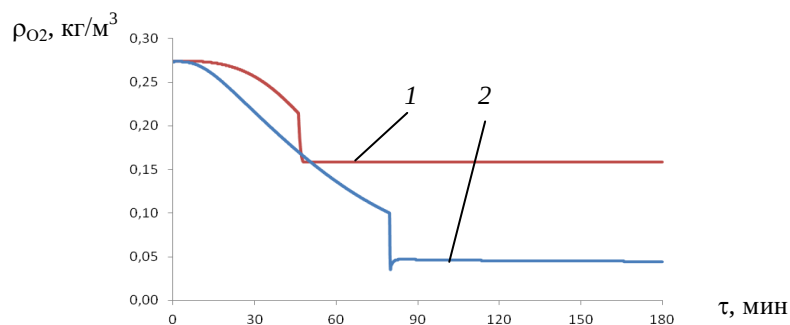


Рисунок 2.11 – Зависимости среднеобъемной плотности кислорода от времени с начала пожара при сценарии 2 (таблица 2.2) в помещении участка ГЦНА на отметке +14,550 пожарной зоны (гермообъем) реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – закрытые двери; 2 – открытые двери

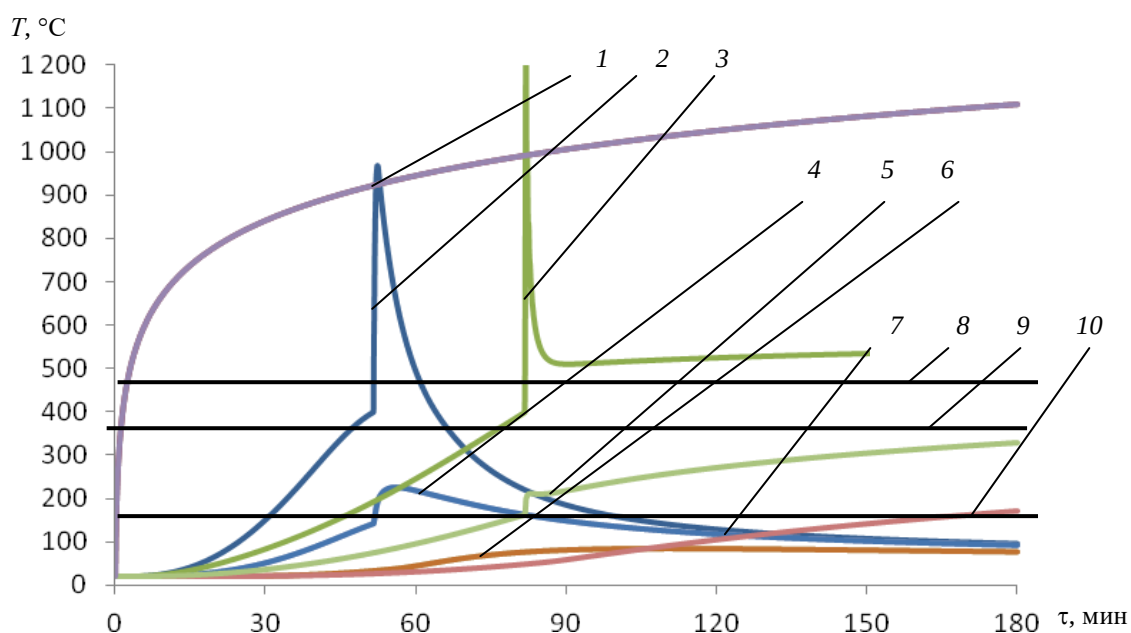


Рисунок 2.12 – Зависимости характерных температур от времени с начала пожара при сценарии 3 (таблица 2.2) в кабельном тоннеле (3-й канал СБ) в галерее натяжения на отметке –7,400 пожарной зоны (межоболочное пространство) реакторного здания при горении кабелей НГ:

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 [170]; 9 – температура воспламенения электротехнических материалов; 10 – температура газовой среды, при которой происходит КЗ кабелей НГ

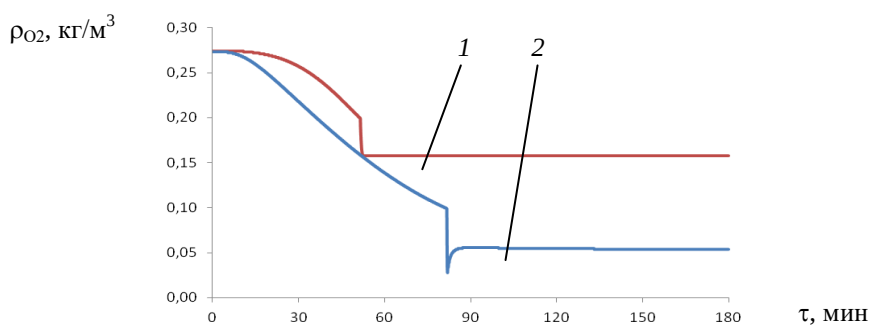


Рисунок 2.13 – Зависимости среднеобъемной плотности кислорода от времени с начала пожара при сценарии 3 (таблица 2.2) в кабельном тоннеле (3-й канал СБ) в галерее натяжения на отметке –7,400 пожарной зоны (межоболочное пространство) реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – закрытые двери; 2 – открытые двери

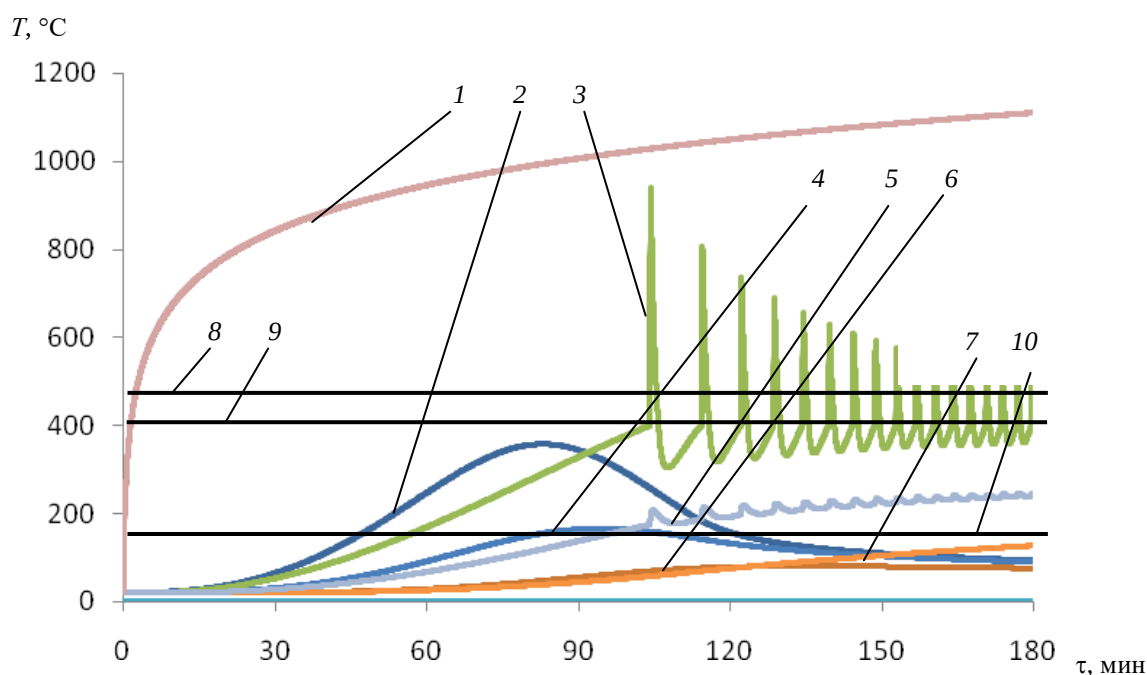


Рисунок 2.14 – Зависимости характерных температур от времени с начала пожара при сценарии 4 (таблица 2.2) в кабельном помещении БПУ на отметке +19,800 при горении кабелей НГ: 1 – среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре; 2 – среднеобъемная температура при реальном пожаре (закрытые двери); 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 [170]; 9 – температура воспламенения электротехнических материалов; 10 – температура газовой среды, при которой происходит КЗ кабелей НГ

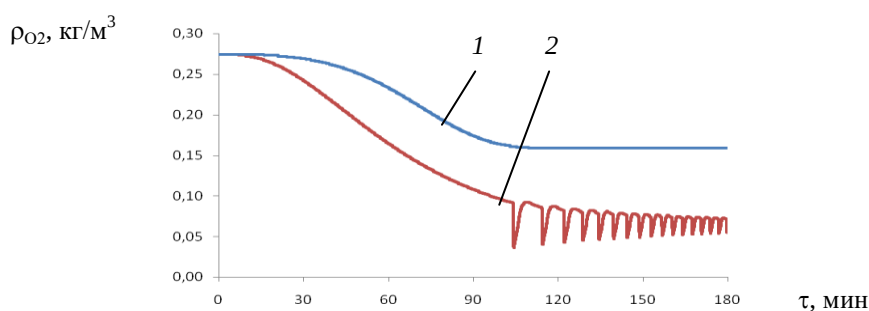


Рисунок 2.15 – Зависимости среднеобъемной плотности кислорода от времени при сценарии 7 (таблица 2.2) в кабельном помещении БПУ на отметке +19,800 при горении кабелей НГ:

1 – закрытые двери; 2 – открытые двери

Определение динамики развития пожаров в зданиях, пожарных отсеках, пожарных зонах, помещениях, а также расчётное обоснование принятых в проекте пределов огнестойкости ограждающих строительных конструкций пожароопасных помещений и границ пожарных зон Ленинградской АЭС-2 показало, что:

- пожар, происходящий при закрытых дверях помещений, продолжается в течение диапазона времени $1,2 \div 109,7$ мин [134] до выгорания кислорода до его концентрации, меньшей низшего концентрационного предела горения, в зависимости от объема помещения и вида горючих веществ и материалов;

- пожар, происходящий при открытых дверях помещений, продолжается в течение диапазона времени $87,8 \div 154,2$ мин [134] до полного выгорания горючих веществ и материалов в зависимости от объема помещения и вида горючих веществ и материалов;

- в пожарной зоне гермообъема реакторного здания выгорание пожарной нагрузки участка разгерметизации кабелей НГ происходит за 117 мин;

- эквивалентная продолжительность реального температурного режима пожара, приведенного к «стандартному», составляет $10,4 \div 62,8$ мин; исключение составляет помещение временного хранения отработавшего масла в бочках отметке 0,000 пожарной зоны здания хранилища свежего топлива и твердых радиоактивных отходов, в котором эквивалентная продолжительность реального температурного режима пожара равна 97,8 мин [134].

- фактические пределы огнестойкости несущих железобетонных конструкций помещений зданий для всех рассматриваемых наиболее опасных сценариев развития пожара превышают REI 180 и больше требуемых пределов огнестойкости.

- распространения опасных факторов пожара за пределы пожарных зон и пожарных отсеков (в том числе и через противопожарные двери и люки) не

происходит через 180 мин от начала возгорания внутри пожарной зоны или пожарного отсека;

– во всех рассматриваемых помещениях при «реальном» пожаре время достижения температуры короткого замыкания кабелей НГ составила от 28 до 64 мин от начала возгорания внутри пожарной зоны или пожарного отсека.

2.2.2 Расчетное обоснование пределов огнестойкости ограждающих конструкций АЭС «Аккую»

На основе анализа горючей нагрузки зданий и путей распространения ОФП проводится экспертный выбор сценариев пожара, при которых:

– ожидаются наихудшие последствия для ограждающих строительных конструкций;

– происходит выход ОФП из пожарной зоны очага пожара и воздействие ОФП одновременно на два канала систем безопасности.

Для предотвращения выхода ОФП из пожарной зоны очага пожара и воздействия ОФП одновременно на два канала систем безопасности необходимо обеспечить фактические пределы огнестойкости ограждающих конструкций помещений, превышающие требуемые по нормам, с учетом времени свободного развития пожара до полного выгорания пожарной нагрузки.

Объем помещения при одинаковой пожарной нагрузке определяет температурный режим пожара, так как:

– при закрытых дверях помещения процесс горения происходит до выгорания кислорода, находящегося в воздухе помещения, до концентрации, меньшей низшего концентрационного предела горения;

– при открытых дверях помещения пожар, регулируемый нагрузкой,

продолжается до момента времени выгорания кислорода, находящегося в воздухе помещения, до концентрации, меньшей нижнего концентрационного предела горения; затем процесс горения определяется массовым расходом воздуха, поступающего через открытую дверь в помещение снаружи (пожар, регулируемый вентиляцией).

Расчет фактических пределов огнестойкости строительных конструкций выполнялся с использованием программных продуктов [129, 131, 146, 151]. Рассматривались два варианта развития пожара при каждом сценарии его развития:

- двери помещения закрыты (закрытая термодинамическая система);
- двери помещения открыты (единичный отказ системы безопасности, открытая термодинамическая система).

Расчет прекращался через 180 мин от начала пожара или до момента времени, когда концентрация кислорода становилась меньше концентрации, при которой прекращается горение.

В качестве примера наиболее опасных сценариев пожара для рассматриваемых зданий АЭС «Аккую» принимаем расчетные ситуации, перечисленные в таблице 2.4.

На рисунках 2.16-2.19 на планах этажей зданий показаны места возникновения начальных очагов пожара.

Рассматриваемые сценарии пожара охватывают весь диапазон изменения объемов помещений, что позволяет рассчитать максимально возможные температуры газовой среды и строительных конструкций.

Рассматриваем наиболее опасные сценарии пожара, представленные в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Характеристики рассматриваемых наиболее опасных сценариев пожара

№ сценария пожара	Здание	Степень огнестойкости здания	Пожарная зона	Помещение первичного очага пожара	Горючие вещества и материалы	Категория помещения по пожарной и взрывопожарной опасности	Площадь пола, м ²	Высота помещения, м
1	Реакторное здание	I	Кабельный этаж БПУ	Кабельный этаж БПУ на отметке 0.000	Изоляция кабелей	B1	147,45	3,7
2			Гермообъем	Зал реактора на отметке +26.300		B1	1432,1	34,2
3				Помещение палубы электродвигателя ГНЦ 3 петли и емкости САОЗ 1 ступени на отметке +16.500		B1	57,8	24,0
4			Помещение БПУ	Помещение БПУ на отметке +4.200		B2	147,45	4,75

В реакторном здании рассмотрены сценарии 1- 4 (рисунки 2.16-2.19). В реакторном здании объем помещений первичного очага возгорания изменяется от $545,6 \text{ м}^3$ до 48979 м^3 [134].

При сценарии 1 (рисунок 2.16) в пожарной зоне пожар возникает в помещении кабельного этажа БПУ на отметке 0.000. Пожарной нагрузкой являются кабели НГ.

При сценарии 2 (рисунок 2.17) в пожарной зоне гермообъема пожар возникает в зале реактора на отметке +26.300. Пожарной нагрузкой являются кабели НГ. Принимаем, что максимальная длина участка разгерметизации короба равна 20 м и максимальный объем горючей массы изоляции кабелей НГ внутри короба составляет 7 л/м.

При сценарии 3 (рисунок 2.18) в пожарной зоне гермообъема пожар возникает в помещении палубы электродвигателя ГНЦА 3 петли и емкости САОЗ 1 ступени на отметке +16.500. Пожарной нагрузкой являются кабели НГ.

При сценарии 4 (рисунок 2.19) в пожарной зоне на отметке +4.200 пожар возникает в помещении БПУ. Пожарной нагрузкой являются кабели НГ.

Объем помещений при горении кабелей НГ в рассматриваемых сценариях развития пожара изменяется в диапазоне от $81,6 \text{ м}^3$ до 48978 м^3 [134].

Значения параметров окружающей среды и начальные значения параметров внутри помещений задавались следующими: температура $t_0=20^\circ\text{C}$; давление $p=1,013 \times 10^5 \text{ Па}$.

Пожарно-технические характеристики кабелей НГ находящихся в зданиях объекта, для рассматриваемых сценариев развития пожара определялись по наихудшему варианту свойств ПН, выбранному из соответствующих свойств близких ПН в базе данных [65, 158] и согласно данным, предоставленными АО «Атомэнергопроект»:

низшая рабочая теплота сгорания $Q_{\text{Н}}^{\text{P}}=22,5\text{-}32\text{мдж/кг}$; удельная скорость выгорания $\psi_{\text{уд}}=0,0067\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; потребление кислорода при горении

$L_{O_2} = -2,19 \text{ кг/кг}$; выделение окиси углерода $L_{CO} = 0,15 \text{ кг/кг}$; выделение двуокиси углерода $L_{CO_2} = 0,903 \text{ кг/кг}$; удельное выделение хлористого водорода $L_{HCL} = 0,0245 \text{ кг/кг}$; удельное дымовыделение $W_{уд} = 635 \text{ Нп·м}^2/\text{кг}$; линейная скорость распространения пламени $W_{пл} = 0,000333 \text{ м/с}$.

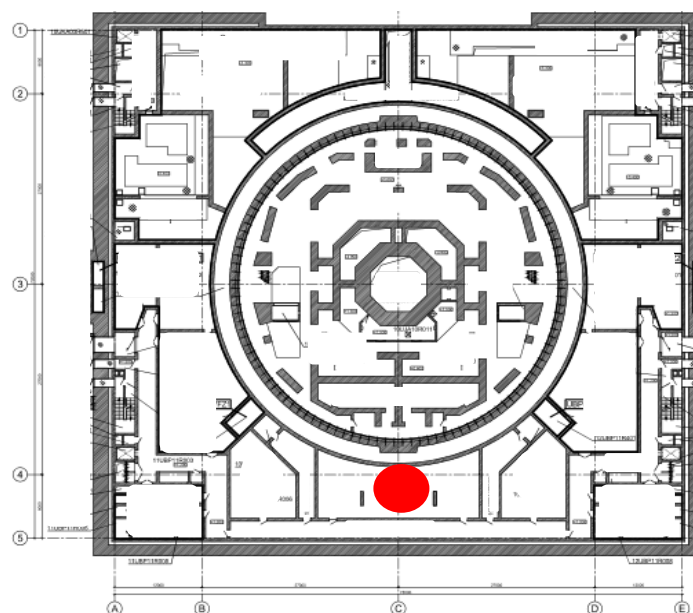


Рисунок 2.16 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено красным) в пожарной зоне в кабельном этаже БПУ на отметке 0.000 (сценарий 1) реакторного здания

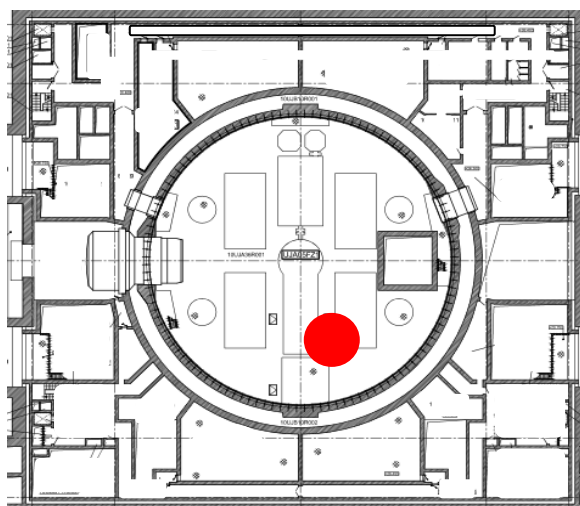


Рисунок 2.17 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено красным) в пожарной зоне в зале реактора на отметке +26.300 (сценарий 2) реакторного здания

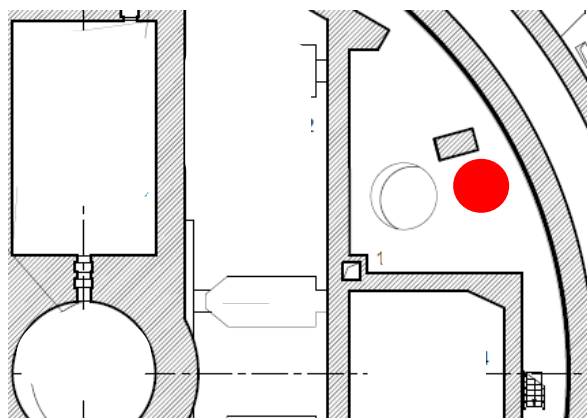


Рисунок 2.18 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено красным) в пожарной зоне в помещении палубы электродвигателя ГНЦА 3 петли и емкости САОЗ 1 ступени на отметке +16.500 (сценарий 3) реакторного здания

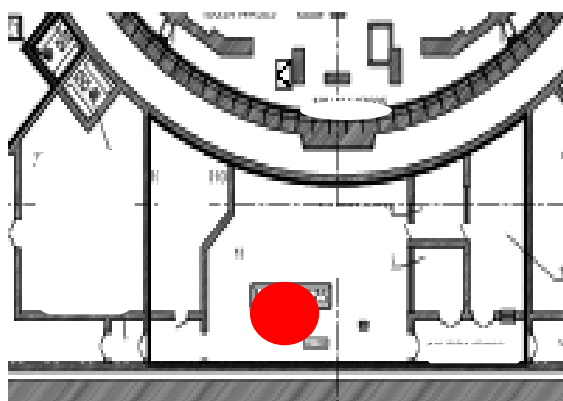


Рисунок 2.19 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено красным) в пожарной зоне в помещении БПУ на отметке +3.200 (сценарий 4) реакторного здания

Принимаем, что при температуре газовой среды помещения, равной 400°C, происходит воспламенение всей пожарной нагрузки помещения (за исключением помещений, где находится дизельное топливо и твердые горючие радиоактивные отходы).

Толщины несущих железобетонных конструкций равны:

– реакторное здание: перекрытия внутри гермообъема: толщина $\delta=0,5\div1,05$ м; снаружи гермообъема: $\delta=0,45\div0,65$ м; несущие стены внутри гермообъема: толщина $\delta=0,8\div2,6$ м; снаружи гермообъема: $\delta=0,4\div2,0$ м.

Минимальная толщина защитного слоя арматуры в железобетонных конструкциях всех зданий равна 40 мм.

Теплофизические свойства железобетонных конструкций принимались следующими [158]:

Бетон тяжелый на гранитном щебне: плотность $\rho=2330$ кг/м³; удельная теплоемкость $c=481+0,84 T$ Дж/(кг·К); коэффициент теплопроводности $\lambda=1,3-3,5\cdot10^{-4} T$ Вт/(м·К), где T – температура, К.

Параметры воздуха в помещении принимались следующими: температура $t_e=20^\circ\text{C}$; давление $p_e=1,013\times10^5$ Па.

Исходные данные при сценарии 2 пожара (таблица 2.4) в зале реактора гермообъема на отметке +26.300 реакторного здания в случае горения кабелей НГ:

- объем гермозоны: $V = 48978$ м³;
- максимальный объем горючей массы внутри короба: $V_T = 7$ л/м;
- максимальная длина участка разгерметизации короба: $L = 20$ м.

Максимальное время полного выгорания (τ_n , с) слоя изоляции толщиной δ_n кабеля НГ определяется в соответствии с формулой (2.23).

При $\psi_{уд}=0,0067$ кг/(с·м²), $\rho_n=1600$ кг/м³ и $\delta_n=0,005$ м: $\tau_n=1194$ с=19,9 мин.

Расчет фактических пределов огнестойкости строительных конструкций выполнялся с использованием программных продуктов [129, 131]. Рассматривались два варианта развития пожара при каждом сценарии его развития:

- двери помещения закрыты (закрытая термодинамическая система);
- двери помещения открыты (единичный отказ системы безопасности, открытая термодинамическая система).

Расчет прекращался через 180 мин от начала пожара или до момента времени, когда концентрация кислорода становилась меньше концентрации, при которой прекращается горение.

На рисунке 2.20 представлены зависимости от времени с начала пожара характерных температур, на рисунке 2.21 - среднеобъемной плотности кислорода при сценарии 4 (таблице 2.4) в пожарной зоне в помещении БПУ на отметке +4.200 реакторного здания при горении кабелей НГ.

Из рисунков 2.20 и 2.21 видно, что:

- при закрытых дверях температура постепенно увеличивалась до температуры короткого замыкания НГ кабелей 180°C через 38,6 мин; достижения температуры воспламенения электротехнических материалов 400°C через 57,5 мин; резкий рост температуры в помещении до максимальной величины $1098,5^{\circ}\text{C}$ (кривая 2, рисунок 2.20) из-за воспламенения всей массы пожарной нагрузки продолжался до выгорания массы кислорода в помещении до концентрации O_2 , меньшей нижнего концентрационного предела горения, до 57,8 мин от начала горения (рисунок 2.21);

- при открытых дверях температура постепенно увеличивалась до температуры короткого замыкания НГ кабелей 180°C через 52,4 мин; достижения температуры воспламенения электротехнических материалов 400°C через 85,4 мин; резкий рост температуры в помещении до максимальной величины $1151,3^{\circ}\text{C}$ (кривая 3, рисунок 2.20) продолжался до выгорания массы кислорода в помещении до концентрации O_2 , меньшей нижнего концентрационного предела горения, до 86,2 мин от начала горения (рисунок 2.21); после этого режим пожара являлся пожаром, регулируемым вентиляцией; процесс газификации горючих материалов продолжался до 105,3 мин; после этого момента времени вся пожарная нагрузка сгорела.

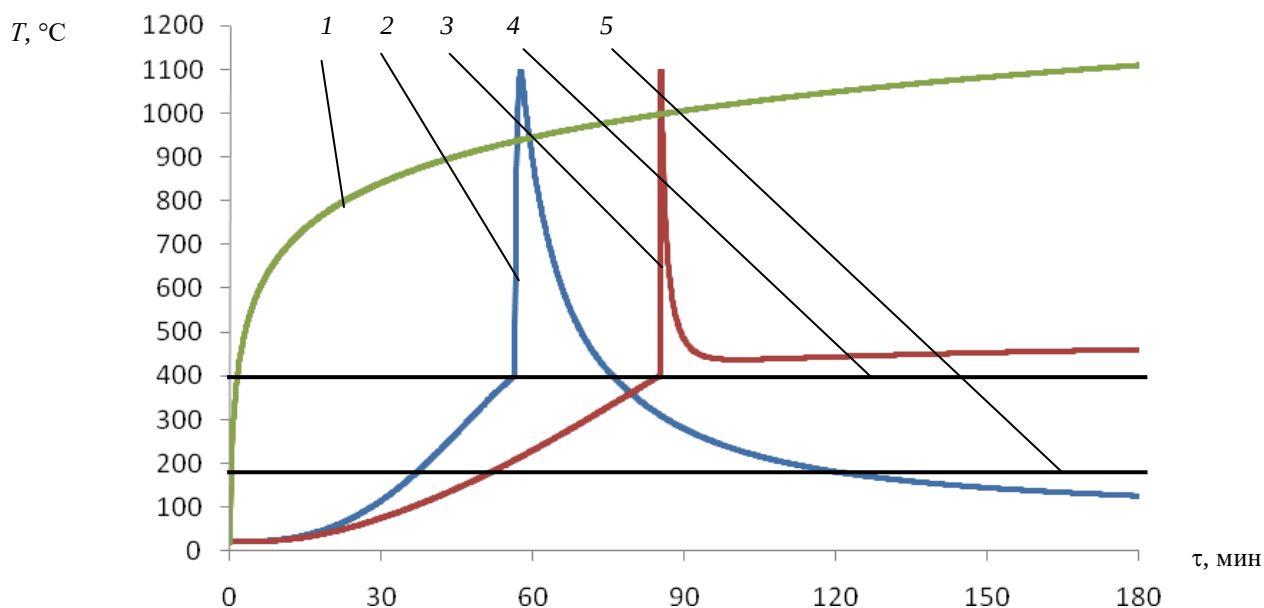


Рисунок 2.20 – Зависимости характерных температур от времени с начала пожара при сценарии 4 (таблица 2.2) в пожарной зоне в помещении БПУ на отметке +4.200 реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре; 2 – среднеобъемная температура при реальном пожаре (закрытые двери); 3 – среднеобъемная температура при реальном пожаре (открытые двери); 4 – температура воспламенения электротехнических материалов; 5 – температура газовой среды, при которой происходит КЗ кабелей НГ

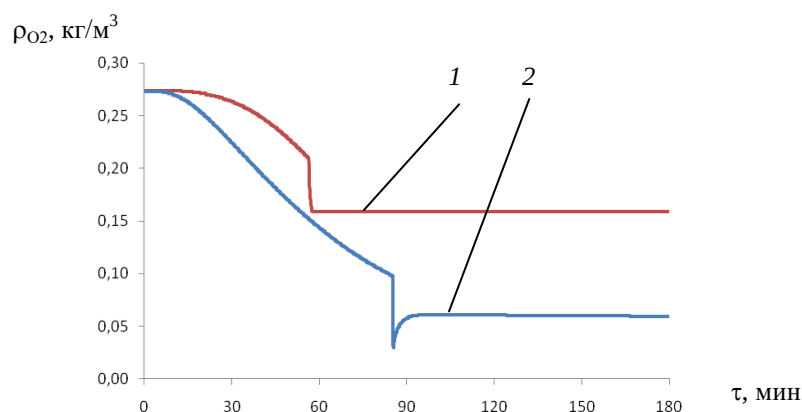


Рисунок 2.21 – Зависимости среднеобъемной плотности кислорода от времени с начала пожара при сценарии 4 (таблица 2.2) в пожарной зоне в помещении БПУ на отметке +4.200 реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – закрытые двери; 2 – открытые двери

Определение динамики развития пожаров в зданиях, пожарных отсеках, пожарных зонах, помещениях, а также расчётное обоснование принятых в проекте пределов огнестойкости ограждающих строительных конструкций пожароопасных помещений и границ пожарных зон в реакторном здании, вспомогательном реакторном здании, здании резервного пункта управления и здании переработки и хранения радиоактивных отходов АЭС «Аккую» показало, что:

- пожар, происходящий при закрытых дверях помещений, продолжается в течение диапазона времени $4,7 \div 70,6$ мин до выгорания кислорода до его концентрации, меньшей низшего концентрационного предела горения, в зависимости от объема помещения и вида горючих веществ и материалов [134];

- пожар, происходящий при открытых дверях помещений, продолжается в течение диапазона времени $27,0 \div 113,7$ мин до полного выгорания горючих веществ и материалов в зависимости от объема помещения и вида горючих веществ и материалов [134];

- в пожарной зоне гермообъема реакторного здания выгорание пожарной нагрузки участка разгерметизации кабелей НГ происходит за 117 мин [134];

- эквивалентная продолжительность реального температурного режима пожара, приведенного к «стандартному», составляет $9,4 \div 60,3$ мин, что существенно меньше требуемых пределов огнестойкости REI 120 [134];

- во всех рассматриваемых помещениях при «реальном» пожаре время достижения температуры короткого замыкания кабелей НГ составила от 20 до 54 мин от начала возгорания внутри пожарной зоны или пожарного отсека;

Результаты расчета пределов огнестойкости строительных конструкций при рассматриваемых наиболее опасных сценариях пожара (таблица 2.4) представлены в таблице 2.5.

На рисунке 2.22 представлены зависимости от времени с начала пожара максимальных температур поверхности перекрытия и арматуры при сценарии 1 (таблица 2.4) в пожарной зоне в помещении кабельного этажа БПУ на отметке 0.000 реакторного здания при горении кабелей НГ.

Из рисунка 2.22 видно, что:

- при закрытых дверях максимальная температура арматуры равна 91,9°C;
- при открытых дверях максимальная температура арматуры равна 151,8°C.

При сценарии 2 (таблица 2.4) в зале реактора гермообъема на отметке +26.300 реакторного здания в случае горения кабелей НГ максимальная температура арматуры меньше, чем максимальная температура газовой среды 152,7°C, а значит не достигает критического значения $T_{кр}=500^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 2.23 представлены зависимости от времени с начала пожара максимальных температур поверхности перекрытия и арматуры при сценарии 3 (таблица 2.4) в пожарной зоне гермообъема в помещении палубы электродвигателя ГНЦА 3 петли и емкости САОЗ 1 ступени на отметке +16.500 реакторного здания при горении кабелей НГ.

Из рисунка 2.23 видно, что при закрытых дверях максимальная температура арматуры равна 102,6°C.

На рисунке 2.24 представлены зависимости от времени с начала пожара максимальных температур поверхности перекрытия и арматуры при сценарии 4 (таблица 2.4) в пожарной зоне в помещении БПУ на отметке +4.200 реакторного здания при горении кабелей НГ.

Из рисунка 2.24 видно, что:

- при закрытых дверях максимальная температура арматуры равна 101,9°C;
- при открытых дверях максимальная температура арматуры равна 149,1°C.

Из таблицы 2.4 и рисунков 2.22-2.24 видно, что температура арматуры в железобетонных стенах и перекрытиях помещений зданий для всех рассматриваемых наиболее опасных сценариев развития пожара не достигает критического значения $T_{кр}=500^{\circ}\text{C}$ [170] при всех наиболее опасных вариантах развития пожара.

Таблица 2.5 – Результаты расчета пределов огнестойкости строительных конструкций при рассматриваемых наиболее опасных сценариях пожара

№ сценария пожара	Здание	Пожарная зона, помещение первичного очага пожара	Пожар при закрытых дверях помещения			Пожар при открытых дверях помещения			Пределы огнестойкости строительных конструкций	
			Максиальная температура арматуры, °С	Проолжител- ность пожара (выгорание кислорода), мин	Эквивалентная продолжительност ь пожара, мин	Максимальная температура арматуры, °С	Продолжитель- ность пожара (выгорание пожар- ной нагрузки), мин	Эквивалентная продолжитель- ность пожара, мин	Требуемые	Фактические
1	Реакторное здание	Кабельный этаж БПУ на отметке 0.000	91,9	55,3	39,2	151,8	103,6	41,1	REI 120	REI 180
2		Гермообъем, зал реактора на отметке +26.300	<152,7***	117,0*	11,4	–	–	–	REI 120	REI 180
3		Помещение палубы электродвигателя ГНЦ 3 петли и емкости САОЗ 1 ступени на отметке +16.500	102,6	75,3	40,8	–	–	–	REI 120	REI 180
4		Помещение БПУ на отметке +4.200,	101,9	57,8	42,8	149,1	105,3	40,3	REI 120	REI 180

Примечания: пожарная нагрузка:– кабель НГ; * – полное выгорание пожарной нагрузки участка разгерметизации короба;
*** – максимальная температура газовой среды равнялась 152,7°С.

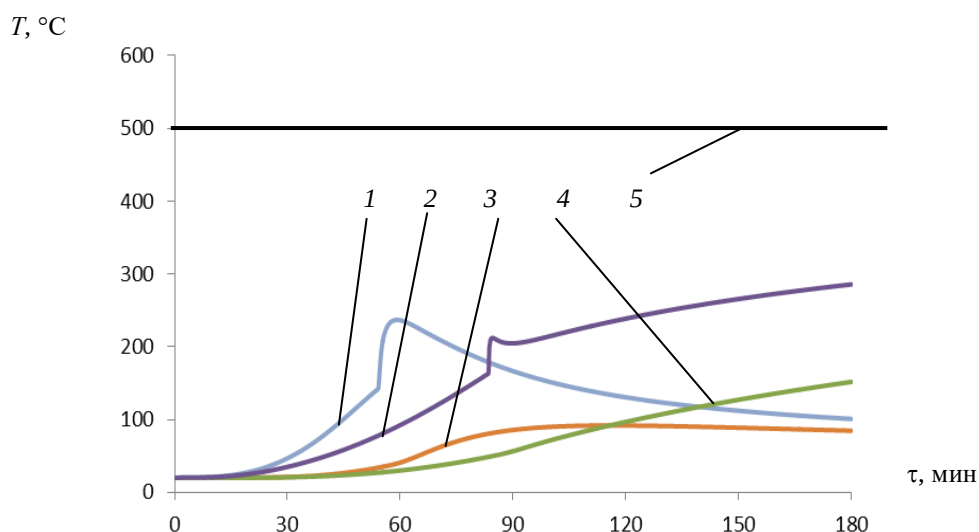


Рисунок 2.22 – Зависимости характерных температур в перекрытии от времени с начала пожара при сценарии 1 (таблица 2.4) в пожарной зоне в кабельном этаже БПУ на отметке 0.000 реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – температура на внутренней (огневой) поверхности перекрытия при реальном пожаре (закрытые двери); 2 – температура на внутренней (огневой) поверхности перекрытия при реальном пожаре (открытые двери); 3 – температура арматуры при реальном пожаре (закрытые двери); 4 – температура арматуры при реальном пожаре (открытые двери); 5 – критическая температура арматуры [170]

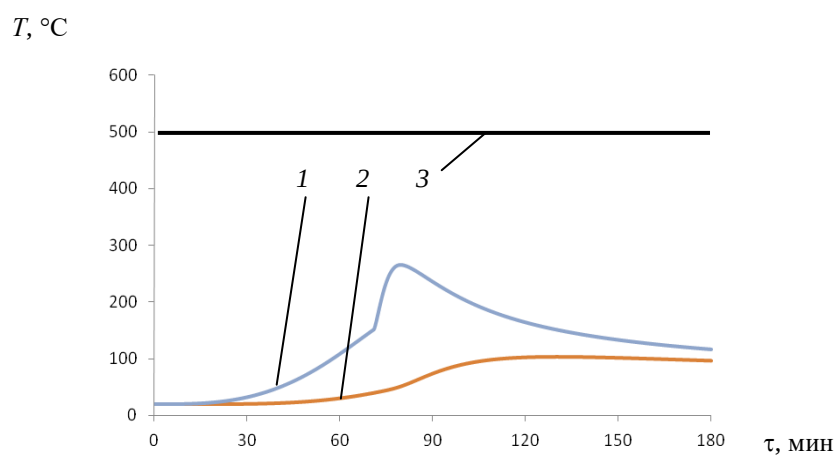


Рисунок 2.23 – Зависимости характерных температур в перекрытии от времени с начала пожара при сценарии 3 (таблица 2.4) в пожарной зоне гермообъема в помещении палубы электродвигателя ГНЦ 3 петли и емкости САОЗ 1 ступени на отметке +16.500 реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – температура на внутренней (огневой) поверхности перекрытия при реальном пожаре (закрытые двери); 2 – температура арматуры при реальном пожаре (закрытые двери); 3 – критическая температура арматуры [170]

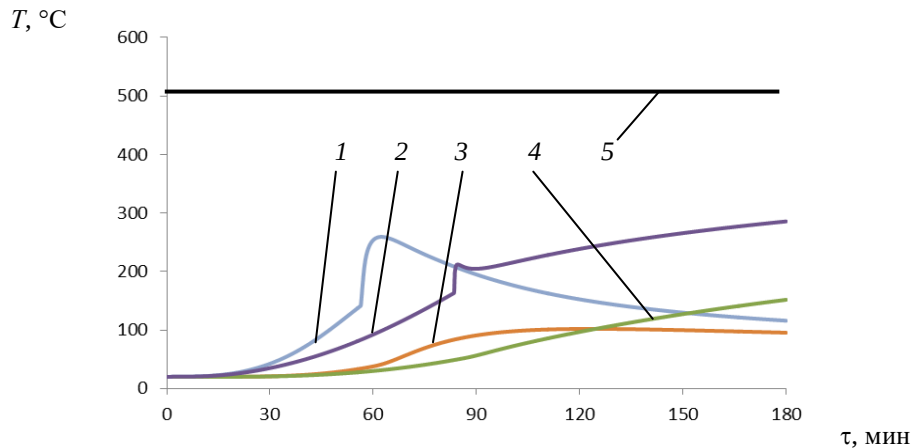


Рисунок 2.24 – Зависимости характерных температур в перекрытии от времени с начала пожара при сценарии 4 (таблица 2.4) в пожарной зоне в помещении БПУ на отметке +4.200 реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – температура на внутренней (огневой) поверхности перекрытия при реальном пожаре (закрытые двери); 2 – температура на внутренней (огневой) поверхности перекрытия при реальном пожаре (открытые двери); 3 – температура арматуры при реальном пожаре (закрытые двери); 4 – температура арматуры при реальном пожаре (открытые двери); 5 – критическая температура арматуры [170]

Здание обращения с твердыми радиоактивными отходами с очень низким уровнем активности является одним из основных производственных зданий АЭС «Аккую», в которых находится большая пожарная нагрузка [75, 177].

Предварительная обработка, переработка, кондиционирование и хранение радиоактивных отходов, а так же получение форм упакованных отходов, предназначенных для хранения и захоронения производятся согласно рекомендациям МАГАТЭ № GS-R-3 [246].

Наибольшую пожарную опасность представляют следующие помещения, выделенные в отдельные пожарные зоны:

- помещение отсеков с горючими отходами, в котором предусматривается хранение 246 280 кг горючих материалов с удельной пожарной нагрузкой 49 740,7 МДж/м²;

- помещение по обращению с ОНУА (отходы с очень низким уровнем радиоактивности) при удельной пожарной нагрузке 1373,3 МДж/м².

Характеристики рассматриваемых наиболее опасных сценариев пожара представлены в таблице 2.6 и на рисунках 2.25 и 2.26.

Таблица 2.6 – Характеристики рассматриваемых наиболее опасных сценариев пожара

№ сценария пожара	Помещение очага пожара	Горючие вещества и материалы	Категория помещения	Пожарная нагрузка, МДж	Площадь пола, м ²	Высота помещения, м
1	Помещение по обращению с ОНУА	Горючие материалы в конструкции автомобиля, электропозвонка, твёрдые горючие радиоактивные вещества в герметичных металлических бочках (6 штук), изоляция кабелей	B2	659177,69	558,0	11,1
2	Отсеки с горючими отходами	Горючие материалы в конструкции электропозвонка, твёрдые горючие радиоактивные вещества в герметичных металлических бочках (6 штук)	B1	6167847	179,0	9,4

Для расчета фактических пределов огнестойкости ограждающих конструкций пожарных зон использованы детерминистические методы, которые позволяют объективно оценивать уровень пожарной опасности и прогнозировать последствия воздействия опасных факторов пожара на вышеуказанные конструкции.

Расчет фактических пределов огнестойкости ограждающих конструкций пожарных зон разделен на теплотехническую и прочностную части.

При решении теплотехнической задачи используются программы расчета для ЭВМ [151], реализующие интегральную и полевою математические модели прогнозирования опасных факторов пожара [139, 140, 158].

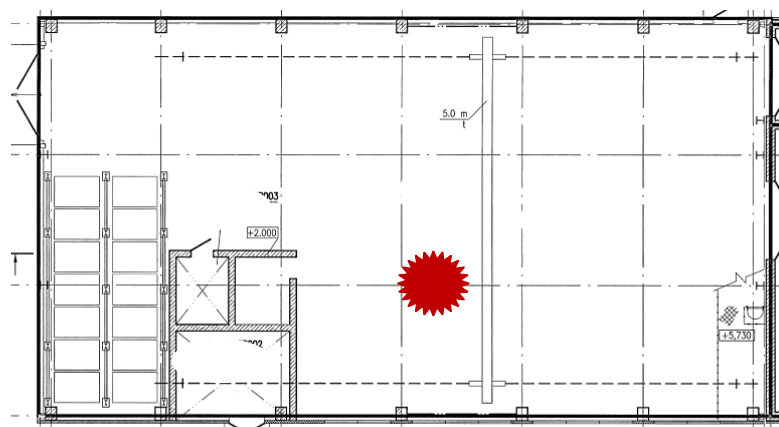


Рисунок 2.25 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено красным) в пожарной зоне в помещении по обращению с ОНУА на отметке 0.000 (сценарий 1) здания обращения с твердыми радиоактивными отходами с очень низким уровнем активности АЭС «Аккую»

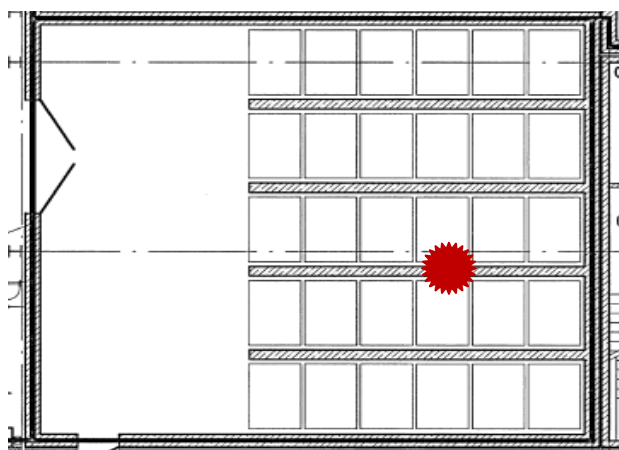


Рисунок 2.26 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено красным) в пожарной зоне в помещении отсека с горючими отходами на отметке 0.000 (сценарий 2) здания обращения с твердыми радиоактивными отходами с очень низким уровнем радиоактивности

Для решения прочностной задачи используется метод критических температур, когда предельное состояние конструкции определяется по достижению температуры арматуры в железобетонных конструкциях или температуры металлической конструкции ее критического значения.

Рассматривались «стандартный» пожар и два варианта развития реального температурного режима пожара в каждой пожарной зоне, когда двери помещения закрыты или открыта одна дверь (единичный отказ системы безопасности).

При расчете в случае «стандартного» пожара, а так же при условии полного выгорания горючей нагрузки [181] при моделировании реального температурного режима пожара продолжительность пожара составила более 6 час, и температура ограждающих конструкций была выше критической. Поэтому для обоснования пределов огнестойкости были обоснованы реально возможные сценарий пожара.

Реальный температурный режим [181] при закрытой двери помещения был менее опасным, чем при открытой двери, так как происходил до момента выгорания не пожарной нагрузки, а кислорода в помещении.

При сценарии 1 пожар возникает в помещении по обращению с ОНУА. Пожарной нагрузкой являются (рисунок 2.27): горючие материалы в конструкции спецавтомобиля и электропогрузчика, твёрдые горючие радиоактивные вещества в герметичных металлических бочках (6 штук), находящиеся на электропогрузчике, а также изоляция кабелей. Возгорание происходит на электропогрузчике с перебросом горения на остальные горючие материалы, то есть на шесть бочек с горючими отходами.

При сценарии 2 пожар возникает в помещении хранения ОНУА (рисунок 2.28). Пожарной нагрузкой являются: горючие материалы в конструкции электропогрузчика, твёрдые горючие радиоактивные вещества в герметичных металлических бочках (6 штук), находящиеся на электропогрузчике. Возгорание происходит на электропогрузчике с перебросом горения на остальные горючие материалы, находящиеся на нем – шесть бочек с горючими отходами.



Рисунок 2.27 – Наиболее опасное расположение горючей нагрузки в помещении по обращению с ОНУА: 1 – технологическая линия; 2 – электропогрузчик; 3 – бочки с ОНУА на электропогрузчике (6 штук)



Рисунок 2.28 – Помещение хранения ОНУА

В состав твердых горючих радиоактивных отходов входят текстиль, древесина, бумага, резина, лавсан, хлорсодержащие полимеры и полиэтилен. В электропогрузчике находятся следующие горючие вещества и материалы: резина, ПВХ, гидравлическое масло, ледерин, пенополиуретан и текстиль. В спецавтомобиле находятся смазочное масло, резина, пенополиуретан, полиэтилен, картон, ледерин, текстиль, поролон, дизельное топливо и ПВХ. Свойства пожарной нагрузки приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Свойства пожарной нагрузки

№	Наименование пожарной нагрузки	Низшая теплота сгорания Q_n^p , мдж/кг	Удельная скорость выгорания $\psi_{уд}$, кг/(м ² ·с)	Потребление кислорода при горении L_{O_2}	Удельное дымовыделение $D_{уд}$, Нп·м ² /кг	Линейная скорость распространения пламени $W_{пл}$, м/с
1	Электропогрузчик	31,6	0,0112	-2,99	850,0	0,0184
2	Горючие ТРО ОНУА	25,0**	0,021	-1,437	270	0,022

** - АЭС «Аккую». Энергоблоки 1- 4. Определение категорий помещений по взрывопожарной и пожарной опасности и классов взрывоопасной (пожароопасной) зоны в здании ОНУА

На рисунке 2.29 приведены зависимости от времени с начала пожара характерных температур, на рисунке 2.30 – среднеобъемной плотности кислорода, на рисунке 2.31 – массового расхода газовой смеси, выходящей через открытую дверь наружу, и массового расхода воздуха, поступающего через открытую дверь в помещение, на рисунке 2.32 – несгоревшей массы (ΔM) пожарной нагрузки в пожарной зоне в помещении на отметке 0.000 (сценарий 1).

Из рисунков 2.29 – 2.32 видно:

- среднеобъемная температура за все время пожара не превышает величины $171,8^{\circ}\text{C}$ при закрытых дверях и $218,0^{\circ}\text{C}$ при открытых дверях;
- пожар продолжается 78,7 мин при закрытых дверях до момента снижения концентрации кислорода до 14 % по массе;
- пожар продолжается 153,4 мин при открытых дверях до момента полного выгорания пожарной нагрузки.

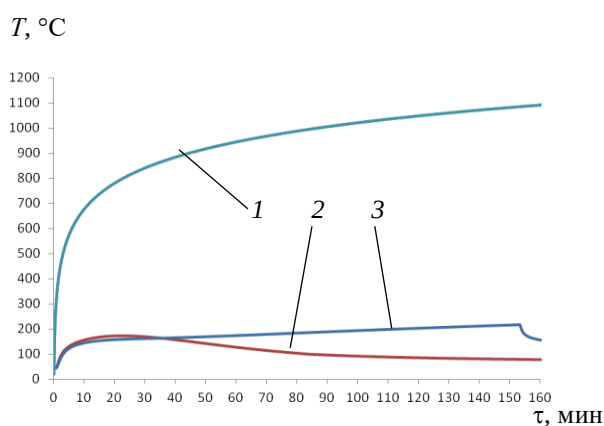


Рисунок 2.29 – Зависимости характерных температур в пожарной зоне в помещении от времени реального пожара в случае сценария 1:1 – среднеобъемная температура «стандартного» пожара; 2 – среднеобъемная температура реального режима пожара при закрытых дверях; 3 – среднеобъемная температура реального режима пожара при открытых дверях

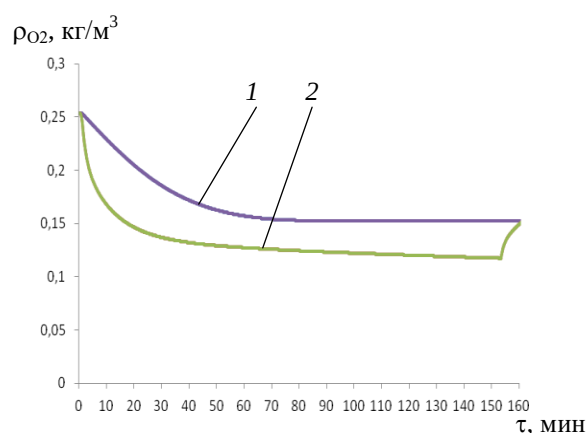


Рисунок 2.30 – Зависимости среднеобъемной плотности кислорода в пожарной зоне 1 в помещении от времени реального режима пожара в случае сценария 1:
1 – при закрытых дверях; 2 – при открытых дверях

Результаты расчета температурных режимов пожара при рассматриваемых наиболее опасных сценариях пожара приведены в таблице 2.8.

На рисунке 2.33 приведены зависимости от времени с начала пожара характерных температур, на рисунке 2.34 – среднеобъемной плотности кислорода,

на рисунке 2.35 – массового расхода газовой смеси, выходящей через открытую дверь наружу, и массового расхода воздуха, поступающего через открытую дверь в помещение, на рисунке 2.36 – несгоревшей массы (ΔM) пожарной нагрузки в пожарной зоне в помещении отсеков ОНУА на отметке 0.000 (сценарий 2).

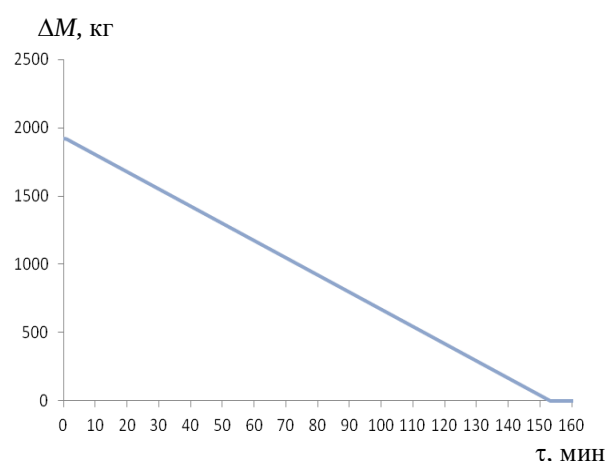
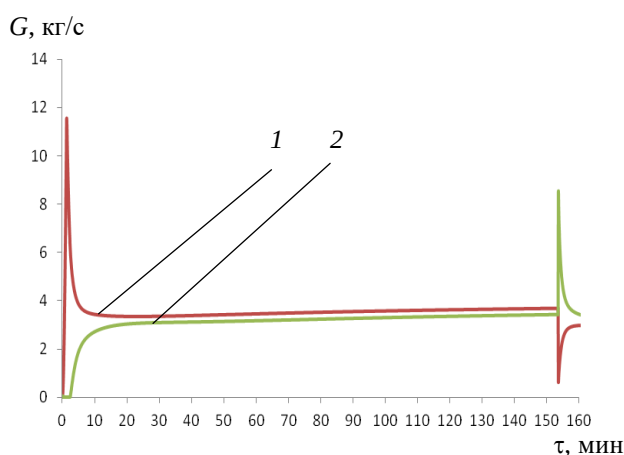


Рисунок 2.31 – Зависимости массового расхода газовой смеси, выходящей через открытую дверь наружу (кривая 1), и массового расхода воздуха, поступающего через открытую дверь в помещение (кривая 2), в пожарной зоне в помещении от времени реального режима пожара в случае сценария 1 при открытых дверях

Рисунок 2.32 – Зависимость несгоревшей массы (ΔM) пожарной нагрузки от времени с начала пожара в пожарной зоне в помещении по обращению с ОУНА в случае сценария 1 при открытых дверях

Из рисунков 2.33 – 2.36 видно:

- среднеобъемная температура за все время пожара не превышает величины $299,0^{\circ}\text{C}$ при закрытых дверях и $415,7^{\circ}\text{C}$ при открытых дверях;
- пожар продолжается 23,8 мин при закрытых дверях до момента снижения концентрации кислорода до 14 % по массе;
- пожар продолжается 139,2 мин при открытых дверях до момента полного выгорания пожарной нагрузки.

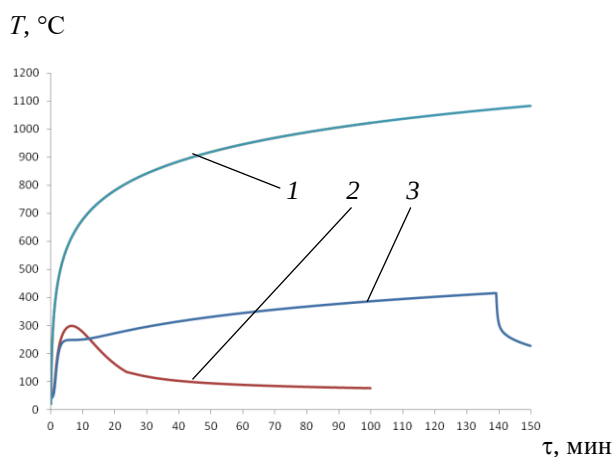


Рисунок 2.33 — Зависимости характерных температур в пожарной зоне в помещении от времени реального режима пожара в случае сценария 2: 1 — среднеобъемная температура «стандартного» пожара; 2 — среднеобъемная температура реального режима пожара при закрытых дверях; 3 — среднеобъемная температура реального режима пожара при открытых дверях

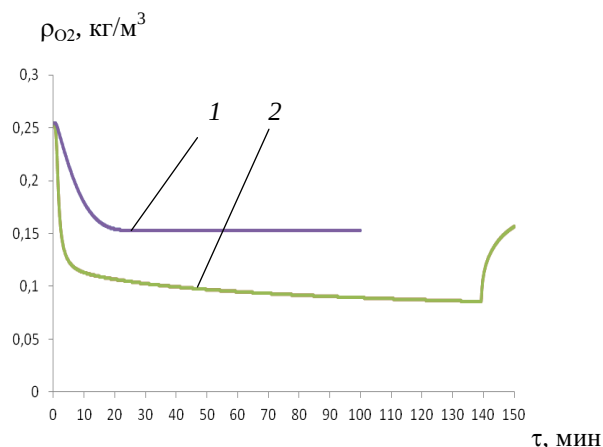


Рисунок 2.34 — Зависимости среднеобъемной плотности кислорода в пожарной зоне в помещении от времени реального режима пожара в случае сценария 2: 1 — при закрытых дверях; 2 — при открытых дверях

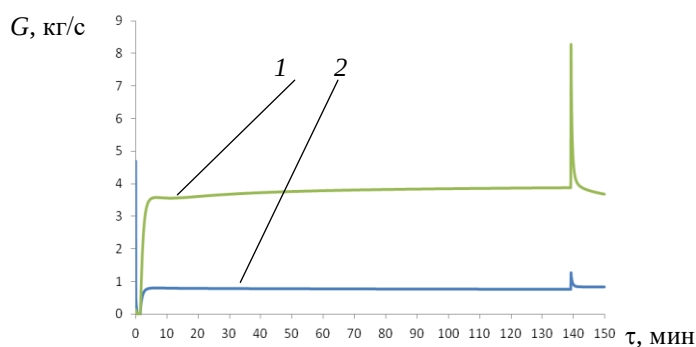


Рисунок 2.35 — Зависимости массового расхода газовой смеси, выходящей через открытую дверь наружу (кривая 1), и массового расхода воздуха, поступающего через открытую дверь в помещение (кривая 2), в пожарной зоне в помещении от времени реального режима пожара в случае сценария 2 при открытых дверях

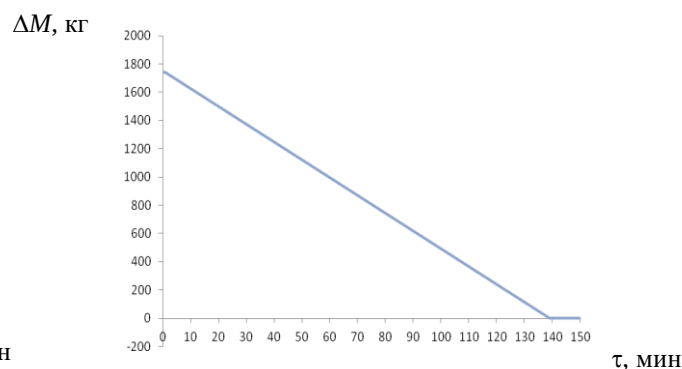


Рисунок 2.36 — Зависимость несгоревшей массы (ΔM) пожарной нагрузки от времени с начала пожара в пожарной зоне в помещении в случае сценария 2 при открытых дверях

Таблица 2.8 – Результаты расчета температурных режимов пожара при рассматриваемых наиболее опасных сценариях пожара

№ сценария пожара	Пожарная зона, помещение очага пожара	Пожар при закрытых дверях (герметичное помещение)			Эквивалентная продолжительность пожара, мин	Пожар при открытых дверях (открытое помещение)			Эквивалентная продолжительность пожара, мин
		Максимальная температура газовой среды, °С	Время достижения максимальной температуры, мин	Продолжительность пожара (выгорание кислорода), мин		Максимальная температура газовой среды, °С	Время достижения максимальной температуры, мин	Продолжительность пожара (выгорание пожарной нагрузки), мин	
1	Помещение по обращению с ОНУА	171,8	22,5	78,7	19,4	218,0	153,4	153,4	38,0
2	Отсеки с горючими отходами	299,0	6,8	23,8	18,4	415,7	139,2	139,2	59,7

Ограждающие конструкции пожарной зоны помещения по обращению с ОНУА выполнены из навесных сэндвич панелей, крепящихся к вертикальным железобетонным колоннам, и стальных ферм покрытия. Ограждающие конструкции пожарной зоны помещения отсеков с горючими отходами являются железобетонными.

Материалы железобетонных конструкций здания приняты следующие: бетон класса В30; рабочая арматура по ГОСТ Р 52544-2006 горячекатаная периодического профиля класса А500С; поперечная арматура класса А500С по ГОСТ Р 52544-2006.

Характеристики несущих железобетонных стен:

- толщина 400 мм, арматура диаметром 16 мм, толщина защитного слоя 34 мм;
- толщина 200 мм, арматура диаметром 12 мм, толщина защитного слоя 28 мм.

Сечение железобетонных колонн принято 400×400 мм, толщина защитного слоя 34 мм.

Толщина монолитных железобетонных плит покрытия равна 200 мм с толщиной защитного слоя 28 мм.

В расчётах принят тяжелый бетон. Теплофизические свойства железобетонных конструкций принимались следующими [158]: плотность $\rho=2330 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость $c=481+0,84 \cdot T \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda=1,3-3,5 \cdot 10^{-4} \cdot T \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, где T – температура, К.

Наружные стены в осях выполняются из навесных сэндвич панелей, узлы крепления которых к колоннам и элементам покрытия защищены слоем минеральной ваты толщиной 30 мм.

Теплофизические свойства минераловатных плит принимались следующими [158]: плотность $\rho=125 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость $c=582+0,63 \cdot T \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda=-0,107+5,8 \cdot 10^{-4} \cdot T \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, где T – температура, К.

Металлические фермы покрытия в осях имеют минимальную приведенную толщину $\delta_{пр}=1,9$ мм (связи вертикальные) ферм покрытия, профиль Гн. 100х4 ГОСТ 30245-2003 С255).

Огнезащита металлических ферм покрытия выполнена с помощью покрытия огнезащитного силиконового «Силотерм ЭП-6» по ТУ 2257-002-33680530-02 с изменениями 02 «Силиконовое огнезащитное покрытие «Силотерм ЭП-6» в соответствии с технологическим регламентом производства.

Толщина сухого слоя покрытия огнезащитного силиконового «Силотерм ЭП-6», наносимого на металлическую ферму покрытия с минимальной приведенной толщиной равна $\delta_c=3,68$ мм.

Теплофизические свойства стальных конструкций определялись по [158]: плотность $\rho = 7800$ кг/м³; удельная теплоемкость $c = 470+0,21t+5,0\cdot 10^{-4}t^2$ Дж/(кг·К); коэффициент теплопроводности $\lambda = 58-0,042\cdot t$ Вт/(м·К), где t – температура, °С. Критическую температуру для стальных конструкций принимаем равной 500°С [169, 170].

Для проверки точности математической модели расчета огнезащитной эффективности покрытия огнезащитного силиконового «Силотерм ЭП-6» на рисунке 2.37 представлены результаты расчета температуры стальной конструкции с приведенной толщиной $\delta_{пр}=5,8$ мм и толщиной сухого слоя покрытия $\delta_c=2,3$ мм с данными сертификационных испытаний этого покрытия в условиях «стандартного» пожара при огнезащитной эффективности 90 мин.

Неопределенные теплофизические свойства вспученного слоя покрытия огнезащитного силиконового «Силотерм ЭП-6» принимались такими, чтобы разница между расчетной и экспериментальной температурами не превышала 1%:

- плотность $\rho_c = 320$ кг/м³; удельная теплоемкость $c_c = 1000$ Дж/(кг·К);
 - эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_c = 0,17$ Вт/(м·К)
- (Силотерм ЭП-6М Огнезащитное покрытие ТУ 2257-002-33680530-02 с изм. 02

Технологический регламент для конструкций из стали от 27.08.2013);

– коэффициент вспучивания $k_{всп} = 10$ (Силотерм ЭП-6М Огнезащитное покрытие ТУ 2257-002-33680530-02 с изменениями 02 Технологический регламент для конструкций из стали от 27.08.2013).

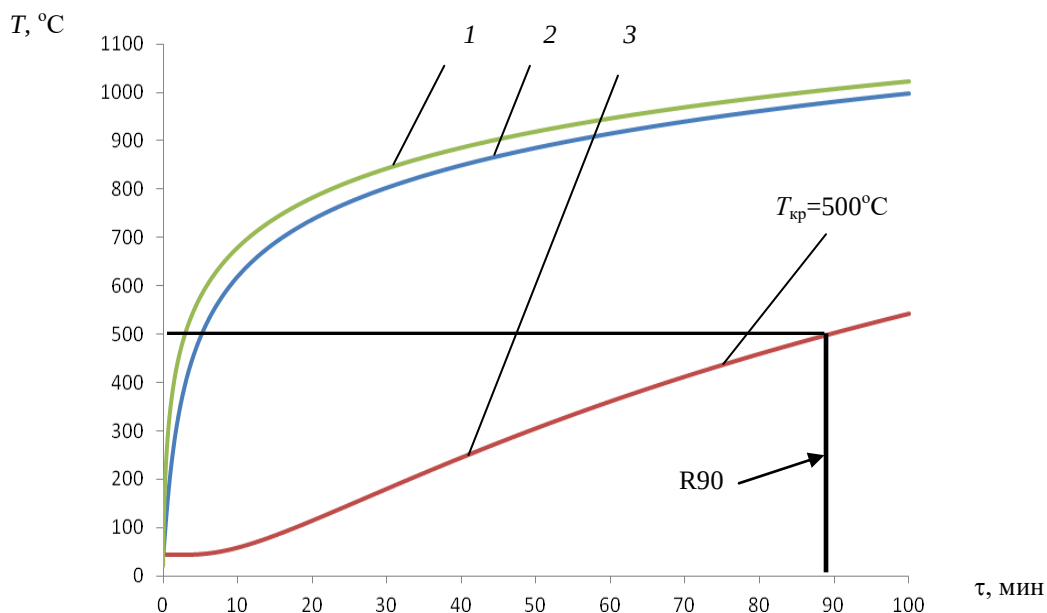


Рисунок 2.37 – Зависимости от времени характерных температур в случае обработки поверхности стальной конструкции с приведенной толщиной $\delta_{пр}=5,8$ мм покрытием огнезащитным силиконовым «Силотерм ЭП-6» с толщиной сухого слоя покрытия $\delta_c=2,3$ мм при «стандартном» пожаре:
 1 – среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре;
 2 – температура наружной поверхности огнезащиты;
 3 – температура поверхности стальной конструкции

Расчетное обоснование пределов огнестойкости ограждающих конструкций проводилось в соответствии со статьей 35 федерального закона № 123-ФЗ [210] наступление пределов огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций допускается определять в результате расчетов.

В данной работе в соответствии с [170] приняты следующие термины и их определения:

- фактический предел огнестойкости $П_{\phi}$ – предел огнестойкости, определённый расчётным методом для реального температурного режима пожара, описываемого зависимостями, полученными по результатам моделирования динамики пожара.

- требуемый предел огнестойкости $П_{тр}$ – предел огнестойкости, учитывающий требования нормативных правовых актов [210] и нормативных документов по пожарной безопасности [181; 196]. В данной работе, в соответствии с п. Р.1 прил. Р ГОСТ Р 12.3.047-2012 [32], требуемые пределы огнестойкости установлены на основе определения эквивалентной продолжительности пожара и коэффициента огнестойкости; эквивалентная продолжительность пожара $П_{экв}$ – продолжительность пожара, характеризуемого стандартным температурным режимом, в течение которого предполагается такое же тепловое воздействие в помещении, как при реальном режиме пожара [170].

В проекте АЭС «Аккую» принят принцип пассивной локализации пожара в пожарных зонах, вошедших в Перечень пожарных зон, содержащих два и более канала СБ. Принцип локализации пожара предполагает, что пределы огнестойкости ограждающих конструкций таких пожарных зон обеспечивают локализацию пожара до полного свободного выгорания пожарной нагрузки без учета воздействия на пожар огнетушащих веществ. С учётом этого принципа, в соответствии с п. Р.1.4 прил. Р ГОСТ Р 12.3.047-2012 [32] требуемый предел огнестойкости границ пожарных зон принят равным ближайшему большему значению предела огнестойкости, установленного ч. 1 ст. 35 Федерального закона № 123-ФЗ [210], относительно максимального значения эквивалентной продолжительности пожара, определённой по результатам моделирования динамики пожара, с учётом коэффициента огнестойкости (K_0):

$$P_{mp} \geq K_0 \cdot P_{экв} \quad (2.24)$$

Требования безопасности выполнены, если соблюдается условие:

$$P_{\phi} \geq P_{mp} \quad (2.25)$$

Эквивалентная продолжительность пожара определялась из равенства площадей под температурной зависимостью реального температурного режима пожара от времени до 120 мин от начала горения и под соответствующей зависимостью «стандартного» пожара с продолжительностью $\tau_{экв}$ [170]:

$$F_{cm} \geq F_p \quad (2.26)$$

где $F_p = \int_0^{120} T d\tau$ – площадь под кривой «температура-время» реального температурного режима пожара в течение 120 мин;

$F_{ст} = \int_0^{\tau_{экв}} T d\tau$ – площадь под кривой «температура-время» стандартного пожара в течение $\tau_{экв}$ мин.

Коэффициент огнестойкости, в соответствии с [170] является коэффициентом запаса, который должен гарантировать необходимую и достаточную надёжность работы строительных конструкций при пожаре. Коэффициент огнестойкости определён по формуле (Р.8) прил. Р ГОСТ Р 12.3.047-2012 [32]:

$$K_0 = 0,527 \exp(0,36\beta) \quad (2.27)$$

где β – характеристика безопасности, определена по таблице Р.3 приложения Р ГОСТ Р 12.3.047-2012 [32] в зависимости от величины предельной вероятности отказа строительных конструкций при пожаре P_n .

Предельная вероятность отказа строительных конструкций при пожаре P_n определена по формуле (Р.7) приложение Р ГОСТ Р 12.3.047-2012 [32]:

$$P_n = \frac{P_{дон}}{P_0 S (1 - P_a)(1 - P_{n.o.})} \quad (2.28)$$

где $P_{дон}$ – допустимая вероятность отказа конструкций от пожаров, принята по

таблице Р.1 прил. Р ГОСТ Р 12.3.047-2012 [32] как для противопожарных преград: $P_{дон} = 10^{-6}$; P_0 – вероятность возникновения пожара, отнесённая к 1 м^2 площади помещения, принята в соответствии с табл. Р.1 прил. Р ГОСТ Р 12.3.047-2012 [32] как для электростанций: $P_0 = 2,24 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{год}$; S – площадь помещения очага пожара, м^2 ; P_a – вероятность выполнения задачи (тушения пожара) автоматической установкой пожаротушения, принята $P_a = 0$, так как во всех рассматриваемых сценариях не учитывается воздействие на пожар огнетушащих веществ и горение продолжается до полного свободного выгорания пожарной нагрузки; $P_{н.о.}$ – вероятность предотвращения развитого пожара силами пожарной охраны, принята $P_{н.о.} = 0$, так как во всех рассматриваемых сценариях не учитывается воздействие на пожар огнетушащих веществ и горение продолжается до полного свободного выгорания пожарной нагрузки. Результаты расчёта коэффициента огнестойкости для различных сценариев пожара приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты расчёта коэффициента огнестойкости для различных сценариев пожара

Сценарий	Допустимая вероятность отказа конструкции $P_{дон}$	Площадь помещения $S, \text{м}^2$	Вероятность возникновения пожара $P_0 S$	Предельная вероятность отказа конструкции P_n	Характеристика безопасности β	Коэффициент огнестойкости K_0
1	10^{-6}	558	0,012	$8,001 \cdot 10^{-5}$	3,807	2,075
2	10^{-6}	179,0	$4,01 \cdot 10^{-3}$	$2,494 \cdot 10^{-4}$	3,5	1,858 (1,7913)*

*Примечание: коэффициент огнестойкости согласно работе [124].

При расчетном обосновании пределов огнестойкости ограждающих строительных конструкций использованы нормативные методы определения пределов огнестойкости строительных конструкций [28; 122; 123], реализованные

в программах расчета на ЭВМ, имеющих свидетельство об официальной регистрации программы в Федеральной службе РФ по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [129; 131].

Рассматривались 2 варианта развития пожара при каждом сценарии его развития:

- двери помещения закрыты (закрытая термодинамическая система);
- двери помещения открыты (единичный отказ системы безопасности, открытая термодинамическая система).

Расчет прекращался через 180 мин от начала пожара или до момента времени, когда концентрация кислорода становилась меньше концентрации, при которой прекращается горение.

Результаты расчета пределов огнестойкости строительных конструкций при рассматриваемых наиболее опасных сценариях пожара представлены в таблице 2.10.

На рисунке 2.38 приведены зависимости от времени с начала пожара характерных температур, в том числе, максимальных температур поверхности элемента стальной конструкции покрытия с минимальной приведенной толщиной $\delta_{пр}=1,9$ мм, расположенного над геометрическим центром пожарной нагрузки, с нанесенным покрытием огнезащитным силиконовым «Силотерм ЭП-6» с толщиной сухого слоя $\delta_c=3,68$ мм в пожарной зоне в помещении при открытых дверях (сценарий 1).

Анализ результатов расчетов показал, что:

- при «стандартном» пожаре: температура элемента стальной конструкции покрытия через 90 мин от начала пожара равна $510,3^{\circ}\text{C}$; фактический предел огнестойкости вышеуказанного элемента конструкции равен R87,9; температура арматуры железобетонной колонны сечением 400×400 мм с толщиной защитного слоя 34 мм через 90 мин от начала пожара равна $496,0^{\circ}\text{C}$; фактический предел огнестойкости железобетонной колонны сечением 400×400 мм с толщиной защитного слоя 34 мм равен R 91,4;

– при реальном температурном режиме пожара: температура элемента стальной конструкции покрытия через 90 мин от начала пожара равна 337,3°C; фактический предел огнестойкости вышеуказанного элемента конструкции равен R153,4; фактический предел огнестойкости железобетонной колонны сечением 400×400 мм с толщиной защитного слоя 34 мм больше R90, так как эквивалентная продолжительность пожара существенно меньше 90 мин (равна 38,0 мин).

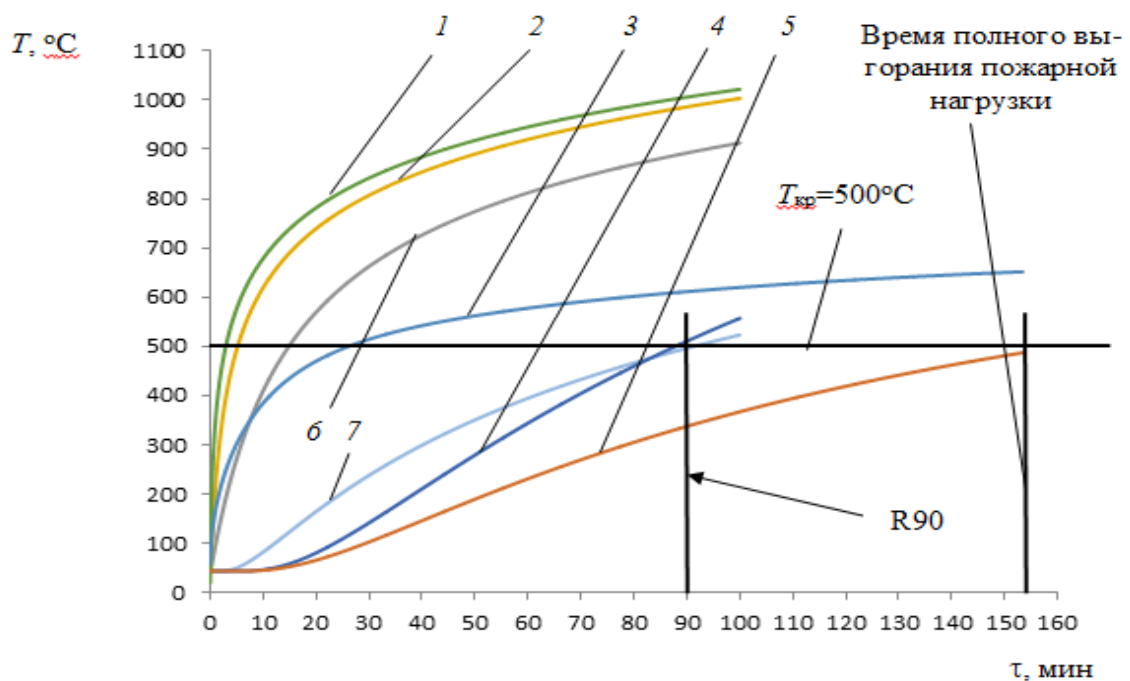


Рисунок 2.38 – Зависимости от времени температуры в случае обработки поверхности элемента стальной конструкции покрытия с минимальной приведенной толщиной $\delta_{пр}=1,9$ мм, расположенного над геометрическим центром пожарной нагрузки, с нанесенным покрытием «Силотерм ЭП-6» с толщиной сухого слоя $\delta_c=3,68$ мм при сценарии 1: 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 стальной конструкции при «стандартном» пожаре; 5 – температура поверхности стальной конструкции при реальном пожаре; 6 – температура поверхности железобетонной колонны сечением 400×400 мм с толщиной защитного слоя 34 мм при «стандартном» пожаре; 7 – температура арматуры железобетонной колонны сечением 400×400 мм с толщиной защитного слоя 34 мм при реальном температурном режиме пожара

Таблица 2.10 – Результаты расчета пределов огнестойкости строительных конструкций при рассматриваемых наиболее опасных сценариях пожара

№ сценария пожара	Пожарная зона, помещение очага пожара	Пожар при закрытых дверях			Пожар при открытых дверях			Коэффициент огнестойкости	Предел огнестойкости строительных конструкций	
		Максимальная температура арматуры, °С	Продолжительность пожара, мин	Эквивалентная продолжительность пожара, мин	Максимальная температура арматуры, °С	Продолжительность пожара, мин	Эквивалентная продолжительность пожара, мин		Требуемый	Фактический
1	Помещение по обращению с ОНУА	-	78,7	19,4	337,3* 425,3** 496,0***	153,4	38,0	2,075	REI (EI) 90	> REI (EI) 90
2	Отсеки с горючими отходами	84,5	23,8	18,4	341,5	139,2	59,7	1,858	REI (EI) 120	> REI (EI) 120

Примечания к таблице 2.9: * - максимальная температура поверхности элемента стальной конструкции покрытия с минимальной приведенной толщиной $\delta_{пр}=1,9$ мм, расположенного над геометрическим центром пожарной нагрузки, с нанесенным покрытием огнезащитным силиконовым «Силотерм ЭП-6» с толщиной сухого слоя $\delta_c=3,68$ мм;

** - максимальная температура металлического элемента крепления сэндвич-панели к элементам покрытия, расположенного над геометрическим центром пожарной нагрузки;

*** - максимальная температура арматуры железобетонной колонны сечением 400×400 мм при «стандартном» пожаре.

На рисунке 2.39 приведены зависимости от времени с начала пожара характерных температур, в том числе, максимальной температуры металлического элемента крепления сэндвич-панели к элементам покрытия, расположенного над геометрическим центром пожарной нагрузки, в пожарной зоне в помещении по обращению с ОНУА при открытых дверях (сценарий 1).

Огнезащита элемента крепления сэндвич-панели с минимальной приведенной толщиной $\delta_{пр}=10$ мм выполнена с помощью слоя минеральной ваты толщиной $\delta_c=30$ мм.

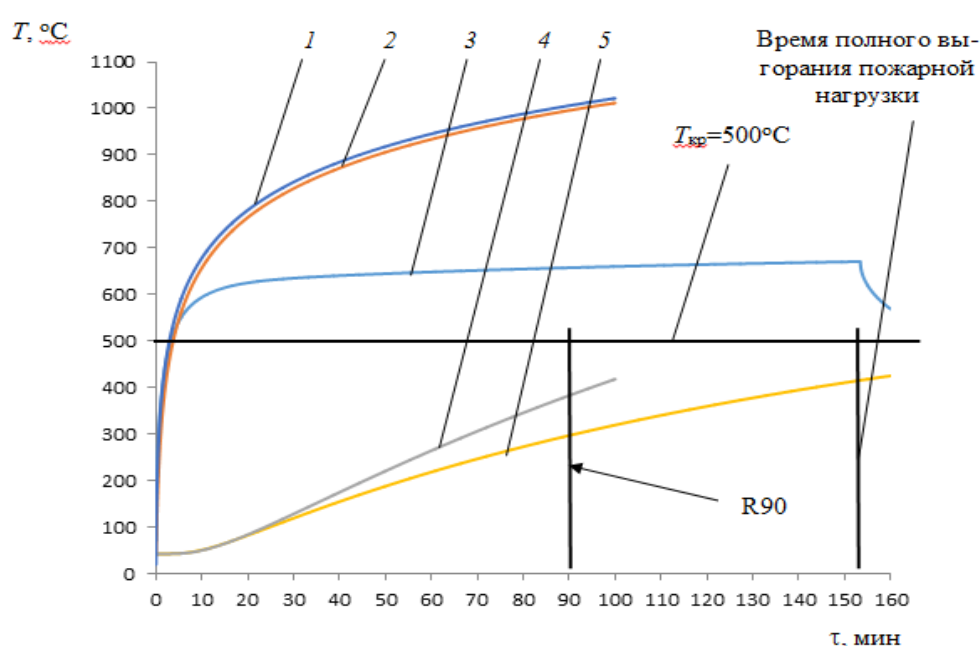


Рисунок 2.39 – Зависимости от времени характерных температур в случае металлического элемента крепления сэндвич-панели к элементам покрытия, расположенного над геометрическим центром пожарной нагрузки, с нанесенным огнезащитным слоем минеральной ваты толщиной 30 мм при сценарии 1: 1 – среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре; 2 – температура наружной поверхности металлического элемента крепления сэндвич-панели к элементам покрытия при «стандартном» пожаре; 3 – температура наружной поверхности металлического элемента крепления сэндвич-панели к элементам покрытия при реальном пожаре; 4 – температура поверхности металлического элемента крепления при «стандартном» пожаре со слоем минеральной ваты 30 мм; 5 – температура поверхности металлического элемента крепления при реальном пожаре со слоем минеральной ваты 30 мм

Анализ результатов расчетов показал, что:

- при «стандартном» пожаре: температура металлического элемента крепления, расположенного над геометрическим центром пожарной нагрузки, через 90 мин от начала пожара равна $383,1^{\circ}\text{C}$; фактический предел огнестойкости вышеуказанного элемента конструкции равен $>R90$;

- при реальном температурном режиме пожара: температура через 90 мин от начала пожара равна $297,2^{\circ}\text{C}$; максимальная температура металлического элемента крепления, расположенного над геометрическим центром пожарной нагрузки, за полное время пожара равна $425,3^{\circ}\text{C}$; фактический предел огнестойкости вышеуказанного элемента конструкции равен $>R90$.

На рисунке 2.40 представлены зависимости характерных температур железобетонных ограждающих конструкции покрытия толщиной 200 мм с толщиной защитного слоя 28 мм пожарной зоны отсеков с горючими отходами от времени при сценарии 2 в случае открытых дверей:

- при «стандартном» пожаре: температура арматуры через 120 мин от начала пожара более $500,0^{\circ}\text{C}$; фактический предел огнестойкости железобетонной конструкции равен $R73,5$;

- при реальном температурном режиме пожара: максимальная температура арматуры через 120 мин от начала пожара равна $305,5^{\circ}\text{C}$; максимальная температура арматуры за полное время пожара равна $341,5^{\circ}\text{C}$; фактический предел огнестойкости железобетонной конструкции более $R150$.

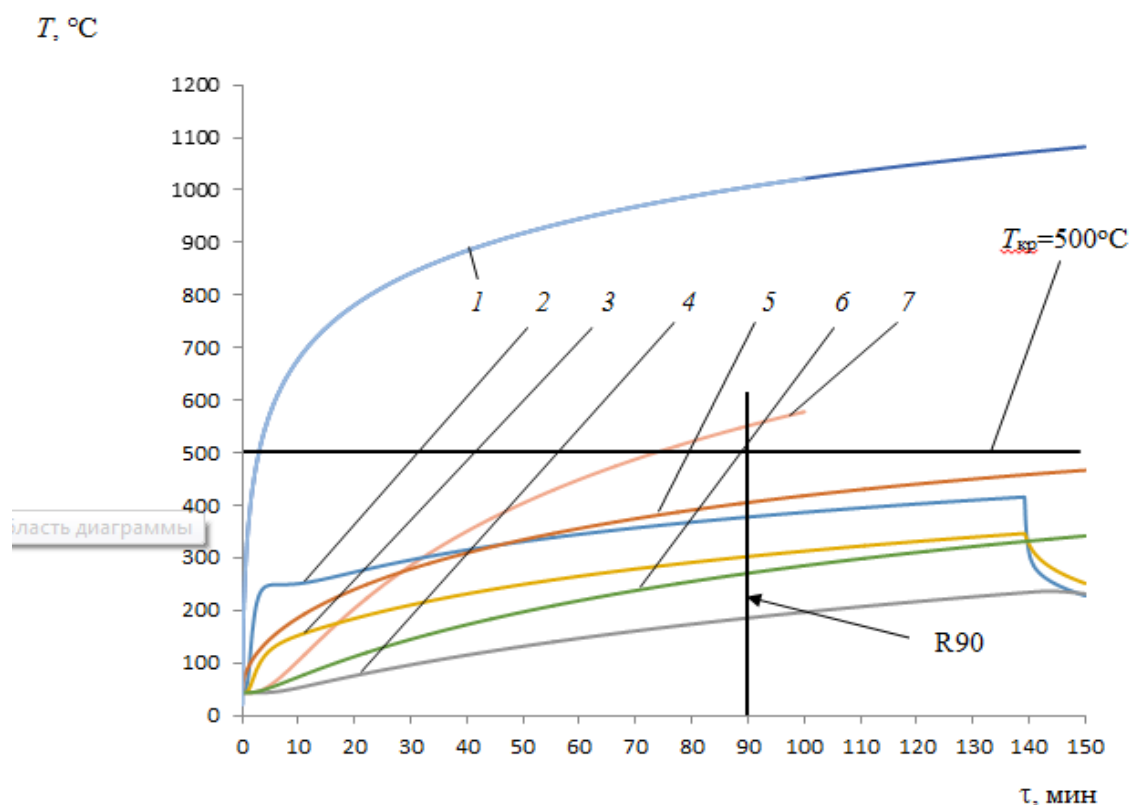


Рисунок 2.40 – Зависимости характерных температур железобетонных ограждающих конструкции покрытия толщиной 200 мм с толщиной защитного слоя 28 мм пожарной зоны отсеков с горючими отходами от времени при сценарии 2 в случае открытых дверей: 1 – среднеобъемная температура «стандартного» пожара; 2 – среднеобъемная температура реального режима пожара; 3 – средняя температура обогреваемой поверхности покрытия при реальном пожаре; 4 – средняя температура арматуры покрытия при реальном пожаре; 5 – максимальная температура внутренней поверхности покрытия над геометрическим центром пожарной нагрузки при реальном пожаре; 6 – максимальная температура арматуры покрытия над геометрическим центром пожарной нагрузки при реальном пожаре; 7 – максимальная температура арматуры покрытия при «стандартном» пожаре

Из таблицы 2.9 и рисунка 2.40 видно, что температура арматуры в железобетонных стенах и перекрытиях с минимальным защитным слоем, расположенных в отсеках с горючими отходами ОНУА, для рассматриваемого наиболее опасного сценария развития пожара не достигает критического значения

$T_{кр}=500^{\circ}\text{C}$. При этом фактический предел огнестойкости строительных конструкций границ пожарных зон превышает требуемый предел огнестойкости $R120$, что исключает возможность распространения опасных факторов пожара за границы пожарных зон в течение времени полного свободного выгорания пожарной нагрузки без учёта воздействия на пожар огнетушащих веществ.

Пределы огнестойкости заполнений проёмов в строительных конструкциях границ пожарных зон – противопожарных дверей, люков, клапанов (EI 90) превышают эквивалентную продолжительность пожара, что исключает возможность распространения ОФП через указанные проёмы в течение времени полного свободного выгорания пожарной нагрузки без учёта воздействия на пожар огнетушащих веществ.

2.2.3 Определение пределов огнестойкости ограждающих конструкций Нововоронежской АЭС-2

Материалы строительных конструкций реакторного здания выполнены из следующих материалов:

- внутренние стены обстройки: бетон прочностью на сжатие B25 с защитным слоем толщиной 35 мм с арматурой класса A 500C;
- внутренняя защитная оболочка: бетон B50 с защитным слоем толщиной 30 мм с арматурой класса A 500C;
- контурные стены: бетон B25 с защитным слоем толщиной 35 мм с арматурой класса A 500C;
- перекрытие обстройки: на отметке +11,950: бетон B25 с защитным слоем толщиной 35 мм с арматурой класса A 500C; на отметке +3,550, +4,750: бетон B25 с защитным слоем толщиной 50 мм с арматурой класса A 500C;
- плита зоны локализации аварии на отметке +0,550: бетон B25 с защитным слоем толщиной 35 мм с арматурой класса A 500C;

Принимаем наиболее опасные с точки зрения нагрева конструкций стен и перекрытий сценарии пожара.

В таблице 2.11 представлены характеристики рассматриваемых сценариев пожара. На рисунках 2.41 и 2.42 приведены на планах этажей места возникновения начальных и вторичных очагов пожара для сценариев пожара, перечисленных в таблице 2.11.

Для обеспечения независимости каналов систем безопасности реакторного здания при пожарах необходимо проверить возможность одновременного воздействия ОФП на кабели 1-го и 2-го каналов СБ.

При сценарии 2 (таблица 2.11) развитие пожара может происходить следующим образом:

- развитие пожара внутри помещения кабельного этажа НЭ на отметке 0,000;
- выход ОФП из вышеуказанного помещения через дверь (открытая или в результате потери целостности от воздействия ОФП) в помещение кабельного этажа НЭ на отметке 0,000 и через дверь (открытая или в результате потери целостности от воздействия ОФП) в коридор;
- в коридоре происходит потеря пределов огнестойкости стены, смежной с помещением кабельного этажа 1-го канала СБ, и ОФП поступают в помещение; происходит выход из строя 1-го канала СБ;
- в помещении кабельного этажа НЭ на отметке 0,000 происходит возгорание кабелей (вторичный очаг пожара);
- выход ОФП из вышеуказанного помещения через дверь (открытая или в результате потери целостности от воздействия ОФП) в коридоре;
- в коридоре происходит потеря пределов огнестойкости стены, смежной с помещением кабельного этажа 2-го канала СБ, и ОФП поступают в помещение; происходит выход из строя 2-го канала СБ.

При сценарии 3 (таблица 2.11, рисунок 2.42) развитие пожара может происходить следующим образом:

- развитие пожара внутри помещения кабельного этажа РПУ на отметке +5,000 и сопряженных помещений кабельного этажа;
- выход ОФП из вышеуказанных помещений через двери (открытые или в результате потери целостности от воздействия ОФП) в коридоре;
- в коридоре происходит потеря пределов огнестойкости дверей, ведущих в смежные помещения: помещение установок системы установок автоматического управления и контроля 1-го канала СБ; ОФП поступают в соседнее помещение; происходит выход из строя 1-го канала СБ; помещение системы установок автоматического управления и контроля 2-го канала СБ; ОФП поступают в соседнее помещение; происходит выход из строя 2-го канала СБ.

Теплофизические свойства железобетонных конструкций принимались следующими [158]: бетон тяжелый на гранитном щебне: плотность $\rho=2330 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость $c=481+0,84 T \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda=1,3-3,5\cdot 10^{-4} T \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, где T – температура, К.

Критические температуры для железобетонных конструкций равны [170]: для арматуры $T_{\text{кр}} = 500^\circ\text{C}$.

Теплофизические свойства стальных конструкций определялись по [15, 158]: плотность $\rho=7800 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость $c=470+0,21t+5,0\cdot 10^{-4} t^2 \text{ Дж/(кг К)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda=58-0,042t \text{ Вт/(м К)}$, где t – температура, $^\circ\text{C}$.

Критическую температуру для стальных конструкций принимаем равной 500°C [170].

Параметры воздуха в помещении принимались следующими: температура 20°C ; давление 10^5 Па .

Таблица 2.11 – Характеристики рассматриваемых наиболее опасных сценариев пожара в реакторном здании

№ сценария пожара	Помещение очага пожара	Категория по пожарной и взрывопожарной опасности	Оборудование, элементы, кабели СБ, СНЭ	Площадь пола, м ²	Высота помещения, м
1	Кабельный этаж 1-го канала СБ на отметке 0,000	В1	Силовые кабели 1-го канала СБ	124,34	3,0
2	Кабельный этаж НЭ на отметке 0,000	В1	Кабели НЭ	210,72	3,0
3	Кабельный этаж РПУ (три смежных помещения + прилегающий коридор) на отметке +4,950	В1	Кабели НЭ, силовые кабели 1-го и 2-го каналов СБ	233,02	2,4

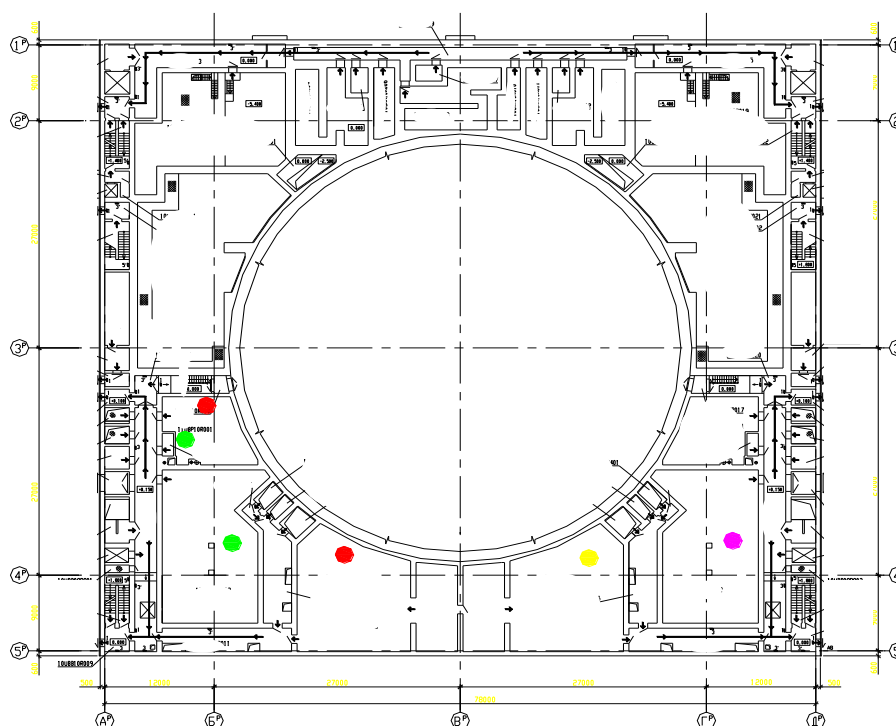


Рисунок 2.41 – Места возникновения начального очага пожара (обозначено красным кругом) и вторичного очага пожара (обозначено желтым кругом) на отметке 0,000 (сценарии 1, 2).

Помещения 1-го канала СБ, которые подвергаются воздействию ОФП обозначены зеленым кругом, соответствующие помещения 2-го канала СБ – фиолетовым кругом

перегородки с пределом огнестойкости не менее EI 60
с противопожарными дверьми с EI 60

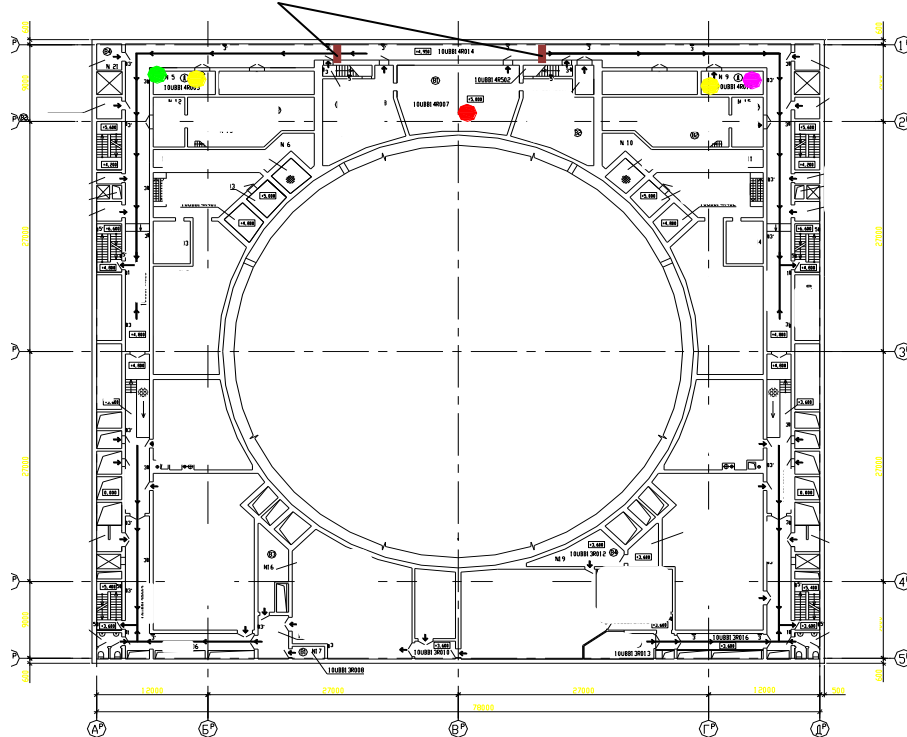


Рисунок 2.42 – Места возникновения начального очага пожара - кабельный этаж РПУ (три смежных помещения + прилегающий коридор на отметке +4,950 (обозначено красным кругом) и вторичного очага пожара (обозначено желтым кругом) на отметке +5,000 (сценарий 3). Помещения 1-го канала СБ, которые подвергаются воздействию ОФП обозначены зеленым кругом, соответствующие помещения 2-го канала СБ – фиолетовым кругом

На рисунке 2.43 представлены зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара в кабельном этаже 1-го канала СБ (реакторное здание, отметка 0,000, сценарий 1 (таблица 2.11).

Расчет прекращался, когда концентрация кислорода становилась меньше концентрации, при которой прекращается горение.

Распределения температур по толщине стены и перекрытия кабельного этажа 1-го канала СБ при наиболее опасном сценарии пожара (рисунок 2.44) через 180 мин. от начала пожара приведены на рисунке 2.44.

Принимаем, что при температуре газовой среды помещения, равной 180°С, может произойти короткое замыкание кабелей НГ, а при температуре газовой

среды помещения, равной 150°C , может произойти короткое замыкание кабелей РГ под токовой нагрузкой, находящихся в помещении, как показано в гл.3 диссертационного исследования и работе [109].

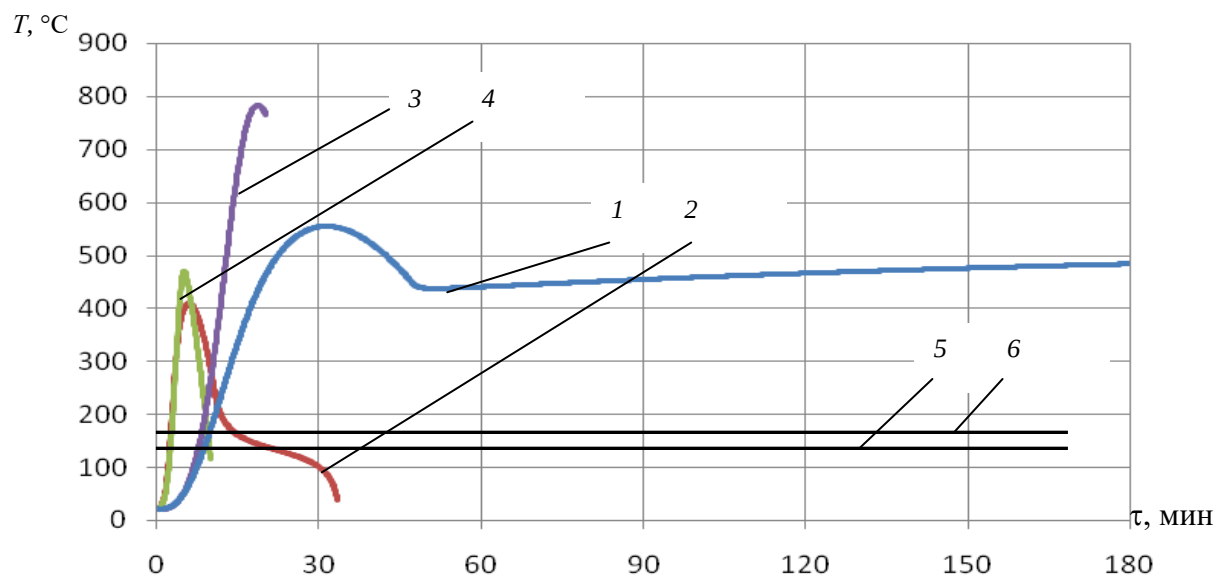


Рисунок 2.43 – Зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара в кабельном этаже 1-го канала СБ (реакторное здание, отметка 0,000, сценарий 1): 1 – кабели НГ, открытые двери; 2 – кабели РГ, открытые двери; 3 – кабели НГ, герметичное помещение; 4 – кабели РГ, герметичное помещение; 5 – температура газовой среды, при которой происходит КЗ кабелей РГ; 6 – температура газовой среды, при которой происходит КЗ кабелей НГ

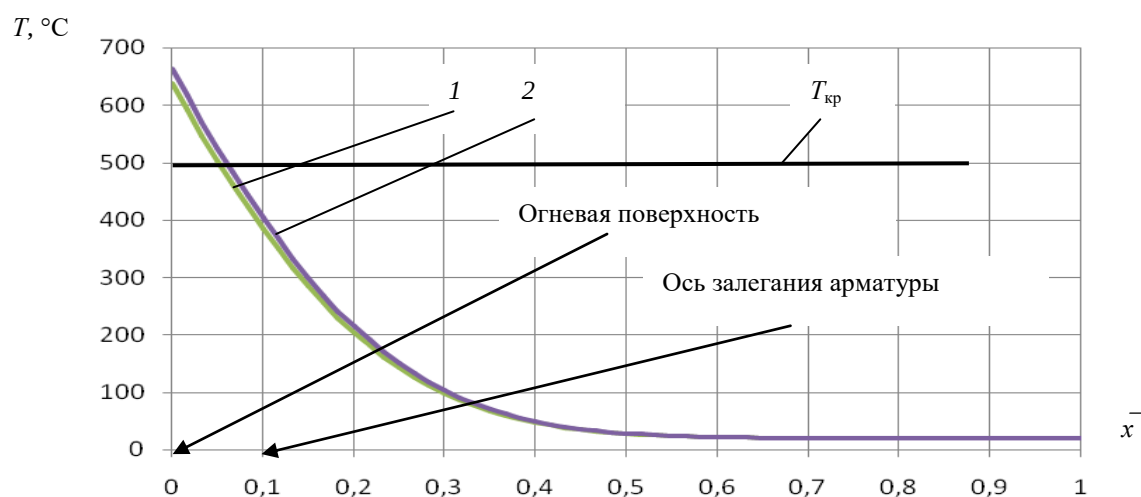


Рисунок 2.44 – Распределения температур по толщине стены (1) и перекрытия (2) кабельного этажа 1-го канала СБ через 180 мин. от начала пожара (сценарий 1)

Обозначения на рисунке 2.44: $\bar{x} = x/\delta$, где x – расстояние по нормали от огневой поверхности стены или перекрытия, м; δ – толщина стены или перекрытия, м.

На рисунке 2.45 представлены зависимости от времени температуры на внутренней (огневой) поверхности перекрытия и на глубине закладки арматуры в помещении (реакторное здание, отметка 0,000, сценарий 1 (таблица 2.11) при «стандартном» и реальном режимах пожара.

Из рисунках 2.44 и 2.45 видно, что температура в месте закладки арматуры не достигает критического значения при наиболее опасном варианте развития пожара.

На рисунке 2.46 показаны зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара в кабельном этаже НЭ на отметке 0,000, сценарий 2 (таблица 2.11) при горении кабелей НГ, на рисунке 2.47 – при горении кабелей РГ.

На рисунке 2.48 приведены зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара в кабельном этаже РПУ (три смежных помещения + прилегающий коридор между помещениями систем установок автоматического управления и контроля 1-го и 2-го канала СБ – кривая 3 и три смежных помещения и прилегающей части коридора между перегородками (показаны на рисунке 2.42) на отметке +4,950 – кривая 2, нагрузка №4 таблица 2.16), сценарий 3 (таблица 2.11) при горении кабелей РГ.

Анализ результатов расчета показывает, что при горении кабелей РГ среднеобъемная температура в помещении системы установок автоматического управления и контроля 1-го канала СБ и в помещении системы установок автоматического управления и контроля 2-го канала СБ может достигнуть 400°C через 6,5 мин. от начала пожара, в том числе и с использованием дымоудаления.

Поэтому для предотвращения одновременного выхода из строя 1-го и 2-го каналов системы безопасности в реакторном здании на отметке +4,950 в коридоре необходимо установить две противопожарные перегородки с пределом

огнестойкости не менее EI 60 с противопожарными дверьми с EI 60, так как продолжительность пожара до выгорания кислорода в трех смежных помещениях и прилегающей части коридора между перегородками (показаны на рисунке 2.42) составляет 38 минут (рисунок 2.48, кривая 2). Вышеуказанные перегородки должны отделять друг от друга смежные участки коридора, в которые выходят двери из следующих помещений:

- три соседних помещения на отметке +4,950 кабельного этажа РПУ;
- помещение системы установок автоматического управления и контроля 1-го канала СБ;
- помещение системы установок автоматического управления и контроля 2-го канала СБ.

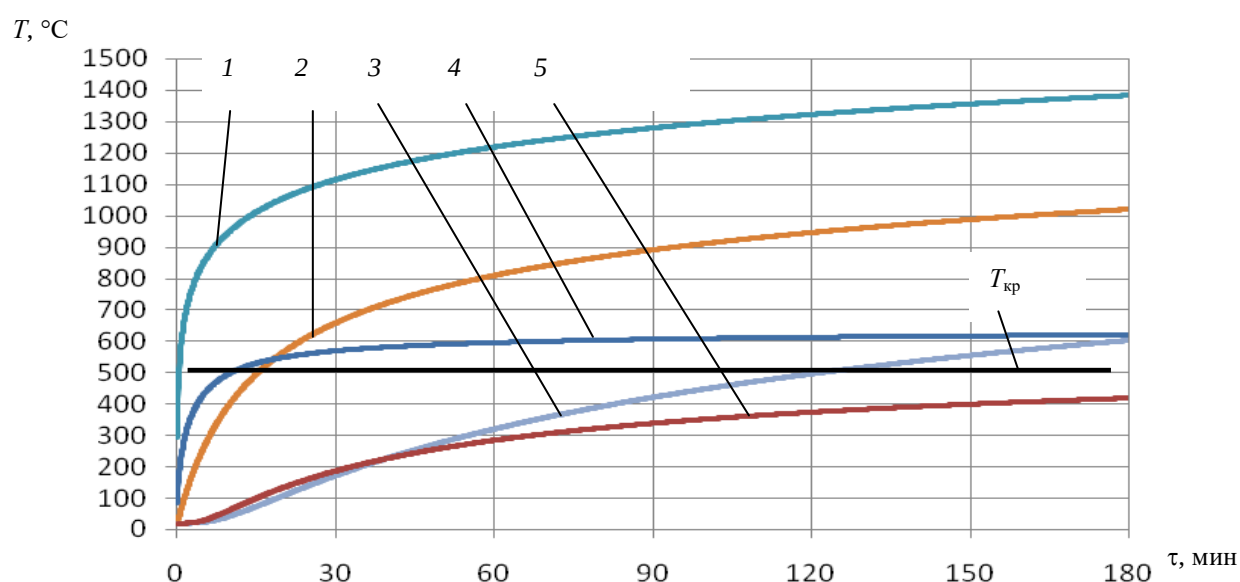


Рисунок 2.45 – Зависимости от времени температур внутри перекрытия помещения (сценарий 1): 1 – среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре; 2 – температура на внутренней (огневой) поверхности перекрытия при «стандартном» пожаре; 3 – температура на глубине оси закладки арматуры при «стандартном» пожаре; 4 – температура на внутренней (огневой) поверхности перекрытия при реальном режиме пожара; 5 – температура на глубине оси закладки арматуры при реальном режиме пожара

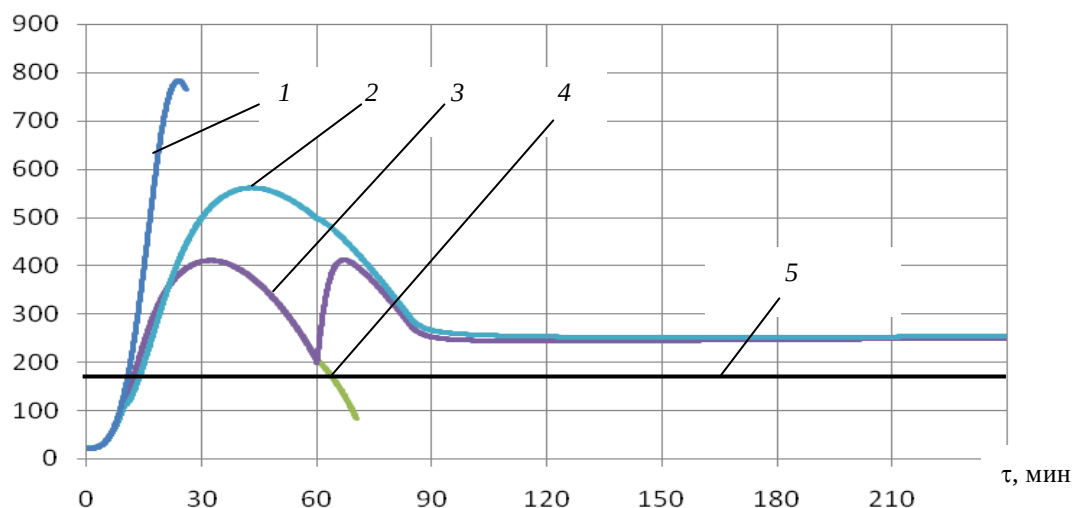
$T, ^\circ\text{C}$ 

Рисунок 2.46 – Зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара в кабельном этаже НЭ (реакторное здание, отметка 0,000, сценарий 2) при горении кабелей НГ: 1– герметичное помещение; 2 – открытая дверь; 3 – открытая дверь + дымоудаление + приточная вентиляция ($10\,000\text{ м}^3/\text{час}$), время включения 60 мин.; 4 – открытая дверь + дымоудаление + приточная вентиляция ($10\,000\text{ м}^3/\text{час}$), время включения 10 мин [95, 197]; 5 – температура газовой среды, при которой происходит короткое замыкание кабелей НГ

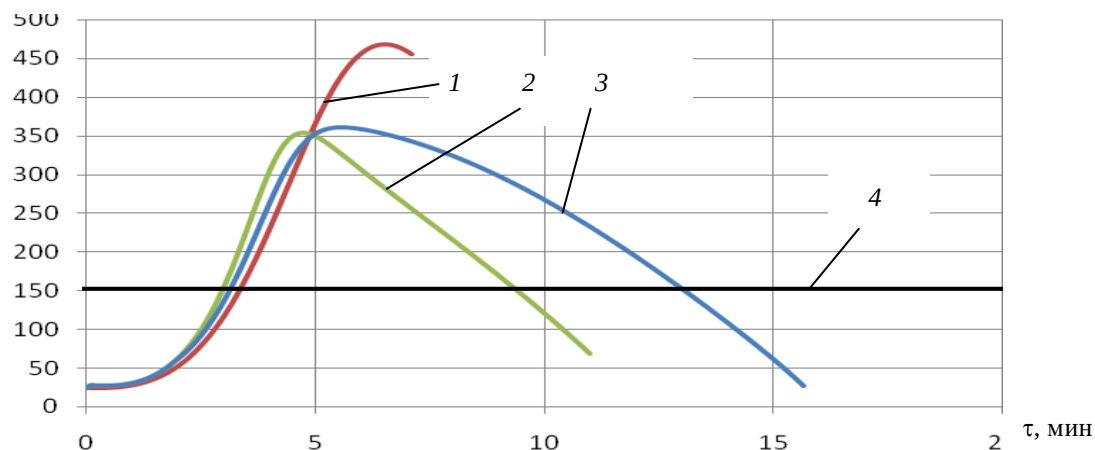
 $T, ^\circ\text{C}$ 

Рисунок 2.47 – Зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара в кабельном этаже НЭ (реакторное здание, отметка 0,000, сценарий 2) при горении кабелей РГ: 1 – герметичное помещение; 2 – открытая дверь; 3 – открытая дверь + дымоудаление + приточная вентиляция ($10\,000\text{ м}^3/\text{час}$), время включения 2 мин [95, 197] ; 4 – температура газовой среды, при которой происходит КЗ для кабелей РГ

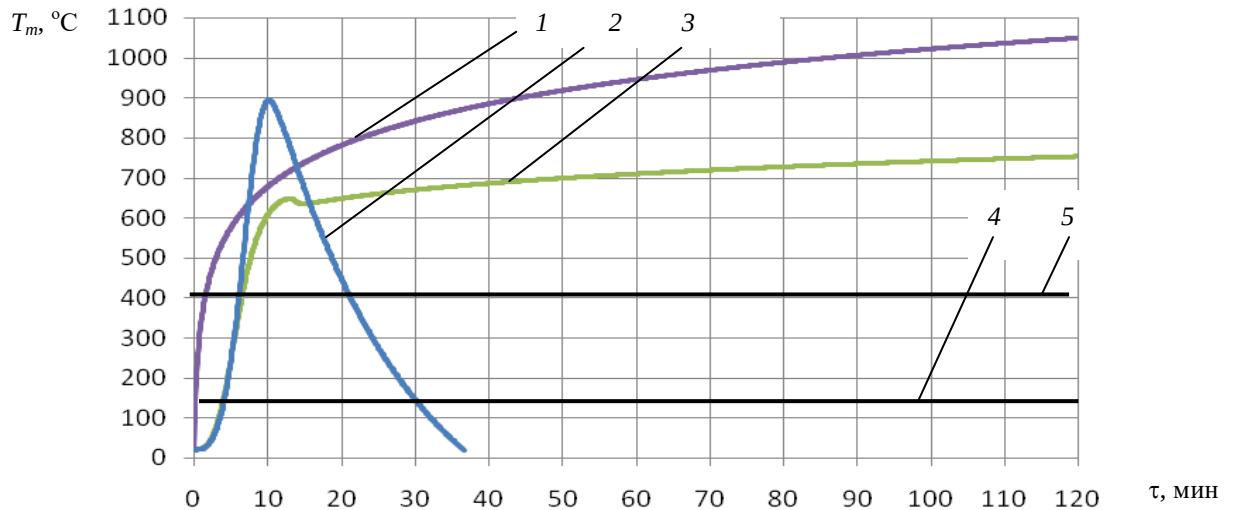


Рисунок 2.48 – Зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара:

1 – при «стандартном» пожаре; 2– в кабельном этаже РПУ (три смежных помещения + часть прилегающего коридора между перегородками на рисунке 2.42) (реакторное здание, отметка +4,950, сценарий 3) при горении кабелей РГ: герметичное помещение; 3 – три смежных помещения + прилегающий коридор между помещениями систем установок автоматического управления и контроля 1-го и 2-го канала СБ; 4 –температура газовой среды, при которой происходит КЗ кабелей РГ; 5 – температура самовоспламенения для кабелей РГ

Таким образом, для предотвращения одновременного выхода из строя 1-го и 2-го каналов системы безопасности 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 следующих помещений:

- три соседних помещения на отметке +5,000 кабельного этажа РПУ;
- помещение системы установок автоматического управления и контроля 1-го канала СБ;
- помещение системы установок автоматического управления и контроля 2-го канала СБ.

Нарушение работоспособности кабелей 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.

2.3 Расчетное обоснование требуемых (минимальных) расстояний и пределов огнестойкости противопожарных преград между каналами систем безопасности АЭС при размещении их в одной пожарной зоне

2.3.1 Расчетное обоснование требуемых (минимальных) расстояний и пределов огнестойкости противопожарных преград между каналами систем безопасности АЭС при размещении их в одной пожарной зоне Ленинградской АЭС-2

Для обеспечения независимости нескольких каналов систем безопасности реакторного здания и здания резервного пункта управления при пожарах необходимо проверить возможность одновременного воздействия ОФП на кабели нескольких каналов СБ.

Примеры схем трассировок нескольких каналов систем безопасности, находящихся в одном помещении, представлены на рисунках 2.49 и 2.50.

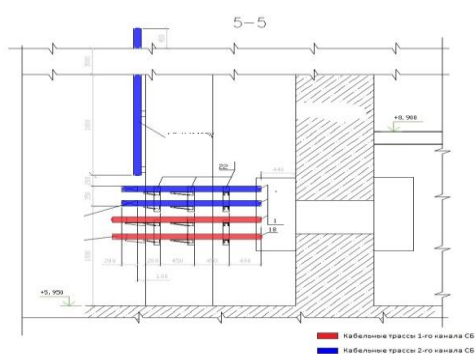


Рисунок 2.49 – Реакторное здание.
План на отметке +5,950

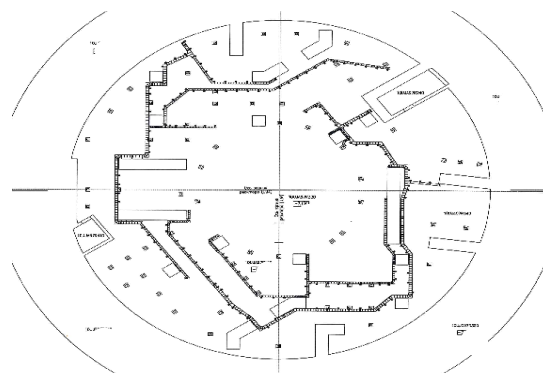


Рисунок 2.50 – Реакторное здание.
План над отметкой -7,150

Выбираем наиболее опасные сценарии развития пожара с точки зрения возможности воспламенения силовых кабелей нескольких каналов СБ в следующих помещениях:

- центральный зал пожарной зоны реакторного здания;
- участок ГЦНА пожарной зоны реакторного здания;
- кабельное помещение БПУ пожарной зоны здания резервного пункта управления.

Характеристики наиболее опасных сценариев развития пожара представлены в таблице 2.12.

Схема противопожарной изоляции кабельных трасс приведена на рисунке 2.51.

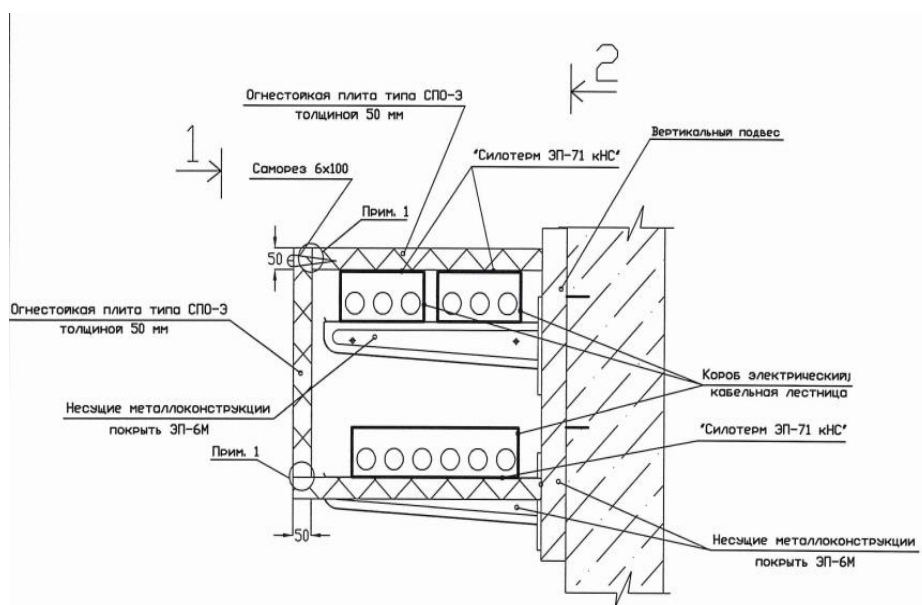


Рисунок 2.51 – Схема противопожарной изоляции кабельных трасс

На рисунке 2.52 показан внешний вид взаимного расположения кабелей, не защищенных коробом.

Теплофизические свойства стальных конструкций кабельных коробов, в которых расположены силовые кабели только одного канала СБ, с толщиной

стенки 2 мм определялись по [15, 158]: плотность $\rho=7800 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость $c=470+0,21t+5,0\cdot 10^{-4} t^2 \text{ Дж/(кг K)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda=58-0,042t \text{ Вт/(м K)}$, где t – температура, °C.

Критическую температуру для стальных конструкций кабельных коробов принимаем равной 500°C [169, 170].

Характеристики кабельных коробов по пожарной нагрузке (кабели НГ):

- максимальный объем горючей массы внутри короба: $V_{\Gamma} = 7 \text{ л/м}$;
- максимальная длина участка разгерметизации короба: $L = 20 \text{ м}$.

Максимальное время полного выгорания ($\tau_{\text{и}}$, с) слоя изоляции толщиной $\delta_{\text{и}}$ кабеля НГ равно:

$$\tau_{\text{и}} = \frac{\delta_{\text{и}} \rho_{\text{и}}}{\psi_{\text{уд}}}, \quad (2.29)$$

где $\rho_{\text{и}}$ – плотность материала изоляции кабеля НГ, кг/м^3 ; $\psi_{\text{уд}}$ – удельная массовая скорость выгорания кабеля НГ, $\text{кг/(с}\cdot\text{м}^2)$.

При $\psi_{\text{уд}}=0,0067 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$, $\rho_{\text{и}}=1600 \text{ кг/м}^3$ и $\delta_{\text{и}}=0,005 \text{ м}$: $\tau_{\text{и}}=1194 \text{ с}=19,9 \text{ мин}$.



Рисунок 2.52 – Внешний вид кабелей без короба

Таблица 2.12 – Характеристики рассматриваемых наиболее опасных сценариев пожара

№ сценария пожара	Помещение очага пожара	Категория по пожарной и взрывопожарной опасности	Горючие вещества и материалы	Площадь пола, м ²	Высота помещения, м
1	Центральный зал пожарной зоны реакторного здания	B1	кабели НГ	1330,0	36,4
2	Участок ГЦНА пожарной зоны реакторного здания	B1	кабели НГ	68,5	11,3
3	Кабельное помещение БПУ пожарной зоны здания РПУ	B1	кабели НГ	421,7	3,1
4	Горение кабелей НГ внутри кабельного короба	–	кабели НГ	9,0	0,45
5	Воздействие теплового потока от разгерметизированного кабельного короба на короб другого канала СБ	–	кабели НГ	–	–
6	Воздействие теплового потока от открытого кабеля одного канала СБ на открытый кабель другого канала СБ	–	кабели НГ	–	–

Система пассивной огнезащиты для герметизации кабельных коробов состоит из следующих слоев (рисунок 2.51): силиконовый огнестойкий клей «Силотерм ЭП-71 кНС» толщиной $\delta = 0,5$ мм; огнестойкая плита типа СПО-Э, $\delta = 50$ мм; огнезащитное вспучивающееся силиконовое покрытие «Силотерм П-6», $\delta = 2$ мм.

Теплофизические свойства минеральной ваты огнестойкой плиты определялись по [15]: плотность $\rho = 150$ кг/м³; удельная теплоемкость $c = 600$ Дж/(кг К); коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,05$ Вт/(м К).

Теплофизические свойства изоляции кабелей НГ определялись по [202]: резина техническая: плотность $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость $c = 1580 \text{ Дж/(кг К)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,146 \text{ Вт/(м К)}$.

Теплофизические свойства огнезащитного вспучивающегося силиконового покрытия «Силотерм ЭП-6» (после вспучивания) принимались следующими:

- плотность $\rho = 15 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость $c = 700\text{-}1000 \text{ Дж/(кг К)}$;
- эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,03 \text{ Вт/(м К)}$;
- температура вспучивания $t_{\text{всп}} = 300^\circ\text{C}$;
- коэффициент вспучивания $k_{\text{всп}} = 80\text{-}100$.

Кабели без коробов обрабатываются огнезащитным составом «Силотерм ЭП-6», если расстояние между кабелями разных каналов СБ менее 1,5 м.

Принимаем, что при температуре газовой среды помещения, равной 180°C , может произойти короткое замыкание кабелей НГ, а при температуре газовой среды помещения, равной 150° , может произойти короткое замыкание кабелей РГ под токовой нагрузкой, находящихся в помещении (глава 3 данного исследования и работа [109]).

Зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара для рассматриваемых сценариев развития 1- 3 пожара при горении кабелей НГ представлены на рисунке 2.53.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.13.

Из рисунка 2.53 видно, что наиболее опасным сценарием является сценарий 2 (таблица 2.11). Температура газовой среды, при которой происходит короткое замыкание кабелей РГ и НГ достигается за 30 мин и 35 мин соответственно.

Зависимости температур в поперечном сечении кабельного короба, внутри которого проходят силовые кабели канала СБ, от времени с начала пожара при горении кабелей НГ для сценария 2 показаны на рисунке 2.54.

Из рисунка 2.54 и анализа результатов расчета видно, что максимальная температура внутренней поверхности минеральной ваты огнестойкой плиты типа

СПО-Э, равная 21°C , не превышает ее критического значения $T_{\text{кр}}=250^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура стального короба, внутри которого проходят кабели НГ, равна максимальной температуре внутренней поверхности плиты 21°C , что существенно меньше критической величины для стальной стенки $T_{\text{кр}}=500^{\circ}\text{C}$ и температуры воспламенения изоляции кабелей НГ $T_{\text{кр}}=400^{\circ}\text{C}$ (при $350\text{--}400^{\circ}\text{C}$ загорается «углеродный остов» молекул поливинилхлорида, отмечено у Тирановского Г. Г. в работе «Монтаж автоматического пожаротушения в кабельных сооружениях энергетических объектов», Москва, 1982, с.4. Поэтому за время наиболее опасного сценария развития пожара теплового воздействия на кабели силового канала, расположенные внутри кабельного короба, не происходит потери целостности огнестойкой плиты типа СПО-Э, и, следовательно, нарушения функций второго по отношению к вышедшему из строя каналу СБ.

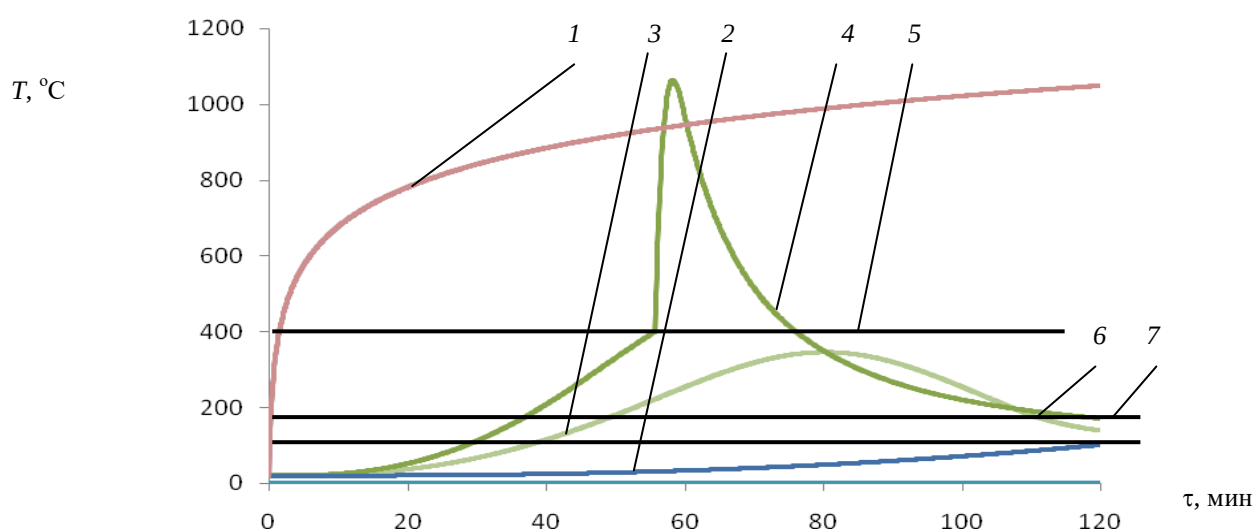


Рисунок 2.53 – Зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара:
 1 – «стандартный» пожар; реальный температурный режим: 2 – сценарий 1; 3 – сценарий 2;
 4 – сценарий 3; 5 – температура воспламенения кабелей НГ; 6 – температура газовой среды,
 при которой происходит КЗ кабелей НГ; 7 – температура газовой среды, при которой
 происходит КЗ кабелей РГ

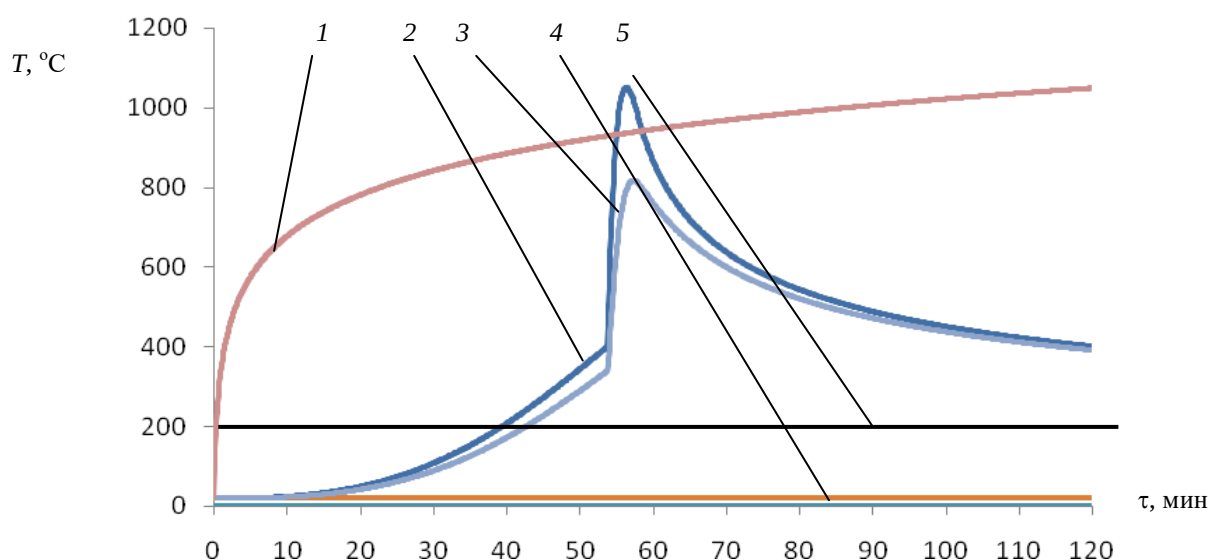


Рисунок 2.54 – Зависимости температур в поперечном сечении кабельного короба, внутри которого проходят силовые кабели каналов СБ, от времени с начала пожара при горении кабелей НГ (сценарий 2): 1 – среднеобъемная температура «стандартного» пожара; 2 – среднеобъемная температура реального температурного режима пожара; 3 – температура наружной (огневой) поверхности огнестойкой плиты типа СПО-Э (вспученный слой огнезащитного вспучивающегося силиконового покрытия «Силотерм ЭП-6»); 4 – температура внутренней поверхности огнестойкой плиты типа СПО-Э; 5 – критическая температура минеральной ваты огнестойкой плиты типа СПО-Э

На рисунке 2.55 приведены зависимости температур в характерных точках поперечного сечения кабельного короба в случае горения кабелей НГ внутри него (сценарий 4).

На рисунке 2.56 представлены зависимости температур в наиболее нагретом сечении стальной стенки верхнего короба одного канала СБ при воздействии на него теплового потока от разгерметизированного кабельного короба другого канала СБ (сценарий 5).

Таблица 2.13 – Результаты расчетов рассматриваемых наиболее опасных сценариев пожара

Номер сценария пожара	Помещение очага пожара	Максимальная среднеобъемная температура газовой среды помещения, °С	Время достижения максимальной температуры газовой среды помещения, мин	Расстояние между кабелями двух каналов СБ, м	Максимальная температура наружной поверхности изоляции кабеля облучаемого канала СБ, °С
1	Центральный зал пожарной зоны реакторного здания	101,5	120,0	–	–
2	Участок ГЦНА пожарной зоны реакторного здания	1063,0	58,3	–	–
3	Кабельное помещение БПУ пожарной зоны здания РПУ	345,8	80,3	–	–
4	Горение кабелей НГ внутри кабельного короба	145,5	7,6	–	–
5	Воздействие теплового потока от разгерметизированного кабельного короба на короб другого канала СБ	900,0*	0,0	–	–
6	Воздействие теплового потока от открытого кабеля одного канала СБ на открытый кабель другого канала СБ	900,0*	19,9**	1,0	554,1
				1,2	447,1
				1,3	400,2
				1,4	358,7
				1,6	290,9
				2,0	201,4

Примечания: * - температура пламенной зоны согласно данным по публикации [222]; ** - время полного выгорания слоя изоляции кабеля НГ.

В сценарии 5 предполагаем наиболее опасный вариант: кабельный короб, с горящими кабелями одного канала СБ, полностью разгерметизирован;

- максимальная длина участка разгерметизации короба: $L = 20$ м;
- максимальный объем горючей массы внутри короба: $V_r = 7$ л/м;
- короб другого канала СБ находится над участком разгерметизации короба горящих кабелей первого канала СБ;
- толщина огнезащитного вспучивающегося силиконового покрытия «Силотерм ЭП-6» равна $\delta = 2$ мм;
- температура газовой среды на наружной поверхности стального короба второго канала СБ, расположенной над источником горения, равна температуре пламени при горении кабелей НГ 900°C [222].

Проведенные расчеты прогрева пассивной огнезащиты для герметизации кабельных коробов при рассматриваемых наиболее опасных сценариях развития пожара показали, что максимальная температура внутренней поверхности кабельных коробов, внутри которых проходят электрические силовые кабели одного канала СБ, в течение 120 мин. от начала пожара равна при пассивной огнезащите $T_{\max}=135,3^\circ\text{C}$. Эти значения температуры существенно меньше критической величины для стальной стенки $T_{\text{кр}}=500^\circ\text{C}$ и температуры воспламенения изоляции кабелей НГ $T_{\text{кр}}=400^\circ\text{C}$.

Для повышения надежности независимой работы каналов СБ металлические крепления кабельных коробов необходимо обработать огнезащитным составом с пределом огнестойкости R 120.

На рисунке 2.57 представлены зависимости температур в наиболее нагретом поперечном сечении кабеля одного канала СБ при воздействии на него теплового потока от открытого кабеля другого канала СБ (сценарий 6) при различных расстояниях между ними с учетом без огнезащиты наружной поверхности кабеля.

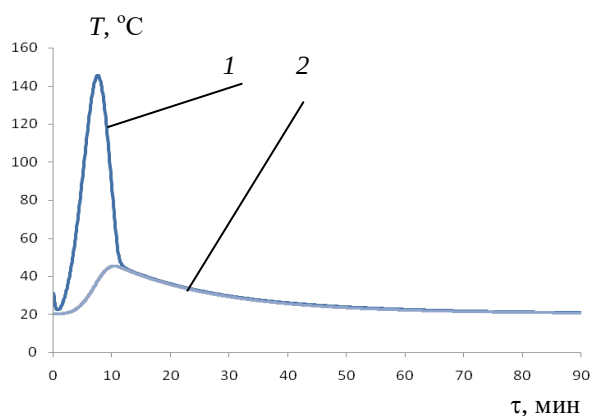


Рисунок 2.55 – Зависимости характерных температур в случае горения кабелей НГ внутри кабельного короба (сценарий 4):

1 – среднеобъемная температура;
2 – внутренняя поверхность стенки кабельного короба

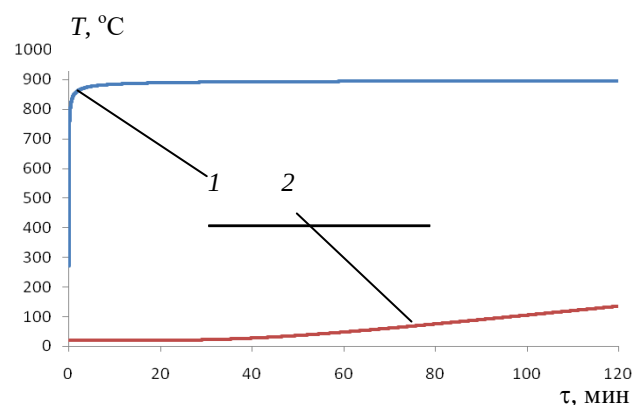


Рисунок 2.56 – Зависимости температур в наиболее нагретом сечении стальной стенки верхнего короба одного канала СБ при воздействии на него теплового потока от разгерметизированного кабельного короба другого канала СБ (сценарий 5):
1 – максимальная температура наружной (огневой) поверхности огнезащитного вспучивающегося силиконового покрытия «Силотерм ЭП-6»; 2 – внутренняя поверхность стальной стенки кабельного короба

Из рисунка 2.57 и таблицы 2.12 видно, что воспламенение кабелей облучаемого канала СБ произойдет при расстоянии $x=1,3$ м от горящего кабеля другого канала СБ.

Принимаем безопасное расстояние между открытыми кабелями двух систем безопасности с учетом запаса по надежности расчетов равным $x_6=2,0$ м. При этом по расчетам (таблица 2.12) максимальная температура наружной поверхности изоляции равна $201,4^{\circ}\text{C}$, что примерно в 2 раза меньше критической температуры воспламенения изоляции кабелей НГ $T_{\text{кр}}=400^{\circ}\text{C}$.

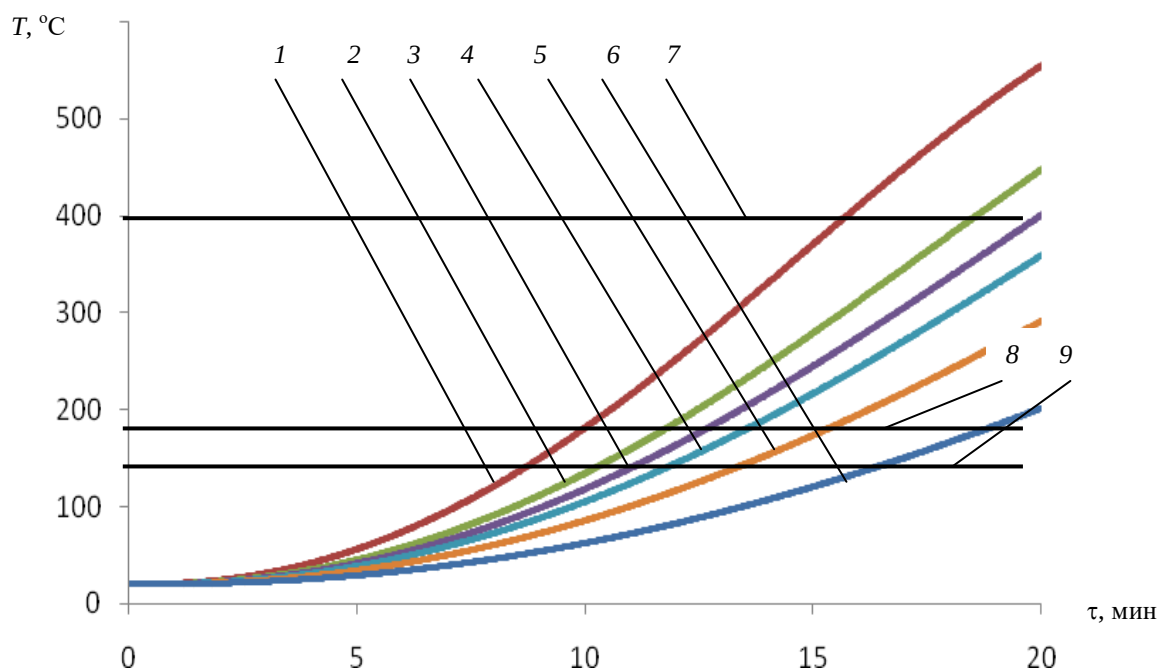


Рисунок 2.57 – Зависимости температур в наиболее нагретом поперечном сечении кабеля одного канала СБ при воздействии на него теплового потока от открытого кабеля другого канала СБ (сценарий 6): максимальная температура наружной (огневой) поверхности изоляции кабеля при различных расстояниях (x , м) между кабелями:

1 – $x=1,0$ м; 2 – $x=1,2$ м; 3 – $x=1,3$ м; 4 – $x=1,4$ м; 5 – $x=1,6$ м; 6 – $x=2,0$ м;

7 – температура воспламенения кабелей НГ $T_b=400^\circ\text{C}$; 8 – температура газовой среды, при которой происходит КЗ кабелей НГ $-T=180^\circ\text{C}$; 9 – температура газовой среды, при которой происходит КЗ кабелей РГ $-T=150^\circ\text{C}$

На рисунке 2.58 приведены 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 (сценарий 6) от расстояния между кабелями.

Из рисунка 2.58 видно, что время наступления КЗ при рассматриваемом сценарии (сценарий 6) 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:

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

для кабелей РГ:

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

Полученные зависимости времени наступления КЗ от расстояния от горящего соседнего кабельного канала позволяют определить время от начала пожара, за которое может произойти термодеструкция изоляции кабелей, что приведет к короткому замыканию непосредственно если кабели работают под нагрузкой или короткое замыкание произойдет сразу после их включения в работу.

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.

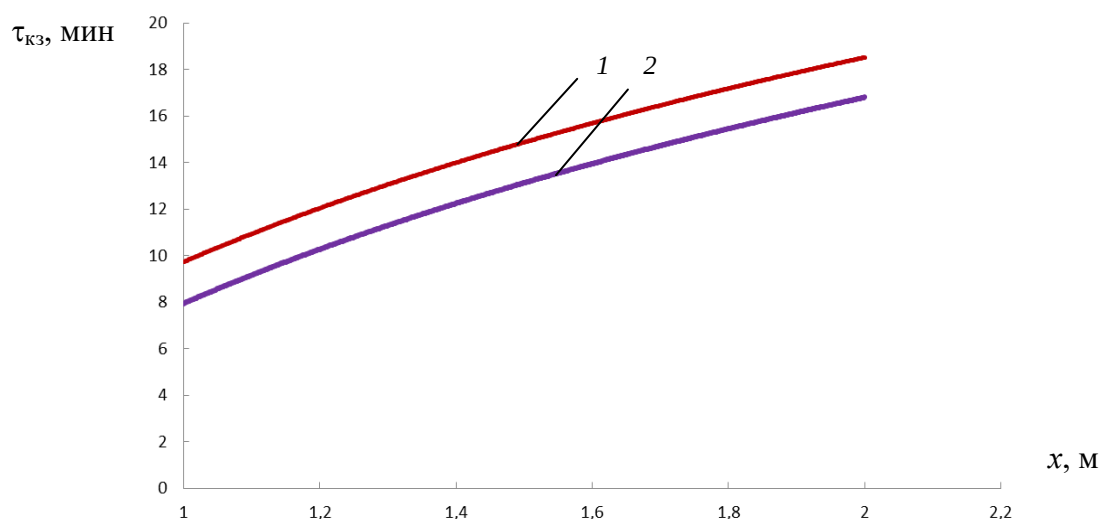


Рисунок 2.58 – Зависимости времени наступления КЗ в наиболее нагретом поперечном сечении кабеля одного канала СБ при воздействии на него теплового потока от открытого кабеля другого канала СБ (сценарий б): от расстояния между кабелями:

1 – кабели НГ; 2 – кабели РГ

Таким образом, при расстояниях между открытыми кабелями двух систем безопасности, меньших $x_6=2,0$ м, наружные поверхности кабелей СБ необходимо обрабатывать огнезащитным составом с огнезащитной эффективностью не менее 120 мин. Обоснование безопасного расстояния между размещенными в одной пожарной зоне кабелями каналов безопасности атомных электростанций с водяными реакторами приведено автором в работе [74].

Поскольку невозможно нарушение функций безопасности более, чем в одном канале безопасности, в случае нахождения оборудования разных каналов СБ в одном помещении, необходима обработка наружных поверхностей кабельных коробов и металлических креплений кабельных коробов огнезащитным составом с огнезащитной эффективностью 120 мин; так же при расстояниях между открытыми кабелями двух систем безопасности, меньших $x_6=2,0$ м, наружные поверхности кабелей СБ необходимо обрабатывать огнезащитным составом с огнезащитной эффективностью не менее 120 мин.

Полученные зависимости времени наступления КЗ от расстояния от горящего соседнего кабельного канала позволяют определить время с начала пожара, за которое может произойти термодеструкция изоляции кабелей, что приведет к короткому замыканию непосредственно если кабели работают под нагрузкой или короткое замыкание произойдет сразу после их включения в работу. Таким образом, огнезащитный состав для обработки наружных поверхностей кабелей СБ должен иметь температуру вспучивания не менее 150°C для кабелей РГ и 180°C для кабелей НГ.

2.3.2 Расчетное обоснование требуемых (минимальных) расстояний и пределов огнестойкости противопожарных преград между каналами систем безопасности АЭС при размещении их в одной пожарной зоне АЭС «Аккую»

Для обеспечения независимости нескольких каналов СБ реакторного здания при пожарах необходимо проверить возможность одновременного воздействия ОФП на кабели нескольких каналов СБ.

Схемы размещения каналов систем безопасности в одной пожарной зоне (планы кабельных трасс) представлены на рисунках 2.59-2.60.

Выбираем наиболее опасные сценарии развития пожара с точки зрения возможности воспламенения силовых кабелей нескольких каналов СБ.

Характеристики наиболее опасных сценариев развития пожара представлены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Характеристики рассматриваемых наиболее опасных сценариев пожара

№ сценария пожара	Помещение очага пожара	Горючие вещества и материалы	Площадь основания короба, м ²	Высота короба, м
1	Горение кабелей НГ внутри кабельного короба	Электрические кабели НГ	9,0	0,45
2	Воздействие теплового потока от разгерметизированного кабельного короба на короб другого канала СБ	Электрические кабели НГ	–	–

При сценарии 2 (таблица 2.14) развитие пожара может происходить следующим образом:

- происходит горение кабелей разгерметизированного участка одного канала СБ;
- тепловое воздействие от пожара происходит на кабельные коробки, внутри которых проходят силовые кабели другого канала СБ;

– принимается наиболее опасный вариант взаимного размещения коробов двух каналов СБ, когда пламенная зона непосредственно касается поверхности короба другого канала СБ; при этом температура пламени равна 900°С и остается постоянной в течение 120 мин;

– за счет нагрева кабельного короба может произойти возгорание силовых кабелей другого канала СБ и, соответственно, выход из строя обоих каналов СБ.

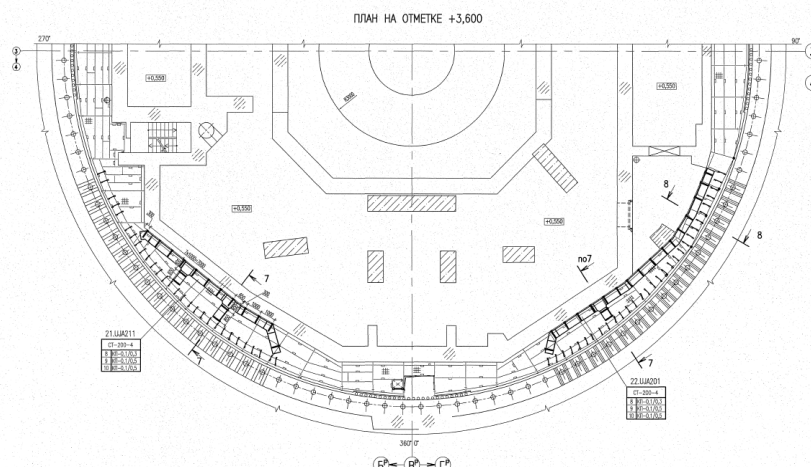


Рисунок 2.59 – Реакторное здание. План кабельных трасс на отметке +3.600

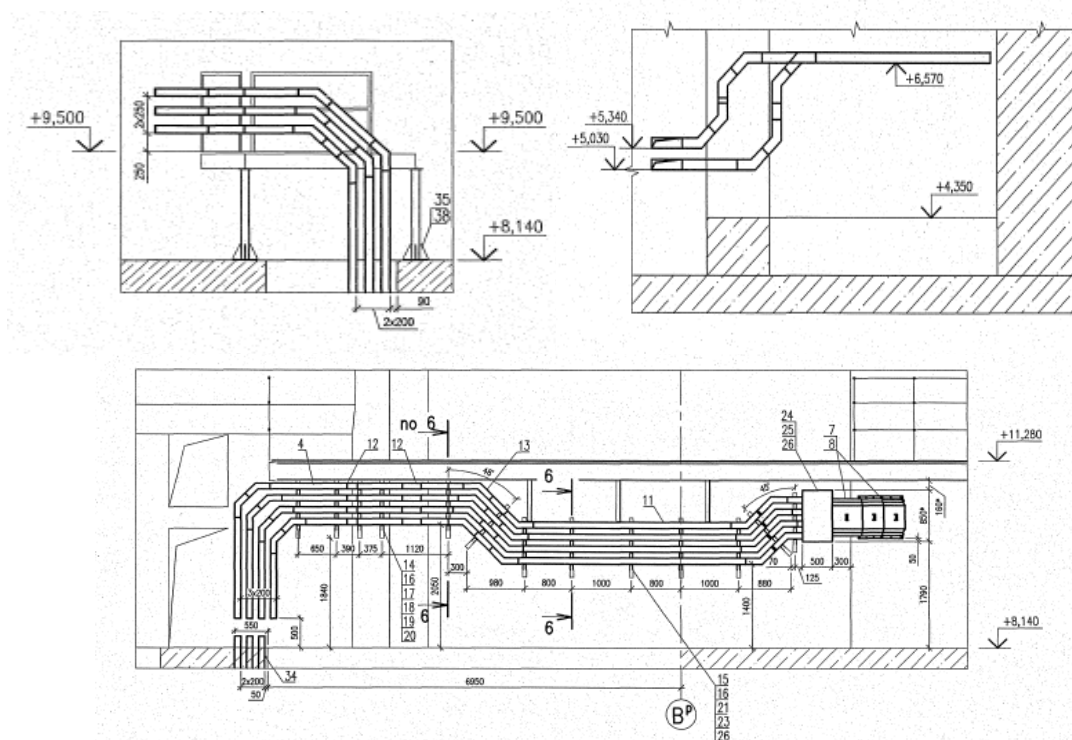


Рисунок 2.60 – Расположение кабельных трасс в реакторном здании

Схема конструкции кабельных коробов, внутри которых проходят силовые кабели каналов СБ, представлена на рисунок 2.61.

Теплофизические свойства стальных конструкций определялись по [15,158]: плотность $\rho=7800 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость $c=470+0,21t+5,0\cdot 10^{-4} t^2 \text{ Дж/(кг К)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda=58-0,042t \text{ Вт/(м К)}$, где t – температура, °С.

Критическую температуру для стальных конструкций принимаем равной $T_{кр}=500^\circ\text{С}$ [169, 170].

Система пассивной огнезащиты СПО-Э-11 для герметизации кабельных коробов состоит из следующих слоев (рисунок 2.61):

- силиконовый огнестойкий клей «Силотерм ЭП-71 кНС» толщиной $\delta = 0,5 \text{ мм}$;
- минераловатная плита $\delta = 50 \text{ мм}$;
- огнезащитное вспучивающееся силиконовое покрытие «Силотерм ЭП-6» толщиной $\delta = 2 \text{ мм}$.

Теплофизические свойства минераловатной плиты определялись по [15]: плотность $\rho = 150 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость $c = 600 \text{ Дж/(кг К)}$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,05 \text{ Вт/(м К)}$.

Теплофизические свойства огнезащитного вспучивающегося силиконового покрытия «Силотерм ЭП-6» (после вспучивания) принимались следующими:

- плотность $\rho = 15 \text{ кг/м}^3$;
- удельная теплоемкость $c = 700-1000 \text{ Дж/(кг К)}$;
- эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda=0,03 \text{ Вт/(м К)}$;
- температура вспучивания $t_{всп} = 300^\circ\text{С}$;
- коэффициент вспучивания $k_{всп}=80-100$.

Параметры воздуха в помещении принимались следующими: температура 20°С ; давление 10^5 Па .

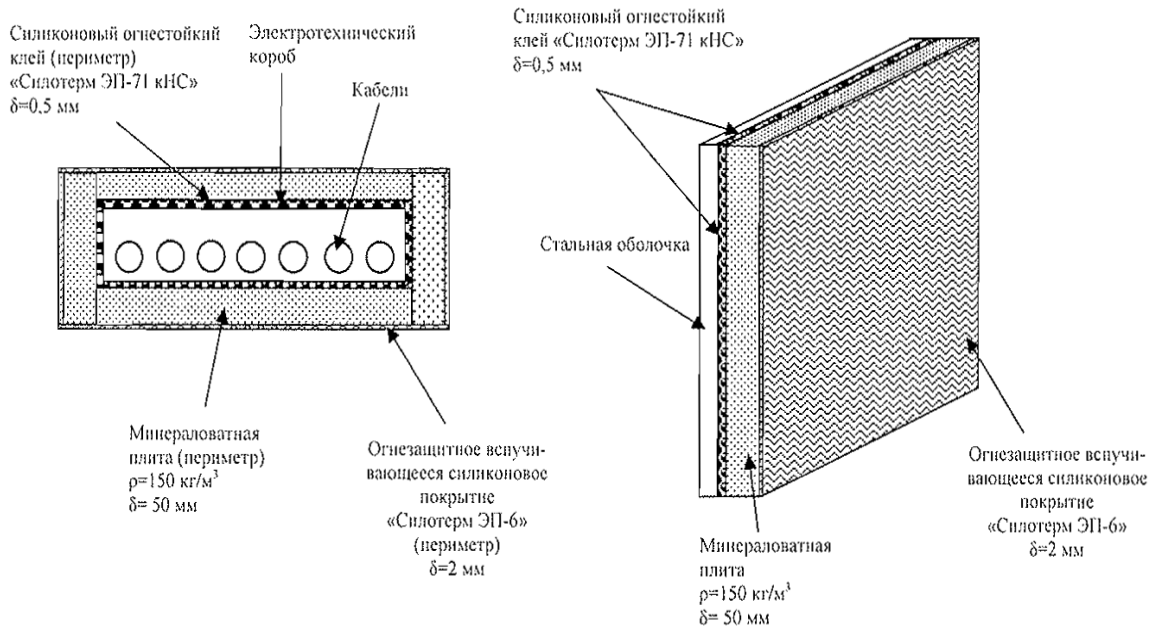


Рисунок 2.61 – Схема конструкции кабельных коробов, внутри которых проходят силовые кабели 1-го и 2-го каналов СБ

Низший концентрационный предел горения принимался равным $X_{O_2, \min}=14\%$ (по массе кислорода). Величина плотности кислорода, при которой прекращается горение, для помещения с закрытыми дверьми равна (без учета массы продуктов газификации пожарной нагрузки):

$$\rho_{O_2, \min} = X_{O_2, \min} \rho_v = X_{O_2, \min} \frac{p_B}{R_B T_B} = 0,169 \text{ кг/м}^3, \quad (2.30)$$

где $\rho_{O_2, \min}$ – величина плотности кислорода, при которой прекращается горение, кг/м³; $T_B=293$ К – температура в помещении перед пожаром; $p_B=1,013 \times 10^5$ Па – давление в помещении перед пожаром; $R_B=286$ Дж/(кг·К) – газовая постоянная воздуха.

В случае помещения с открытой дверью величина плотности кислорода, при которой прекращается горение, определяется в процессе расчета:

$$\rho_{O_2, \min} = X_{O_2, \min} \rho_{cm}, \quad (2.31)$$

где ρ_{cm} – плотность газовой смеси в помещении во время пожара, кг/м³.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Результаты расчетов рассматриваемых наиболее опасных сценариев пожара

№ сценария пожара	Помещение очага пожара	Максимальная среднеобъемная температура газовой среды помещения, °С	Время достижения максимальной температуры газовой среды помещения, мин
1	Горение кабелей НГ внутри кабельного короба	145,5	7,6
2	Воздействие теплового потока от разгерметизированного кабельного короба на короб другого канала СБ	900,0*	0,0

Примечание: * - принята постоянной по [222] .

На рисунке 2.62 приведены зависимости от времени температур в поперечном сечении кабельного короба в случае горения кабелей НГ внутри него (сценарий 1, таблица 2.14). На рисунке 2.63 представлена зависимость от времени среднеобъемной плотности кислорода внутри кабельного короба (сценарий 1).

Из рисунка 2.62 видно, что максимальная температура внутренней поверхности стенки кабельного короба равнялась 145,5°С. Выгорание массы кислорода внутри короба до концентрации, меньшей нижнего концентрационного предела горения, произошло через 10,5 мин от начала горения (рисунок 2.63).

В сценарии 2 предполагаем наиболее опасный вариант: кабельный короб, с горящими кабелями одного канала СБ, полностью разгерметизирован;

- максимальная длина участка разгерметизации короба: $L = 20$ м;
- максимальный объем горючей массы внутри короба: $V_r = 7$ л/м;
- короб другого канала СБ находится над участком разгерметизации короба горящих кабелей первого канала СБ;

- температура газовой среды на наружной поверхности стального короба второго канала СБ, расположенной над источником горения, равна температуре пламени кабелей НГ 900°С и остается постоянной в течение 120 мин.

На рисунке 2.64 представлены зависимости температур в наиболее нагретом сечении стальной стенки верхнего короба одного канала СБ при воздействии на него теплового потока от разгерметизированного кабельного короба другого канала СБ (сценарий 2, таблица 2.13).

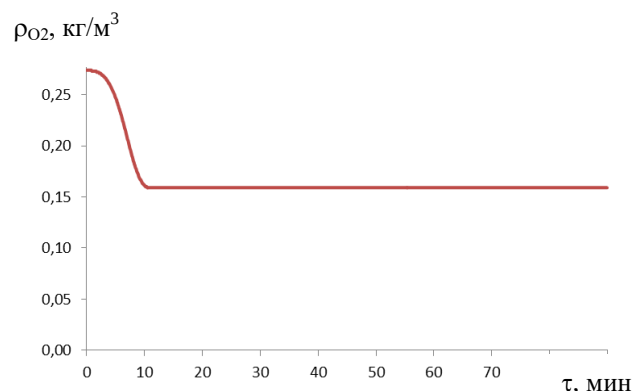
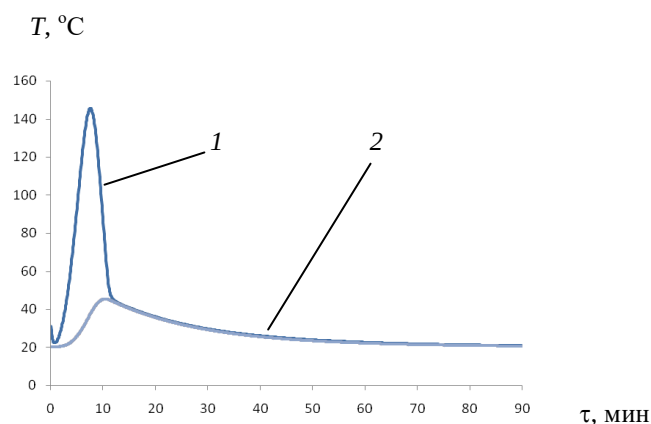


Рисунок 2.62 – Зависимости от времени температуры в случае горения кабелей НГ внутри кабельного короба (сценарий 1): 1 – среднеобъемная температура внутри кабельного короба; 2 – внутренняя поверхность стенки кабельного короба

Рисунок 2.63 – Зависимость от времени среднеобъемной плотности кислорода в случае горения кабелей НГ внутри кабельного короба (сценарий 1)

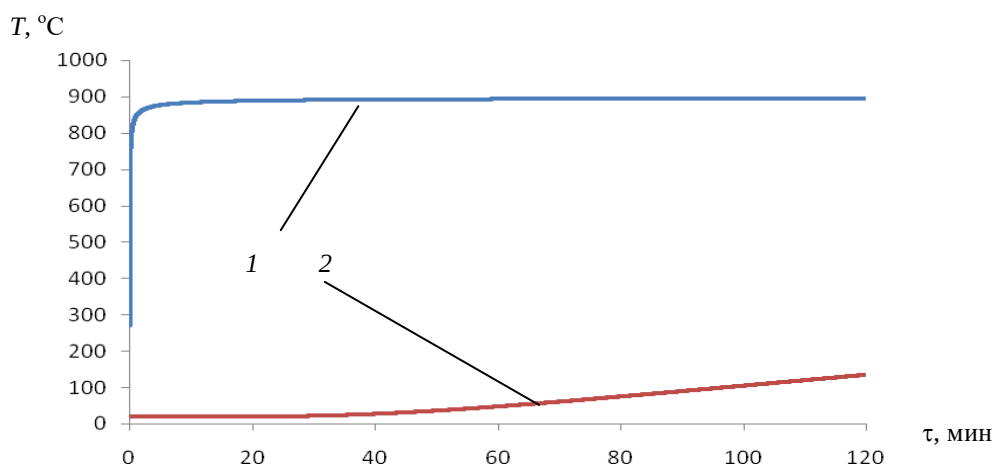


Рисунок 2.64 – Зависимости температур в наиболее нагретом сечении стальной стенки верхнего короба одного канала СБ при воздействии на него теплового потока от разгерметизированного кабельного короба другого канала СБ (сценарий 2): 1 – максимальная температура наружной (огневой) поверхности огнезащитного вспучивающегося силиконового покрытия «Силотерм ЭП-6»; 2 – внутренняя поверхность стальной стенки кабельного короба

Проведенные расчеты прогрева пассивной огнезащиты для герметизации кабельных коробов при рассматриваемых наиболее опасных сценариях развития пожара показали, что максимальная температура внутренней поверхности кабельных коробов, внутри которых проходят электрические силовые кабели одного канала СБ, в течение 120 мин. от начала пожара равна при пассивной огнезащите $T_{\max}=135,3^{\circ}\text{C}$ (сценарий 2). Эти значения температуры существенно меньше критической величины для стальной стенки $T_{\text{кр}}=500^{\circ}\text{C}$ и температуры воспламенения изоляции кабелей НГ $T_{\text{кр}}=400^{\circ}\text{C}$. Для повышения надежности независимой работы каналов СБ металлические крепления кабельных коробов необходимо обработать огнезащитным составом с пределом огнестойкости R 120.

Таким образом, система пассивной огнезащиты СПО-Э-11, используемая для герметизации кабельных коробов, обеспечивает предотвращение одновременного выхода из строя нескольких каналов систем безопасности в случае если вспучивание огнезащитного состава произойдет до достижения среднеобъемной температуры в помещении 180°C для кабелей НГ и 150°C для кабелей РГ (гл.3 диссертационного исследования).

2.4 Обеспечение безопасной эвакуации персонала из реакторного здания АЭС с ВВЭР

«Анализ влияния пожаров на безопасный останов и расхолаживание реакторной установки энергоблоков атомных станций (на этапах проектирования и перед физическим пуском). Методические указания» МУ 1.1.4.01.1408-2017, утвержденные приказом Акционерного общества «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» [8], предусматривают п. 5.1.1 защиту персонала АЭС от воздействия ОФП.

Согласно п.7.4 [8] для расчета температуры газовой среды на

участке размещения систем (элементов) безопасного останова и расхолаживания РУ на начальной стадии пожара и при локальном пожаре целесообразно использовать зонные и полевые модели пожара [122, 123]. Для определения продолжительности и температурных режимов объемных пожаров в помещениях используется методика в соответствии с ГОСТ Р 12.3.047 (приложение П) [32]. Зависимость между величиной удельной пожарной нагрузки в помещении и продолжительностью пожара в нем получена экспериментально и представлена номограммами.

Расчет пожарных рисков для производственных объектов производится в соответствии с «Методикой определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», утвержденной приказом МЧС России № 404 от 10.07.2009 [122]. Расчет величины пожарного риска в машинных залах гидроэлектростанций приведен в работе [168]. В то же время, данная методика не распространяется на АЭС. Поэтому расчет пожарных рисков, например, для Ленинградской АЭС-2 выполнялся филиалом «Головной институт «ВНИИПИЭТ» «СПбАЭП» на основе положений ГОСТ Р 12.3.047-2012 "Пожарная безопасность технологических процессов» [32] и оценки пожарного риска для уникальных производственных зданий [108].

В настоящее время отсутствует методика определения воздействия ОФП, за исключением повышенной температуры газовой среды, на персонал АЭС в соответствии с ГОСТ Р 12.3.047-2012 «Пожарная безопасность технологических процессов» [32, 117].

В проектах реакторных установок с ВВЭР-1000 в соответствии с «Общими положения обеспечения безопасности атомных станций» (ОПБ-88/97) был применен «жесткий» критерий, который заключается в том, что вероятности исходных событий возникновения аварии не должны превышать 10^{-7} на парогенератор в год [107]. В то время как, действующие в настоящий момент «Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» определяют вероятность разрушения корпуса реактора одного блока АС на интервале в один

год не превышает 10^{-7} , и допускается не включать в перечень исходных событий для анализа проектных аварий, представляемый в ООБ АС, внутренние события, имеющие оцененную вероятность возникновения на интервале в один год 10^{-6} или ниже [207].

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

Для обеспечения безопасности персонала, выполняющего функции по приведению энергоблока в безопасное состояние и подлежащего спасению, необходимо обеспечить защиту помещений управления и путей эвакуации от воздействия ОФП в течение времени, необходимого для начала спасательных работ и тушения пожара приведения РУ 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 соответствии с объемно-планировочными решениями здания, геометрическими размерами эвакуационных путей и выходов, а также известными особенностями поведения людей при пожарах (движение к более широким и хорошо заметным выходам, выбор более короткого пути эвакуации, использование знакомых маршрутов движения и т.п.) [105, 175, 176, 203, 214] были составлены расчетные схемы эвакуации из пожарных зон и отсеков зданий.

Выполненные численные эксперименты по расчету динамики опасных факторов пожара при наиболее опасных сценариях его развития в основных зданиях энергоблока Нововоронежской АЭС-2 показали, что для обеспечения безопасности персонала, необходимо учитывать воздействие всех ОФП на персонал АЭС, в том числе токсичных продуктов горения и термического разложения пожарной нагрузки помещений АЭС. Согласно расчетам критическая продолжительность пожара наступает по потере видимости в большинстве случаев [44, 57, 141]. Однако при расчете не учитывали наличие в составе

продуктов горения, например, циановодорода, который выделяется при горении кабельной продукции (основная горючая нагрузка помещений АЭС). В реакторном здании в межоболочном пространстве кабельная нагрузка находится непосредственно на путях эвакуации ремонтных бригад.

В современной базе пожарной нагрузки [65] нет данных по удельным коэффициентам образования циановодорода при горении полимерных материалов. Поэтому существующие методики расчета ОФП не рассматривают процесс распространения циановодорода, который образуется при термическом разложении полимерных материалов. В работах [13, 14] в результате проведения численных и натурных экспериментов показано, что во время эвакуации при пожаре происходит блокирование путей эвакуации также и циановодородом. Это может привести к серьезному отравлению и гибели людей.

Циановодород является высокотоксичным газом, проникающим в организм человека через органы дыхания и незащищенные кожные покровы. Если летальная концентрация СО для людей при 30-минутном воздействии составляет 0,4%, то для HCN она равна 0,0135% [97]. Кроме того, смесь СО + HCN усиливает токсический эффект каждого из этих газов в отдельности [51]. Исследования токсичности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального температурного режима пожара приведены в главе 4 исследования.

Особенностью кабельных помещений объектов энергетики является повышенная пожарная опасность. Основной пожарной нагрузкой в кабельных тоннелях является изоляция кабелей, плотность которой может достигать 30–60 кг/м².

Кроме того, трудность тушения возгораний в кабельных помещениях связана с тем, что, горение как правило, сопровождается высокой температурой с последующим разлетом искр расплавленного металла, множественными короткими замыканиями, являющимися источниками возгорания, и большой скоростью распространения огня и дыма. При этом в продуктах горения содержится большой спектр токсических веществ [54].

Расчет времени блокирования путей эвакуации отдельными ОФП (потеря

видимости, температура, излучение, повышенное содержание токсичных газов, пониженное содержание кислорода и концентрация частиц дыма) позволяет спрогнозировать состояние людей во время эвакуации, степень отравления людей в результате пожара, а также разработать технические требования к фильтрующим средствам защиты органов дыхания для проведения безопасной эвакуации.

Расчет времени блокирования путей эвакуации отдельными ОФП в помещениях АЭС, в первую очередь, требует знания свойств горючих материалов, находящихся в этих помещениях.

Очередность наступления критических значений различных ОФП в широком диапазоне объемов помещений была исследована в работе [97] для всех приведенных индивидуальных веществ и комбинированных пожарных нагрузок [65]. Были использованы все типы математических моделей расчета динамики ОФП (аналитическое решение интегральной модели, интегральная, зонная и полевая модели) [97]. Однако, для разработки практических рекомендаций по обеспечению безопасности для жизни и здоровья персонала во время эвакуации и спасения на пожарах в зданиях АЭС этих данных недостаточно, так как в базе данных [65] нет информации по современным горючим веществам и материалам, находящимся в помещениях АЭС, и всему спектру токсичных газов, выделяющихся при горении этих веществ.

Для эффективного использования средств защиты органов дыхания персоналом помещений БПУ и РПУ АЭС, которые не покидают рабочих мест до перевода РУ в безопасное состояние при пожаре целесообразно производить прогнозирование ОФП для данных помещений.

Определить, какие именно токсичные газы в данном помещении будут выделяться при горении необходимо для разработки требований к фильтрующим средствам защиты органов дыхания (самоспасателей) [54, 97]. Отсутствие такой информации может привести к тому, что при пожаре в помещение поступят токсичные газы, от которых фильтрующие самоспасатели не обеспечат защиту.

Целесообразно производить разработку рекомендаций по параметрам и

применению средств защиты органов дыхания (например, изолирующего действия) для конкретного помещения или использовать многофункциональные робототехнические комплексы [102, 128]. Иначе возможно отравление персонала АЭС в связи с тем, что ОФП в начальной стадии значительно превосходят параметры защиты фильтрующих средств защиты органов дыхания [133].

Исследования токсичности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, в условиях реального режима пожара, приведенные в главе 4 диссертационного исследования, показывают необходимость использования фильтрующих средств защиты органов дыхания с защитой от циановодорода в помещениях АЭС, особенно в межблочном пространстве и помещениях блочного и резервного пультов управления.

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:

- персонал, подлежащий эвакуации;
- персонал, выполняющий функции по приведению энергоблока в безопасное состояние и подлежащий спасению;
- спасатели и работники пожарной охраны.

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

Для обеспечения безопасности персонала, выполняющего функции по приведению энергоблока в безопасное состояние и подлежащего спасению, необходимо обеспечить защиту помещений управления и путей эвакуации от воздействия опасных факторов пожара в течение времени, необходимого для начала спасательных работ и тушения пожара. 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 2.16.

На рисунках 2.65-2.67 на планах этажей зданий Новоронежской АЭС-2 показаны места возникновения начальных очагов пожара, а также обозначены места расположения контрольных точек (эвакуационных выходов).

Пожарно-технические характеристики горючих материалов для рассматриваемых сценариев развития пожара определялись по типовой базе пожарной нагрузки [65, 158] и представлены в таблице 2.17.

Таблица 2.16 – Наиболее опасные сценарии развития пожара

№ сценария пожара	Здание	Помещение первичного очага пожара	Блокируемый эвакуационный выход
1	Реакторное здание (внутри защитной оболочки)	Зона электрических гермопроходок 1-го канала СБ на отметке +3,600	В лестничную клетку в осях 3 ^Р -4 ^Р /Б ^Р -В ^Р
2	Реакторное здание (снаружи защитной оболочки в осях)	Помещение РПУ на отметке +7,800	В лестничную клетку в осях 1 ^Р -2 ^Р /Б ^Р -В ^Р
3		Помещение БПУ на отметке +3,600	В осях 4 ^Р -5 ^Р /В ^Р -Г ^Р в лестничную клетку в осях 4 ^Р -5 ^Р /Г ^Р -Д ^Р
4		Помещение установок системы автоматического управления и контроля на отметке +4,950	В лестничную клетку в осях 2 ^Р -3 ^Р /А ^Р -Б ^Р

Выбор данных сценариев пожара обусловлен геометрическими размерами помещений, а также расчетными временами эвакуации из них.

Для всех сценариев высота рабочей зоны равна 1,7 м.

Значения параметров окружающей среды и начальные значения параметров внутри помещений задавались следующими: температура $t_o=20^{\circ}\text{C}$; давление $p=101300$ Па.

Размеры рассматриваемых помещений зданий представлены в таблице 2.18.

Таблица 2.17 – Свойства пожарной нагрузки

№	Наименование ПН	Низшая рабочая теплота сгорания Q_H^P , Мдж/кг	Удельная скорость выгорания, $\psi_{уд}$, кг/(м ² ·с)	Потребление кислорода при горении, L_{O_2}	Выделение окси углерода, L_{CO}	Выделение циановодорода L_{HCN}	Выделение двуокси углерода, L_{CO_2}	Удельное выделение хлороводорода L_{HCl}	Удельное дымовыделение $W_{уд}$, Нп·м ² /кг	Линейная ско- рость распро- странения пла- мени $W_{пл}$, м/с
1	кабельный подвал/лоток; кабели АВВГ+АПВГ	30,7	0,0244	-2,19	0,1295	-	0,65	0,0202	521	0,0071
2	кабели + провода; 0,75 (АВВГ, АПВГ, ТПВ) + 0,25 (КПРТ, ПР, ШРПС)	33,5	0,0622	-2,389	0,0995	-	0,655	0,014	612	0,0054
3	электрокабель АВВГ; ПВХ оболочка + изоляция	25,0	0,0244	-2,19	0,109	-	0,398	0,0245	635	0,0071
4	электрокабель АВВГ; ПВХ оболочка + полиэтилен	36,4	0,0244	-2,19	0,15	-	0,903	0,016	407	0,0071
5	провода в резиновой изоляции типа КПРТ, ПТ, ВПРС	37,8	0,01917	-2,99	0,015	-	0,416	0	850	0,005
6	телефонный кабель ТПВ; ПВХ + полиэтилен	34,6	0,0085	-2,19	0,124	-	0,903	0,0156	556	0,0022
7	кабели, не распространяющие горение (НГ)	22,5-32*	0,0067*	-2,19** -1,5 ³	0,15** 0,06 ³	3,5·10 ⁻⁴ ³	0,903**	0,0245**	635**	0,000333*
8	кабели, распространяющие горение (РГ)	16,9- 19,2*	0,025*	-2,19**	0,15**	-	0,903**	0,0245**	635**	0,0071**

Окончание таблицы 2.17 – Свойства пожарной нагрузки

№	Наименование ПН	Низшая рабочая теплота сгорания Q_R , МДж/кг	Удельная скорость выгорания, $\psi_{уд}$, кг/(м ² ·с)	Потребление кислорода при горении, L_{O_2}	Выделение окиси углерода L_{CO}	Выделение циановодорода, L_{HCN}	Выделение двуокиси углерода, L_{CO_2}	Удельное выделение хлороводорода, L_{HCL}	Удельное дымовыделе-ние , $W_{уд}$, Нп·м ² /кг	Линейная скорость распространения пламени, $W_{пл}$, м/с
9	Временная ПН: верхняя одежда; ворс + ткани (шерсть + нейлон)	23,3	0,013	-3,698	0,0145	-	0,467	-	129	0,00835
10	Теплоноситель; турбинное масло ТП-22	41,9	0,03	-2,82	0,122	-	0,70	-	243	-
11	индустриальное масло	42,7	0,043	-1,589	0,122	-	1,07	-	480	-
12	трансформаторное масло ГК	43,5*	0,043**	- 1,589**	0,122**	-	1,07**	-	480**	-
13	дизельное топливо	48,8*	0,0425**	- 3,368**	0,122**	-	3,163**	-	620,1**	-
14	здание 1-2 степени огнестойкости; мебель + ткани	14,7	0,0145	-1,437	0,0022	-	1,285	0,006	82	0,0108

Примечания:

Э - свойства ПН, принятые по экспериментальным данным (гл. 4 диссертационного исследования);

* - свойства ПН, принятые по данным АО «Атомэнергoproject»;

** - по наихудшему варианту свойств ПН, выбранному из соответствующих свойств близких ПН в базе данных [65, 158]

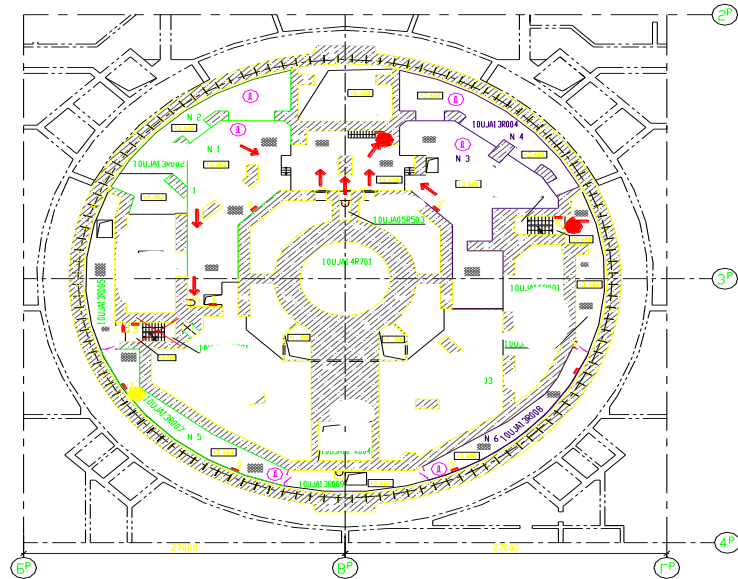


Рисунок 2.65 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено желтым) на отметке +3,600 (сценарий 1) реакторного здания. Красным цветом обозначены места расположения контрольных точек (эвакуационных выходов)

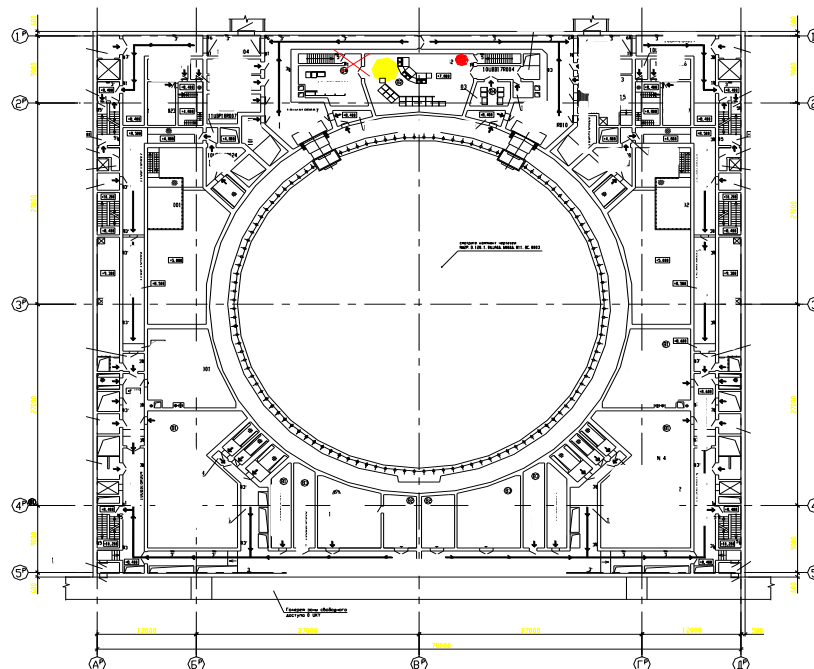


Рисунок 2.66 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено желтым) на отметке +7,800 (сценарий 2) реакторного здания. Красным цветом обозначены места расположения контрольных точек (эвакуационных выходов)

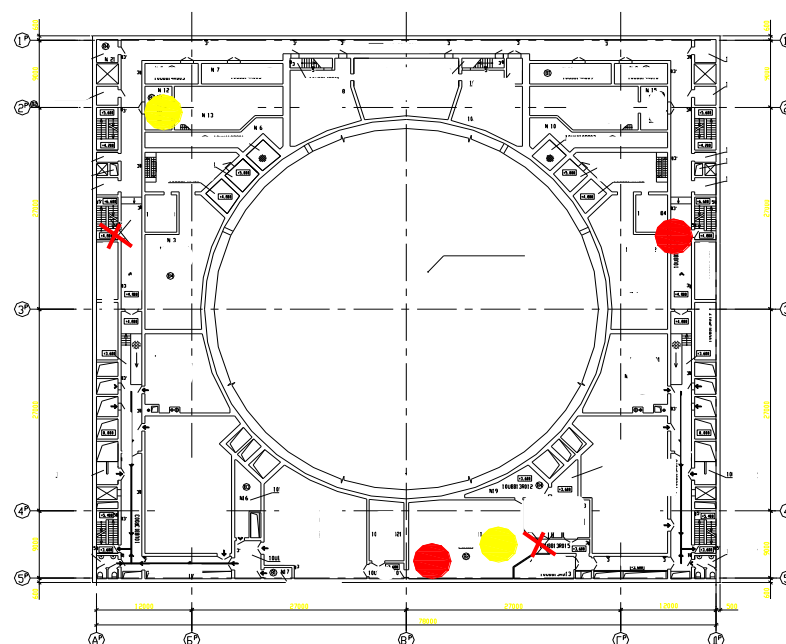


Рисунок 2.67 – Место возникновения начального очага пожара (обозначено желтым) на отметках +3,600 и +4,950 (сценарии 3, 4) реакторного здания. Красным цветом обозначены места расположения контрольных точек (эвакуационных выходов)

Таблица 2.18 – Габаритные размеры рассматриваемых помещений

№	Здание (уровень пола, сценарий)	Наименование и расположение помещения	Размеры (площадь × высота), м ² ×м	Свободный объем, м ³
1	Реакторное здание (отметка +3,600, Сценарий 1)	Зона электрических гермопроходок 1-го канала СБ	43,6×4,05	141,3
2	Реакторное здание (отметка +7,800, Сценарий 2)	Помещение РПУ	100,06×3,7	296,2
3	Реакторное здание (отметка +3,600, Сценарий 3)	Помещение БПУ	183,08×4,45	651,8
4	Реакторное здание (отметка +3,600 и +4,950 сценарий 4)	Помещение установок системы автоматического управления и контроля на отметке +4,950 1-го канала СБ на отметке +4,950 и коридор осях 1 ^Р -5 ^Р /А ^Р -Д ^Р между лестничной клеткой в осях 2 ^Р -3 ^Р /А ^Р -Б ^Р и в осях 2 ^Р -3 ^Р /Г ^Р -Д ^Р	500,0×4,5 (3,0 для помещения установок системы автоматического управления и контроля на отметке +4,950)	1800

В таблице 2.19 приведены величины времени блокирования эвакуационных выходов ОФП для всех сценариев развития пожара.

Прочерки в таблице 2.19 означают, что данный ОФП не достиг своего критического значения на уровне рабочей зоны за рассматриваемое время пожара.

Результаты расчетов показывают, что время блокирования путей эвакуации определяется по потере видимости.

Расчет с учетом работы системы дымоудаления [150, 253] (таблица 2.18) выполнен при следующих параметрах системы дымоудаления:

- реакторное здание:
- отметка +3.600, сценарий 1: расход равен $G_d = 6,06 \text{ кг/с} \approx 38\,204 \text{ м}^3/\text{час}$; время включения системы составляет $\tau_d = 30 \text{ с}$;
- отметка +3,600, сценарий 3; отметка +3,600, сценарий 4; отметка -4,400, $G_d = 7,93 \text{ кг/с} \approx 55\,060 \text{ м}^3/\text{час}$; $\tau_d = 30 \text{ с}$;

Из анализа данных таблицы 2.19 и рисунка 2.68 видно, что персонал, выполняющий функции по приведению энергоблока в безопасное состояние и подлежащий спасению, при свободном развитии пожара в помещении, где вышеуказанный персонал находится, без учета работы систем пожарной безопасности и средств защиты органов дыхания подлежит спасению через нижеуказанные промежутки времени от начала пожара:

- помещение РПУ на отметке +7,800 (сценарий 2):
 $\tau_n = 6,08 \text{ мин.}$ (ПН №7 (таблица 2.16) – кабели НГ);
 $\tau^{\text{HCN}}_{\text{кр}} = 38,2 \text{ мин.}$ (ПН №7 (таблица 2.17) – кабели НГ(свойства по гл.4 диссертационного исследования));
 $\tau^{\text{CO}}_{\text{кр}} = 33,5 \text{ мин.}$ (ПН №7 (таблица 2.17) – кабели НГ(свойства по гл.4 диссертационного исследования));
 $\tau^{\text{T}}_{\text{кр}} = 19,1 \text{ мин.}$ (ПН №7 (таблица 2.17) – кабели НГ(свойства по гл.4 диссертационного исследования));

$\tau_{\text{H}} = 0,51$ мин. (ПН №8 (таблица 2.17) – кабели РГ);

– помещение БПУ на отметке +3,600 (сценарий 3):

$\tau_{\text{H}} = 8,72$ мин. (ПН №7 (таблица 2.17) – кабели НГ);

$\tau^{\text{HCN}}_{\text{кр}} = 50,1$ мин. (ПН №7 (таблица 2.17) – кабели НГ(свойства по гл.4 диссертационного исследования));

$\tau^{\text{CO}}_{\text{кр}} = 43,8$ мин. (ПН №7 (таблица 2.17) – кабели НГ(свойства по гл.4 диссертационного исследования));

$\tau^{\text{T}}_{\text{кр}} = 43,2$ мин. (ПН №7 (таблица 2.17) – кабели НГ(свойства по гл.4 диссертационного исследования));

$\tau_{\text{H}} = 0,73$ мин. (ПН №8 (таблица 2.17) – кабели РГ).

Данные по наступлению критического времени по температуре, циановодороду и монооксиду углерода [80], полученные с использованием массовых коэффициентов образования L_{CO} и L_{HCN} (гл.4 диссертационного исследования) позволяют сделать вывод о том, что критические времена по температуре, циановодороду и монооксиду углерода имеют близкие значения. Поскольку токсичное действие смеси $\text{CO} + \text{HCN}$ увеличивается путем суммирования эффектов [51, 52, 257]. А повышенная температура приводит к увеличению частоты дыхания, то их воздействие на персонал БПУ и РПУ, приводящий реакторную установку в безопасное состояние в течение нескольких часов [45, 207] (не менее 72 часов [16]) может привести к отравлению. Следовательно персонал должен использовать средства индивидуальной защиты [11, 21] от циановодорода и от монооксида углерода.

Таблица 2.19 – Времена блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара

№	Помещение (здание, отметка, сценарий)	Времена блокирования путей эвакуации ОФП, с								Необходимое время эвакуации (минимальное время блокирования × 0,8), с
		по потере видимости	по повышенной температуре	по тепловому потоку	по понижен- ному содержа- нию O ₂	по повышен- ному содержа- нию CO	по повышен- ному содержа- нию HCN	по повышенному содержанию CO ₂	по повышен- ному содержа- нию HCl	
1	Зона электрических гермопроходок 1-го канала СБ (реакторное здание, отметка +3,600, сценарий 1)	33,8 ₁ ^А 374,1 ₇ ^А 31,3 ₈ ^А 300,0 ₈ ^Д	82,9 ₁ ^А 966,9 ₇ ^А 96,1 ₈ ^А -	-	96,1 ₁ ^А 1116,7 ₇ ^А 119,3 ₈ ^А -	120,3 ₁ ^А 1338,8 ₇ ^А 108,0 ₈ ^А -	-	-	55,4 ₁ ^А 613,5 ₇ ^А 51,3 ₈ ^А -	27,0 ₁ ^А 299,3 ₇ ^А 25,1 ₈ ^А 240,0 ₈ ^Д
2	Помещение РПУ (реакторное здание, отметка +7,800, сценарий 2)	41,2 ₁ ^А 455,9 ₇ ^А 38,2 ₈ ^А	101,5 ₁ ^А 1184,0 ₇ ^А 1146,0 ₇ ^{ИЭ} 117,7 ₈ ^А	-	116,2 ₁ ^А 1350,8 ₇ ^А 2580,1 ₇ ^{ИЭ} 144,0 ₈ ^А	144,3 ₁ ^А 1609,1 ₇ ^А 2010,1 ₇ ^{ИЭ} 130,7 ₈ ^А	2292 ₇ ^{ИЭ}	-	67,4 ₁ ^А 747,0 ₇ ^А 62,5 ₈ ^А	32,9 ₁ ^А 364,7 ₇ ^А 30,6 ₈ ^А
3	Помещение БПУ (реакторное здание, отметка +3,600, сценарий 3)	59,1 ₁ ^А 654,2 ₇ ^А 54,8 ₈ ^А 375,0 ₈ ^Д	144,2 ₁ ^А 1682,2 ₇ ^А 2592,0 ₇ ^{ИЭ} 167,2 ₈ ^А -	-	169,6 ₁ ^А 1970,9 ₇ ^А 2970,1 ₇ ^{ИЭ} 211,2 ₈ ^А -	215,0 ₁ ^А 2383,4 ₇ ^А 2628,1 ₇ ^{ИЭ} 190,4 ₈ ^А -	3006 ₇ ^{ИЭ}	-	97,0 ₁ ^А 1074,2 ₇ ^А - 89,7 ₈ ^А -	47,3 ₁ ^А 523,4 ₇ ^А 43,8 ₈ ^А 300,0 ₈ ^Д
4	Помещение установок системы автоматического управления и контроля 1-го канала СБ на отметке +4,950 и коридор (реакторное здание, сценарий 4)	492,0 ₇ ^П 262,0 ₈ ^П 375,0 ₈ ^Д	- - -	- - -	- - -	- - -	-	- - -	- - -	393,6 ₇ ^П 209,6 ₈ ^П 300,0 ₈ ^Д

Примечания: нижний индекс – номер ПН из таблица 2.17; Э – расчет с использованием свойств кабелей НГ, принятых по экспериментальным данным (гл. 4 диссертации); А – расчет с использованием аналитического решения интегральной модели; И – расчет с использованием интегральной модели; П – расчет с использованием полевой модели; Д – расчет с учетом работы системы дымоудаления

Для иллюстрации полученных результатов на рисунках 2.68 и 2.69 представлены соответственно зависимости среднеобъемных температур, плотностей циановодорода (ρ_{HCN}) и монооксида углерода (ρ_{CO}) от времени с начала пожара и времени достижения их критических значений для человека, полученные из расчета с использованием интегральной модели при свободном развитии пожара в помещении РПУ (реакторное здание, отметка +7,800, сценарий 2) и помещении БПУ (реакторное здание, отметка +3,600, сценарий 3), ПН кабели НГ (теплофизические свойства представлены в главе 4 диссертационного исследования), герметичное помещение.

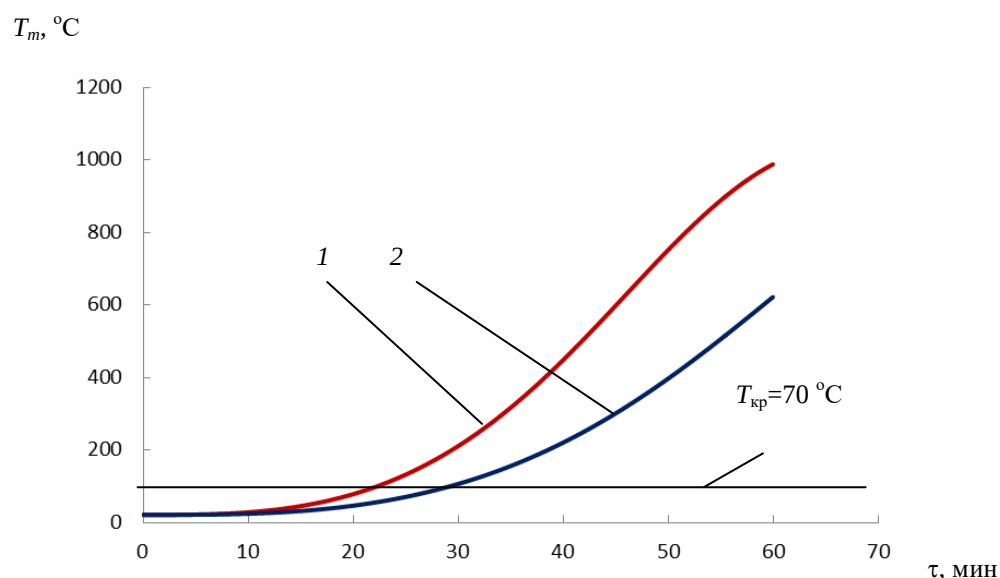


Рисунок 2.68 – Зависимости среднеобъемных температур от времени с начала пожара в:

- 1 – помещение РПУ (реакторное здание, отметка +7,800, сценарий 2);
- 2 – помещение БПУ (реакторное здание, отметка +3,600, сценарий 3), кабели НГ (свойства в главе 4 исследования), герметичное помещение

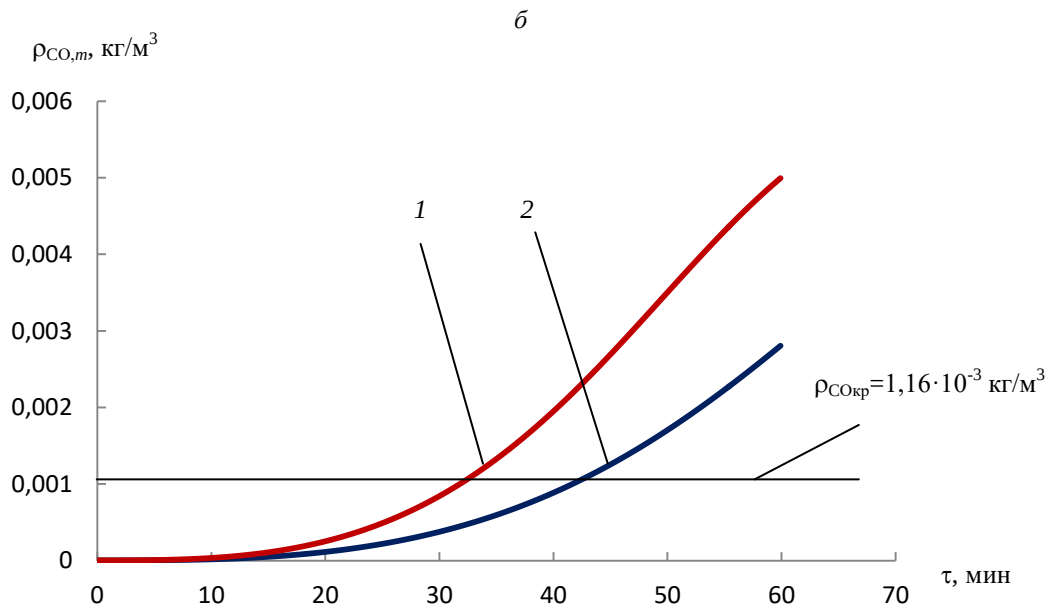
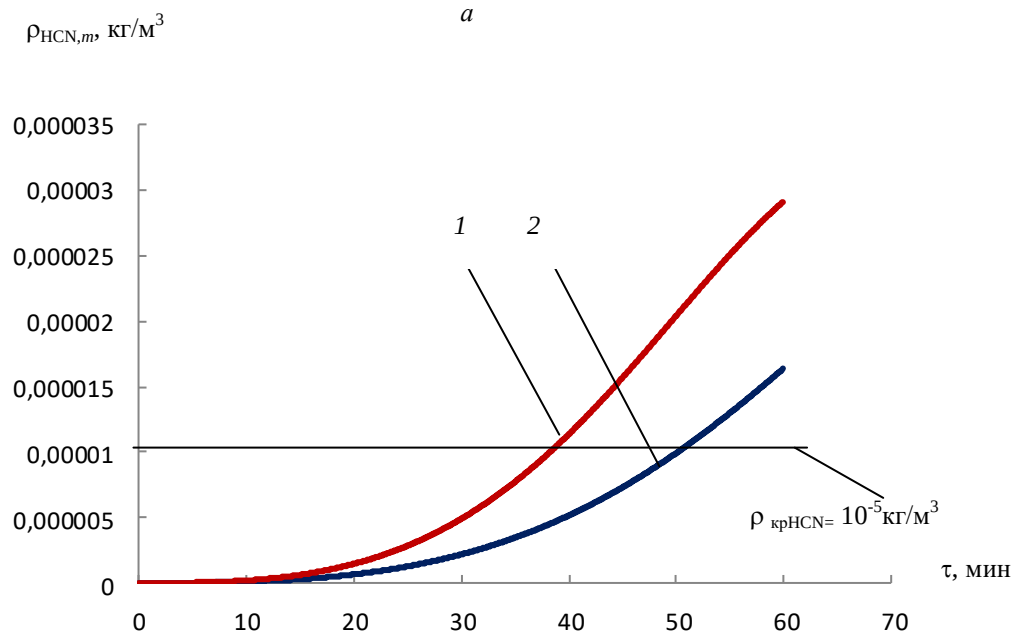


Рисунок 2.69 – Зависимости среднееобъемных плотностей циановодорода (*a*) и монооксида углерода (*б*) от времени с начала пожара в: 1 – помещение РПУ (реакторное здание, отметка +7,800, сценарий 2); 2 – помещение БПУ (реакторное здание, отметка +3,600, сценарий 3), кабели НГ (свойства в главе 4 исследования) герметичное помещение

Для иллюстрации полученных результатов в случае распространения ОФП по коридорам реакторного здания на отметках +4,950 и +4,800 в осях 1^P - $3^P/A^P$ - $Д^P$ (очаг возгорания находится в помещении установок системы управления и контроля, сценарий 4) на рисунках 2.70-2.72 представлены в случае свободного развития пожара через различные промежутки времени от начала пожара при горении кабелей НГ (пожарная нагрузка №7, таблица 2.17):

- поля дальности видимости, температур, скоростей, массовых концентраций CO и O_2 на уровне рабочей зоны;
- поля температур, оптической плотности дыма, скоростей и схемы течения в продольном сечении, проходящем через место возгорания.

В случае распространения ОФП по коридорам на отметках +4,950 и +4,800 в осях 1^P - $3^P/A^P$ - $Д^P$ (очаг возгорания находится в помещении установок системы управления и контроля, сценарий 4) на рисунках 2.73-2.76 приведены в случае свободного развития пожара через различные промежутки времени от начала пожара при горении кабелей РГ (пожарная нагрузка №8 из таблицы 2.17):

- поля дальности видимости, температур, скоростей, массовых концентраций CO и O_2 на уровне рабочей зоны;
- поля температур, оптической плотности дыма, скоростей и схемы течения в продольном сечении, проходящем через место возгорания.

Координаты x , y , z на рисунках 2.70-2.76 направлены вдоль длины, ширины и высоты помещения соответственно. Значения температур даны в $^{\circ}C$, оптической плотности дыма в Нп/м, дальности видимости в м, скорости в м/с.

Результаты расчета показали, что при распространении ОФП в коридорах потеря дальности видимости при горении кабелей НГ (таблица 2.19, сценарий 4) наступает только за в 1,88 раза меньший промежуток времени, чем в случае горения кабелей РГ. Это объясняется отличием в свойствах кабелей НГ и РГ, а именно: удельная скорость выгорания кабелей НГ в 3,73 раза ниже кабелей РГ; линейная скорость распространения пламени ниже в 21,3 раза у кабелей НГ, однако удельное тепловыделение у кабелей НГ выше чем у РГ в 1,9 раза (таблица 2.17).

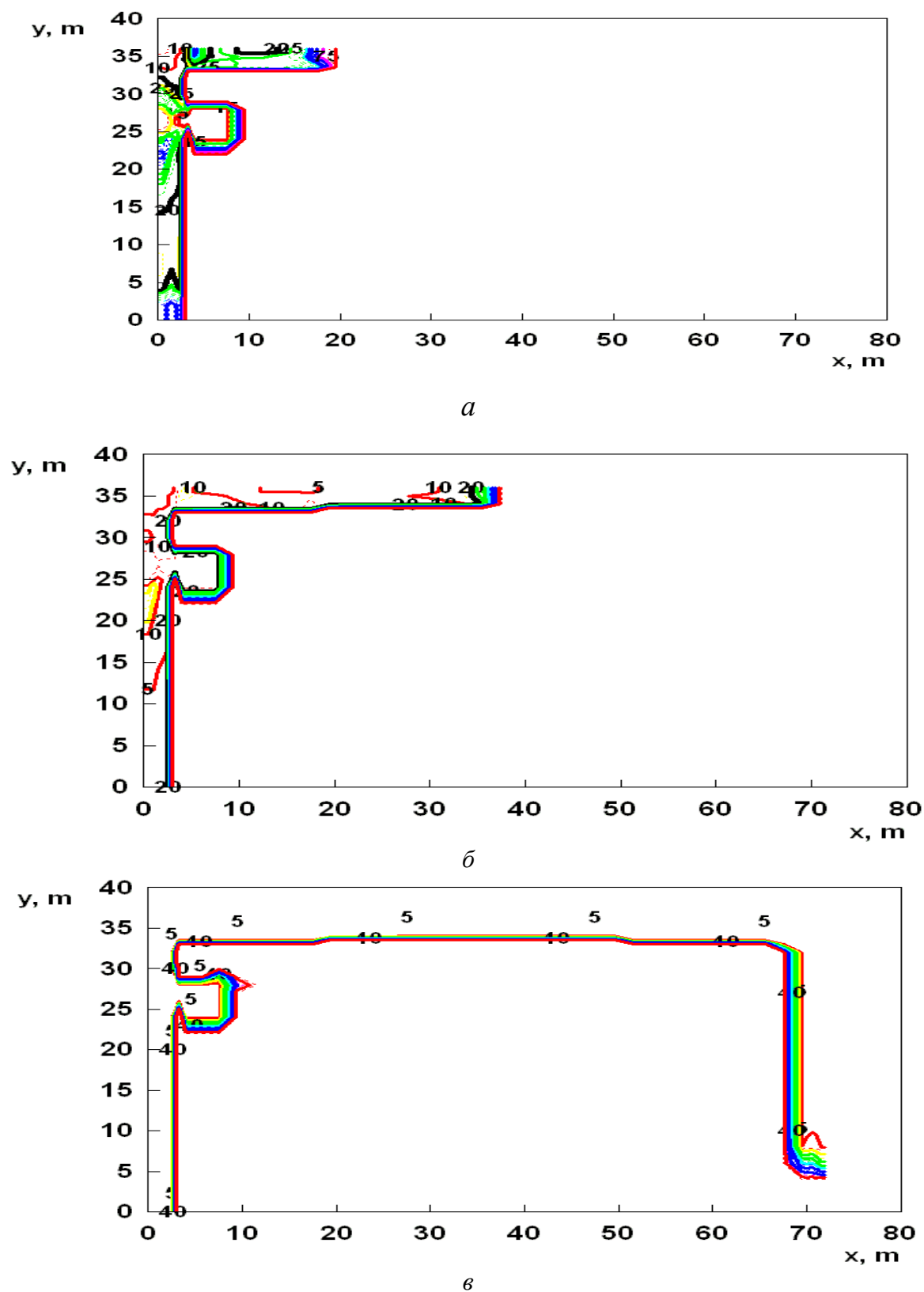


Рисунок 2.70 – Поля дальности видимости на уровне рабочей зоны через 240 (*a*), 300 (*б*) и 510 с (*в*) от начала пожара при горении кабелей НГ (реакторное здание, отметки +4,950 и +4,800, сценарий 4)

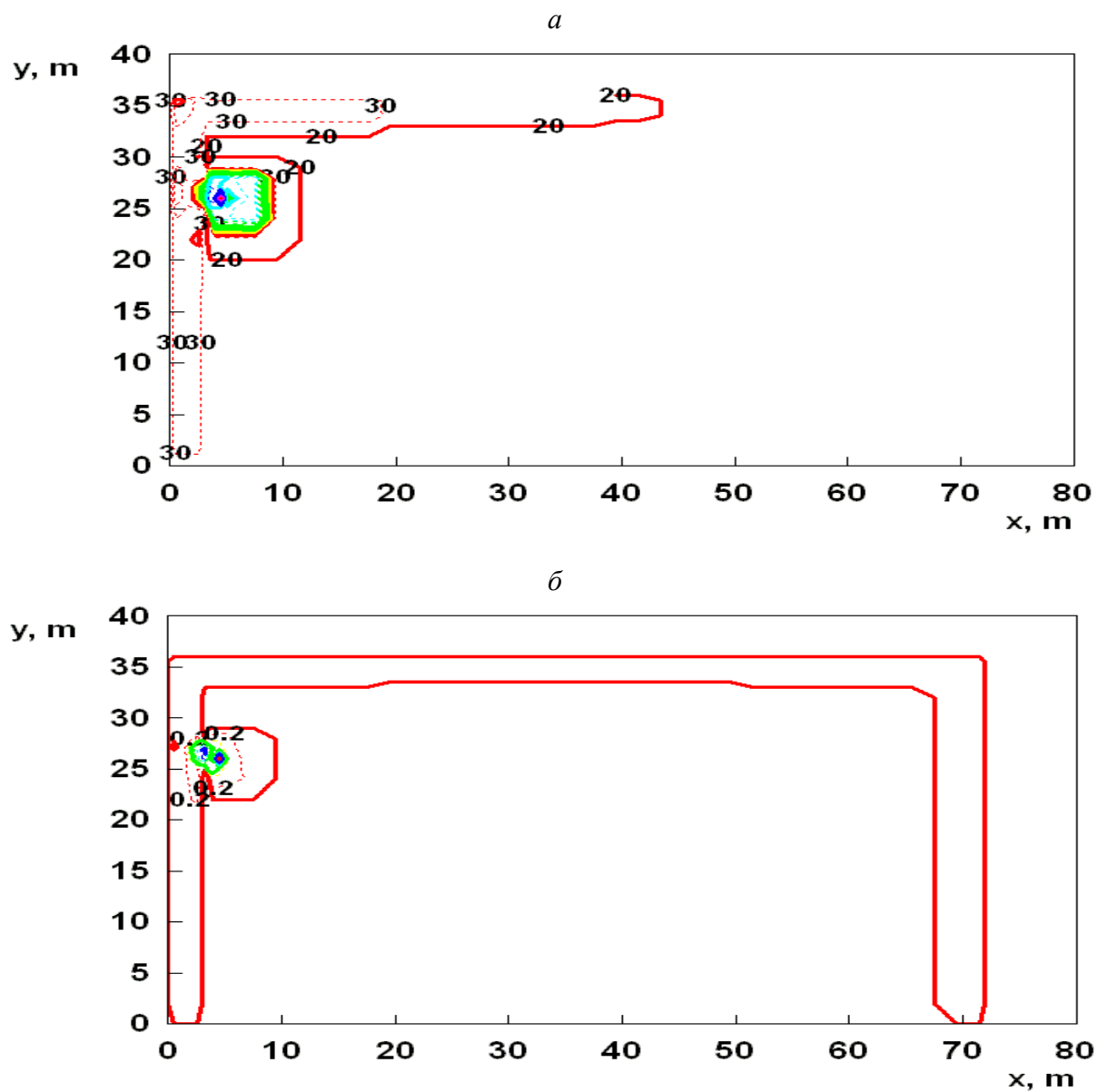


Рисунок 2.71 – Поля температур (а) и скоростей (б) на уровне рабочей зоны через 300 с от начала пожара при горении кабелей НГ (реакторное здание, отметки + 4,950 и + 4,800, сценарий 4)

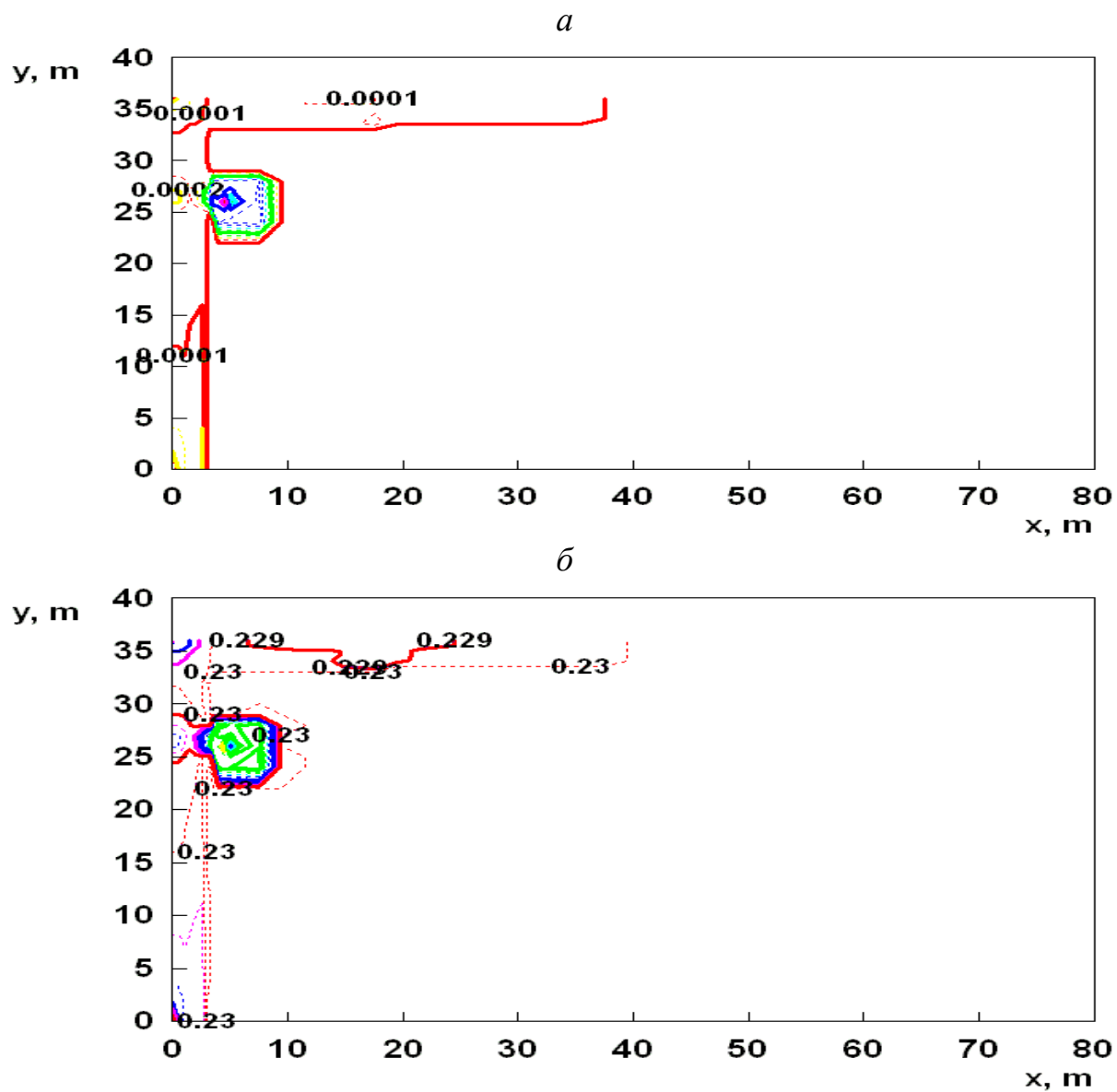


Рисунок 2.72 – Поля массовых концентраций CO (а) и O_2 (б) на уровне рабочей зоны через 300 с от начала пожара при горении кабелей НГ (реакторное здание, отметки + 4,950 и + 4,800, сценарий 4)

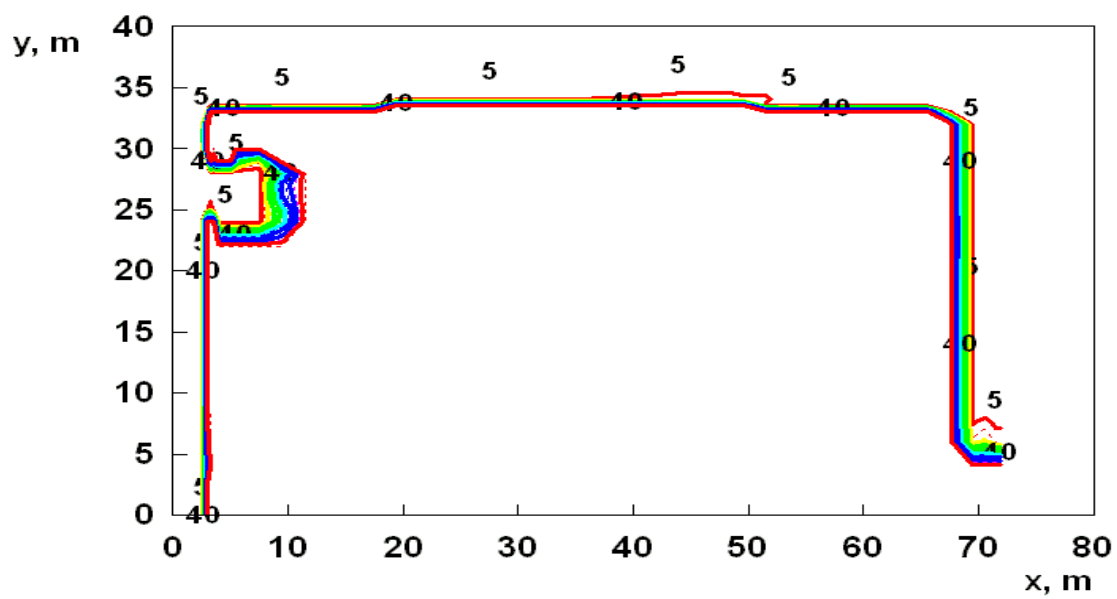


Рисунок 2.73 – Поля дальности видимости на уровне рабочей зоны через 120 (а), 240 с (б) от начала пожара при горении кабелей РГ (реакторное здание, отметки +4,950 и +4,800, сценарий 4)

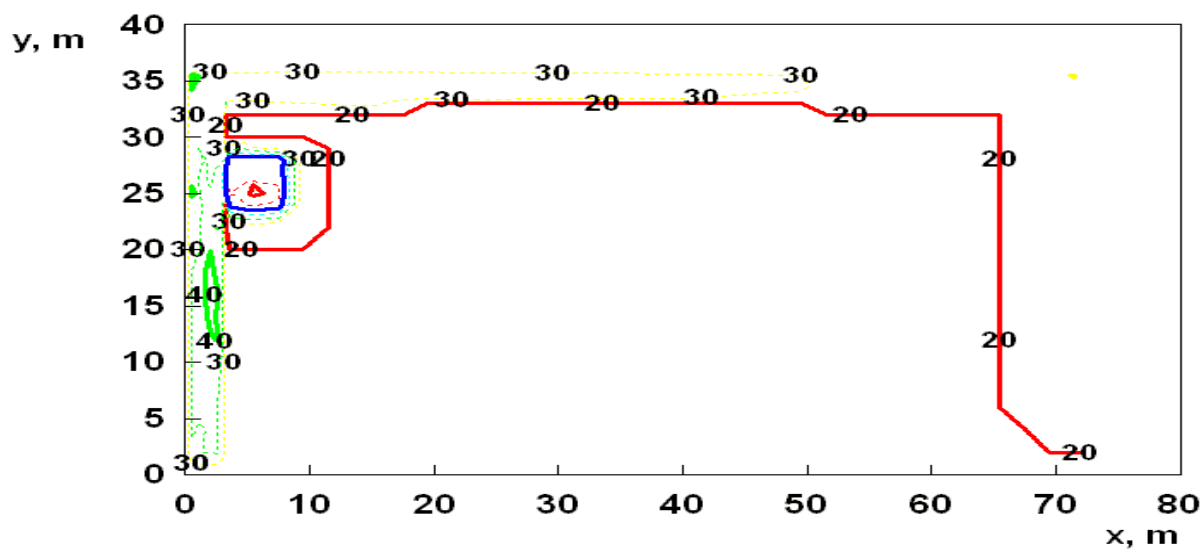
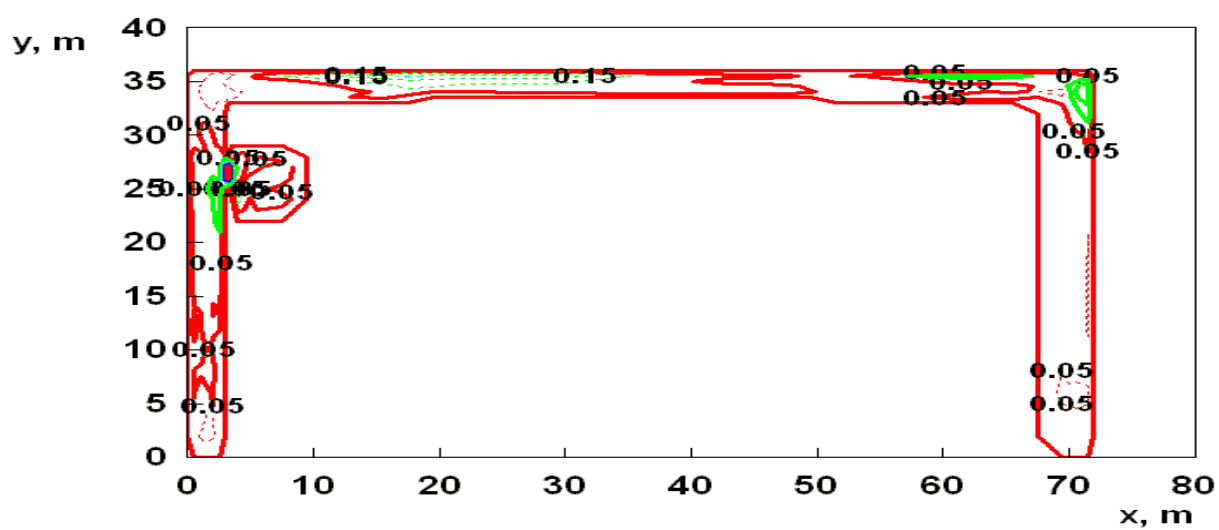
a*б*

Рисунок 2.74 – Поля температур (*a*) и скоростей (*б*) на уровне рабочей зоны через 300 с от начала пожара при горении кабелей РГ (реакторное здание, отметки + 4,950 и + 4,800, сценарий 4)

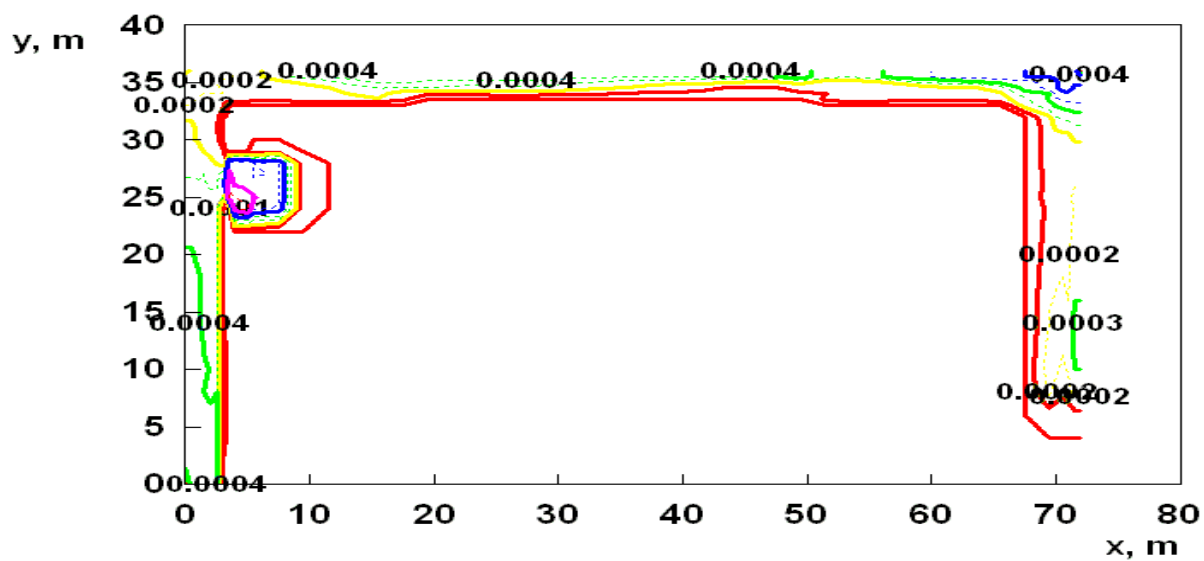
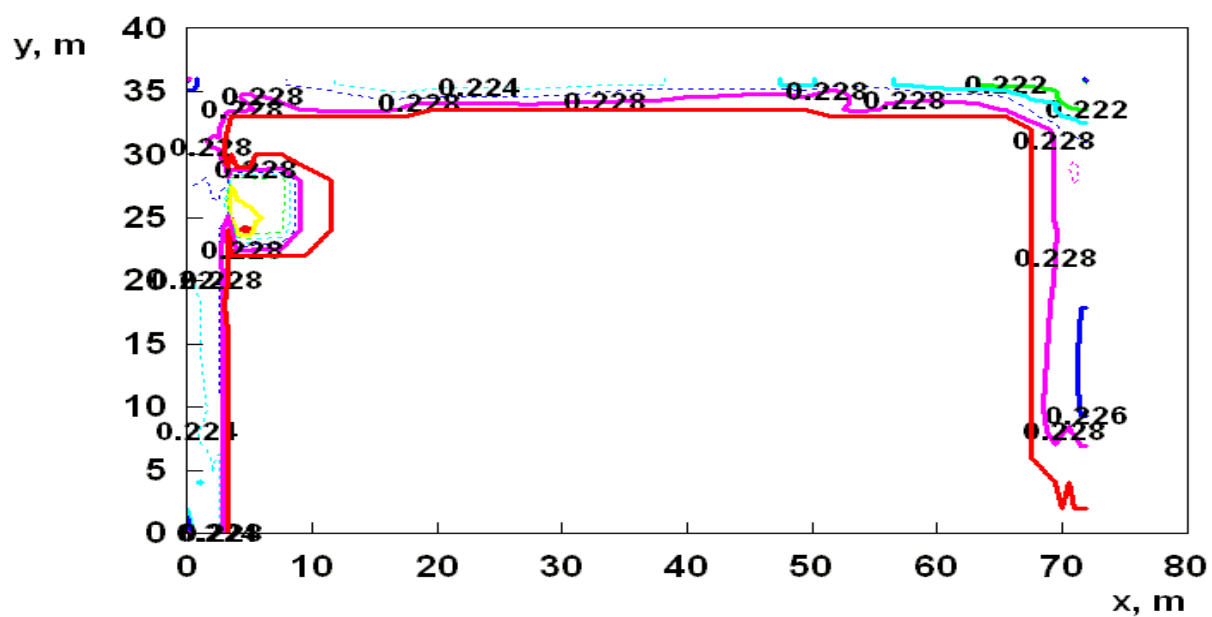
a*б*

Рисунок 2.75 – Поля массовых концентраций CO (*a*) и O₂ (*б*) на уровне рабочей зоны через 300 с от начала пожара при горении кабелей РГ (реакторное здание, отметки + 4,950 и + 4,800, сценарий 4)

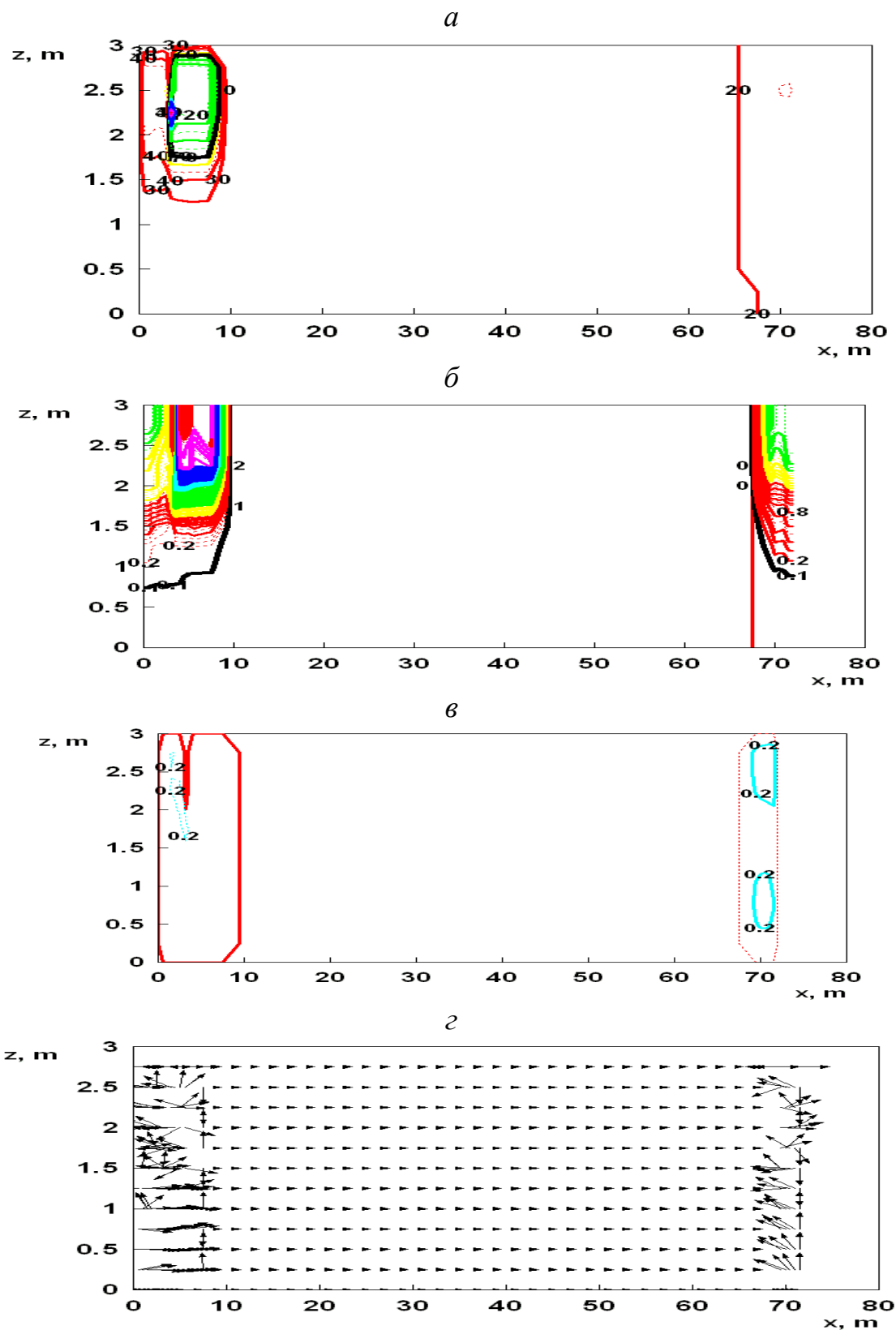


Рисунок 2.76 – Поля температур (*a*), оптической плотности дыма (*б*), скоростей (*в*) и схемы течения (<

Расчёт фактического времени эвакуации из помещений здания производился при следующих исходных данных:

- общая площадь помещений, ширина и длина коридоров, ширина лестниц определялись в соответствии с объемно-планировочными решениями здания;
- пути движения людей по участкам (согласно схеме движения) соответствуют требованиям, предъявляемым к эвакуационным путям, в соответствии с [178, 203];
- количество находящихся в помещениях людей определяется штатным расписанием;
- средняя площадь горизонтальной проекции человека принимается равной $0,125 \text{ м}^2$ (взрослого человека в зимней одежде) в соответствии с таблицей П5.3 приложения №5 к [123];
- расчётное время эвакуации определялось без учёта одного выхода в соответствии с [178];
- высота эвакуационных выходов в свету составляет не менее 2 м.

Эвакуация из реакторного здания персонала, подлежащего эвакуации и находящегося внутри защитной оболочки в осях $2^P\text{-}4^P/\text{Б}^P\text{-}\Gamma^P$ на уровнях от +0,550 до +26,300, происходит через незадымляемые лестничные клетки в осях $2^P\text{-}3^P/\text{В}^P\text{-}\Gamma^P$ и $3^P\text{-}4^P/\text{Б}^P\text{-}\text{В}^P$.

Эвакуация из реакторного здания персонала, подлежащего эвакуации и находящегося в осях $1^P\text{-}5^P/\text{А}^P\text{-}\text{Д}^P$ снаружи защитной оболочки на уровнях от +0,550 до +26,300, происходит через незадымляемые лестничные клетки.

Персонал, находящийся в реакторном здании и выполняющий функции по приведению энергоблока в безопасное состояние и подлежащий спасению, находится в следующих помещениях: помещение БПУ на отметке +3,600; центр техподдержки на отметке +3,600; помещение УДУ на отметке +3,600; помещение УДУ на отметке +7,200; помещение РПУ на отметке +7,200; помещение УДУ на отметке +7,200.

На рисунке 2.77 представлены расчетные схемы эвакуации из реакторного здания.

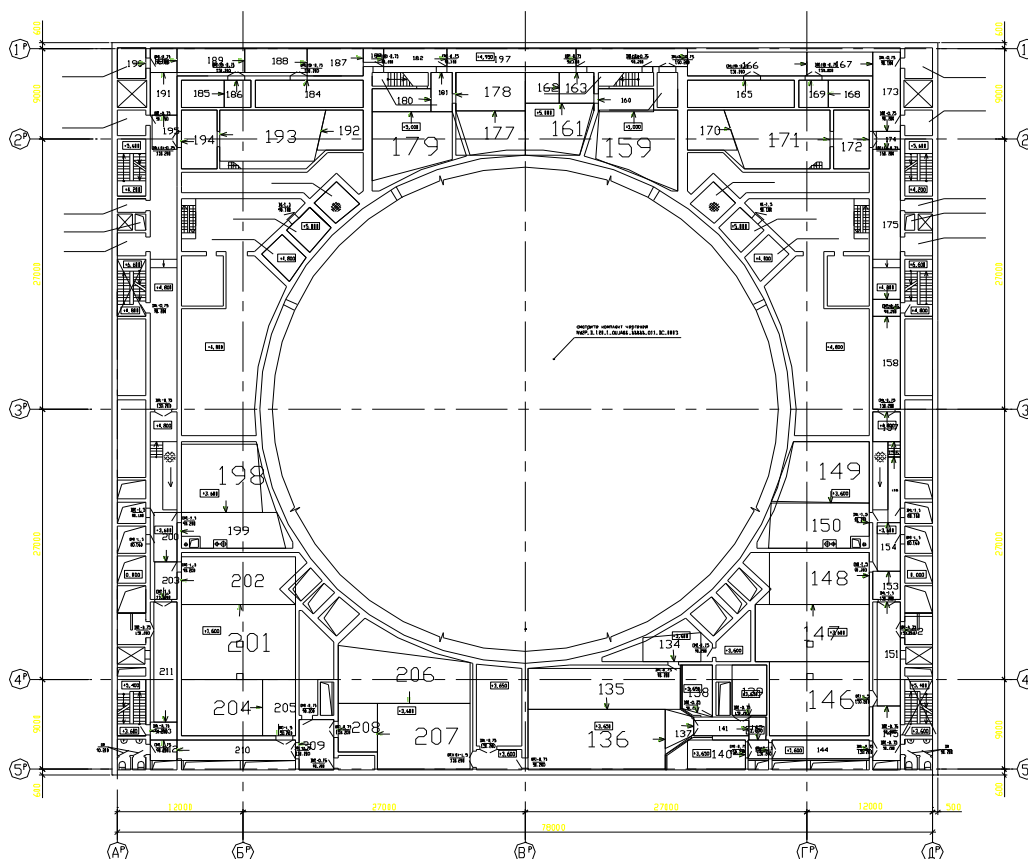


Рисунок 2.77 – Расчетные схемы эвакуации из реакторного здания
на отметках +3,600, +4,800 (таблица 2.15, сценарии 3, 4)

Предполагаем, что людские потоки распределяются равномерно на все эвакуационные выходы (за исключением заблокированных по расчетному сценарию). Время начала эвакуации $\tau_{\text{нз}}$ определяется в соответствии с [123].

В таблице 2.20 приведены характеристики помещений по числу одновременно находящихся людей, значения необходимого и фактического времени эвакуации через различные эвакуационные выходы, а также результаты проверки выполнения условия безопасной эвакуации людей.

При этом должны быть обеспечены специальные организационно-технические мероприятия с тем, чтобы пути движения людей по участкам (согласно схеме движения) должны соответствовать требованиям, предъявляемым к эвакуационным путям, в соответствии с [178, 203].

Таблица 2.20 – Количество людей, необходимое и фактическое время эвакуации из помещений, а также результаты проверки выполнения условия безопасной эвакуации людей

№	Здание (сценарий)	Помещение очага пожара	Количество человек	Необходимое время эвакуации, $\tau_{нб}$, мин.	Расчётное (фактическое) время эвакуации + время начала эвакуации, $\tau_{фэ} + \tau_{нэ}$, мин	Вывод о соответствии
1	Реакторное здание (сценарий 1)	Зона электрических гермопроходок 1-го канала СБ	14	4,99 _{нг} 16,1 _{нг} ^С	1,88 + 0,5 = 2,38	С
2	Реакторное здание (сценарий 2)	Помещение РПУ	71	4 ^Д	2,11 + 0,5 = 2,61	С
3	Реакторное здание (сценарий 3)	Помещение БПУ	33	5 ^Д	3,73 + 0,5 = 4,23	С
4	Реакторное здание (сценарий 4)	Помещение установок САУ и контроля 1-го канала СБ на отметке +4,950 и коридор в осях 1 ^Р -5 ^Р /А ^Р -Д ^Р между лест- ничной клеткой в осях 2 ^Р -3 ^Р /А ^Р -Б ^Р и 2 ^Р -3 ^Р /Г ^Р -Д ^Р	43	5 ^Д	3,73 + 0,5 = 4,23	С

Примечания: сокращение «С» – соответствует, «Н/С» – не соответствует;

^Д – с учетом работы системы дымоудаления; нг – пожарная нагрузка – кабели НГ; ^С - с учетом использования портативных фильтрующих средств защиты органов дыхания.

Проведенные расчеты безопасной эвакуации людей из реакторного здания Нововоронежской АЭС-2, показали, что условие безопасной эвакуации людей выполняется только с учетом работы системы дымоудаления (за исключением части реакторного здания внутри защитной оболочки в осях 2^Р-4^Р/Б^Р-Г^Р (сценарий 1) при выполнении следующих противопожарных мероприятий:

– в реакторном здании внутри защитной оболочки в осях 2^Р-4^Р/Б^Р-Г^Р ограничить время пребывания обслуживающего персонала до 15 мин (с учетом использования портативных фильтрующих средств защиты органов дыхания) в сутки для более длительного пребывания необходимы изолирующие средства индивидуальной защиты, так же в соответствии со статьей 93 ФЗ №123 [210] и предусмотреть меры по обучению персонала действиям при пожаре и по

социальной защите работников, компенсирующие их работу в условиях повышенного риска;

- необходимо предусмотреть средства индивидуальной защиты органов дыхания обслуживающего персонала от воздействия ОФП;

- необходимо предусмотреть организационно-технические мероприятия по эвакуации персонала в условиях потери видимости;

- в реакторном здании персонал, находящийся в помещении РПУ на отметке +7,800 и в помещении БПУ на отметке +3,600, выполняющий функции по приведению энергоблока в безопасное состояние и подлежащий спасению, должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты [11] органов дыхания от воздействия ОФП.

Для иллюстрации полученных результатов на рисунках 2.68 и 2.69 представлены соответственно зависимости среднеобъемных температур, плотностей циановодорода и монооксида углерода от времени с начала пожара, полученные из расчета с использованием интегральной модели при свободном развитии пожара в помещении РПУ (реакторное здание, отметка +7,800, сценарий 2) и помещение БПУ (реакторное здание, отметка +3,600, сценарий 3), ПН кабели НГ, герметичное помещение.

Данные по наступлению критического времени по температуре, циановодороду и монооксиду углерода, полученные с использованием массовых коэффициентов образования L_{CO} и L_{HCN} (гл.4 диссертационного исследования) позволяют сделать вывод о том, что критические времена по температуре, циановодороду и монооксиду углерода имеют близкие значения. Поскольку токсичное действие смеси $CO+HCN$ увеличивается путем суммирования эффектов [51, 52, 257], а повышенная температура приводит к увеличению частоты дыхания, то их воздействие на персонал БПУ и РПУ, приводящий реакторную установку в безопасное состояние в течение нескольких часов [45, 207] (не менее 72 часов [16]) может привести к отравлению. Следовательно персонал должен использовать средства индивидуальной защиты [11, 21] от циановодорода и от монооксида углерода.

2.5 Выводы по главе 2

1. Отсутствие в литературных источниках и нормативных документах пожароопасных свойств материалов, находящихся на АЭС, требует проведения их экспериментальных исследований. Кроме того, при расчете динамики ОФП в помещениях АЭС необходимо использовать программы, в которых напрямую вводятся экспериментальные данные по пожароопасным свойствам вышеуказанных материалов.

2. Рассчитаны 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;

3. Фактические пределы огнестойкости несущих ограждающих железобетонных конструкций помещений, пожарных зон и пожарных отсеков зданий АЭС для всех рассматриваемых наиболее опасных сценариев развития пожара превышают требуемые пределы огнестойкости.

4. Распространения опасных факторов пожара за пределы пожарных зон и пожарных отсеков (в том числе и через противопожарные двери и люки) зданий АЭС не происходит через 180 мин от начала возгорания внутри пожарной зоны или пожарного отсека.

5. Во всех рассматриваемых помещениях при реальном температурном режиме пожара время достижения температуры короткого замыкания кабелей НГ находится в диапазоне от 14 до 64 мин от начала возгорания внутри пожарной зоны или пожарного отсека, в том числе и в случае работы системы дымоудаления (активной системы пожарной защиты).

6. Для устранения нарушений требований пожарной безопасности в зданиях АЭС необходимо:

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

- стальные элементы крепления сэндвич-панелей к железобетонным колоннам в помещении по обращению с ОНУА пожарной зоны защитить с

помощью слоя минеральной ваты;

- для предотвращения одновременного выхода из строя 1-го и 2-го каналов системы безопасности в реакторном здании Нововоронежской АЭС-2 на отметке +4,950 в коридоре необходимо установить две противопожарные перегородки с пределом огнестойкости EI 60 с противопожарными дверьми с EI 60;

- нарушение работоспособности кабелей (короткое замыкание) 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 целого 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;

- сформулированы требования к температуре вспучивания огнезащитных составов для обработки наружных поверхностей кабелей СБ: вышеуказанная температура должна быть не более 150⁰С для кабелей РГ и 180⁰С для кабелей НГ.

- для обеспечения безопасной эвакуации людей из реакторного здания Нововоронежской АЭС-2, необходима работа системы дымоудаления, наличие средств индивидуальной защиты органов дыхания обслуживающего персонала от воздействия ОФП, разработка организационно-технических мероприятий по эвакуации персонала в условиях потери видимости;

- в реакторном здании персонал, находящийся в помещении РПУ и в помещении БПУ, выполняющий функции по приведению энергоблока в безопасное состояние и подлежащий спасению, должен быть обеспечен средствами индивидуальной защиты органов дыхания от воздействия ОФП.

- наиболее токсичными газами, выделяющимися при пожаре в реакторном здании, являются циановодород и монооксид углерода при этом токсичное действие их смеси при повышенной температуре увеличивается путем суммирования эффектов.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ И СИГНАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА АЭС, В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОГО И СТАНДАРТНЫХ РЕЖИМОВ ПОЖАРА

3.1. Теоретическая оценка функционирования сигнальных кабелей каналов безопасности АЭС в условиях пожара

3.1.1. Постановка задачи

Для надежного проведения реакторной установки атомной станции в безопасное состояние при возникновении аварии или пожара используют специально созданные каналы систем безопасности (СБ). В отличие от канала нормальной эксплуатации, каналы СБ включают только те приборы и оборудование, которые необходимы для горячего или холодного останова ядерного реактора. Количество каналов СБ может быть различным: Нововоронежская АЭС имеет два канала СБ, Тяньваньская АЭС в Китае [174] и Ленинградская АЭС-2 – четыре канала.

Прокладывают каналы СБ в разных пожарных зонах для обеспечения их сохранности во время аварий и пожаров. Однако в ряде помещений, таких как, например, блочный пульт управления, резервный пульт управления, гермозона и межболочное пространство реакторного здания сходятся все каналы СБ согласно особенностям технологического процесса. Таким образом, в случае пожара в одном из вышеперечисленных помещений воздействию повышенной температуры подвергаются все кабельные каналы СБ.

Воздействию пожара на кабели посвящено большое количество научных работ, например, [37; 87; 233; 234; 235; 244]. Ряд работ [134; 213] посвящен сохранению целостности кабельных коробов, условиям самовоспламенения изоляции электрического кабеля, определению огнестойкости кабельных проходок. Токовые нагрузки проводов и кабелей рассчитывали исходя из температуры на поверхности жилы [205]. Ограничением для тока, протекающего

по жиле, служила температура, при которой материал изоляции начинает разрушаться. Например, для кабелей с пластмассовой изоляцией расчетной температурой принимают 60°C для нормальных температурных условий ($+25^{\circ}\text{C}$), а при высоких температурах изоляция подвергается двустороннему воздействию - со стороны окружающей среды и со стороны внутреннего нагрева жилы кабеля, за счет протекающего тока (токовой нагрузки). В свою очередь, сопротивление жилы при высоких температурах тоже повышается, следовательно, еще больше повышается ее нагрев за счет протекающего по ней тока.

Особенностью сигнальных кабелей СБ на АЭС является сохранение способности проводить модулированный сигнал в течение времени, необходимого для приведения реакторной установки в безопасное состояние. Однако возможности сигнальных кабелей передавать корректно сигнал в условиях повышенной температуры газовой среды в помещении до настоящего времени не исследовалась.

Существенное влияние на корректность передаваемого сигнала оказывает температурное изменение сопротивления, величина которого определяются температурным коэффициентом сопротивления материала жилы. Изменения сопротивления с температурой вызывают изменения затухания модулированного сигнала, причем температурный коэффициент затухания равен примерно половине температурного коэффициента сопротивления. Например, для меди эти коэффициенты составляют 0,004 и 0,002 на градус. Между тем цифровые системы передачи весьма чувствительны к изменениям затухания: так, что коэффициент ошибок может возрасти на один-два порядка. Это приемлемо при передаче речи, но может вызвать весьма существенные искажения в случае передачи цифровых данных.

Одной из целей создания системы обеспечения пожарной безопасности атомной станции является обеспечение безопасного останова и расхолаживания реакторной установки при пожаре. Раздел 9 проектной документации АЭС «Перечень мероприятий по обеспечению пожарной безопасности» п. 9.1.3.5

содержит формулировку «...противопожарная защита должна гарантировать функционирование систем безопасности в случае пожара допускается выход из строя не более одного канала систем безопасности».

В тех пожарных зонах, где имеет место расположение элементов разных каналов систем безопасности, ликвидация пожара должна быть обеспечена на начальной стадии его развития в пределах одного канала безопасности (п. 9.1.3.7. Раздела 9 ПД АЭС). Это означает что в помещении пожара (РПУ, БПУ, гермозона) электрические кабели остальных каналов СБ должны сохранять способность корректно передавать сигнал.

А так же, в соответствии со статьей 82 (п. 2) ФЗ №123 [210] кабельные линии и электропроводка систем противопожарной защиты, средств обеспечения деятельности подразделений пожарной охраны, систем обнаружения пожара, оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре, аварийного освещения на путях эвакуации, аварийной вентиляции и противодымной защиты, автоматического пожаротушения [172], внутреннего противопожарного водопровода, лифтов для транспортировки подразделений пожарной охраны в зданиях и сооружениях должны сохранять работоспособность в условиях пожара в течение времени, необходимого для выполнения их функций.

Чрезмерно высокая температура проводов и кабелей приводит к преждевременному высыханию изоляции, а у проводников без изоляции к ускоренному окислению соединительных контактов и, как следствие, ухудшению проводимости. Кроме того, перегрев проводов и кабелей сверх допустимых величин может приводить к пожарам. Поэтому в ПУЭ [121] устанавливаются следующее предельно длительно допустимое значение температуры проводов и кабелей. Так, например, для проводов без изоляции предельно длительно допустимое значение 70°C .

Целью исследования является теоретическая и экспериментальная оценка возможности кабелей системы безопасности АЭС передавать корректно модулированный электрический сигнал при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки.

3.1.2 Математическая модель

Расчет температуры токопроводящей жилы проводился путем решения сопряженной стационарной задачи о теплоотдаче горизонтальных и вертикальных цилиндров (трубы, проволоки) при свободном движении в неограниченном пространстве и повышенной температуры окружающей среды.

Температура токопроводящей жилы при стационарном режиме охлаждения равна [72]:

$$T_c = T_r + \frac{q}{k}, \quad (3.1)$$

где T_c – температура токопроводящей жилы, К; T_r – температура газовой среды помещения, К; q – линейный тепловой поток от наружной поверхности

изоляции к газовой среде помещения, Вт/м; $k = \frac{1}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi r_2 \alpha}}$ – линейный

коэффициент теплопередачи от токопроводящей жилы к газовой среде помещения, Вт/(м·К); r_1 – наружный радиус токопроводящей жилы (внутренний радиус изоляции), м; r_2 – наружный радиус изоляции, м; α – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к газовой среде помещения, Вт/(м²·К).

Линейный тепловой поток при стационарном режиме охлаждения равен:

$$q = \frac{I^2 R}{l}, \quad (3.2)$$

где I – сила тока, А; $R = \rho_o \frac{l}{s}$ – электрическое сопротивление токопроводящей жилы, Ом; ρ_o – удельное электрическое сопротивление материала токопроводящей жилы, Ом·мм²/м; l – длина токопроводящей жилы, м; s – площадь поперечного сечения токопроводящей жилы, мм².

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к газовой среде помещения определяется для горизонтального расположения провода (при

$10^3 < (Gr \cdot Pr)_m < 10^9$) и вертикального расположения провода (при $(Gr \cdot Pr)_m > 10^{10}$) [72]:

$$Nu_r = 0,5(Gr \cdot Pr)_r^{0,25} \left(\frac{Pr_r}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (3.3)$$

$$Nu_r = 0,15(Gr \cdot Pr)_r^{1/3} \left(\frac{Pr_r}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (3.4)$$

где $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$ – число Нуссельта; $Gr = \beta g (T_r - T_w) L^3 / \nu^2$ – число Грасгофа; β – коэффициент объемного расширения, $1/K$; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; T_w – температура наружной поверхности изоляции токопроводящей жилы, K ; ν – коэффициент кинематической вязкости, m^2/c ; L – характерный размер, m ; $L=d$ – при горизонтальном расположении провода; $L=l$ – при вертикальном расположении провода; индекс “ r ” означает, что теплофизические свойства берутся при температуре T_r , индекс “ w ” – при T_w ; T_w – температура наружной поверхности изоляции токопроводящей жилы, K ; λ – коэффициент теплопроводности газовой среды помещения, $Вт/(м \cdot K)$.

При одновременном воздействии тепловой и токовой нагрузки на сигнальный кабель возможно искажение модулированного сигнала, что воспринимается как воздействие помехи на электрический сигнал. Подобное воздействие может привести к ложным срабатываниям СБ АЭС с последующими негативными последствиями.

3.1.3 Результаты расчетов

Для определения температур газовой среды помещения при пожаре, при которых кабели не нагреваются выше рабочих температур, при достижении проводником заданного установившегося перегрева (постоянной температуры) был выбран кабель конструкции КПЭПнг(А)-HF 24x2x0,6. Этот кабель предназначен для передачи электрических сигналов и распределения электрической энергии в цепях управления, сигнализации, связи, межприборных

соединений при напряжении 250, 380 и 1000 В переменного тока, частотой до 200 кГц, или при напряжении соответственно 350, 750 и 1000 В постоянного тока.

При проведении расчета принимали диаметр жилы равный эквивалентному диаметру суммарной площади сечения жил кабеля: $d_j = 4,1$ мм; соответственно предельная сила тока составит $I = 80,7$ А

В результате расчетов с использованием уравнений (3.1) - (3.4), без учета зависимости удельного электрического сопротивления проводника от температуры, получена зависимость температуры токопроводящей жилы от температуры газовой среды в помещении (рисунок 3.1).

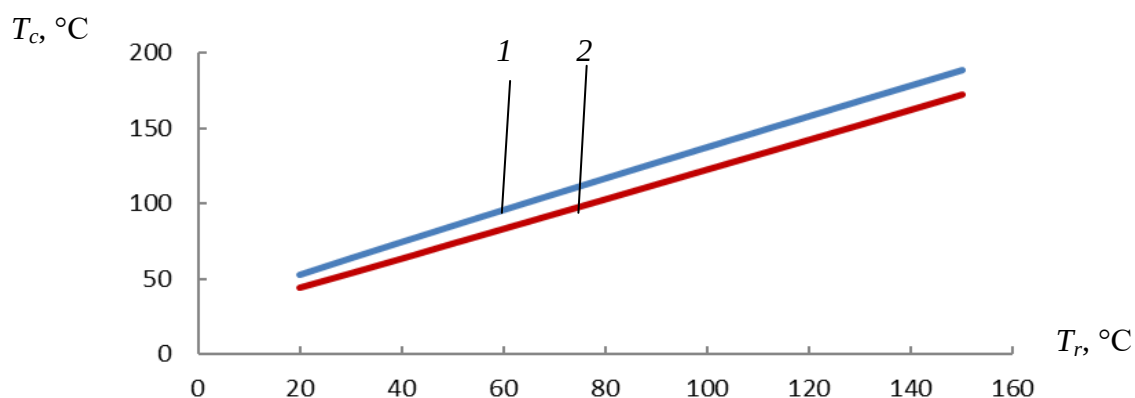


Рисунок 3.1 – Зависимость температуры токопроводящей жилы от температуры газовой среды в помещении при диаметре жилы провода $d_j = 4,1$ мм и предельной силе тока $I = 80$ А:

1 – кабель расположен вертикально; 2 – кабель расположен горизонтально

Из рисунка 3.1 видно, что рабочая температура жилы кабеля, расположенного вертикально, при допустимом токе нагрузки может быть превышена уже при температуре 42 °C в помещении, а в случае горизонтального расположения кабеля – при температуре 53 °C в помещении.

Получены расчетные зависимости допустимой токовой нагрузки кабеля от среднеобъемной температуры в помещении для значимых температур жил кабеля, имеющего наиболее опасное – вертикальное расположение.

На рисунке 3.2 представлены соотношения между температурой газовой среды в помещении пожара и предельной силой тока I_l (кабель расположен

вертикально) в электрическом кабеле при предельно допустимой рабочей температуре жил кабеля $T_l=70^\circ\text{C}$, предельно допустимой рабочей температуре нагрева жил кабеля в режиме перегрузки $T_l=80^\circ\text{C}$ и максимальной температуре нагрева жил кабеля при коротком замыкании, равной $T_l=160^\circ\text{C}$. При этом в расчетах учитывалась зависимость удельного сопротивления проводника от температуры по формуле:

$$\rho_o = \rho_o^* \cdot (1 + 0,0043 \cdot (T_c - 20)) , \quad (3.5)$$

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

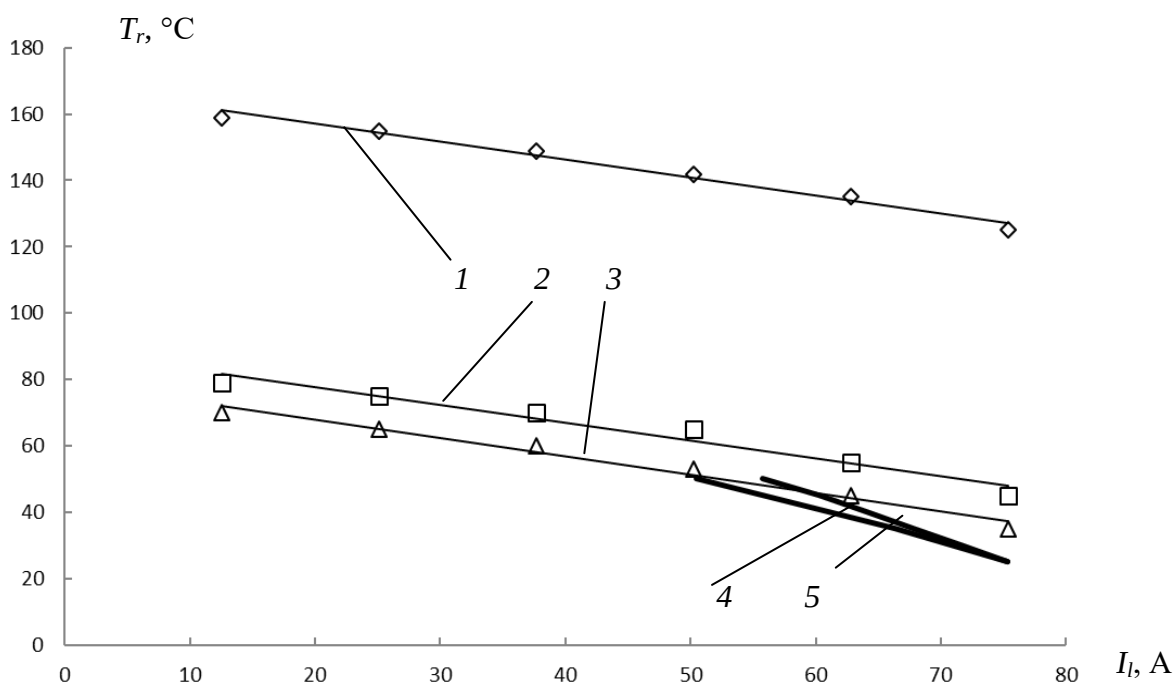


Рисунок 3.2 – Зависимость температуры газовой среды в помещении пожара от силы тока (кабель расположен вертикально): при температуре жилы кабеля $T_c=160^\circ\text{C}$: $\diamond$ – расчет; 1 – аппроксимирующее уравнение $T_r = -0,5391I + 167,87$ с степенью достоверности $R^2=0,9823$; при $T_c=80^\circ\text{C}$: $\square$ – расчет; 2 – $T_r = -0,5346I + 88,333$ с $R^2=0,9611$; при $T_c=70^\circ\text{C}$: $\triangle$ – расчет; 3 – $T_r = -0,5505I + 78,867$ с $R^2=0,9804$; 4 – при $T_c=80^\circ\text{C}$ согласно ПУЭ -2003, издание 7 [121]; 5 – при $T_c=70^\circ\text{C}$ согласно ПУЭ 2003, издание 7 [121]

Из рисунка 3.2 видно, что, например, на начальной стадии пожара в помещении условием работоспособности сигнального кабеля является:

- при температуре газовой среды помещения $T_r=72^\circ\text{C}$ в рабочем режиме работы кабеля ($T_l=70^\circ\text{C}$) сила тока не должна превышать $I_l=12\text{ A}$;
- при $T_r=82^\circ\text{C}$ в режиме перегрузки ($T_l=80^\circ\text{C}$) сила тока не должна превышать $I_l=12\text{ A}$;
- при $T_r=162^\circ\text{C}$ в режиме короткого замыкания ($T_l=160^\circ\text{C}$) сила тока не должна превышать $I_l=12\text{ A}$.

Разработанная математическая модель и результаты численных экспериментов позволяют оценить влияние температуры в помещении атомной станции при пожаре на способность сигнального кабеля системы безопасности АЭС передавать неискаженный модулированный сигнал в зависимости от значения токовых нагрузок в кабеле и вида его расположения (вертикально или горизонтально).

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 [121] зону зависимости температуры в помещении от токовой нагрузки в сигнальных кабелях каналах систем безопасности АЭС при пожаре.

3.2 Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций в условиях пожара

3.2.1 Постановка задачи

Одной из основных функций системы пожарной безопасности атомной станции является обеспечение безопасного останова и расхолаживания

реакторной установки при пожаре. Раздел 9 проектной документации АЭС «Перечень мероприятий по обеспечению пожарной безопасности» п. 9.1.3.5 содержит формулировку «...противопожарная защита должна гарантировать функционирование систем безопасности в случае пожара допускается выход из строя не более одного канала систем безопасности».

В тех пожарных зонах, где имеет место расположение элементов разных каналов (электрические кабели силовой и осветительной сетей) систем безопасности (СБ), ликвидация пожара должна быть обеспечена на начальной стадии его развития в пределах одного канала СБ (п. 9.1.3.7. Раздела 9 ПД АЭС). Это означает, что в таких помещениях как блочный пульт управления, резервный пульт управления, гермозона и межболочное пространство реакторного здания, где, согласно особенностям технологического процесса, сходятся все каналы СБ, электрические кабели остальных каналов СБ должны сохранять работоспособность.

В работах [77, 79] представлены результаты теоретической оценки возможности сигнальных кабелей СБ АЭС передавать корректно модулированный электрический сигнал при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки. Для ее достижения решалась задача теоретического исследования температуры токопроводящей жилы сигнального кабеля на начальной стадии пожара. Однако в вышеуказанной работе решалось стационарное уравнение теплопроводности, что не позволяло оценить динамику режима нагрева электрического кабеля.

Известно, что повышение температуры проводов и кабелей приводит к преждевременному высыханию изоляции и, как следствие, ухудшению проводимости [87; 192]. Перегрев проводов и кабелей сверх допустимых величин может приводить к пожарам. Поэтому в ПУЭ [121] устанавливаются предельно длительно допустимые значения температуры проводов и кабелей. Так, например, для проводов без изоляции предельно длительно допустимое значение равно 70°C.

Пожар в антенной части Останкинской башни на отметке + 460,000 м, произошедший 26-27 августа 2000 г. показал, что при перегрузке силовых кабелей начался их нагрев до температуры плавления пластиковых фиксаторов в цилиндрической конструкции силового кабеля, где центральная и наружная токопроводящие жилы разделялись и изолировались друг от друга пластиковыми фиксаторами [115].

При нагревании силового кабеля произошло плавление пластиковых фиксаторов, короткое замыкание токоведущих жил кабеля и нагрев полихлорвиниловой внешней изоляции кабеля до температуры более 200°C. В результате произошло возгорание внешней изоляции кабеля с последующим повышением температуры в кабельной проходке (лифтовой шахте) до 1000°C. При такой температуре разрушились не только силовые кабели, но вместе с ними и стальные тросы четырех лифтов в лифтовой шахте.

За счет стекания расплавленных и загоревшихся капель внешней изоляции силового кабеля пожар начал распространяться не только вверх, но и вертикально вниз по шахте. Распространение пожара достигло нижней отметки + 67,000 м, где он был остановлен в результате героических действий московских пожарных. На отметке останкинской пожаром башни + 62,000 м находилось аппаратное помещение с дорогостоящей радиопередающей аппаратурой и аппаратурой телевизионного вещания. Их уничтожение привело бы к остановке телевизионного и радиовещания на несколько месяцев на территории не только Московской области, но и всей Российской Федерации.

Изложенное выше говорит об исключительной актуальности рассматриваемой проблемы теоретической оценки эффективности вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов СБ атомных станций с водо-водяными реакторами в условиях пожара при одновременном воздействии различных режимов пожара и токовой нагрузки.

Целью исследования является теоретическая оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов

СБ атомных станций с водо-водяными реакторами в условиях пожара при одновременном воздействии различных режимов пожара и токовой нагрузки.

Для ее достижения были рассмотрены следующие температурные режимы 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 водо-водяными реакторами, в котором проходит, как минимум, два канала СБ.

В случаях вышеуказанных режимов проведен расчет температур наружной поверхности изоляции и вспучивающегося огнезащитного покрытия в зависимости от времени пожара.

3.2.2 Математическая модель

Решается сопряженная нестационарная задача теплоотдачи при нагреве кабелей СБ АЭС от воздействия пожара и токовой нагрузки.

Расчет динамики нагрева кабелей проводился для 3-х стандартных режимов пожара (стандартного, углеводородного и медленно развивающегося (тлеющего)) и реального температурного режима пожара в кабельном этаже БПУ АЭС с водо-водяными реакторами, в которых проходят, как минимум, два канала системы безопасности.

Предполагаем одинаковую по периметру изоляции и длине кабеля плотность теплового потока, падающего на поверхность изоляции от газовой среды помещения.

В этом случае для определения распределения температур внутри многослойной изоляции токопроводящей жилы решается нестационарное одномерное уравнение теплопроводности [72]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad (3.6)$$

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

Уравнение (3.8) решается численным методом контрольных объемов [113].

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.

В случаях стандартных режимов пожара задаются граничные условия 3-го рода [72] в соответствии с данными ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Альтернативные и дополнительные методы. Дата введения 2015-06-01 [36].

При стандартном режиме пожара к уравнению (1) граничные условия 3-го рода имеют вид:

– температура среды (T_m) изменяется в соответствии с кривой «стандартного» пожара:

$$T_m = 345 \lg(0,133\tau + 1) + T_o; \quad (3.7)$$

– коэффициент теплоотдачи от газовой среды к поверхности изоляции равен $\alpha = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

где: τ – время, мин; T_o – начальная температура в помещении, К ;

При углеводородном режиме пожара граничные условия 3-го рода принимаются в виде:

– температура среды изменяется по формуле:

$$T_m = 1080 \left[1 - 0,325e^{-0,167\tau} - 0,67e^{-2,5\tau} \right] + 20; \quad (3.8)$$

– коэффициент теплоотдачи $\alpha = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

В случае медленно развивающегося (тлеющего) режима пожара:

– температура среды изменяется в соответствии с выражениями:

при $0 < \tau \leq 21$ мин:

$$T_m = 154\tau^{0,25} + 20 ; \quad (3.9)$$

при $\tau > 21$ мин:

$$T_m = 345 \log_{10} (8(\tau - 20) + 1) + 20 ; \quad (3.10)$$

– коэффициент теплоотдачи $\alpha = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Для реального режима пожара температура в помещении определяется с использованием интегральной математической модели пожара [158].

Среднеобъемная температура газовой среды в помещении пожара T_m находится из уравнения закона сохранения энергии и уравнения состояния [158]:

$$\frac{V}{k_m - 1} \frac{dp_m}{d\tau} = \eta \Psi Q_n^p + c_{pa} T_a G_a - c_{pm} T_m G_m - Q_\Sigma - Q_{пр} \quad (3.11)$$

$$p_m = \rho_m R T_m , \quad (3.12)$$

где τ – время, с; V – объем помещения, м^3 ; p_m – среднеобъемное давление газовой среды, Па; ρ_m – среднеобъемная плотность газовой среды, $\text{кг}/\text{м}^3$; 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; $Q_{пр}$ – 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);

Коэффициент теплоотдачи находится в случае вертикальных цилиндров при свободном движении в неограниченном пространстве и повышенной температуре окружающей среды. Горизонтальное расположение кабеля менее опасно для

нагрева кабеля [79].

При реальном режиме пожара в случае вертикального расположения провода (при $(Gr \cdot Pr)_m > 10^{10}$) [72]:

$$Nu = 0,15(Gr \cdot Pr)_m^{1/3} \left(\frac{Pr_m}{Pr_w} \right)^{0,25}; \quad (3.13)$$

где $Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$ – число Нуссельта; $Gr = \beta g (T_m - T_w) L^3 / \nu^2$ – число Грасгофа;

Pr – число Прандтля; β – коэффициент объемного расширения, $1/K$; g – ускорение свободного падения, m/s^2 ; T_w – температура наружной поверхности изоляции (или огнезащитного состава) токопроводящей жилы, K ; ν – коэффициент кинематической вязкости, m^2/s ; λ – коэффициент теплопроводности газовой среды помещения, $Вт/(м \cdot K)$; L – характерный размер при вертикальном расположении провода, m ; индекс “ m ” означает, что теплофизические свойства берутся при температуре T_m , индекс “ w ” – при T_w .

Зависимость удельного сопротивления проводника (медь) от температуры определяется по формуле [47]:

$$\rho_o = \rho_o^* \cdot (1 + 0,0043 \cdot (T_c - 20)) , \quad (3.14)$$

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

Приведенные формулы (3.6)-(3.14) позволяют установить, через какое время перегрев изоляции проводника достигнет заданного критического значения.

3.2.3 Исходные данные для проведения численного эксперимента

Рассматриваем силовой кабель ВВГнг(А)-LS 3×2,5 ТУ 16.К71-310-2001 изм. 4, используемый в каналах СБ АЭС с водо-водяными реакторами. Силовые кабели данного типа предназначены для передачи и распределения электрической

энергии в стационарных установках при переменном и постоянном напряжении 1,0 кВ.

При реальном режиме пожара принимаем, что кабель находится в кабельном этаже АЭС с площадью пола 102 м^2 и высотой 3,1 м. Горючим материалом являются кабели НГ. Рассматриваем развитие реального температурного режима пожара при открытых и закрытых дверях помещения.

Сила тока проводника принималась равной 6 А/мм^2 (максимальная согласно ПУЭ [121]).

Геометрические размеры и теплофизические свойства материалов жилы и изоляции кабелей [201; 202], а также сухого слоя вспучивающегося огнезащитного состава [41-43; 90; 160] представлены в таблице 3.1.

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 короткого замыкания составляют: 150°C – 200°C [35].

Деструкция изоляции из ПВХ пластиката происходит при нагревании выше 140°C и сопровождается выделением хлористого водорода. Температура текучести полимера равна 150 – 160°C , температура самовоспламенения составляет 400°C [204].

Таблица 3.1 – Геометрические размеры и теплофизические свойства материалов жилы и изоляции кабелей, а также сухого слоя вспучивающегося огнезащитного состава

Материал	Наружный диаметр, мм	Плотность, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Жила кабеля (медь)	1,8	8900	392	397
Изоляция кабеля (ПВХ пластикат пониженной пожароопасности с низким дымо- и газовыделением)	5,0	1290	0,165	1680
Сухой слой вспучивающегося огнезащитного состава	6,0	716	0,2	1000

Время воздействия до достижения критических температур определяется нагревом слоев кабеля от газовой среды помещения пожара.

Температуры вспучивания огнезащитного состава принимались в диапазоне 180-250°C. При этом процесс вспучивания не рассматривался, расчеты проводились для оценок времени его начала.

3.2.4 Результаты расчетов

Зависимости температур наружной поверхности изоляции и медной жилы кабеля от времени его работы в нормальных условиях при максимальной силе тока 6 А на 1 мм² сечения жилы представлены на рисунке 3.3.

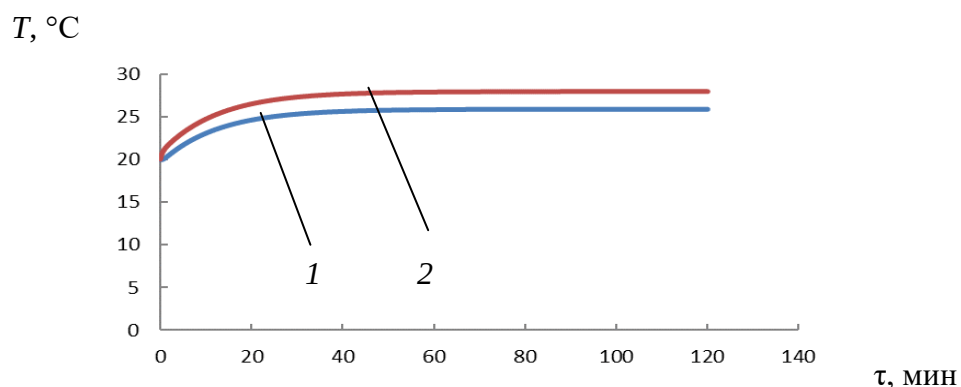
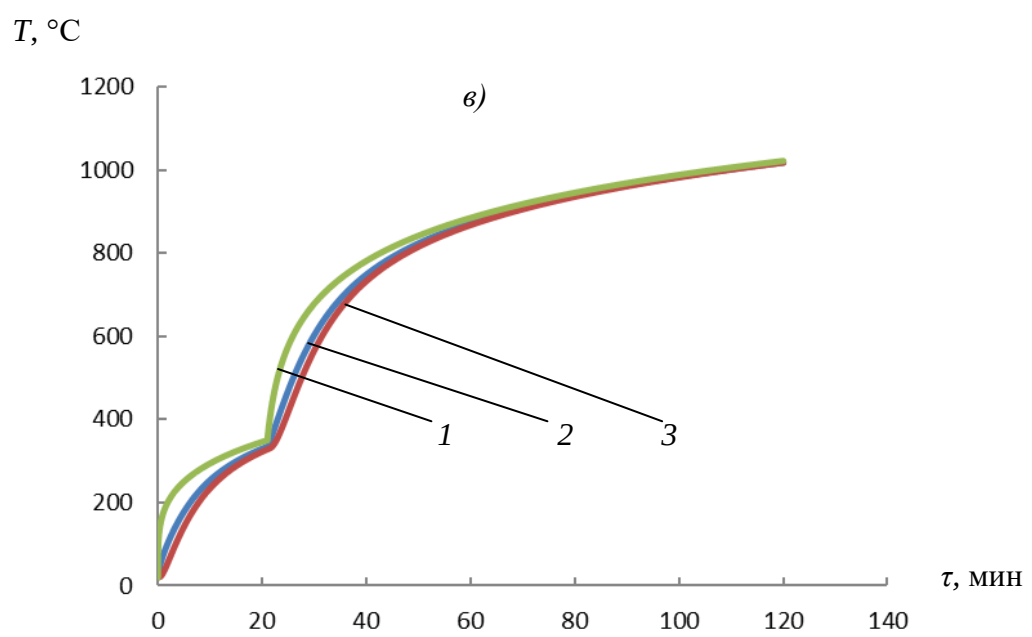
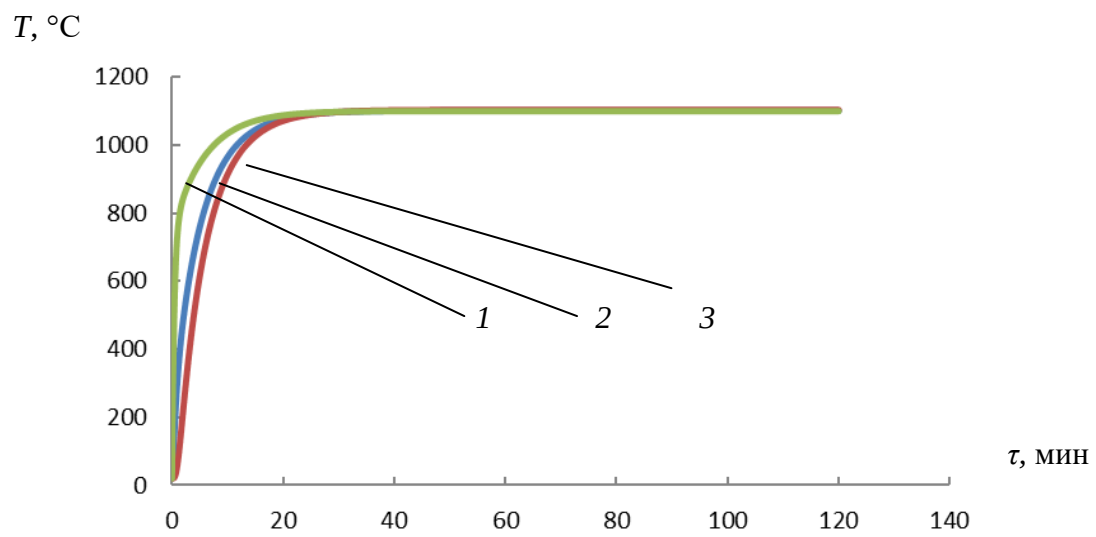
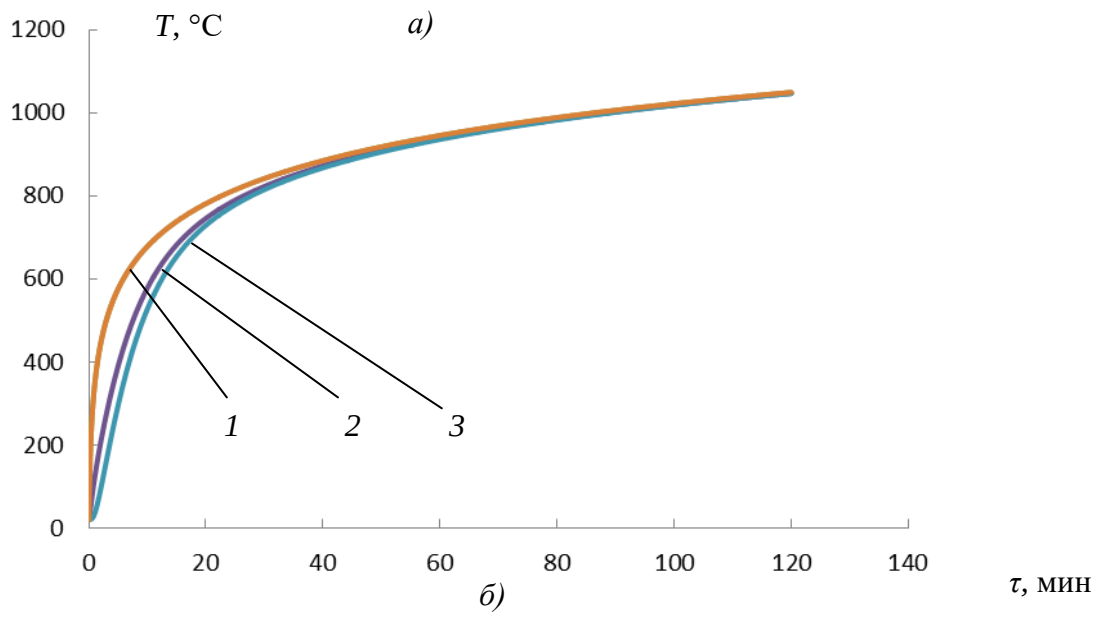


Рисунок 3.3 – Зависимости характерных температур в кабеле от времени его работы в нормальных условиях при максимальной силе тока: 1 – температура наружной поверхности изоляции; 2 – температура медной жилы кабеля

Из рисунка 3.3 видно, что в отсутствие пожара температура наружной поверхности изоляции рассматриваемого кабеля повышается на 8°C и остается постоянной по времени.

Зависимости температуры наружных поверхностей изоляции при пожаре в кабельном этаже БПУ Ленинградской АЭС-2 (площадь 421,7м²; высота 3,1) в отсутствие вспучивающегося огнезащитного состава от времени пожара представлены на рисунке 3.4.



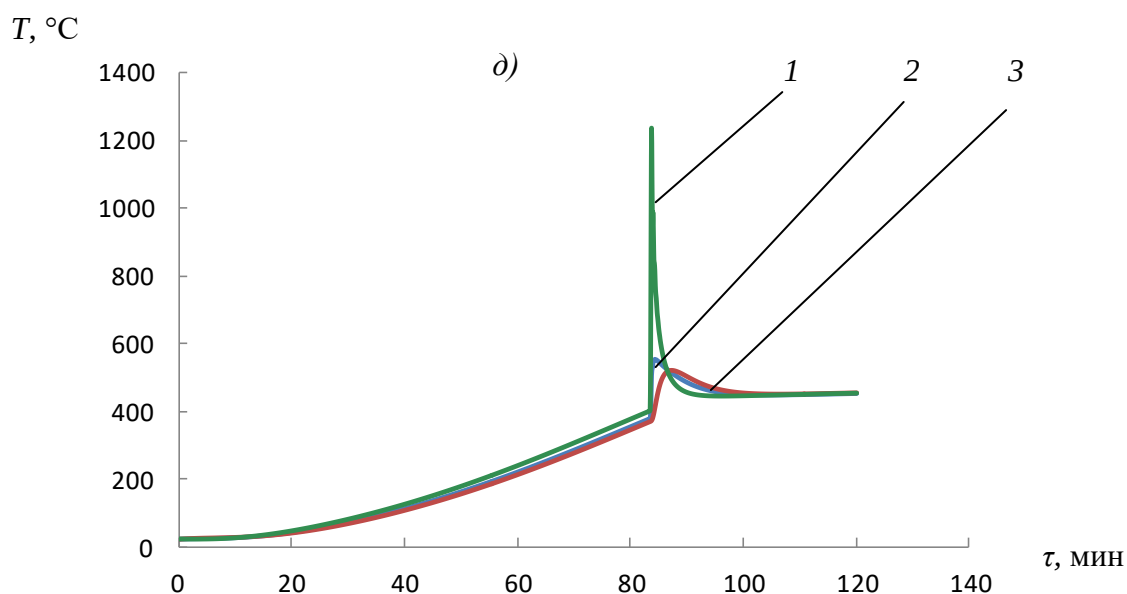
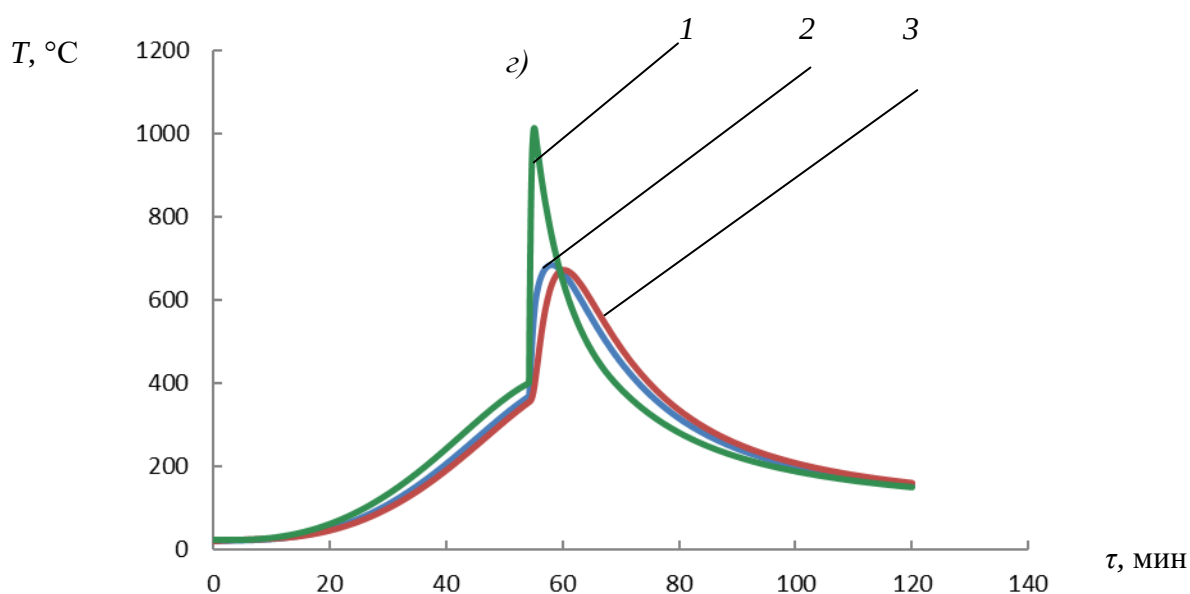
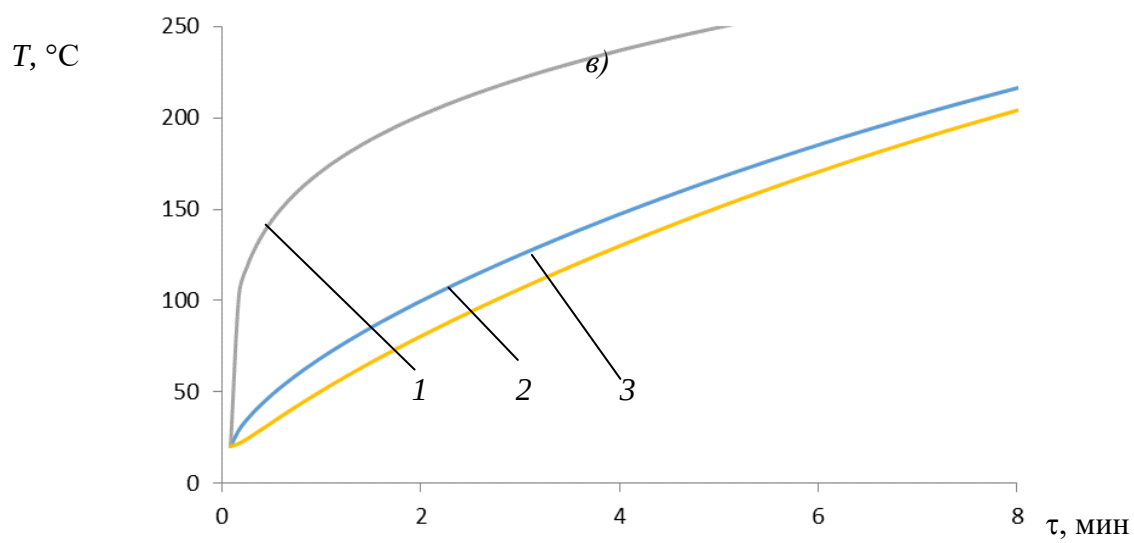
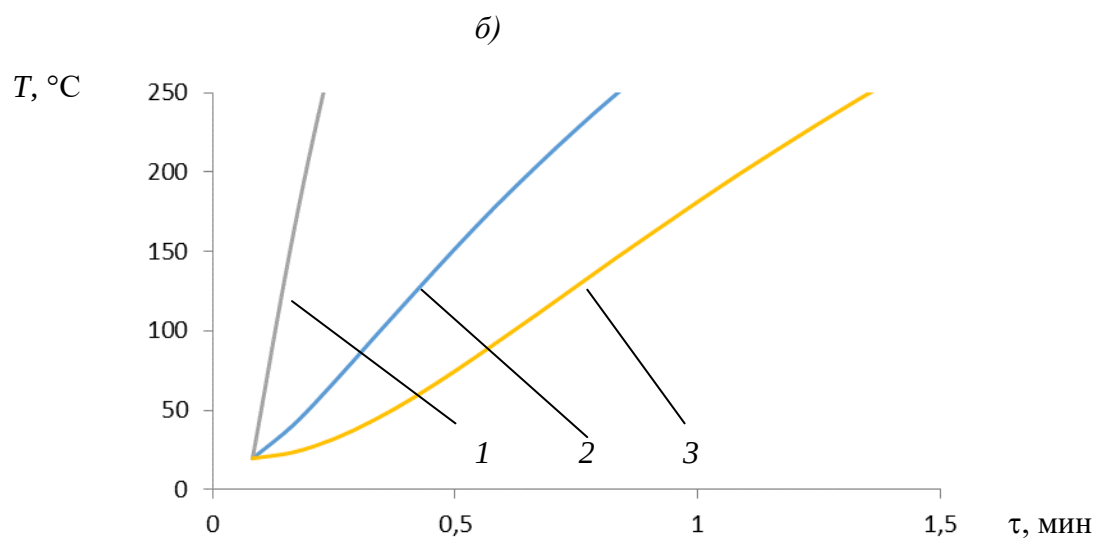
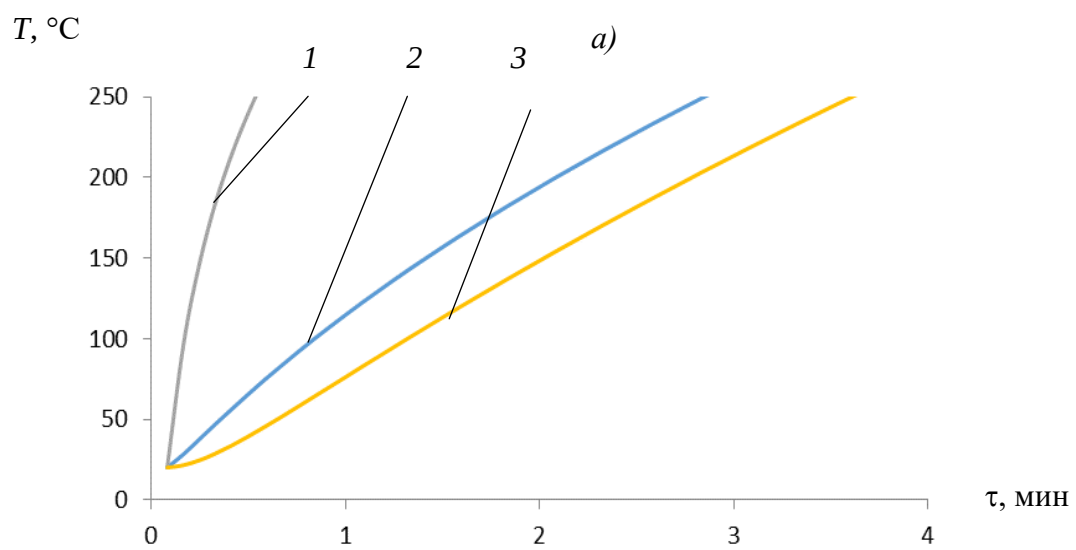


Рисунок 3.4 – Зависимости характерных температур в кабеле без огнезащиты от времени его работы в условиях пожара при максимальной силе тока: а) стандартный пожар; б) углеводородный пожар; в) тлеющий пожар; г) реальный температурный режим в кабельном этаже при горении кабелей НГ (проемы открыты); д) реальный температурный режим в кабельном этаже при горении кабелей НГ (проемы закрыты): 1 – среднеобъемная температура; 2 – температура наружной поверхности изоляции; 3 – температура внутренней поверхности изоляции

На рисунке 3.5 приведены зависимости температуры наружных поверхностей изоляции и сухого слоя вспучивающегося огнезащитного состава от времени пожара в кабельном этаже БПУ Ленинградской АЭС-2 (площадь 421,7м²; высота 3,1м).



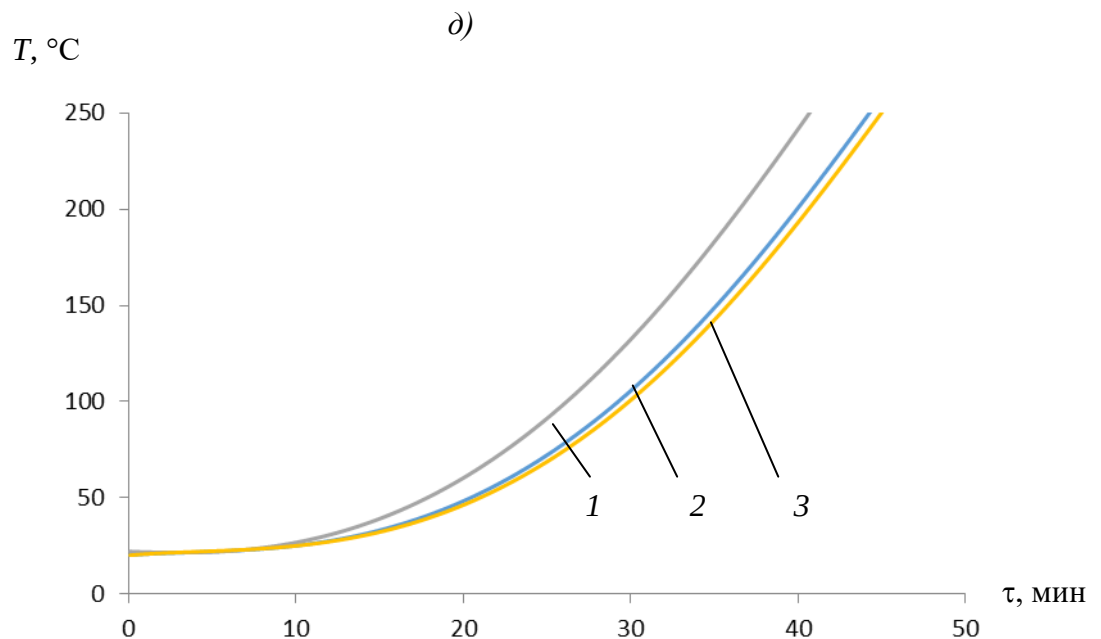
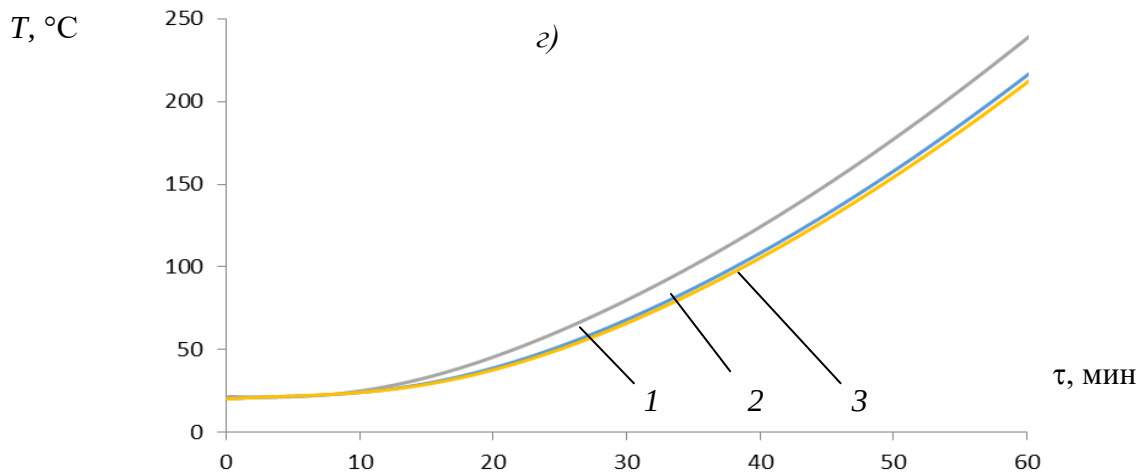


Рисунок 3.5 – Зависимости характерных температур в кабеле, покрытом вспучивающейся огнезащитной краской, от времени его работы в условиях пожара при максимальной силе тока: а) стандартный пожар; б) углеводородный пожар; в) тлеющий пожар; г) реальный температурный режим в кабельном этаже при горении кабелей НГ (проемы открыты); д) реальный температурный режим в кабельном этаже при горении кабелей НГ (проемы закрыты): 1 – среднеобъемная температура; 2 – температура наружной поверхности огнезащитного состава; 3 – температура наружной поверхности изоляции

Времена от начала пожара до достижения критических температур изоляции без огнезащиты и с нанесенным огнезащитным составом представлены в таблице 3.2.

Температуры изоляции и наружной поверхности огнезащитного слоя при достижении критических температур изоляции кабеля приведены в таблице 3.3.

В таблице 3.3 выделены ячейки с температурой наружной поверхности огнезащитного слоя, большей минимальной температуры вспучивания 180°C.

Таблица 3.2 – 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, °C				Температура наружной поверхности изоляции с использованием вспучивающегося огнезащитного состава, °C		
		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 пожар	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 3.3 – Температуры (°C) наружной поверхности огнезащитного слоя при достижении критических температур изоляции

Критические температуры изоляции, °C		120	150	200
Стандартный пожар		163,1	199,8	248,9
Стандартный углеводородный пожар		210	270,4	308,5
Стандартный медленно развивающийся (тлеющий)		138,1	167,0	212,5
Реальный пожар	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°C (1), 150°C (2) и 200°C (3), а также время ее достижения (красный цвет) при рассматриваемых режимах пожара представлены на рисунке 3.6.

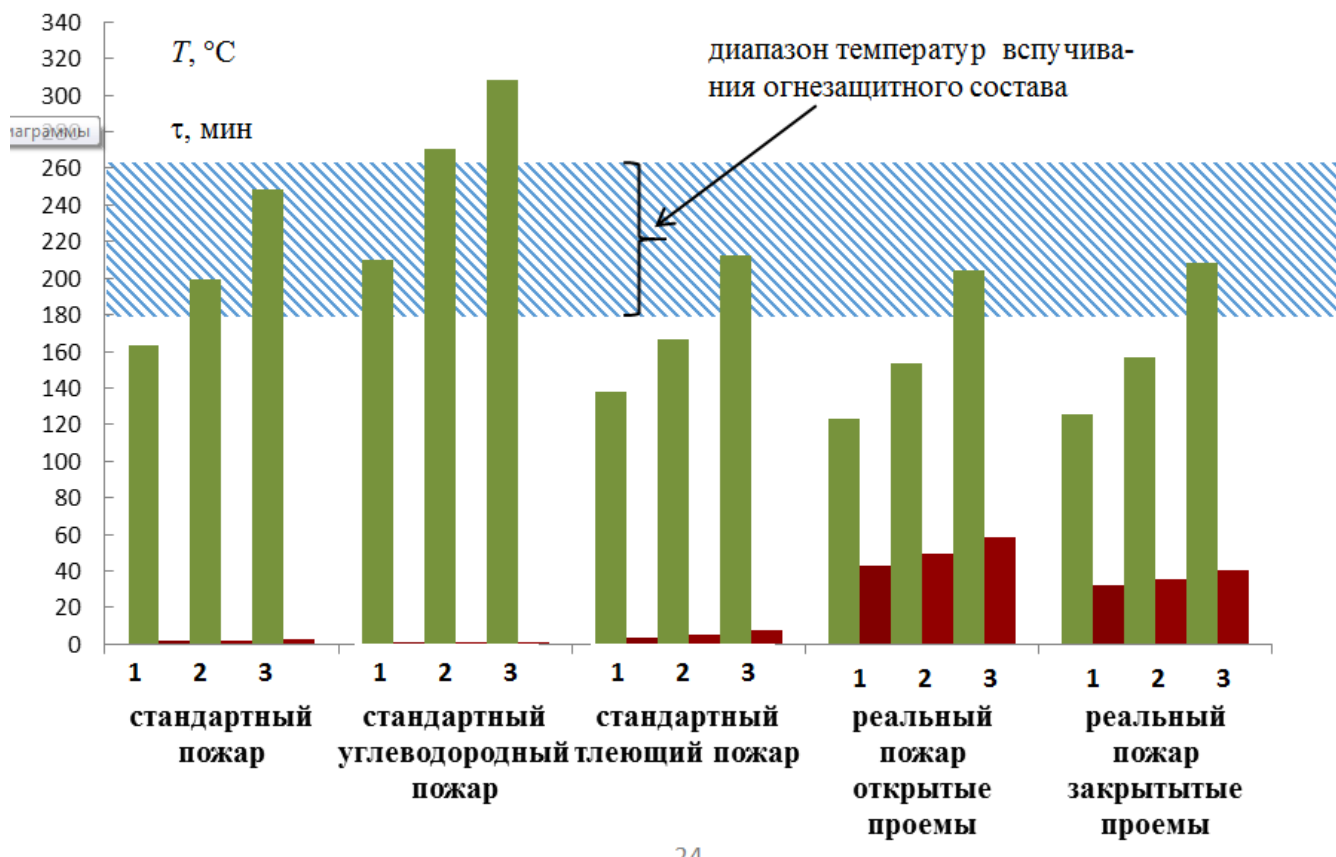


Рисунок 3.6 – Температуры наружной поверхности огнезащитного состава: (зеленый цвет) при температуре наружной поверхности изоляции 120°C (1), 150°C (2) и 200°C (3), а также время ее достижения (красный цвет) при всех рассматриваемых режимах пожара

Из таблицы 3.3 и рисунка 3.6 видно, что:

- при температуре изоляции 120°C (начало деструкции материала изоляции) только при углеводородном пожаре происходит вспучивание огнезащитного покрытия;
- при температуре изоляции 150°C (начало плавления материала изоляции) происходит вспучивание огнезащитного покрытия только при стандартном и стандартном углеводородном режимах пожара;
- при температуре изоляции 200°C (температура активной текучести материала изоляции) во всех рассматриваемых режимах происходит вспучивание.

При реальных температурных режимах пожара время плавления изоляции до момента вспучивания огнезащитного покрытия (минимальная температура вспучивания 180°C) равно:

- пожар в помещении (проемы открыты) $\tau_{\text{пл}}=4,75$ мин;
- пожар в помещении (проемы закрыты) $\tau_{\text{пл}}=3,0$ мин;

При реальных температурных режимах пожара время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции (минимальная температура плавления изоляции 150°C) составляет:

- пожар в помещении (проемы открыты) $\tau_{\text{д}}=6,0$ мин;
- пожар в помещении (проемы закрыты) $\tau_{\text{д}}=3,33$ мин;

При стандартном медленно развивающемся (тлеющем) режиме пожара:

- время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции (минимальная температура плавления изоляции 150°C) равно $\tau_{\text{д}}=1,42$ мин;
- время плавления изоляции до момента вспучивания огнезащитного покрытия (минимальная температура вспучивания 180°C) равно $\tau_{\text{пл}}=1,5$ мин;

При стандартном режиме пожара:

- время от начала деструкции материала изоляции до момента плавления изоляции (минимальная температура плавления изоляции 150°C) равно $\tau_{\text{д}}=0,42$ мин;
- время плавления изоляции до момента вспучивания огнезащитного покрытия (минимальная температура вспучивания 180°C) равно $\tau_{\text{пл}}=0,5$ 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.

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующий вывод.

Теоретическое обоснование параметров вспучивающихся огнезащитных составов с использованием стандартных температурных режимов пожара может привести к потере изоляционными материалами силовых кабелей каналов СБ АЭС эксплуатационных свойств при реальном температурном режиме пожара.

Поэтому необходимо научное обоснование эффективности применения огнезащитных составов для вышеуказанных кабелей с учетом реальных температурных режимов пожара, особенно в помещениях, где, согласно особенностям технологического процесса, сходятся все каналы СБ.

3.3 Экспериментальная оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки

3.3.1 Постановка задачи

Нарушение изоляции в электропроводах и кабелях, вызываемое повышением их температуры, перенапряжениями, старением изоляции и механическими повреждениями может привести к короткому замыканию [109, 115, 192]. Из-за этого за короткий промежуток времени выделяется большое количество тепла в проводниках, вследствие чего изоляция начинает гореть и возникает пожар, часто приводящий к большому материальному ущербу, травмированию или гибели людей. Поэтому в ПУЭ [121] устанавливаются предельно длительно допустимые значения температуры проводов и кабелей. Так, например, для проводов без изоляции предельно длительно допустимое значение равно 70°C .

С начала 2021 года из-за короткого замыкания электропроводки произошло около 800 пожаров.

Например, 7 мая 2022 г. в подмосковных Мытищах произошел пожар в двухэтажном здании сварочного цеха. Площадь возгорания составила 225 м^2 (рисунок 3.7). Причиной возгорания является КЗ в электросети.



Рисунок 3.7– Пожар в здании сварочного цеха, вызванный коротким замыканием

Пожар в антенной части останкинской башни на отметке + 450,000 м, произошедший 27 августа 2000 г. показал, что при перегрузке силовых кабелей (волноводов) начался их нагрев до температуры плавления полихлорвиниловой внешней изоляции кабеля до температуры более 200°C и последующему короткому замыканию токопроводящих жил кабеля.

В соответствии со статьей 82 (п. 2) (ФЗ №123. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [210]) кабельные линии и электропроводка систем противопожарной защиты, средств обеспечения деятельности подразделений пожарной охраны, систем обнаружения пожара, оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре, аварийного освещения на путях эвакуации, аварийной вентиляции и противодымной защиты, автоматического пожаротушения, внутреннего противопожарного водопровода, лифтов для транспортировки подразделений пожарной охраны в зданиях и сооружениях должны сохранять работоспособность в условиях пожара в течение времени, необходимого для выполнения их функций.

Для сохранения работоспособности проводов и кабелей в условиях пожара при одновременной токовой нагрузке используются в качестве одного из способа защиты от теплового потока вспучивающиеся огнезащитные покрытия.

В работе [78] представлены результаты теоретической оценки эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций с водо-водяными

реакторами в условиях пожара при одновременном воздействии различных режимов пожара и токовой нагрузки. Показано, что процесс деструкции материала изоляции кабелей происходит до начала вспучивания огнезащитного покрытия (за исключением углеводородного режима пожара). Однако влияние деструкции изоляции на работоспособность кабелей не исследовано.

Изложенное выше говорит о недопустимости нагрева, проводов и кабелей каналов до момента разрушения изоляции этих кабелей и последующего короткого замыкания токоведущих жил, что может привести, например, к невозможности дальнейшей передачи информации по каналам связи.

Поэтому вопросы проведения экспериментальных и теоретических исследований воздействия пожара на сигнальные и силовые провода и кабели и изменение их электрических параметров при нагреве являются исключительно актуальными.

Целью исследования является экспериментальная оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки.

Для достижения поставленной цели были проведены опытные испытания проводов и кабелей различных марок на разработанной экспериментальной установке. При этом проводилась оценка влияния температуры нагреваемой окружающей среды на электрические параметры проводов и кабелей, такие как, удельное сопротивление, индуктивность и емкость.

Работоспособность кабельной продукции проверяют в соответствии ГОСТ Р 53316 – 2021 «Электропроводки. Сохранение работоспособности в условиях стандартного температурного режима пожара. Методы испытаний» п. 4.3.1 [34] «В процессе испытания в испытательной установке должен быть создан стандартный температурный режим» [36]. Температура при «стандартном пожаре» менее чем за 30 с достигает 200°C и сразу инициирует вспучивание огнезащитного состава, защищающего кабель. Так же работоспособность кабельной продукции проверяют в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60331-21-2003 [35] воздействием

пламени с температурой выше 750°C . Такая высокая температура сразу инициирует вспучивание огнезащитного состава, защищающего кабель. Для проверки работоспособности кабельной продукции с огнезащитным покрытием используют нормативные документы [33].

Однако при реальном режиме пожара температура газовой среды помещения может нарастать медленно. Как показано в работе [78; 235], в этом случае может не произойти вспучивание состава, что приводит к терморазложению материала изоляции кабелей.

В случаях реальных режимов пожара зависимость температуры в помещении, влияющей на нагрев изоляции кабелей, существенно отличается от соответствующих зависимостей при различных стандартных режимах пожара. В результате начало деструкции изоляции может произойти до начала вспучивания покрытия. Поэтому необходима разработка экспериментальной установки, позволяющей плавно изменять температуру окружающего кабель воздуха.

Кроме того, в стандартной установке изучается только возникновение короткого замыкания без измерения амплитуды, фазы, частоты и формы сигнала, поступающего из испытуемого образца провода, что является необходимым для оценки прохождения модулированного сигнала по сигнальным кабелям.

3.3.2 Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Для проведения натурных испытаний был разработан экспериментальный стенд, функциональная схема которого представлена на рисунке 3.8 а). Фотография стенда приведена на рисунке 3.8 б).

Сигнал синусоидальной формы, амплитудой напряжения 2В и частотой $2 \cdot 10^5$ Гц с одного из выходов (Вых. 1) генератора (2) поступает в исследуемый образец кабеля или провода (3). На рисунке 3.8 а) изображена эквивалентная схема испытуемого образца с распределенными по длине образца электрическими параметрами: емкостью, индуктивностью и сопротивлениями проводников и

изоляции. На электрические параметры провода оказывает воздействие тепловой поток и температура нагреваемой окружающей среды внутри муфельной печи (7).

Сигнал с выхода испытуемого образца поступает на один из входов (Вх. 1) двухлучевого осциллографа (1). На второй вход (Вх. 2) осциллографа поступает образцовый синусоидальный сигнал с выхода (Вых. 1) генератора (2). Оба сигнала (изучаемый и образцовый) отображаются на экране двухлучевого осциллографа для их сравнения и визуального контроля изменений параметров амплитуды, фазы, частоты и формы сигнала, поступающего из испытуемого образца провода (рисунок 3.9).

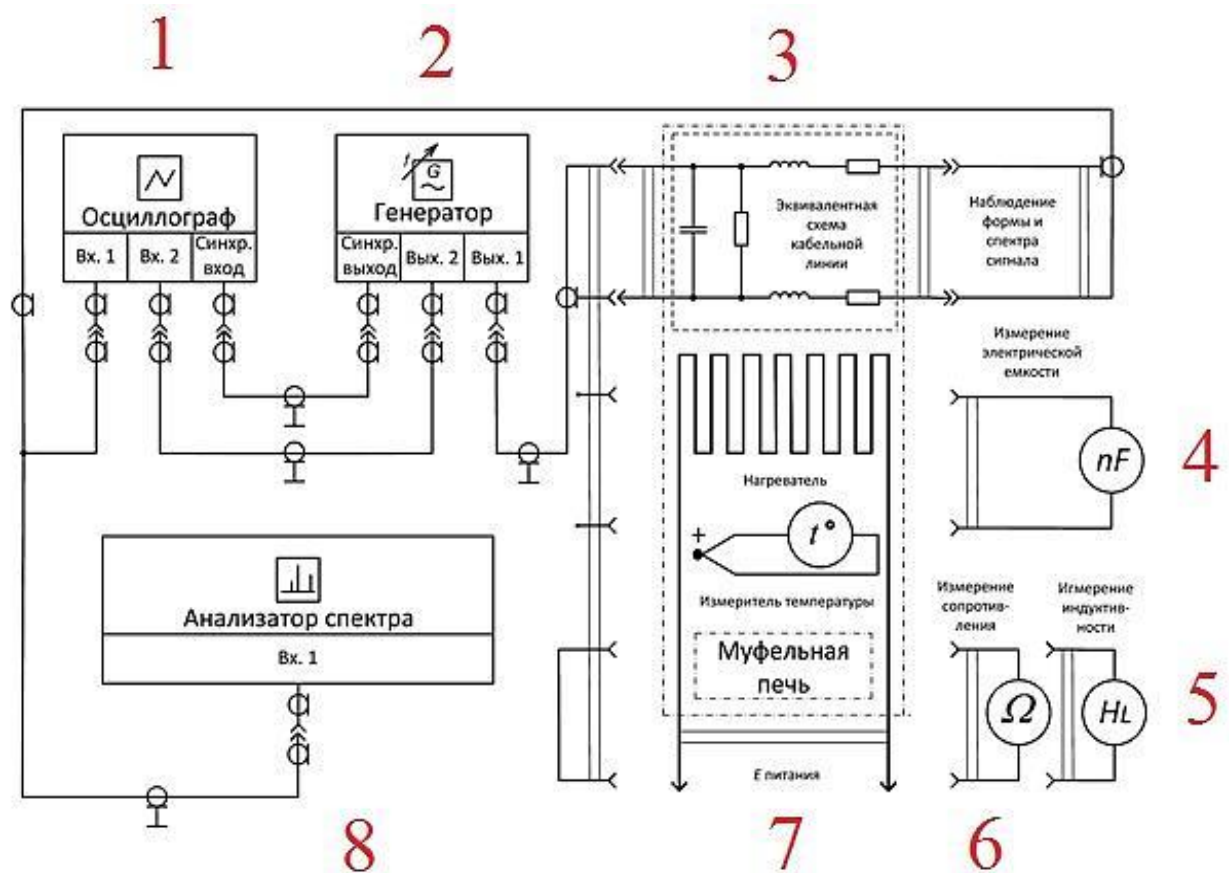


Рисунок – 3.8 а) Функциональная электрическая схема экспериментального стенда:

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



Рисунок 3.8 б) – Общий вид стенда для проведения испытаний проводов и кабелей



Рисунок 3.9 – Визуальный контроль формы сигнала на экране осциллографа:

1 - образцовый сигнал; 2 - сигнал с выхода испытуемого образца

Для контроля уровня шума и спектра сигнала, используется анализатор спектра (8), на вход (Вх. 1) которого поступает сигнал с выхода испытуемого образца провода (рисунок 3.10).

Предположительно, воздействие тепловой энергии должно вызвать изменение формы, спектра и уровня шума гармонического сигнала при его прохождении через испытываемый образец провода, а также изменения емкости, индуктивности и сопротивления по длине испытываемого образца.

Температура в муфельной печи (7) изменяется программируемым контроллером с равными промежутками установившейся температуры, в момент которых происходят наблюдение и измерения электрических параметров сигнала. Установление температуры в печи необходимо для того, чтобы изоляция кабеля прогрелась до этой температуры.

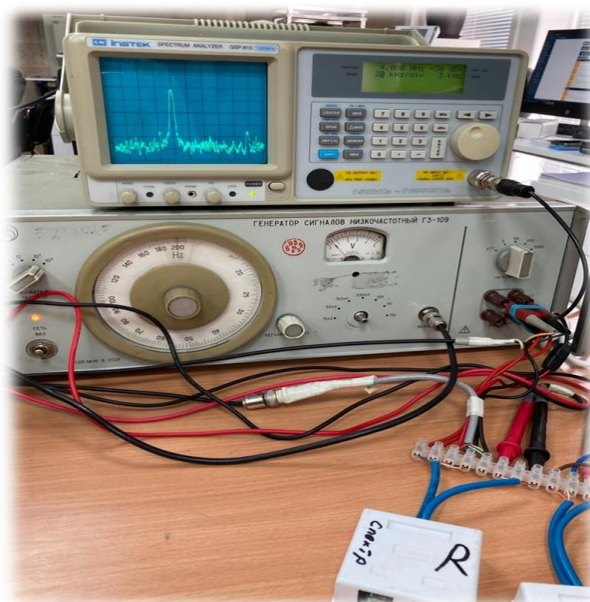


Рисунок 3.10 – Визуальный контроль спектра сигнала на экране анализатора спектра

В процессе визуального контроля формы и спектра сигнала, в момент стабилизации температуры в камере муфельной печи, последовательно производится контроль емкости, индуктивности и сопротивления испытываемого образца. Для измерения величины электрической емкости образец провода, левым (по схеме на рисунке 3.8 а) концом подключается к разъему с пустыми контактами, а правым концом – к тестеру (4), включенному в режим измерения емкости.

Для контроля величины электрической индуктивности испытуемый образец левым концом подключается к разъему с короткозамкнутыми контактами, а правым – к тестеру (5), включенному в режим измерения индуктивности.

Для контроля величины электрического сопротивления образец провода левым концом подключается к разъему с короткозамкнутыми контактами, а правым концом – к тестеру (6), включенному в режим измерения сопротивления.

3.3.3 Исходные данные для проведения экспериментов

Проводились экспериментальные исследования следующих электрических проводов и кабелей:

- кабельная линия типа витая пара [61], используемая для прокладки внутри и вне помещений, в коробах, стенах, а также в телефонных сетях;
- кабельная линия из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 [59], используемая для автоматического включения и выключения нагрузки при появлении движущихся объектов в зоне обнаружения датчика, включения освещения в помещении при открывании двери, автоматического открывания дверцы шкафа по движению ладони, включения сигнализации при открытии окна, контроля движения продукции на конвейере на производстве, контроля положения подвижных механизмов в пространстве (лифтовое и подъемное оборудование, ворота с автоматическими приводами) и др.;
- кабельная линия типа КМВЭВ 1×2×1,5 [60], предназначена для применения в различных системах сигнализации и блокировки, в системах пожарной сигнализации, системах оповещения, связи, для внутри- и межблочного монтажа различной аппаратуры и т. п. (с рабочим переменным напряжением не более 300 В и постоянным не более 420 В).

Свойства кабелей витой пары были следующими: материал проводников - медь; диаметр проводника 0,51 мм; толщина полиэтиленовой изоляции проводников 0,25 мм; толщина ПВХ изоляции кабеля 0,5 мм.

Кабели из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 имели следующие свойства: материал проводников – сталь; диаметр проводника 1,2 мм; изоляция: виниловый пластикат; толщина изоляции 0,3 мм.

Свойства кабеля типа КМВЭВ 1×2×1,5 были следующими: материал проводника - медь; диаметр проводника 1,5 мм; толщина изоляции проводника 0,35 мм; толщина изоляции кабеля 0,8 мм.

Для равномерности нагрева испытываемые образцы проводов и кабелей были свернуты в форме спирали (рисунок 3.11).



1)



2)



3)



4)



5)



6)

Рисунок 3.11– Образцы кабелей и проводов и их размещение в муфельной печи:

1 – образец двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ $1 \times 1,2$ после воздействия температуры в муфельной печи; 2 – образец кабеля типа витая пара в муфельной печи; 3 - образец провода типа КМВЭВ $1 \times 2 \times 1,5$; 4 - образец двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ $1 \times 1,2$; 5 и 6 - образцы кабеля типа витая пара

Достижение температуры в пределах $149-190^{\circ}\text{C}$ для различных типов кабелей и проводов, испытываемых в данной работе, приводит к разрушению изоляции испытуемого проводника и последующее короткое замыкание токопроводящих жил проводника. При этом передача электрического сигнала по проводнику становится невозможной.

3.3.4 Результаты экспериментов

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры приведены в таблицах 3.4-3.5.

Таблица 3.4 – Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры (эксперимент №1)

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$C, \text{пФ}$	$L, \text{мГн}$	Примечания
22	9,2	2,05	0,026	Длина медного кабеля: - в нагреваемом образце 7,0 м; - в подводящей (холодной части) 4,0 м. Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 88 м. Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 44 м.
60	8,6	1,26	0,027	
80	8,9	1,2	0,027	
100	9,9	1,2	0,026	
149	3,5	0	0,003	Короткое замыкание

Таблица 3.5 – Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры (эксперимент №2)

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$C, \text{пФ}$	$L, \text{мГн}$	Примечания
20	8,9	2,11	0,028	Длина медного кабеля витая пара: - в нагреваемом образце 7,0 м; - в подводящей (холодной части) 4,5 м. Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 92 м. Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 46 м.
40	9,2	2,12	0,028	
60	9,5	1,24	0,028	
80	10,0	1,24	0,028	
100	10,0	1,24	0,028	
120	10,1	1,24	0,028	
130	10,6	1,25	0,028	
140	10,9	1,28	0,028	
150	10,9	1,27	0,027	
151	4,4	0	0,005	Короткое замыкание
170	1,9	0	0,003	

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 при воздействии температуры представлены в таблице 3.6.

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 при воздействии температуры показаны в таблице 3.7. Для исследования изменения спектра использован генератор синусоидального сигнала частотой 200 кГц.

Таблица 3.6 – Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двухжильного 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
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	

Таблица 3.7 – Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 при воздействии температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$C, \text{пФ}$	$L, \text{мГн}$	Примечание
20	1,4	0,847	0,007	Длина кабеля с медными проводами: в нагреваемом образце 6,0 м. Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 12,0 м. Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 6,0 м.
40	1,4	0,934	0,007	
60	1,4	1,049	0,007	
80	1,4	1,155	0,007	
100	1,4	1,169	0,007	
110	1,4	1,174	0,007	
120	1,4	1,196	0,007	
130	1,4	1,217	0,007	
140	1,4	1,248	0,007	
150	1,4	1,293	0,007	
160	1,4	1,410	0,007	
170	1,4	1,605	0,007	
180	1,4	2,030	0,007	
187	1,0	0	0,017	Короткое замыкание

Из таблиц 3.4-3.7 видно, что при нагреве всех рассматриваемых кабелей короткое замыкание произошло при температурах окружающей среды в диапазоне 149-190°C.

При испытаниях витой пары (таблицы 3.4 и 3.5) и кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 (таблица 3.7) изменения фазы и амплитуды входного сигнала не произошло.

В экспериментах с двухжильным нагревательным проводом типа ПНСВ 1×1,2 (таблица 3.6) 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 3.12).



Рисунок 3.12 – Визуальный контроль формы сигнала с двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 на экране осциллографа в момент стабилизации сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала на спектрограмме: 1 - образцовый сигнал; 2 - сигнал с выхода испытуемого образца

Полученные результаты проведенных экспериментальных испытаний проводов и кабелей различных типов показали, что постепенный нагрев электрического проводника или 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 короткому

замыканию между его токопроводящими жилами и невозможности дальнейшей передачи электрического сигнала по электрическим проводам и кабелям. Поэтому обработка кабелей огнезащитными вспучивающимися составами с температурой начала вспучивания в диапазоне 180-250°C [78; 235] может не сохранить работоспособность проводов и кабелей в условиях пожара при одновременной токовой нагрузке, так как в процессе нагрева не происходит вспучивание покрытий.

Учитывая полученные экспериментальные данные можно сделать вывод.

В случае одновременного воздействия пожара и токовой нагрузки на рассмотренные в работе распространенные электрические провода и кабели в них произошло искажение передаваемого сигнала (сигнальные кабели) и короткое замыкание в диапазоне температур, в котором не начинается вспучивание огнезащитных вспучивающихся покрытий на поверхности изоляции. Поэтому сохранение работоспособности электрических проводов и кабелей с помощью вышеуказанных покрытий может быть неэффективным.

Таким образом, необходимо научное обоснование эффективности применения огнезащитных составов для вышеуказанных кабелей с учетом реальных температурных режимов пожара.

3.4 Экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки

3.4.1 Постановка задачи

Для защиты от воздействия пожара на электрические провода и кабели широко применяются вспучивающиеся огнезащитные покрытия. Механизм защиты заключается в многократном увеличении толщины покрытия под воздействием повышенных температур. В данном параграфе приведены результаты продолжения экспериментальных исследований воздействия

температурного режима реального пожара на электропровода и кабели приведенных в пункте 3.3.2, в том числе обработанные вспучивающейся водно-дисперсионной огнезащитной краской «Огнеза-ВД-К», ТУ 2313-004-92450604-2013 для защиты кабеля [188].

При возникновении пожаров в процессе функционирования объектов энергетики необходимо выполнение требований по обеспечению определенной продолжительности работы оборудования для безопасной эвакуации персонала и завершения технологических операций. При этом важно знать, какой промежуток времени системы электропитания и управления будут выполнять свои функции. Незаменимой частью этих систем являются различные провода и кабели. Поэтому необходимо иметь четкое представление относительно устойчивости этих элементов систем электропитания и управления к тепловым воздействиям.

Тепловое воздействие может привести непосредственно к нарушению изоляции, а также к ее «старению» с последующим изменением изоляционных и других характеристик, что, в конечном счете, будет причиной либо короткого замыкания, либо ухудшения других электрических параметров [109; 192].

Такие изменения могут привести как к выделению большого количества тепла в проводниках и возникновению вторичного источника зажигания, так и к нарушению процесса управления. В конечном счете, это может привести к большим материальным потерям и человеческим жертвам [115].

Поэтому вопросы теплового режима проводов и кабелей достаточно подробно рассматриваются в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) [121].

Среди решений, обеспечивающих защиту проводов и кабелей от внешнего теплового воздействия при пожарах, применяются вспучивающиеся огнезащитные покрытия.

В параграфе 3.2 представлены результаты теоретической оценки эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций с водо-водяными реакторами в условиях пожара при одновременном воздействии различных

режимов пожара и токовой нагрузки. Показано, что процесс деструкции материала изоляции кабелей происходит до начала вспучивания огнезащитного покрытия (за исключением углеводородного режима пожара).

Поскольку, динамика теплового воздействия может отличаться от режимов стандартных пожаров, необходимо исследовать влияние деструкции изоляции на работоспособность кабелей при различных режимах прогрева.

Как следует из анализа приведенных случаев нарушения режимов эксплуатации электрооборудования, необходимо исключить ситуации, препятствующие чрезмерному перегреву проводов и кабелей с последующим нарушением параметров их изоляции и других характеристик, ведущих к невозможности передачи информации по каналам связи и управления.

Поэтому вопросы проведения экспериментальных исследований воздействия пожара на сигнальные и силовые провода и кабели и на изменение их электрических параметров при нагреве являются исключительно актуальными.

3.4.2 Исходные данные для проведения экспериментов

Для экспериментальной оценки эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при воздействии реального температурного режима пожара были проведены опытные испытания проводов и кабелей различных марок на разработанной экспериментальной установке, приведенной в пункте 3.3.2. При этом проводилась оценка влияния изменения температуры нагреваемой окружающей среды на электрические параметры (удельное сопротивление, индуктивность и емкость) проводов и кабелей (таких же марок как и в параграфе 3.3) обработанных огнезащитным покрытием.

Работоспособность кабельной продукции проверяют в соответствии ГОСТ Р 53316—2021 «Электропроводки. Сохранение работоспособности в условиях стандартного температурного режима пожара. Методы испытаний» п. 4.3.1 [34]

«В процессе испытания в испытательной установке должен быть создан стандартный температурный режим [36]. Температура при «стандартном пожаре» менее чем за 30 с достигает 200°C и сразу инициирует вспучивание огнезащитного состава, защищающего кабель. Так же работоспособность кабельной продукции проверяют в соответствии с ГОСТ Р МЭК 60331-21-2003 [35] воздействием пламени с температурой выше 750°C . Такая высокая температура сразу инициирует вспучивание огнезащитного состава, защищающего кабель.

Однако при реальном режиме пожара температура газовой среды помещения может нарастать медленно. Как показано в параграфе 3.3, в этом случае может не произойти вспучивание состава, что приводит к терморазложению материала изоляции кабелей.

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» [33] при стандартном режиме пожара, когда происходит быстрое нагревание краски и кабеля до температуры 600°C в течении 5 минут. Температура вспучивания краски составляет порядка $200\text{--}400^{\circ}\text{C}$ для разных составов. При этом вспучивание краски происходит, когда температура изоляции не достигает температур ее терморазложения ($130\text{--}170^{\circ}\text{C}$) 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 .

В случаях реальных режимов пожара зависимость температуры в помещении, влияющей на нагрев вспучивающихся покрытий изоляции кабелей, существенно отличается от соответствующих зависимостей при различных стандартных режимах пожара, что показано в работе [78, 235]. Поэтому начало деструкции изоляции может произойти до начала вспучивания покрытия.

Экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий для электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки приведена в работе [221]

Как и в предыдущих экспериментах, приведенных в параграфе 3.3 диссертационного исследования в процессе визуального контроля формы и спектра сигнала, в момент стабилизации температуры в камере муфельной печи, последовательно производится контроль емкости, индуктивности и сопротивления испытываемого образца. Так же проводился визуальный контроль состояния вспучивающегося покрытия, нанесенного на кабели.

Огнезащита кабелей осуществлялась с использованием вспучивающегося огнезащитного покрытия «Огнеза-ВД-К» [188].

Для равномерности нагрева испытываемые образцы проводов и кабелей, обработанные вспучивающимся покрытием были свернуты в форме спирали (рисунок 3.13). Нанесение вспучивающегося покрытия производилось в строгом соответствии с рекомендациями производителя.



1)



2)



3)



4)

Рисунок 3.13— Образцы кабелей и проводов, обработанных огнезащитным составом, и их размещение в муфельной печи: 1 – образец кабеля типа витая пара в муфельной печи после воздействия температуры 170°C; 2 – образец провода типа КМВЭВ 1×2×1,5; 3 - образец двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2; 4 - образец кабеля типа витая пара

3.4.3 Результаты экспериментов и их анализ

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара, обработанной вспучивающимся покрытием, при воздействии температуры приведены в таблицах 3.8-3.9.

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2, обработанного вспучивающимся покрытием «Огнеза-ВД-К» при воздействии температуры представлены в таблице 3.10. Температура начала вспучивания покрытия по данным производителя составляет 200°C [188].

Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5, обработанного вспучивающимся покрытием «Огнеза-ВД-К» при воздействии температуры показаны в таблице 3.11. Для исследования изменения спектра использован генератор синусоидального сигнала частотой 200 кГц.

Динамика изменения температуры внутри муфельной печи приближалась к температурному режиму реального пожара в блочном пункте управления АЭС с водо-водяными реакторами [134], что видно из рисунка 3.17.

Таблица 3.8 – Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры (эксперимент №1)

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$C, \text{пФ}$	$L, \text{мГн}$	Примечания
20	8,9	2,09	0,027	Длина медного кабеля: в нагреваемом образце 7,0 м; в подводящей (холодной части) 4,0 м. Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 88 м. Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 44 м. Материал проводников: медь. Диаметр проводника 0,51 мм. Толщина полиэтиленовой изоляции проводников 0,25 мм. Толщина ПВХ изоляции кабеля 0,5 мм.
155	8,9	2,10	0,027	
175	9,1	2,10	0,027	
185	9,6	2,10	0,027	
195	9,8	2,10	0,023	
				Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось.

Таблица 3.9 – Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа витая пара при воздействии температуры (эксперимент №2)

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$C, \text{пФ}$	$L, \text{мГн}$	Примечание
20	9,7	2,21	0,026	Длина кабеля витая пара: в нагреваемом образце 7,0 м; - в подводящей (холодной части) 4,0 м. Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 88 метров. Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 44 метра. Материал проводников: медь. Диаметр проводника 0,5 мм. Толщина полиэтиленовой изоляции проводников 0,25 мм. Толщина ПВХ изоляции кабеля 0,5 мм.
100	9,8	2,25	0,026	
125	9,8	2,24	0,026	
135	10,2	2,23	0,026	
145	10,6	2,22	0,026	
155	10,7	2,22	0,028	
165	10,8	2,23	0,028	
175	10,6	2,28	0,028	
180	5,8	2,33	0,027	Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось.
175	5,5	-	0,026	Развитие процесса короткого замыкания на остывании

Таблица 3.10 – Результаты измерения электрических параметров кабельной линии из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 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 м. Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 15,0 м. Сдвиг фазы синусоидального сигнала и изменения амплитуды сигнала на спектрограмме Огнезащитное покрытие не вспучилось. Диаметр проводника 1,2 мм. Изоляция: виниловый пластикат. Толщина изоляции 0,3 мм.
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	
145	6,5	1,639	0,269	
160	6,7	1,618	0,272	
170	7,0	1,599	0,277	
180	7,3	1,588	0,283	
200	7,3	1,645	0,288	
215	7,8	1,846	0,294	
230	> 5,2	-	> 0,200	Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось.

Таблица 3.11– Результаты измерения электрических параметров кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 при воздействии температуры.

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$C, \text{пФ}$	$L, \text{мГн}$	Примечание
20	1,4	0,894	0,006	Длина кабеля с медными проводами: в нагреваемом образце 6,0 м. Общая длина провода при измерении сопротивления и индуктивности 12,0 м. Общая длина пары проводов при измерении емкости и формы сигнала 6,0 м. Диаметр проводника 1,5 мм. Толщина изоляции проводника 0,35 мм. Толщина изоляции кабеля 0,8 мм.
120	1,5	1,378	0,007	
145	1,8	1,403	0,007	
160	1,9	1,437	0,007	
170	2,1	1,478	0,007	
180	1,4	1,595	0,007	Появление дыма в результате терморазложения изоляции кабеля. Огнезащитное покрытие не вспучилось.
200	1,3	2,31	0,007	
210	1,5	5,86	0,007	
				Короткое замыкание. Огнезащитное покрытие не вспучилось.

Из таблиц 3.8-3.11 видно, что при нагреве всех рассматриваемых кабелей короткое замыкание 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, вследствие нарушения изоляции и возникновения короткого замыкания, передача электрического сигнала по проводнику становится невозможной.

Эксперименты по определению температуры вспучивания огнезащитного покрытия «Огнеза-ВД-К» в муфельной печи при постепенном повышении температуры показали, что вспучивание происходит при температуре 400°C. При 230°C огнезащитное покрытие остается без изменений.

На рисунке 3.14 показаны результаты эксперимента по определению температуры вспучивания огнезащитного покрытия «Огнеза-ВД-К».



Рисунок 3.14 – Внешний вид образца кабеля с огнезащитным покрытием «Огнеза-ВД-К»: *а* – до вспучивания (230°С); *б* – после вспучивания (450°С)

При испытаниях витой пары (таблицы 3.8 и 3.9) и кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 (таблица 3.11) изменения фазы и амплитуды входного сигнала не произошло.

В экспериментах с двухжильным нагревательным проводом типа ПНСВ 1×1,2 (таблица 3.10) при температуре 120°С начался сдвиг фазы синусоидального сигнала, при 170°С произошли скачки амплитуды сигнала на спектрограмме выходного сигнала, а при 180°С установился стабильный характер сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала на спектрограмме (рисунок 3.15).

Полученные результаты проведенных экспериментальных испытаний проводов и кабелей различных типов показали, что постепенный нагрев электрического проводника или кабеля приводит к искажению передаваемой информации по сигнальным кабелям в связи со сдвигом фазы и изменением амплитуды сигнала на спектрограмме и, в конечном итоге, к короткому замыканию между его токопроводящими жилами и невозможности дальнейшей передачи электрического сигнала по электрическим проводам и кабелям. Поэтому обработка кабелей огнезащитными вспучивающимися составами с температурой начала вспучивания в диапазоне 180-250°С [78; 235] может не сохранить работоспособность проводов и кабелей в условиях пожара при одновременной токовой нагрузке, так как в процессе нагрева не происходит вспучивание покрытий.

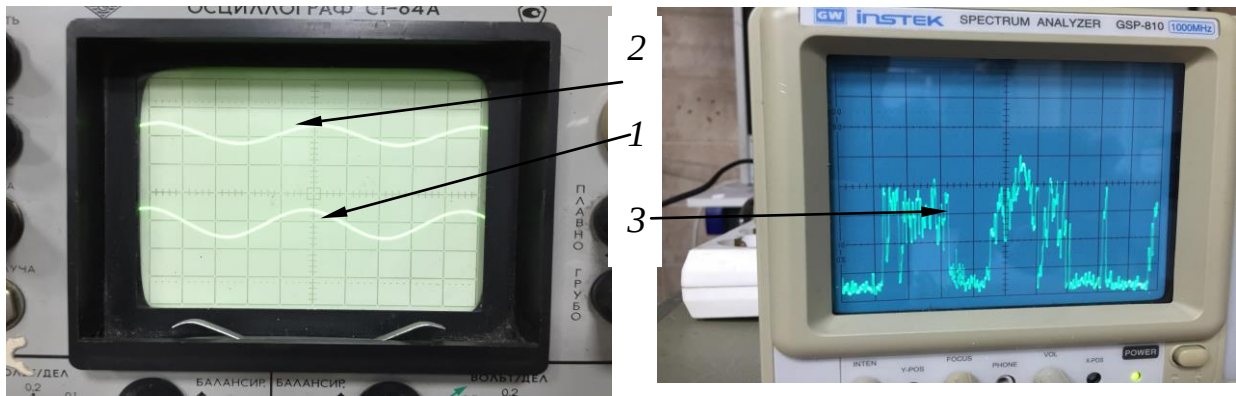


Рисунок 3.15– Визуальный контроль формы сигнала с двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1×1,2 на экране осциллографа в момент стабилизации сдвига фазы и изменения амплитуды сигнала на спектрограмме: 1 — образцовый сигнал; 2 — сигнал с выхода испытуемого образца; 3 — скачки амплитуды сигнала на спектрограмме

На рисунок 3.16 представлен внешний вид образца кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 при воздействии реального температурного режима пожара. Вспучивание огнезащитного покрытия не произошло при нагреве до 300°C, а короткое замыкание зафиксировано при 210°C (таблица 3.11). Огнезащитное покрытие при начале нагрева было целостное, в процессе нагрева покрытие лопнуло из-за температурного расширения и последующего плавления изоляции кабеля.



Рисунок 3.16 – Внешний вид образца кабельной линии типа КМВЭВ 1×2×1,5 при воздействии реального температурного режима пожара с огнезащитным покрытием «Огнеза-ВД-К»

Таким образом, при достижении температуры в 180-230°C для различных типов кабелей и проводов, испытываемых в данной работе, происходит разрушение изоляции испытуемого проводника без вспучивания огнезащитного покрытия и последующее короткое замыкание токопроводящих жил проводника. При этом передача электрического сигнала по проводнику становится невозможной.

На рисунке 3.17 приведен пример сопоставления расчетных зависимостей характерных температур от времени с начала пожара помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания при горении кабелей НГ и полученных экспериментально режимов пожара.

Из графика (рисунок 3.17) видно, что полученные экспериментальные зависимости имеют схожий характер с расчетными в случае реального температурного режима пожара в помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания и в кабельном помещении 3-го канала безопасности здания безопасности, что подтверждает достоверность расчетов выполненных ранее во второй и третьей главе данного исследования.

По результатам натурных и численных экспериментов разработана методика, по которой проведены испытания кабельной продукции при реальном температурном режиме пожара, позволяющая обосновывать эффективность применения огнезащитных вспучивающихся покрытий.

В случае воздействия реального температурного режима пожара на рассмотренные в работе электрические провода и кабели в них произошло искажение передаваемого сигнала (сигнальные кабели) и короткое замыкание проводников в диапазоне температур, в котором не начинается вспучивание огнезащитных вспучивающихся покрытий на поверхности изоляции. Поэтому сохранение работоспособности электрических проводов и кабелей с помощью вышеуказанных покрытий может быть неэффективным.

Следует отметить, что используемые для контроля сигналы имели относительно низкую частоту ($2 \cdot 10^5$ Гц).

Полученные экспериментальные зависимости имеют схожий характер с расчетными в случае реального температурного режима пожара в помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания и в кабельном помещении 3-го канала безопасности здания безопасности, что подтверждает достоверность расчетов выполненных ранее во второй и третьей главе данного исследования.

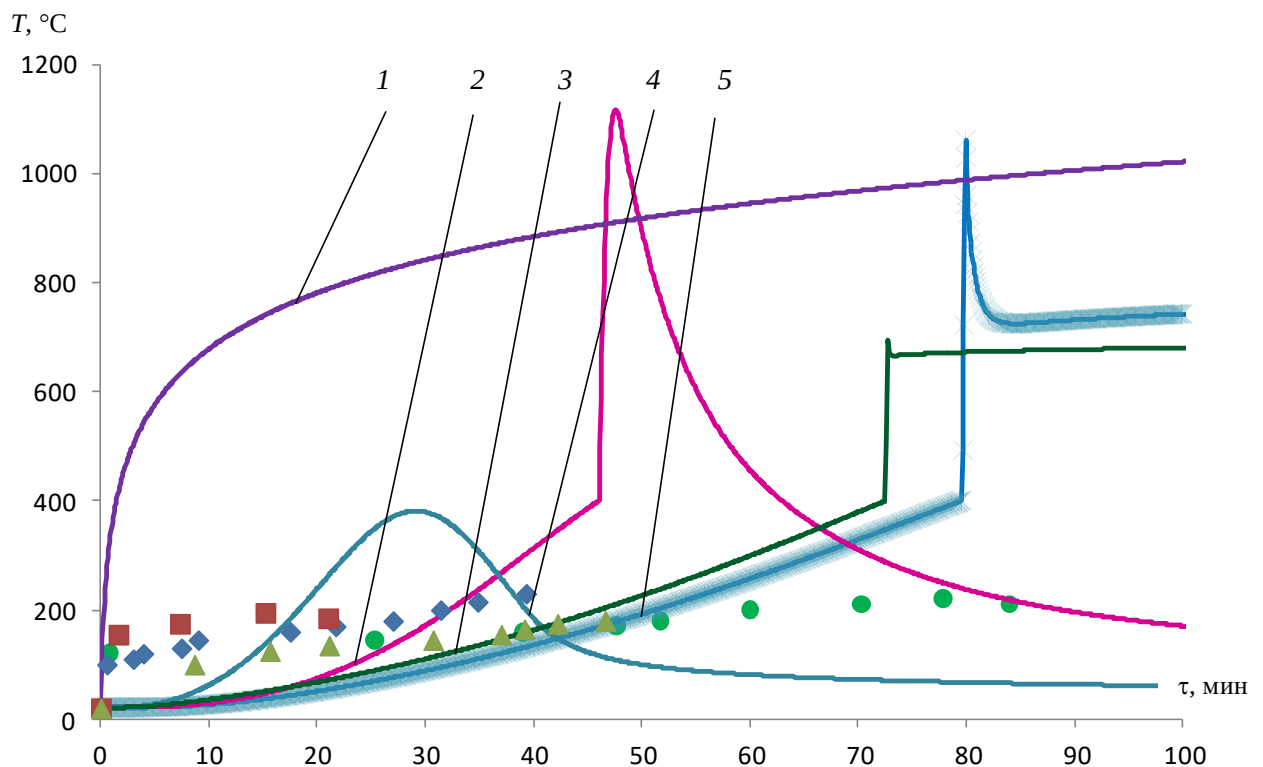


Рисунок 3.17 – Зависимости характерных температур от времени с начала пожара в помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания при горении кабелей НГ: 1 – среднеобъемная температура при «стандартном» пожаре; 2 – среднеобъемная температура при реальном пожаре (закрытые двери); 3 – среднеобъемная температура при реальном пожаре (открытые двери);

Зависимости характерных температур от времени с начала пожара в кабельном помещении 3-го канала безопасности на отметке здания безопасности при горении кабелей НГ:

4 – среднеобъемная температура при реальном пожаре (закрытые двери); 5 – среднеобъемная температура при реальном пожаре (открытые двери);

Маркерами температурные режимы при проведении экспериментов с кабелями в муфельной печи

Таким образом, можно сделать вывод об ограниченности применения огнезащитных вспучивающихся покрытий для защиты проводов и кабелей. Поэтому, для практического использования необходимо научное обоснование эффективности применения огнезащитных составов для вышеуказанных кабелей с учетом различных скоростей изменения температуры окружающей среды при реальных режимах пожара.

3.5 Методика обоснования эффективности применения огнезащитных составов для кабелей с учетом реальных режимов пожара

Обоснование эффективности применения огнезащитных составов для кабелей с учетом реальных режимов пожара проводится без учета активных систем противопожарной защиты.

Вначале проводится анализ объемно-планировочных решений помещений и пожарных зон АЭС с ВВЭР с целью выявления помещений и пожарных зон, в которых проходит более одного канала СБ, а так же анализ пожарной нагрузки данных помещений.

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

Сбор теплофизических свойств огнезащитного состава: плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности сухого и вспученных слоев огнезащитного состава.

Решая задачу нестационарной теплопроводности для цилиндрической многослойной стенки определяем распределение температур внутри многослойной стенки (температуру изоляции кабеля и огнезащитного покрытия).

Экспериментальным путем, используя стенд (рисунок 3.8 (а, б), п. 3.3.2, гл.3

диссертации) определяем температуру вспучивания огнезащитного покрытия, моделируя реальный температурный режим пожара.

Сопоставляя полученную при реальном режиме пожара температуру вспучивания огнезащитного состава и динамику изменения температуры изоляции кабеля делаем вывод о возможном времени наступлении короткого замыкания кабеля либо искажения модулированного электрического сигнала, если температура термодеструкции и плавления материала изоляции кабеля наступает до температуры вспучивания огнезащитного материала, полученного при реальном режиме пожара. Используя полученные данные, делаем вывод об эффективности применения огнезащитного покрытия в каждом конкретном случае.

Последовательность проведения методики приведена на рисунке 3.18.



Рисунок 3.18 – Методика обоснования эффективности применения огнезащитных составов для кабелей с учетом реального температурного режима пожара

3.6 Выводы по главе 3

1. Для надежного проведения реакторной установки атомной станции в безопасное состояние при возникновении аварии или пожара используют специально созданные каналы систем безопасности (СБ), включающие контрольные, сигнальные и силовые кабели. Необходимо сохранить работоспособность каналов систем безопасности (СБ) АЭС за исключением одного в соответствии с требованиями нормативных документов, регламентирующих защиту АЭС от аварий и пожаров. Поэтому теоретическое и экспериментальное изучение влияние повышенной температуры в помещении пожара на работоспособность силовых и сигнальных кабелей является актуальным.

2. Разработанная математическая модель зависимости силы тока в электрическом кабеле от температуры газовой среды в помещении пожара при предельно допустимых температурах жил кабеля и результаты численных экспериментов позволяют оценить влияние температуры в помещении атомной станции при пожаре на способность сигнального кабеля системы безопасности АЭС передавать неискаженный модулированный сигнал в зависимости от значения токовых нагрузок в кабеле и вида его расположения (вертикально или горизонтально).

3. 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 систем безопасности АЭС при пожаре.

4. 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.

Поэтому необходимо научное обоснование эффективности применения огнезащитных составов для вышеуказанных кабелей с учетом реальных режимов пожара, особенно в помещениях, где, согласно особенностям технологического процесса, сходятся все каналы СБ.

5. Для экспериментального изучения влияния повышенной температуры в помещении пожара на работоспособность силовых и сигнальных кабелей была разработана экспериментальная установка и методика проведения эксперимента, согласно которой были проведены опытные испытания проводов и кабелей различных марок. При этом проводилась оценка влияния температуры нагреваемой окружающей среды на электрические параметры проводов и кабелей, такие как, удельное сопротивление, индуктивность и емкость, так же определялась температура газовой среды, при которой происходит короткое замыкание кабелей.

6. Экспериментальные исследования одновременного воздействия пожара и токовой нагрузки на рассмотренные в работе распространенные электрические провода и кабели показало, что в них произошло искажение передаваемого сигнала (сигнальные кабели) и короткое замыкание в диапазоне температур, в котором не начинается вспучивание огнезащитных вспучивающихся покрытий на поверхности изоляции. Поэтому сохранение работоспособности электрических проводов и кабелей с помощью вышеуказанных покрытий может быть неэффективным.

7. При достижении температуры в 180-230°C для различных типов кабелей и проводов, испытываемых в данной работе, происходит разрушение изоляции испытуемого проводника без вспучивания огнезащитного покрытия и последующее короткое замыкание токопроводящих жил проводника. При этом передача электрического сигнала по проводнику становится невозможной.

8. Разработана методика, по которой проведены испытания кабельной продукции при реальном температурном режиме пожара, позволяющая обосновывать эффективность применения огнезащитных вспучивающихся

покрытий. Полученные экспериментальные зависимости имеют схожий характер с расчетными в случае реального температурного режима пожара в помещении участка ГЦНА Ленинградской АЭС (гермообъем) реакторного здания и в кабельном помещении 3-го канала безопасности здания безопасности Ленинградской АЭС, что подтверждает достоверность расчетов выполненных ранее во второй и третьей главе диссертационного исследования.

В случае воздействия реального температурного режима пожара на рассмотренные в работе электрические провода и кабели в них произошло искажение передаваемого сигнала (сигнальные кабели) и короткое замыкание проводников в диапазоне температур, в котором не начинается вспучивание огнезащитных вспучивающихся покрытий на поверхности изоляции. Поэтому сохранение работоспособности электрических проводов и кабелей с помощью вышеуказанных покрытий может быть неэффективным.

9. Выявлены ограничения в использовании огнезащитных вспучивающихся покрытий для защиты проводов и кабелей. Поэтому, для практического использования необходимо научное обоснование эффективности применения огнезащитных составов для вышеуказанных кабелей с учетом различных скоростей изменения температуры окружающей среды при реальных режимах пожара.

ГЛАВА 4 ТОКСИЧНОСТЬ НЕ РАСПРОСТРАНЯЮЩИХ ГОРЕНИЕ СИЛОВЫХ И СИГНАЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА АЭС, В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОГО РЕЖИМА ПОЖАРА

4.1 Постановка задачи

Согласно пункту 14.2 «Методическим рекомендациям 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 Трудового Кодекса РФ.

Нормативный документ «ГОСТ 12.0.230-2007 Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Общие требования» [29] в пункте 4.10.2.2 предполагает, что «перед любым изменением или применением новых приемов труда, материалов, процессов или оборудования должны быть выполнены определение опасностей и оценка рисков на рабочих местах». Следовательно, использование новых не распространяющих горение полимерных материалов [69] в качестве изоляции кабелей необходимо оценить с точки зрения влияния на здоровье человека во время пожара в помещении [70, 71].

Уровень токсичности газовой среды в помещении во время пожара является определяющим фактором для сохранения жизни и здоровья людей [27, 97]. В настоящее время широкое применение получили не распространяющие горение материалы, изготовленные из полимеров с огнезащитными добавками. Однако тепловое воздействие пожара на данные материалы с точки зрения выделения токсичных газов недостаточно изучено.

Наряду с сильнейшим токсикантом - монооксидом углерода, чаще всего приводящим к гибели и отравлению людей, при терморазложении негорючих полимеров выделяется чрезвычайно токсичное соединение - циановодород [14, 97, 227, 252]. Однако нет данных по удельному коэффициенту образованию циановодорода для электрических кабелей с изоляцией, изготовленной из полимеров с огнезащитными добавками (за исключением работы [110]).

Целью исследования является экспериментальная оценка токсичности газовой среды помещения при терморазложении не распространяющих горение сигнальных кабелей, используемых в производственных помещениях, а также в зданиях с массовым пребыванием людей.

Для достижения цели проведено экспериментальное исследование в маломасштабной экспериментальной установке [143, 153] процесса образования высокотоксичных газов (монооксида углерода и циановодорода) при воздействии тепловых потоков, характерных для пожара в помещении, на наружную поверхность вышеуказанных кабелей.

4.2 Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Схема и фотография экспериментальной установки представлены на рисунках 4.1 и 4.2 [143; 153].

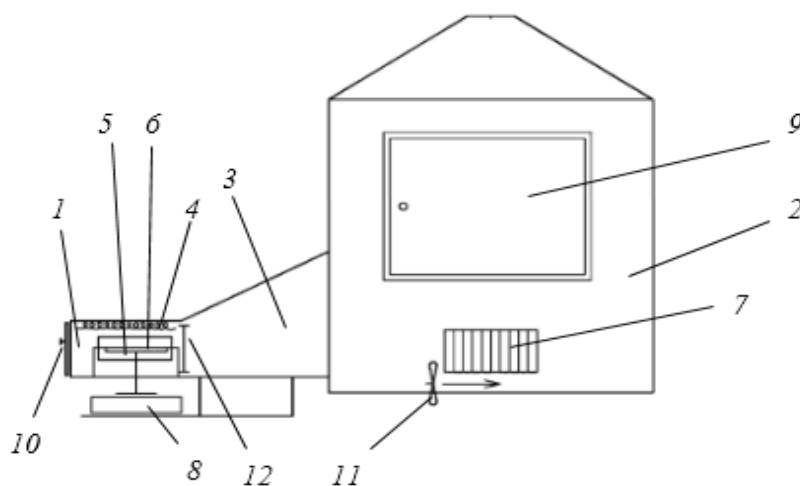


Рисунок 4.1– Схема экспериментальной установки [143, 153]: 1 – камера сгорания; 2 – экспозиционная камера; 3 – переходной рукав; 4 – электронагревательный излучатель; 5 – держатель образца; 6 – образец исследуемого кабеля; 7 – шибберные отверстия; 8 – электронные весы; 9 – дверца экспозиционной камеры; 10 – дверца камеры сгорания; 11 – вентилятор; 12 – заслонка переходного рукава



Рисунок 4.2 – Фотография экспериментальной установки [143, 153]

Теплоизолированная камера сгорания 1 соединена с теплоизолированной экспозиционной камерой 2 теплоизолированным переходным рукавом 3. В камере сгорания установлен электронагревательный излучатель 4 и держатель образца 5 на подвижной основе, который размещается на электронных весах 8.

В начале экспериментов происходит запуск контура электронагревательного излучателя 4. Далее ступенчато задаётся рабочая температура электронагревательного излучателя и плотность падающего теплового потока на образец.

Температура определяется с использованием термопары с диапазоном измерений от -40°C до $+1100^{\circ}\text{C}$ с погрешностью не более $\pm 1,5 \cdot t$ ($^{\circ}\text{C}$). Плотность теплового потока измеряется с помощью водоохлаждаемого датчика типа Гордона с погрешностью измерений не более $\pm 8\%$.

После достижения температурой и плотностью потока заданных значений открывается заслонка 12 переходного рукава 3 и дверца камеры сгорания 10.

Образец исследуемого кабеля 6 помещается в камеру сгорания 1 в держатель образца 5, размещенный на электронных весах 8 с погрешностью измерений не более ± 1 мг. Закрывается дверца камеры сгорания 10.

Продукты терморазложения материала образца через переходный рукав 3 поступают в экспозиционную камеру 2, представляющую собой кубический

объем $0,5887 \text{ м}^3$ с конусообразной верхней частью.

Внутри этой камеры расположены 27 низко инерционных термопар с диапазоном измерений от -40°C до $+1100^\circ\text{C}$ и не более $\pm 1,5 \cdot t$ ($^\circ\text{C}$).

Газовая среда экспозиционной камеры через зонд непрерывного отбора проб поступает в многоканальный автоматический проточный газоанализатор типа Dräger X-am 7000, в котором измеряются концентрации CO (диапазон измерений от 0 до 1% об. и допустимая погрешность $\pm 10\%$), HCN (диапазон измерений от 0 до 0,01% об. и допустимая погрешность $\pm 1\%$) и O_2 (диапазон измерений от 0 до 21% об. и допустимая погрешность $\pm 10\%$).

При проведении экспериментов непрерывно измеряются масса образца, плотность теплового потока, падающего на поверхность образца, температура в объеме экспозиционной камеры и концентрации CO, HCN и O_2 .

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

$$L_{\text{HCN}} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{HCN}}}{d\tau}, \quad (4.1)$$

$$L_{\text{CO}} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{CO}}}{d\tau}, \quad (4.2)$$

$$L_{\text{O}_2} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{O}_2}}{d\tau}, \quad (4.3)$$

где V – объем экспозиционной камеры, м^3 ; Ψ – массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с ; ρ_{HCN} , ρ_{CO} , ρ_{O_2} – среднеобъемные парциальные плотности HCN, CO и O_2 в экспозиционной камере соответственно, кг/м^3 ; τ – время от начала экспериментов, с.

Более подробное описание установки и методики проведения экспериментов представлено в работах [143, 153].

4.3 Токсичность не распространяющих горение сигнальных кабелей

Выполнена экспериментальная оценка токсичности газовой среды помещения при терморазложении не распространяющих горение сигнальных кабелей, используемых в производственных помещениях, а также в зданиях с массовым пребыванием людей. Проведено экспериментальное исследование в маломасштабной экспериментальной установке воздействия характерного для пожара в помещении лучистого теплового потока на изоляцию вышеуказанных кабелей, изготовленную из полимеров с огнезащитными добавками. Было выявлено, что наряду с сильнейшим токсикантом - монооксидом углерода, чаще всего приводящим к гибели и отравлению людей, при терморазложении не распространяющих горение полимеров выделяется чрезвычайно токсичное соединение - циановодород. 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. Обнаружено, что вышеуказанный кабель в условиях реального температурного режима пожара может выделять токсичные соединения (монооксид углерода и циановодород) в концентрациях, превышающих их предельно допустимые величины в условиях эвакуации людей из помещений.

4.3.1 Исходные данные для проведения экспериментов

В качестве объекта исследования принимаем сигнальный кабель марки НГ LS FR HF E1180 [58], рекомендованный для прокладки в производственных помещениях, а также в зданиях с массовым пребыванием людей.

Характеристики вышеуказанного кабеля:

- «НГ» не распространение горения, ГОСТ 12176, часть 3, категория "А" (ГОСТ Р МЭК 332-3-96);
- «FR» fire resistance (огнестойкость), МЭК 60331-11 МЭК 60331-24;

– «LS» low smoke (низкое дымогазовыделение при горении и тлении, МЭК 61034, части 1 и 2);

– «HF» halogen free ("безгалогенный", пониженная коррозионная активность продуктов дымо- и газовыделения при горении), ГОСТ Р МЭК 60754, часть 2),

– «LS» дымовыделение, согласно ГОСТ Р 53315-2009 допустимое снижение светопропускаемости составляет 50% для HF - 25-40%.

Допустимая коррозионная активность газообразных выделений изоляции кабелей (по ГОСТ Р 53769-2010) при пожаре: для FR LS этот предел составляет 140 мг/г, для FR HF - 5 мг/г (имеется в виду газ галогенных кислот в пересчете на HCL для ПВХ-пластификата пониженной опасности). Кабели типа FR HF отличаются параметрами коррозионной активности кратно ниже допустимых.

Перед проведением экспериментов кабель разрезается на части длиной 0,1 м и размещается на подложке размерами 0,1 × 0,1 м (рисунок 4.3).

Основные исходные данные проведенных экспериментов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1– Исходные данные экспериментов

№ серии экспериментов	Начальная масса образца, кг·10 ³	Размеры образца, м×м	Температура в помещении, °С	Давление в помещении, мм рт. ст.	Влажность в помещении, %
1	72,1	0,1 × 0,1	23	753	38
2	73,2	0,1 × 0,1	20	753	41

Отличие серии экспериментов №1 и №2 заключалось в задании разных зависимостей плотностей лучистых тепловых потоков, падающих от нагревателя на поверхность образца, от времени проведения экспериментов (таблица 4.2).

В серии экспериментов №1 плотность теплового потока, падающего от нагревателя на поверхность образца, равнялась 35 кВт/м² в течение всего времени испытаний.

Во время проведения серии экспериментов №2 плотность теплового потока изменялась ступенчато по времени до максимального значения 45 кВт/м².

Изменение вышеуказанной плотности теплового потока в серии экспериментов №2 выбрано из анализа литературных источников, в которых показано, что плотность теплового потока, падающего на поверхность ограждающих конструкций при пожаре в помещении (а значит и на поверхность сигнальных кабелей), может в соответствии с работами [10, 65, 66, 67] достигать 44 кВт/м^2 , в отличие от работы [234], где тепловой поток был равен 50 кВт/м^2 .

Таблица 4.2 – Зависимости плотностей лучистых тепловых потоков, падающих от нагревателя на поверхность образца, от времени проведения экспериментов

Промежуток времени от начала испытаний, Δt , мин			0-3	3-6	6-8	8-10	10-13	13-18
Плотность теплового потока, $q \cdot 10^3$, Вт/м^2	№ серии эксперимента		35					
		2	10	15	20	25	35	45

Критическое значение парциальной плотности монооксида углерода составляет $\rho_{\text{CO.кр}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ [65]. Критическое значение парциальной плотности HCN принимаем равным $\rho_{\text{HCN.кр}} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$ [14]

4.3.2 Результаты экспериментов и их анализ

Фотографии образцов до и после проведения экспериментов представлены на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Фотографии образцов до и после проведения экспериментов

Зависимости потери массы (m , кг) образцов от времени проведения экспериментов приведены на рисунке 4.4. На рисунке 4.5 представлены зависимости удельной массовой скорости выгорания образца ($\Psi_{\text{уд}}$, кг/(с·м²)) от времени проведения экспериментов.

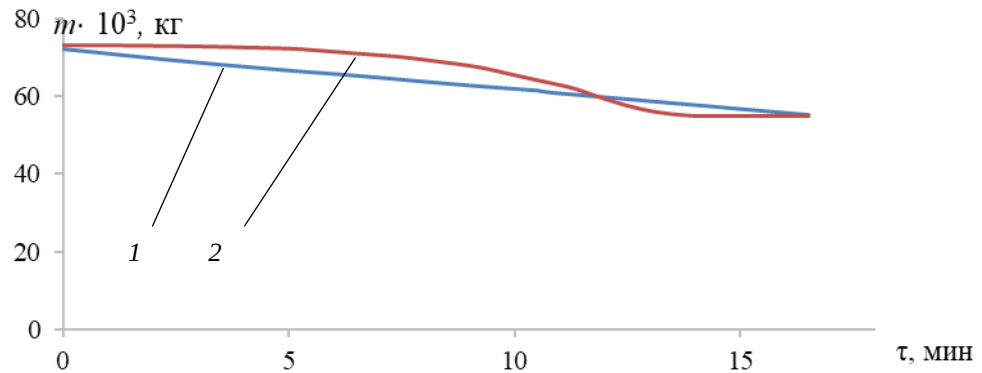


Рисунок 4.4 – Зависимости потери массы образцов и плотности лучистого теплового потока, падающего на поверхность образца, от времени проведения экспериментов:

1, 2 – номера экспериментов

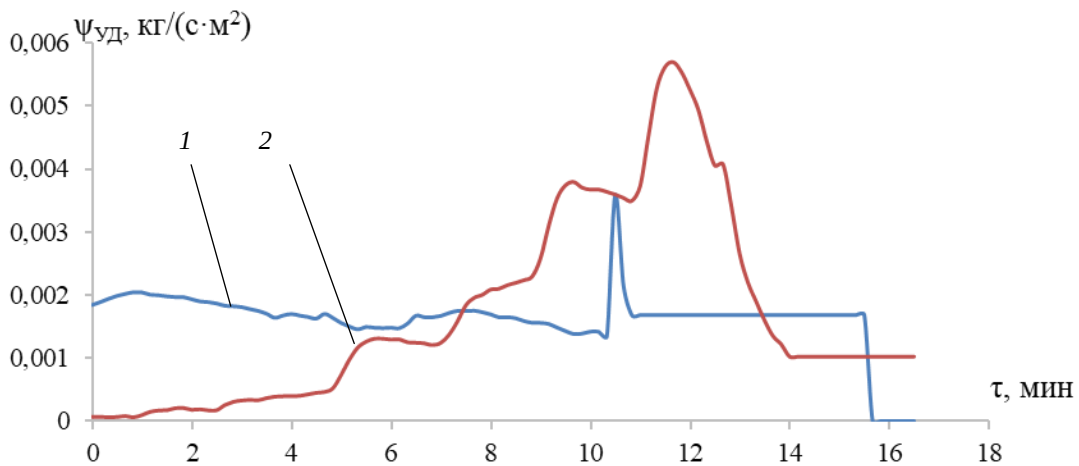


Рисунок 4.5 – Зависимость удельной массовой скорости выгорания образца от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов

Зависимости парциальной плотности монооксида углерода, циановодорода и кислорода в экспозиционной камере от времени испытаний показаны на рисунке 4.6.

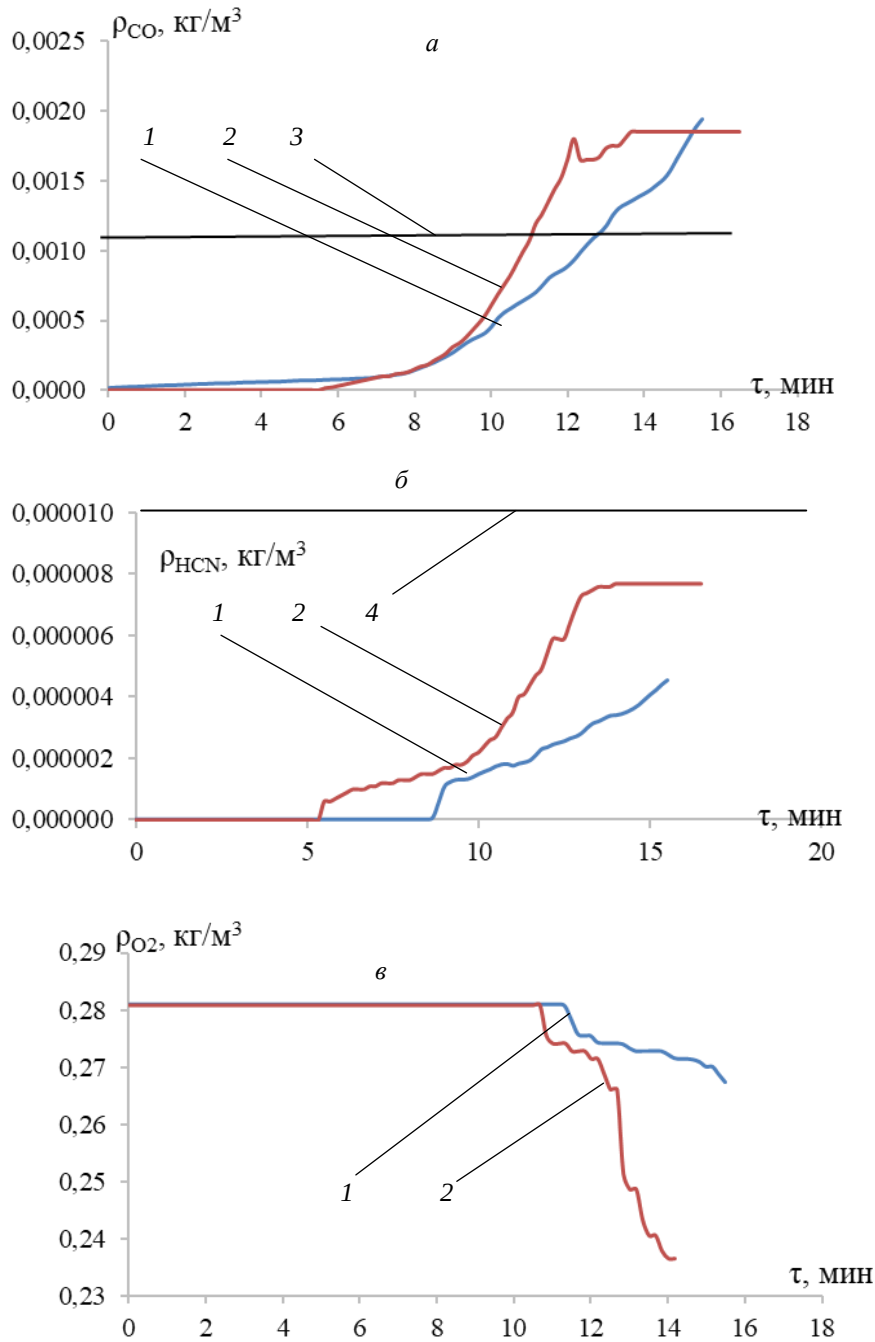


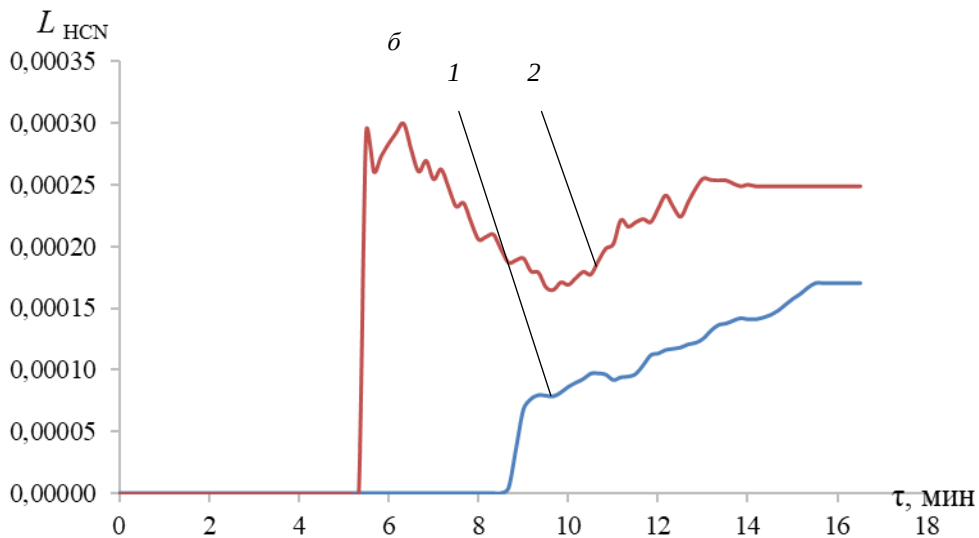
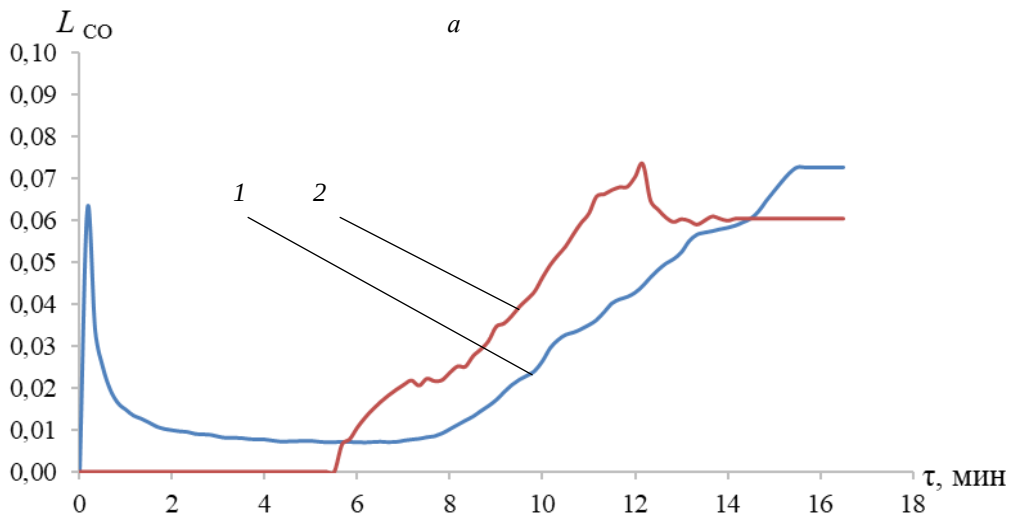
Рисунок 4.6 – Зависимости парциальной плотности монооксида углерода (*a*), циановодорода (*б*) и кислорода (*в*) в экспозиционной камере от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов; 3 – критическое значение парциальной плотности CO; 4 – критическое значение парциальной плотности HCN

Из рисунка 4.6 видно, что парциальная плотность CO в обоих экспериментах превышает ее критическое значение.

Парциальной плотность HCN не достигает ее критической величины.

Однако в зависимости от площади облучаемой тепловым потоком поверхности кабелей ρ_{HCN} может также превысить $\rho_{\text{HCN.кр}}$.

На рисунке 4.7 представлены зависимости удельных массовых коэффициентов образования монооксида углерода и циановодорода, а также удельного массового коэффициента поглощения кислорода от времени проведения экспериментов.



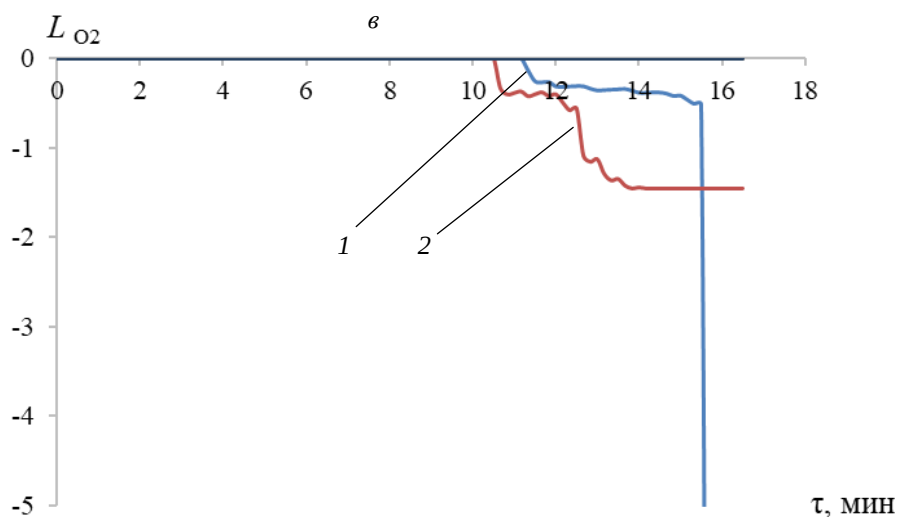


Рисунок 4.7 – Зависимости удельных массовых коэффициентов образования монооксида углерода (а) и циановодорода (б), а также удельного массового коэффициента поглощения кислорода (в) от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов

Полученные в экспериментах величины удельных массовых коэффициентов образования СО и HCN, а также удельного массового коэффициента поглощения O₂ могут использоваться в математических моделях расчетах динамики опасных факторов пожара при расчете блокирования путей эвакуации.

Проведенные эксперименты показали, что сигнальный не распространяющий горение кабель марки НГ LS FR HF E1180 [58], рекомендованный для прокладки в производственных помещениях, а также в зданиях с массовым пребыванием людей, в условиях реального температурного режима пожара может выделять высокотоксичные соединения (монооксид углерода и циановодород) в концентрациях, превышающих предельно допустимые величины и оказывать отрицательное воздействие на здоровье людей и их возможность самостоятельно эвакуироваться.

4.4 Токсичность не распространяющих горение современных силовых кабелей

4.4.1 Исходные данные

Уровень токсичности газовой среды в помещении во время пожара является определяющим фактором для сохранения жизни и здоровья персонала [94]. В настоящее время широкое применение получили не распространяющие горение материалы, изготовленные из полимеров. Однако тепловое воздействие пожара на данные материалы с точки зрения выделения токсичных газов недостаточно изучено.

Наряду с сильнейшим токсикантом - монооксидом углерода [227], чаще всего приводящим к гибели и отравлению людей, при терморазложении не распространяющих горение полимеров выделяется чрезвычайно токсичное соединение - циановодород [14, 97, 98, 204, 229, 251, 252]. Необходимо изучить влияние высоких температур при пожаре на рабочие характеристики силовых кабелей. Чтобы иметь представление об их поведении и минимизировать риски опасного воздействия на организм человека, а также проводить противопожарные мероприятия, необходимые для повышения уровня пожарной безопасности на объектах энергетики. Для разработки профилактических противопожарных мероприятий по предотвращению негативного воздействия токсичных газов необходимо проводить математическое моделирование распространения этих газов в объеме рассматриваемых помещений и их воздействия на организм человека. Однако, исходных данных для проведения расчетов в случаях горения современных веществ и материалов недостаточно.

Целью параграфа является экспериментальная оценка токсичности газовой среды помещения при терморазложении силового кабеля с медной жилой, изоляцией из ПВХ, оболочкой из ПВХ пониженной горючести «ВВГнг (А)-FRLS 2х1,5», используемых на объектах энергетики.

Для достижения цели необходимо провести экспериментальное

исследование процесса образования токсичных газов (монооксида углерода и циановодорода) при воздействии тепловых потоков, характерных для пожара в помещении, на наружную поверхность вышеуказанных кабелей.

Характеристики вышеуказанного кабеля [58]:

Расшифровка маркировки ВВГнг (А)-FRLS 2х1.5:

- «В» изоляция из ПВХ композиции.
- «В» оболочка из ПВХ композиции.
- «Г» не имеет брони.
- «(А)» индекс пожаробезопасности, означает что кабель не распространяет горение при групповой прокладке (прокладке в пучках).
- «НГ» не распространение горения, ГОСТ 12176, часть 3, категория "А" (ГОСТ Р МЭК 332-3-96);
- «FR» fire resistance (огнестойкость), МЭК 60331-11 МЭК 60331-24.
- «LS» low smoke (низкое дымогазовыделение при горении и тлении, МЭК 61034, части 1 и 2);

Область применения силового кабеля «ВВГнг (А)-FRLS 2х1,5»:

- для оборудования систем безопасности АЭС, электропроводок цепей систем пожарной безопасности (цепи пожарной сигнализации, питания насосов пожаротушения, освещения запасных выходов и путей эвакуации, систем дымоудаления и приточной вентиляции, эвакуационных лифтов).
- для электропроводок в операционных отделениях больниц, цепей аварийного электроснабжения и питания оборудования (токоприемников), функционирующих при пожаре.

Кабель может быть проложен как в грунте, так и на открытом воздухе, так как он не восприимчив к агрессивному влиянию природных факторов.

Перед проведением экспериментов кабель разрезается на части длиной 0,1 м и размещается на подложке размерами 0,1 × 0,1 м.

Основные исходные данные проведенных экспериментов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные данные экспериментов

№ серии эксперимента	Начальная масса образца, кг·10 ³	Размеры образца, м×м	Температура в помещении, °С	Давление в помещении, мм рт. ст.	Влажность в помещении, %
1	50,0	0,1 × 0,1	23	753	38
2	100,0	0,1 × 0,1	20	753	41

В серии экспериментов №1 плотность теплового потока, падающего от нагревателя на поверхность образца, равнялась 35 кВт/м² в течение всего времени испытаний.

Плотность теплового потока в серии экспериментов №2 выбрана из анализа литературных источников, в которых показано, что плотность теплового потока, падающего на поверхность ограждающих конструкций при пожаре в помещении (а значит и на поверхность силовых кабелей), в соответствии с работами [10, 65] в среднем достигает 45 кВт/м², в отличие от работы [234], где тепловой поток был равен 50 кВт/м² (таблица 4.2).

Схема и фотография экспериментальной установки представлены на рисунках 4.1 и 4.2 [143, 153].

Внешний вид образца кабеля для проведения эксперимента показан на рисунке 4.8.

а*б*

Рисунок 4.8 – Внешний вид силового кабеля, с медной жилой, изоляцией из ПВХ, оболочкой из ПВХ пониженной горючести «ВВГнг (А)-FRLS 2x1,5» (а) и образца для проведения эксперимента (б)

Критическое значение парциальной плотности монооксида углерода составляет $\rho_{\text{CO,кр}}=1,16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ [64]. Критическое значение парциальной плотности HCN принимаем равным $\rho_{\text{HCN,кр}}=1,1 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$ [14].

Для достижения цели проведено экспериментальное исследование процесса образования токсичных газов (монооксида углерода и циановодорода) при воздействии тепловых потоков, характерных для пожара в помещении, на наружную поверхность вышеуказанных кабелей.

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

$$L_{\text{HCN}} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{HCN}}}{d\tau}, \quad (4.4)$$

$$L_{\text{CO}} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{CO}}}{d\tau}, \quad (4.5)$$

$$L_{\text{O}_2} = \frac{V}{\Psi} \frac{d\rho_{\text{O}_2}}{d\tau}, \quad (4.6)$$

где V – объем экспозиционной камеры, м^3 ; Ψ – массовая скорость выгорания горючего материала, кг/с ; ρ_{HCN} , ρ_{CO} , ρ_{O_2} – среднеобъемные парциальные плотности HCN, CO и O_2 в экспозиционной камере соответственно, кг/м^3 ; τ – время от начала экспериментов, с.

Более подробное описание установки и методики проведения экспериментов представлено в работах [98, 143, 153].

4.4.2 Результаты экспериментов и их анализ

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

Зависимости потери массы (m , кг) образцов от времени проведения экспериментов приведены на рисунке 4.9. На рисунке 4.10 представлены

зависимости удельной массовой скорости выгорания образца ($\psi_{\text{уд}}$, кг/(с·м²)) от времени проведения экспериментов.

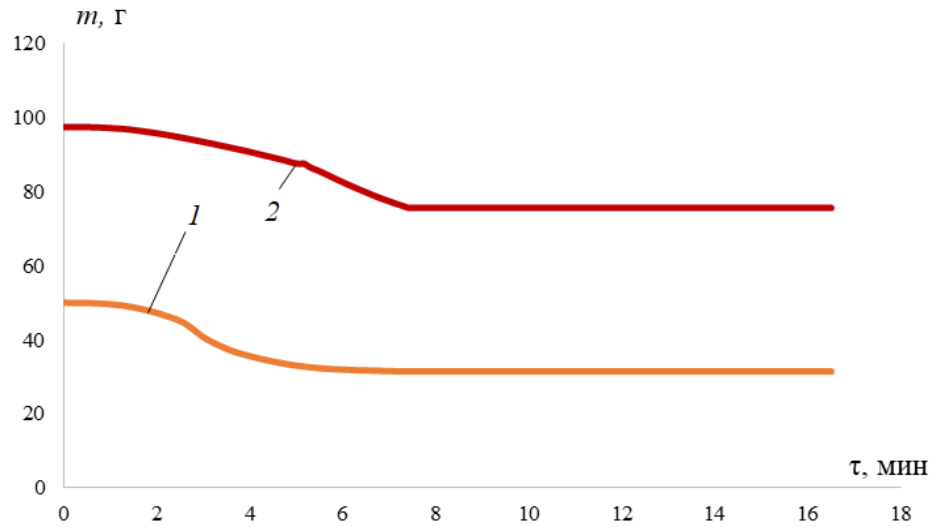


Рисунок 4.9 – Зависимости потери массы образцов и плотности лучистого теплового потока, падающего на поверхность образца, от времени проведения экспериментов:

1, 2 – номера экспериментов

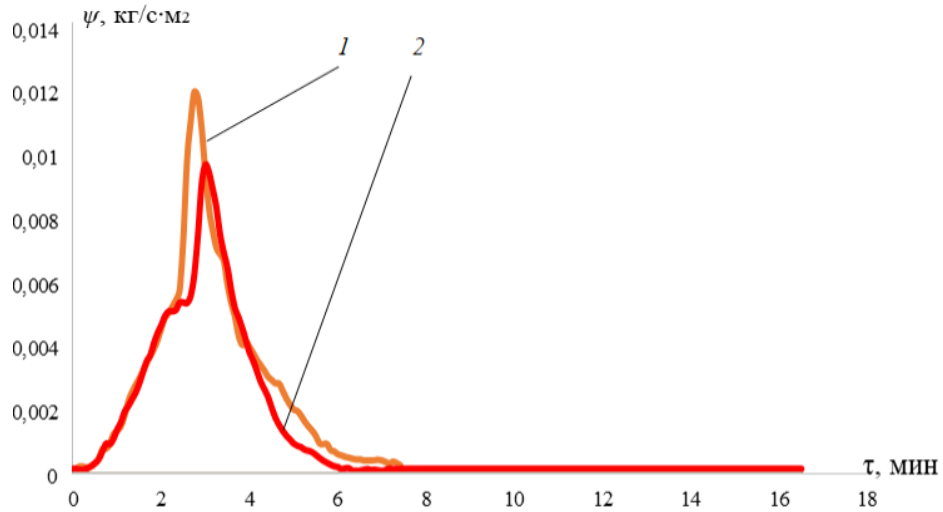


Рисунок 4.10 Зависимость удельной массовой скорости выгорания образца от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов

Зависимости парциальной плотности монооксида углерода, циановодорода и кислорода в экспозиционной камере от времени испытаний показаны на рисунке 4.11.

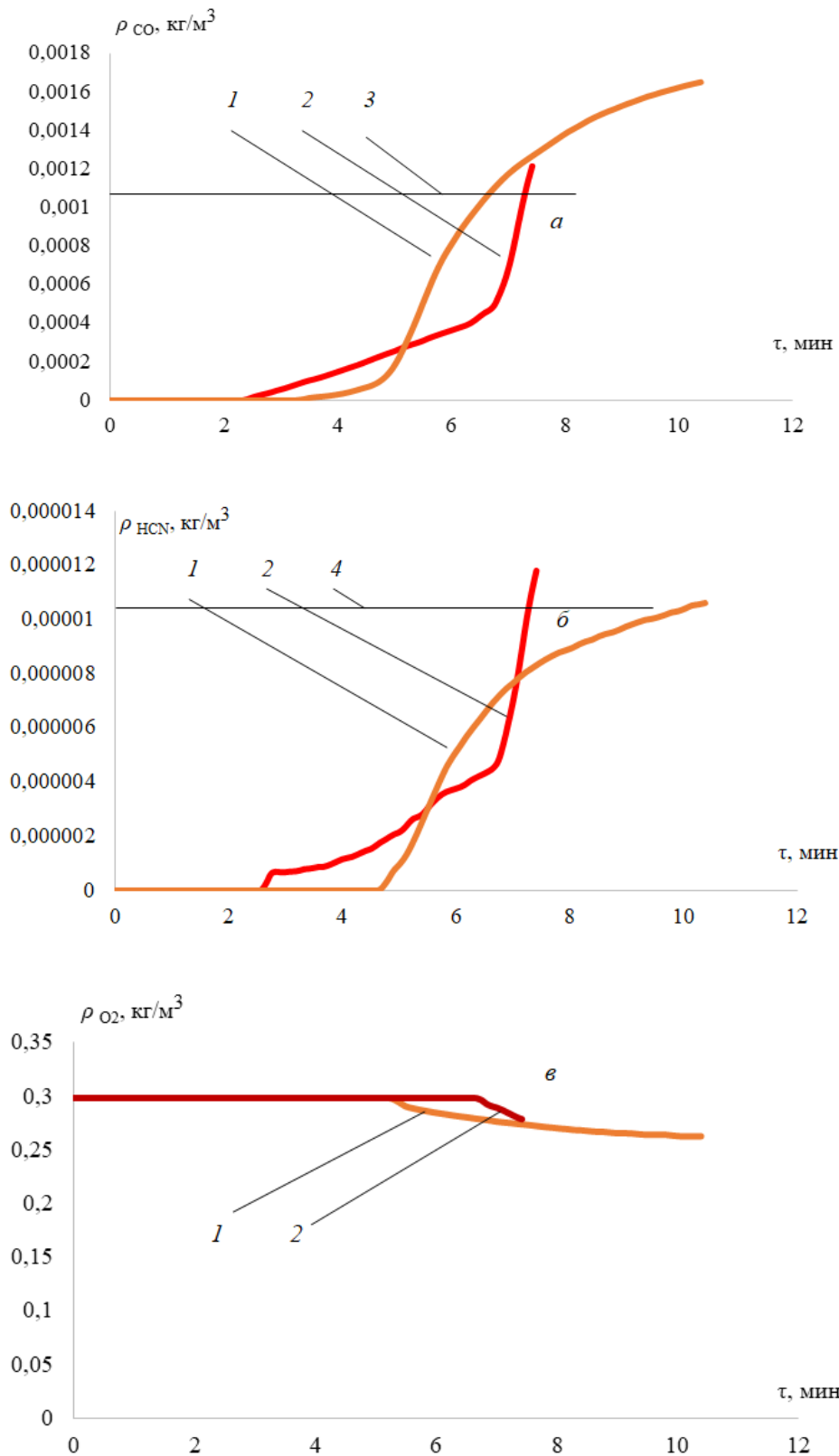
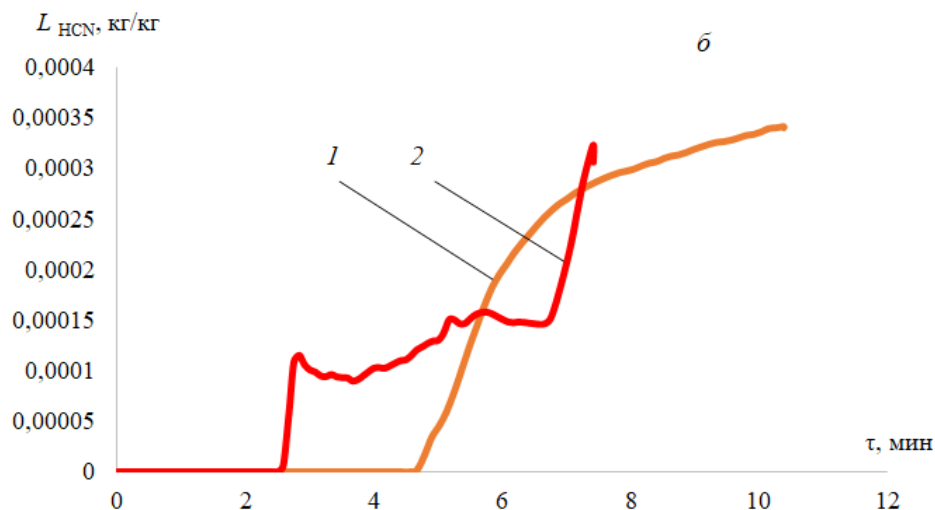
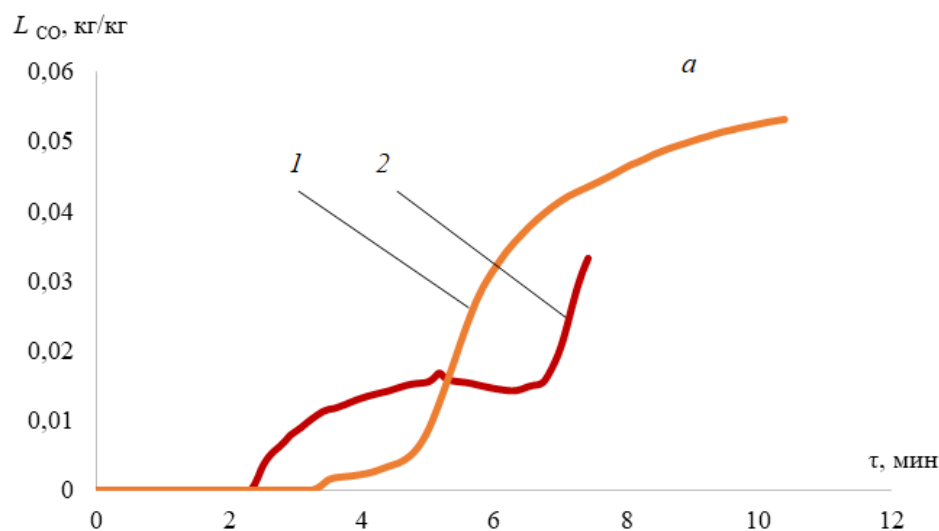


Рисунок 4.11 – Зависимости парциальной плотности монооксида углерода (а), циановодорода (б) и кислорода (в) в экспозиционной камере от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов; 3 – критическое значение парциальной плотности CO; 4 – критическое значение парциальной плотности HCN

Из рисунка 4.11 видно, что парциальная плотность CO и HCN в обоих экспериментах превышает критическое значение.

На рисунке 4.12 представлены зависимости удельных массовых коэффициентов образования монооксида углерода и циановодорода, а также удельного массового коэффициента поглощения кислорода от времени проведения экспериментов.



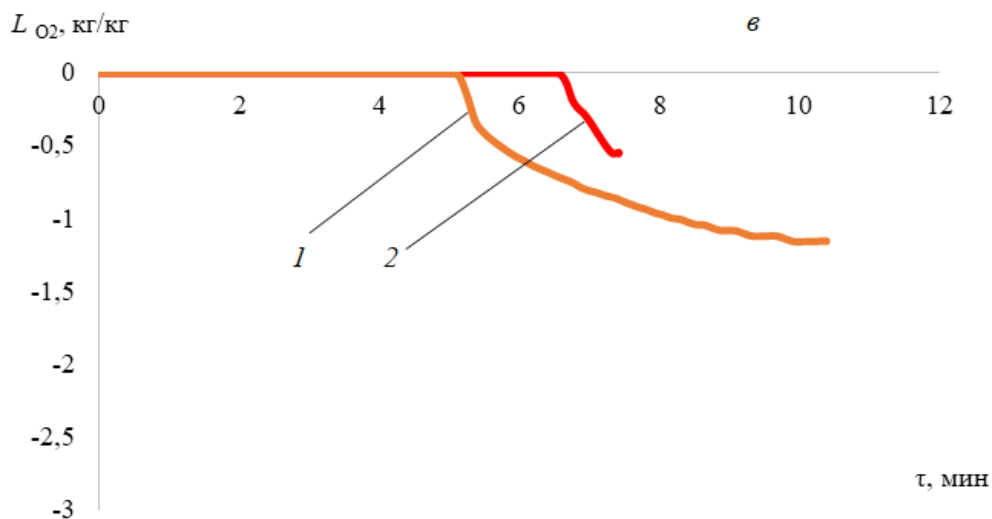


Рисунок 4.12 – Зависимости удельных массовых коэффициентов образования монооксида углерода (а) и циановодорода (б), а также удельного массового коэффициента поглощения кислорода (в) от времени проведения экспериментов: 1, 2 – номера экспериментов

Полученные в экспериментах величины удельных массовых коэффициентов образования СО и HCN, а также удельного массового коэффициента поглощения O_2 могут использоваться в математических моделях расчетах динамики опасных факторов пожара при расчете времени блокирования путей эвакуации.

Проведенные эксперименты показали, что силовой кабель в условиях реального температурного режима пожара может выделять токсичные соединения (монооксид углерода и циановодород) в концентрациях, превышающих предельно допустимые величины, и оказывать отрицательное воздействие на здоровье людей и их возможность самостоятельно эвакуироваться.

На основании анализа данных полученных в ходе проведения эксперимента можно сделать вывод:

1. Силовой кабель марки «ВВГнг(А)-FRLS 2х1,5» - силовой кабель, с медной жилой, изоляцией из ПВХ, оболочкой из ПВХ пониженной горючести в условиях реального температурного режима пожара может выделять высокотоксичные соединения (монооксид углерода и циановодород) в концентрациях, превышающих предельно допустимые величины и оказывать отрицательное воздействие на здоровье людей и их возможность самостоятельно

эвакуироваться. Поэтому при расчете пожарных рисков для обоснования выполнения условия безопасной эвакуации людей при горении современной кабельной продукции необходимо определять времена блокирования путей эвакуации токсичными газами с учетом циановодорода.

2. Выполненная модернизация экспериментальной установки дает возможность получить экспериментальные зависимости от времени парциальных плотностей циановодорода и монооксида углерода, а также удельных коэффициентов их выделения. Это позволяют расширить и уточнить существующую базу данных типовой пожарной нагрузки и проводить расчет времени блокирования путей эвакуации при совместном воздействии вышеуказанных газов.

4.5 Выводы по главе 4

1. Изоляция современных не распространяющих горение сигнальных и силовых кабелей, используемых на АЭС, содержит антипирены, что приводит не только к положительному эффекту уменьшения удельной скорости выгорания, но повышает токсичность продуктов горения этих кабелей.

2. При горении не распространяющих горение кабелей в помещениях АЭС кроме выделения оксида углерода образуется высокотоксичное соединение – циановодород, что обусловлено содержанием азота в антипиренах.

3. Необходимо при расчете пожарного риска в помещениях АЭС, в которых находятся не распространяющие горение кабели, учитывать время блокирования путей эвакуации циановодородом.

ГЛАВА 5 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ НАТЕКАНИИ ВОДОРОДА В РЕАКТОРНОЕ ЗДАНИЕ АЭС С ВОДО- ВОДЯНЫМИ РЕАКТОРАМИ

5.1 Постановка задачи

Анализ водородной безопасности АЭС, выполненный в п. 1.4 диссертации, показал, что для решения всех задач безопасности, связанной с водородом, нужно уметь рассчитать концентрационные поля водородо-воздушной смеси при различных аварийных ситуациях.

В соответствии с [196] коэффициенты участия водорода в горении (Z_{Γ}) и взрыве ($Z_{\text{в}}$) могут быть рассчитаны на основе характера распределения газа в объеме помещения и принимаются равным $Z_{\text{в}} = Z_{\Gamma} = 1$.

При натекании водорода в помещение для определения вышеуказанного коэффициента необходимо рассчитать концентрационные поля. 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 необходимо провести валидацию трехмерной модели на известных экспериментальных данных

Также необходимо разработать возможные аналитические решения для расчета распределения концентраций водорода в случае ряда модельных задач натекания водорода. Это позволит определить коэффициент участия водорода в горении и взрыве, а также использовать аналитические решения для тестирования трехмерной модели.

Закономерности образования взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в верхнюю часть помещения большого объема изучены достаточно широко [26, 48]. Характерное время

выравнивания концентраций водорода по всему объему помещения при этом составляет порядка нескольких часов [48]. При натекании водорода в нижнюю часть помещения это время составляет порядка нескольких минут, что описывается в работе [48] без приведения каких-либо экспериментальных данных. Это связано со сложностью точного измерения быстроизменяющихся концентраций этого газа [24]. Поэтому актуальной задачей является изучение закономерностей образования локальных взрыво- и пожароопасных концентраций при натекании газа в нижнюю часть помещения (например, в гермзону реакторного здания). Для основных модельных задач принимали следующие варианты натекания водорода в помещение (таблица 5.1).

Таблица 5.1– Варианты натекания водорода в помещение

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.
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.
Утечка через отверстие	Распространение водорода в области конвективной колонки, образующейся над источником его натекания в помещение

Целью пятой главы диссертационного исследования является:

- разработка аналитических решений для основных модельных задач натекания водорода;
- валидация трехмерной модели на экспериментальных данных,

приведенных в литературных источниках;

- разработка зонной модели расчета концентраций водорода при его натекании в помещение большого объема (например, в гермзону реакторного здания);

- проведение численных экспериментов по особенностям образования пожаро- и взрывоопасных водородно-воздушных зон при натекании водорода в гермзону реакторного здания как наиболее опасного с точки зрения выделения водорода в реакторном здании.

5.2 Стационарная одномерная концентрационная диффузия водорода в воздухе

Из-за высокой скорости диффузии водорода в воздухе в первом приближении коэффициент Z_v и Z_r можно определить из решения модельной задачи одномерной стационарной концентрационной диффузии водорода.

Рассмотрим протяженный канал 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) – $X_h=X_2$.

В случае отсутствия конвекции распределение концентраций водорода при установившейся молекулярной диффузии определяется из уравнения диффузии, которое для одномерного стационарного процесса имеет вид [72]:

$$\frac{d}{dx} \left(\rho D \frac{dX_h}{dx} \right) = 0, \quad (5.1)$$

где ρ – локальная плотность водородно-воздушной смеси; D – коэффициент молекулярной диффузии водорода в воздухе; X_h – локальная массовая концентрация водорода; x – координата вдоль длины канала.

Используя уравнение состояния смеси и выразив газовую постоянную

смеси через массовые концентрации компонентов [72], уравнение (5.1) в случае постоянства температуры и давления смеси, а также коэффициента молекулярной диффузии водорода в воздухе можно привести к виду:

$$\frac{d}{d\bar{x}} \left(\frac{1}{(\mu_a - \mu_h)X_h + \mu_h} \frac{dX_h}{d\bar{x}} \right) = 0, \quad (5.2)$$

где $\bar{x}=x/L$ – безразмерная координата; μ_a , μ_h – молекулярные массы воздуха и водорода.

Интегрируя уравнение (5.2), получаем:

$$\frac{1}{(\mu_a - \mu_h)} \ln[(\mu_a - \mu_h)X_h + \mu_h] = C_1\bar{x} + C_2, \quad (5.3)$$

где постоянные интегрирования C_1 и C_2 находятся из граничных условий:

при $\bar{x}=0$: $X_h=X_1$; при $\bar{x}=1$: $X_h=X_2$.

Тогда распределение массовых концентраций водорода по длине канала имеет вид:

$$X_h = \left(X_1 + \frac{\mu_h}{\mu_a - \mu_h} \right) \left(\frac{(\mu_a - \mu_h)X_2 + \mu_h}{(\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h} \right)^{\bar{x}} - \frac{\mu_h}{\mu_a - \mu_h}. \quad (5.4)$$

Коэффициенты участия массы водорода, находящегося внутри канала, в горении и взрыве равны:

$$Z_{\Gamma} = m_{\Gamma} / m_{\Sigma}; \quad (5.5)$$

$$Z_{\text{в}} = m_{\text{в}} / m_{\Sigma}, \quad (5.6)$$

где m_{Σ} – суммарная масса водорода внутри канала; m_{Γ} – суммарная масса водорода, приходящаяся на участок канала с концентрацией $X_{\Gamma 1} \leq X_h \leq X_{\Gamma 2}$ (горючая смесь); $m_{\text{в}}$ – суммарная масса водорода, приходящаяся на участок с концентрацией $X_{\text{в}1} \leq X_h \leq X_{\text{в}2}$ (взрывоопасная смесь); $X_{\Gamma 1}$, $X_{\Gamma 2}$ – нижний и верхний концентрационные пределы горения; $X_{\text{в}1}$, $X_{\text{в}2}$ – нижний и верхний концентрационные пределы детонации.

Величины масс водорода, входящие в выражения (5.5) и (5.6), определяются по формулам:

$$m_{\Sigma} = \int_0^1 \rho X_h F d\bar{x}; \quad (5.7)$$

$$m_{\Gamma} = \int_{\bar{x}_{\Gamma 2}}^{\bar{x}_{\Gamma 1}} \rho X_h F d\bar{x}; \quad (5.8)$$

$$m_{\text{B}} = \int_{\bar{x}_{\text{B} 2}}^{\bar{x}_{\text{B} 1}} \rho X_h F d\bar{x}, \quad (5.9)$$

где F – площадь поперечного сечения канала; $\bar{x}_{\Gamma 1}$, $\bar{x}_{\Gamma 2}$ – безразмерные координаты, в которых массовые концентрации водорода равны его нижнему и верхнему концентрационным пределам горения ($X_{\Gamma 1}$ и $X_{\Gamma 2}$); $\bar{x}_{\text{B} 1}$, $\bar{x}_{\text{B} 2}$ – безразмерные координаты, в которых массовые концентрации водорода равны его нижнему и верхнему концентрационным пределам детонации ($X_{\text{B} 1}$ и $X_{\text{B} 2}$).

Используя уравнение состояния смеси и выразив газовую постоянную смеси через массовые концентрации компонентов, уравнения (5.7)-(5.9) в случае постоянства температуры и давления смеси можно привести к виду (при $X_2 \leq X_{\Gamma 1}$ в случае выражения (5.8) и $X_2 \leq X_{\text{B} 1}$ для уравнения (5.9)):

$$m_{\Sigma} = A \left(1 + \frac{\mu_h}{((\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h) \ln \left(\frac{(\mu_a - \mu_h)X_2 + \mu_h}{(\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h} \right)} \left(\frac{(\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h}{(\mu_a - \mu_h)X_2 + \mu_h} - 1 \right) \right); \quad (5.10)$$

$$m_{\Gamma} = A \left[\bar{x}_{\Gamma 1} - \bar{x}_{\Gamma 2} + \frac{\mu_h}{((\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h) \ln \left(\frac{(\mu_a - \mu_h)X_2 + \mu_h}{(\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h} \right)} \times \right. \\ \left. \left(\frac{(\mu_a - \mu_h)X_2 + \mu_h}{(\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h} \right)^{-\bar{x}_{\Gamma 1}} - \left(\frac{(\mu_a - \mu_h)X_2 + \mu_h}{(\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h} \right)^{-\bar{x}_{\Gamma 2}} \right]; \quad (5.11)$$

$$m_B = A \left[\bar{x}_{B1} - \bar{x}_{B2} + \frac{\mu_h}{((\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h) \ln \left(\frac{(\mu_a - \mu_h)X_2 + \mu_h}{(\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h} \right)} \times \right. \\ \left. \left(\frac{(\mu_a - \mu_h)X_2 + \mu_h}{(\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h} \right)^{-\bar{x}_{B1}} - \left(\frac{(\mu_a - \mu_h)X_2 + \mu_h}{(\mu_a - \mu_h)X_1 + \mu_h} \right)^{-\bar{x}_{B2}} \right], \quad (5.12)$$

где $A = \frac{pF\mu_h\mu_a L}{R_\mu T(\mu_a - \mu_h)}$; p – давление смеси внутри канала; T – температура смеси внутри канала; R_μ – универсальная газовая постоянная.

Величина суммарной массы водорода, приходящейся на участок канала с горючей смесью и определяемой по выражению (5.11), является максимальной при $X_2 \leq X_{г1}$ и равняется нулю в случае $X_2 \geq X_{г2}$.

Значение суммарной массы водорода, приходящейся на участок канала с взрывоопасной смесью и находящейся из выражения (5.12), является максимальным при $X_2 \leq X_{в1}$ и равняется нулю в случае $X_2 \geq X_{в2}$.

Таким образом, соотношения (5.10)-(5.12) соответствуют максимально возможным величинам m_Γ и m_B в рассматриваемой модельной задаче. При этом $X_1=1$ и $X_2=X_{г1}$ при расчете m_Γ и $X_1=1$ и $X_2=X_{в1}$ для m_B .

Используя выражения (5.10)-(5.12), можно найти коэффициенты участия массы водорода, находящейся внутри канала, в горении и взрыве (формулы (5.5)-(5.6)).

Переводя объемные доли водорода в массовые получаем: $X_{г1}=0,0029$; $X_{г2}=0,164$; $X_{в1}=0,0149$; $X_{в2}=0,087$.

Распределение массовых концентраций водорода по длине канала в частном случае диффузии водорода из емкости ($X_1=1$) в чистый воздух ($X_2=0$) показано на рисунке 5.1.

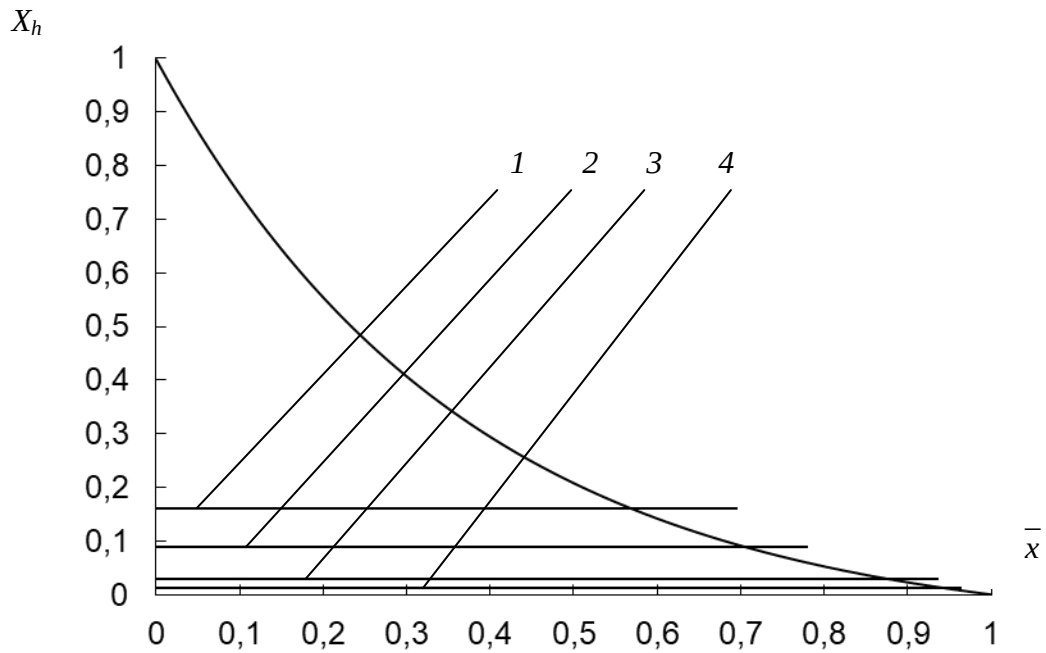


Рисунок 5.1 – Распределение массовой концентрации водорода по длине канала:

$$1 - X_h = X_{r2}; 2 - X_h = X_{b2}; 3 - X_h = X_{b1}; 4 - X_h = X_{r1}$$

Максимальные значения коэффициентов участия массы водорода, находящейся внутри канала, в горении и взрыве составляют:

$$Z_r = 0,2743; \quad Z_b = 0,1279.$$

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 [196] равного единице.

5.3 Ламинарная и турбулентная конвекция на горизонтальной пластине при натекании водорода

Рассматривается модельная задача распространения водорода в воздухе при ламинарной или турбулентной конвекции на горизонтальной поверхности, через которую натекает водород, при ее обдуве потоком воздуха. Рассмотрим диффузионный пограничный слой при конвекции на горизонтальной проницаемой пластине. Схема обтекания представлена на рисунке 5.2.

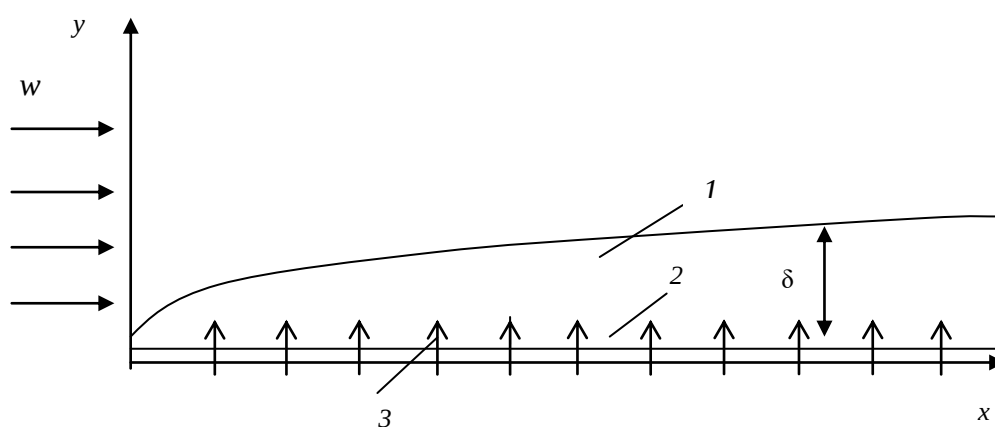


Рисунок 5.2 – Схема диффузионного пограничного слоя при конвекции на горизонтальной проницаемой пластине: 1 – пограничный слой; 2 – поверхность пластины, где $X_h=1$; 3 – направление движения водорода на стенке

Обозначения на рисунке 5.2 следующие: x – координата вдоль длины пластины, м; y – координата, перпендикулярная поверхности пластины, м; δ – толщина диффузионного пограничного слоя, м; w_0 – скорость набегающего потока воздуха, м/с.

В основной поток воздуха, параллельный поверхности пластины, вдувается через пористую поверхность водород с температурой, равной температуре торможения воздуха. Такой случай эквивалентен обдуванию вентилятором или ветром поверхности испаряющегося жидкого водорода или открытой поверхности емкости с газообразным водородом при равенстве давления внутри нее наружному.

Доли суммарного массового расхода водорода, проходящего через поперечное сечение пограничного слоя, которые приходятся на горючие и взрывоопасные водородно-воздушные смеси, соответственно равны:

$$Z_{\Gamma} = G_{\Gamma} / G_{\Sigma}; \quad (5.13)$$

$$Z_{\text{В}} = G_{\text{В}} / G_{\Sigma}, \quad (5.14)$$

где Z_{Γ} и $Z_{\text{В}}$ – доли суммарного массового расхода водорода, проходящего через поперечное сечение пограничного слоя, которые приходятся на горючие и взрывоопасные водородно-воздушные смеси, соответственно; G_{Σ} – суммарный массовый расход водорода, проходящий через поперечное сечение пограничного слоя, кг/с; G_{Γ} – суммарный массовый расход водорода, приходящийся на участок с его концентрацией $X_{\Gamma 1} \leq X_h \leq X_{\Gamma 2}$ (горючая смесь), кг/с; $G_{\text{В}}$ – суммарный массовый расход водорода, приходящийся на участок с его концентрацией $X_{\text{В} 1} \leq X_h \leq X_{\text{В} 2}$ (взрывоопасная смесь), кг/с.

Зная профили параметров газовой смеси по сечению пограничного слоя, можно записать:

$$G_{\Gamma} = B\delta \int_{\xi_{\Gamma 1}}^{\xi_{\Gamma 2}} \rho X_h w_x d\xi; \quad (5.15)$$

$$G_{\text{В}} = B\delta \int_{\xi_{\text{В} 1}}^{\xi_{\text{В} 2}} \rho X_h w_x d\xi; \quad (5.16)$$

$$G_{\Sigma} = B\delta \int_0^1 \rho X_h w_x d\xi, \quad (5.17)$$

где B – ширина пластины, м; w_x – локальная проекция скорости потока на ось x , м/с; $\xi=y/\delta$ – безразмерная координата вдоль оси y ; $\xi_{\Gamma 1}$, $\xi_{\Gamma 2}$, $\xi_{\text{В} 1}$, $\xi_{\text{В} 2}$ – безразмерные координаты, при которых массовые концентрации водорода равны нижнему и верхнему концентрационным пределам горения, а также нижнему и верхнему концентрационным пределам детонации, соответственно; ρ – плотность смеси водорода и воздуха, кг/м³.

Используя уравнение состояния смеси и выразив газовую постоянную смеси через массовые концентрации компонентов, уравнения (5.15)-(5.17) в случае постоянства температуры и давления смеси можно привести к виду:

$$G_r = A \int_{\xi_{r1}}^{\xi_{r2}} \frac{X_h}{(v_a - v_h)X_h + v_h} \omega d\xi; \quad (5.18)$$

$$G_b = A \int_{\xi_{b1}}^{\xi_{b2}} \frac{X_h}{(v_a - v_h)X_h + v_h} \omega d\xi; \quad (5.19)$$

$$G_\Sigma = A \int_0^1 \frac{X_h}{(v_a - v_h)X_h + v_h} \omega d\xi, \quad (5.20)$$

где $A = \frac{p v_a v_h B \delta w_o}{R_\mu T}$; R_μ – универсальная газовая постоянная, Дж/(Кмоль·К);

$\omega = w_x/w_o$ – безразмерная скорость; p – давление, Па; T – температура, К.

Найдем величины коэффициентов участия водорода в горении и взрыве по формулам (5.13) и (5.14).

В первом приближении рассмотрим эталонный диффузионный слой без учета влияния вдува на профили скоростей и плотностей по поперечному сечению пограничного слоя.

При использовании тройной аналогии Рейнольдса [72]:

$$\omega = \omega_o = \bar{X}_h = \frac{X_{h,w} - X_h}{X_{h,w} - X_{h,o}}, \quad (5.21)$$

где $\bar{X}_h$ – безразмерная концентрация водорода; $X_{h,w}$, $X_{h,o}$, X_h – массовые концентрации водорода на стенке, на внешней границе пограничного слоя и в текущем сечении пограничного слоя; ω_o – безразмерная скорость в эталонном пограничном слое.

В случае эталонного ламинарного пограничного слоя [72]:

$$\omega_o = \bar{X}_h = 2\xi - 2\xi^3 + \xi^4. \quad (5.22)$$

При турбулентном пограничном слое [72]:

$$\omega_o = \bar{X}_h = \xi^{1/7}. \quad (5.23)$$

Из уравнений (5.21)–(5.23) массовая концентрация водорода на расстоянии ξ от стенки равна:

– для ламинарного пограничного слоя:

$$X_h = X_{h,w} - (X_{h,w} - X_{h,o})(2\xi - 2\xi^3 + \xi^4); \quad (5.24)$$

– для турбулентного пограничного слоя:

$$X_h = X_{h,w} - \xi^{1/7}(X_{h,w} - X_{h,o}). \quad (5.25)$$

Подставляя выражение (5.24) в уравнения (5.18)–(5.20), получаем в случае ламинарного пограничного слоя:

$$G_r = A \int_{\xi_{r1}}^{\xi_{r2}} \frac{(X_{h,w} - (X_{h,w} - X_{h,o})(2\xi - 2\xi^3 + \xi^4))}{(v_a - v_h)(X_{h,w} - (X_{h,w} - X_{h,o})(2\xi - 2\xi^3 + \xi^4)) + v_h} (2\xi - 2\xi^3 + \xi^4) d\xi; \quad (5.26)$$

$$G_b = A \int_{\xi_{b1}}^{\xi_{b2}} \frac{(X_{h,w} - (X_{h,w} - X_{h,o})(2\xi - 2\xi^3 + \xi^4))}{(v_a - v_h)(X_{h,w} - (X_{h,w} - X_{h,o})(2\xi - 2\xi^3 + \xi^4)) + v_h} (2\xi - 2\xi^3 + \xi^4) d\xi; \quad (5.27)$$

$$G_\Sigma = A \int_0^1 \frac{(X_{h,w} - (X_{h,w} - X_{h,o})(2\xi - 2\xi^3 + \xi^4))}{(v_a - v_h)(X_{h,w} - (X_{h,w} - X_{h,o})(2\xi - 2\xi^3 + \xi^4)) + v_h} (2\xi - 2\xi^3 + \xi^4) d\xi. \quad (5.28)$$

Подставляя выражение (5.25) в уравнения (5.18)–(5.20), получаем в случае турбулентного пограничного слоя:

$$G_r = A \int_{\xi_{r1}}^{\xi_{r2}} \frac{X_{h,w} - \xi^{1/7}(X_{h,w} - X_{h,o})}{(v_a - v_h)X_{h,w} - \xi^{1/7}(X_{h,w} - X_{h,o}) + v_h} \xi^{1/7} d\xi; \quad (5.29)$$

$$G_b = A \int_{\xi_{b1}}^{\xi_{b2}} \frac{X_{h,w} - \xi^{1/7}(X_{h,w} - X_{h,o})}{(v_a - v_h)X_{h,w} - \xi^{1/7}(X_{h,w} - X_{h,o}) + v_h} \xi^{1/7} d\xi; \quad (5.30)$$

$$G_\Sigma = A \int_0^1 \frac{X_{h,w} - \xi^{1/7}(X_{h,w} - X_{h,o})}{(v_a - v_h)X_{h,w} - \xi^{1/7}(X_{h,w} - X_{h,o}) + v_h} \xi^{1/7} d\xi. \quad (5.31)$$

Интегралы (5.26)-(5.31) решены численным способом по формуле трапеций [64].

Используя выражения (5.26)-(5.31), можно найти коэффициенты участия массы водорода, в горении и взрыве (формулы (5.13) и (5.14)).

Зависимости концентрации водорода по толщине диффузионного пограничного слоя представлены на рисунке 5.3.

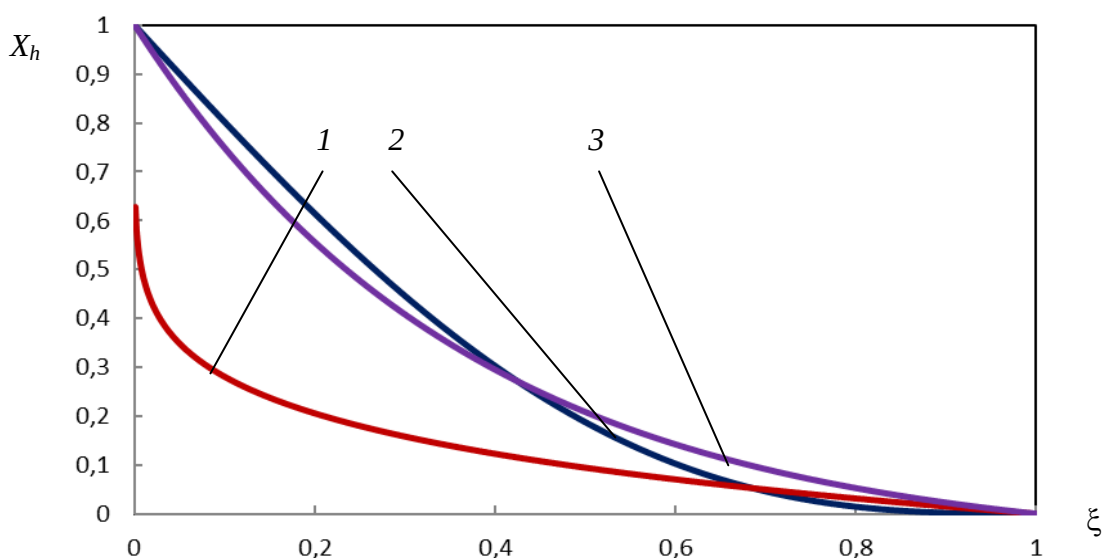


Рисунок 5.3 – Профиль массовых концентраций водорода по толщине пограничного слоя: 1 - турбулентный режим; 2 – ламинарный режим; 3 – стационарная диффузия

Доли суммарного количества массового расхода водорода, проходящего через поперечное сечение пограничного слоя, которые приходятся на горючие и взрывоопасные водородно-воздушные смеси равны:

- ламинарный пограничный слой: $Z_T=0,37$; $Z_B=0,18$;
- турбулентный пограничный слой: $Z_T=0,63$; $Z_B=0,31$.

При стационарной концентрационной диффузии водорода в воздухе соответствующие доли равны: $Z_T=0,27$; $Z_B=0,13$.

Таким образом, при конвекции коэффициенты участи водорода в горении и взрыве существенно выше, чем только при диффузии.

Аналитическое решение модельной задачи распространения водорода в пограничном слое при конвекции на открытой поверхности испаряющегося

жидкого водорода или емкости с газообразным водородом показывает, что:

- при ламинарном режиме обтекания 37 % всей массы водорода образуют горючую водородно-воздушную смесь и 18 % - взрывоопасную смесь;
- при турбулентном режиме 63 % всей массы водорода образуют горючую водородно-воздушную смесь и 31 % - взрывоопасную смесь.

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. Для более точной оценки коэффициента участия водорода во взрыве необходимо учитывать трехмерную нестационарную конвекцию, возникающую при натекании водорода в помещение, например, по методу расчета, предложенному в [254].

5.4 Конвективная колонка, образующаяся над источником натекания водорода в помещение

Прогнозированию динамики образования и развития локальных пожаро- и взрывоопасных зон в водородно-воздушной смеси, образующейся при натекании водорода в помещение, посвящено большое количество работ [39, 218, 245, 254, 256, 263]. Однако из-за сложности протекающих турбулентных процессов тепломассообмена задача до конца не решена.

Рассматривается модельная задача распространения водорода в области конвективной колонки, образующейся над источником его натекания в помещение.

В отличие от работы [218], где в уравнении изменения расхода водородно-воздушной смеси по высоте конвективной колонки расход воздуха, вовлекаемого в колонку, определяется с использованием эмпирического коэффициента подмешивания, в вышеуказанном уравнении в данной работе задается угол полураскрытия колонки.

В работе [39] также рассматривается аналогичная задача, но не учитывается подсос воздуха в колонку.

Условная схема газодинамической картины при натекании водорода в помещение представлена на рисунке 5.4.

Обозначения на рисунке 5.4 следующие: z – координата вдоль высоты конвективной колонки, отсчитываемая от уровня выходного сечения отверстия, через которое водород поступает в помещение, м; γ – угол полураскрытия конвективной колонки, град; G_h – массовый расход водорода, поступающего через отверстие в помещение, кг/с; G_a – массовый расход воздуха, подмешивающегося в конвективную колонку, кг/с; d – диаметр отверстия, через которое водород поступает в помещение, м; h_r и h_b – длина пожароопасного ($X_{r1} \leq X_h \leq X_{r2}$) и взрывоопасного ($X_{b1} \leq X_h \leq X_{b2}$) участков конвективной колонки, соответственно; X_h – средняя по поперечному сечению колонки на высоте z массовая концентрация водорода; X_{r1} и X_{r2} – соответственно нижний и верхний концентрационные пределы горения; X_{b1} и X_{b2} – нижний и верхний концентрационные пределы детонации.

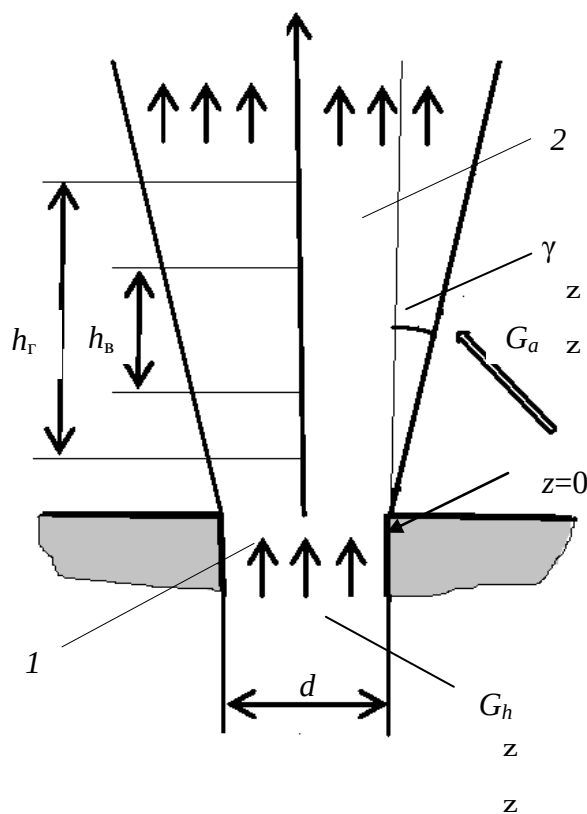


Рисунок 5.4 – Условная схема газодинамической картины при натекании водорода в помещение: 1 – отверстие; 2 – конвективная колонка

Через отверстие (1) происходит поступление водорода с расходом G_h из емкости в помещение. Под действием подъемных сил и перепада давлений в емкости с водородом и помещении над источником натекания образуется конвективная колонка (2), в которую подмешивается окружающий воздух с переменным по высоте z расходом G_a .

Рассматриваем течение водородно-воздушной смеси внутри конвективной колонки как стационарное, одномерное и изотермическое. Принимаем, что в каждом сечении колонки параметры газовой смеси задаются осредненными по сечению значениями.

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

$$G = G_h + G_a = \rho_m w_z F, \quad (5.32)$$

где ρ_m – средняя плотность водородно-воздушной смеси на высоте z , кг/м³; w_z – проекция средней скорости на ось z на высоте z , м/с; F – площадь поперечного сечения колонки на высоте z , м².

Массовый расход G можно также представить в виде:

$$G = G_h / X_h. \quad (5.33)$$

Площадь поперечного сечения колонки в форме круга на высоте z составляет:

$$F = \pi(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)^2 \quad (5.34)$$

Уравнение движения в одномерном стационарном случае при переменной площади поперечного сечения колонки имеет вид [220]:

$$\frac{d}{dz} (\rho_m w_z^2 F + pF) = p \frac{dF}{dz}, \quad (5.35)$$

где p – давление воздуха на высоте z , Па.

Градиент давления по высоте равен:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho_a g, \quad (5.36)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_a – плотность воздуха, кг/м³.

Используя уравнение состояния водородно-воздушной смеси [72] и выразив газовую постоянную смеси через массовые концентрации компонентов [72], дифференциальное уравнение (5.35) в случае постоянства температуры и давления смеси с использованием уравнений (5.32)-(5.34) и (5.36) можно привести к виду:

$$\frac{dX_h}{dz} = \left[\frac{B}{X_h(\mu_a - \mu_h) + \mu_h} - \rho_a \right] \frac{g(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)^4}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]} - \frac{2 \operatorname{tg} \gamma [(\mu_a - \mu_h)X_h - \mu_h]}{(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]} + \frac{2p_o(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)^3 \operatorname{tg} \gamma \cdot X_h^2}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]}, \quad (5.37)$$

где $A = \frac{G_h^2}{\pi^2 B}$ – размерный параметр, $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль} / \text{с}^2$; $B = \frac{p_o \mu_h \mu_a}{R_\mu T}$ – 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_o – давление воздуха на высоте $z = 0$, Па ; R_μ – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж} / (\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

Дифференциальное уравнение (5.37) решено численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности [64].

Для определения заранее неизвестного угла полураскрытия конвективной колонки, входящего в дифференциальное уравнение (5.37), проведены тестовые расчеты.

Угол γ подбирался таким образом, чтобы при решении уравнения (5.37) начало пожароопасного участка конвективной колонки соответствовало экспериментальным данным [218].

При этом, в соответствии с работой [118, 261] (переводя объемные доли водорода в массовые): $X_{г1}=0,0029$, $X_{г2}=0,164$, $X_{в1}=0,0149$, $X_{в2}=0,09$.

На рисунке 5.5 представлена зависимость угла полураскрытия конвективной колонки от числа Фруда ($\text{Fr} = \frac{w_o^2}{gd}$, где w_o – вертикальная проекция скорости водорода на срезе отверстия (1) (рисунке 5.4), $\text{м} / \text{с}$), представленного в логарифмической координате.

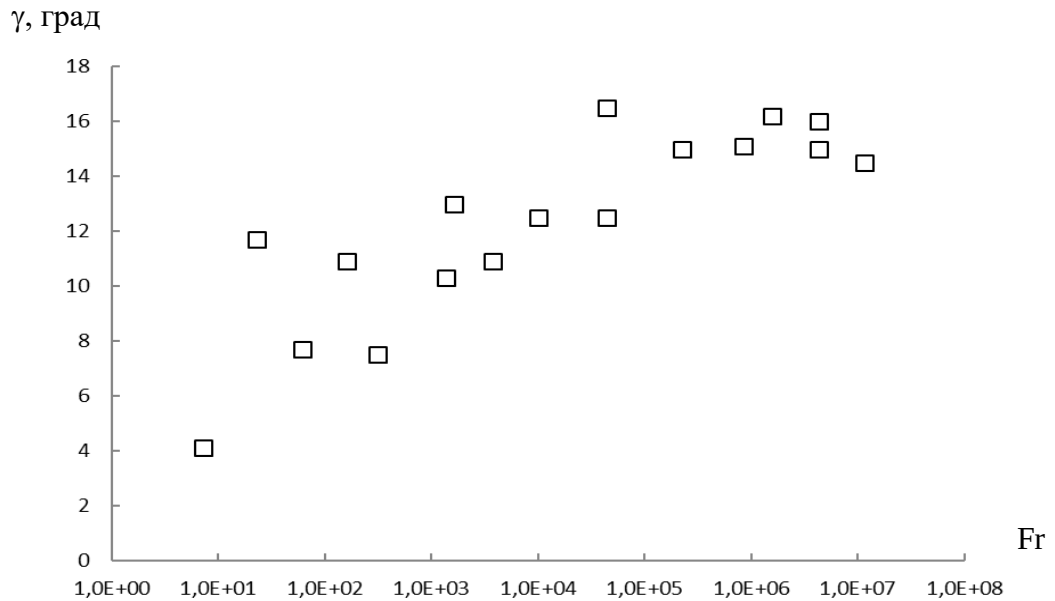


Рисунок 5.5 – Зависимость угла полураскрытия конвективной колонки от числа Фруда

Из рисунка 5.5 видно, что γ находится в пределах 10-17 град., что соответствует экспериментальным данным по углам полураскрытия конвективной колонки при пожаре [40] и распространении легкого газа неограниченном пространстве [23].

При решении уравнения (5.37) использовались значения угла полураскрытия конвективной колонки, полученные из тестовых расчетов (рисунок 5.5).

На рисунках 5.6-5.9 представлены зависимости безразмерных высот поперечных сечений конвективной колонки, ограничивающих пожароопасные и взрывоопасные участки водородно-воздушной смеси, от числа Рейнольдса

($Re = \frac{\rho_h w_0 d}{\mu_h}$ – число Рейнольдса; ρ_h – плотность водорода на срезе отверстия;

μ_h – коэффициент кинематической вязкости водорода, кг/(м·с)).

Зависимости безразмерных длин пожароопасных и взрывоопасных участков водородно-воздушной смеси, находящейся внутри конвективной колонки, приведены на рисунке 5.10.

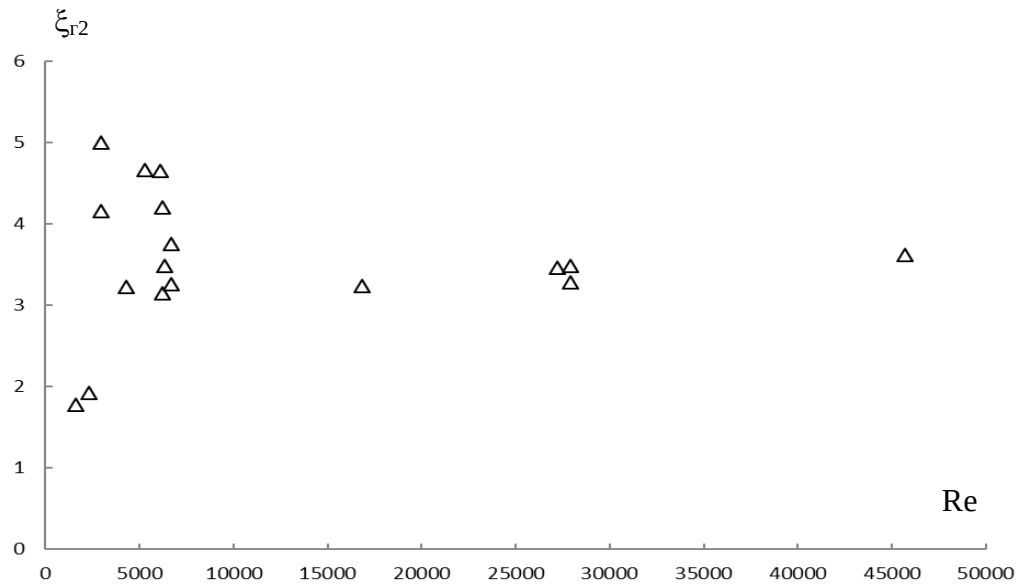


Рисунок 5.6 – Зависимость безразмерной координаты ξ_{r2} до поперечного сечения колонки, в котором средняя массовая концентрация водорода равна верхнему концентрационному пределу горения, от числа Рейнольдса; $\xi_{r2}=z_{r2}/d$; z_{r2} – координата по оси z до поперечного сечения колонки, где $X_h=X_{r2}$

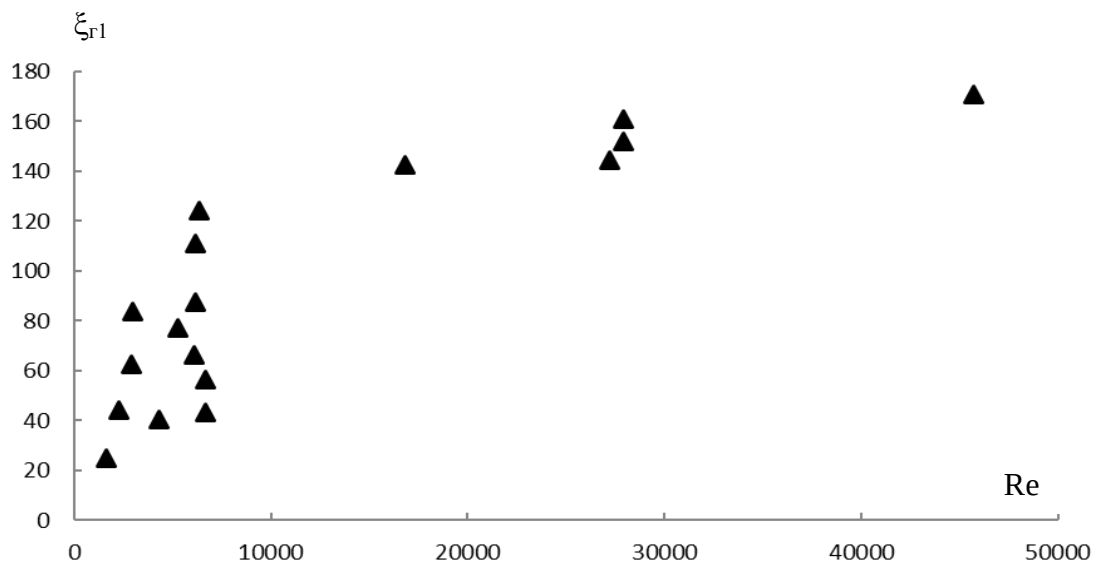


Рисунок 5.7 – Зависимость безразмерной координаты ξ_{r1} до поперечного сечения колонки, в котором средняя массовая концентрация водорода равна нижнему концентрационному пределу горения, от числа Рейнольдса; $\xi_{r1}=z_{r1}/d$; z_{r1} – координата по оси z до поперечного сечения колонки, где $X_h=X_{r1}$

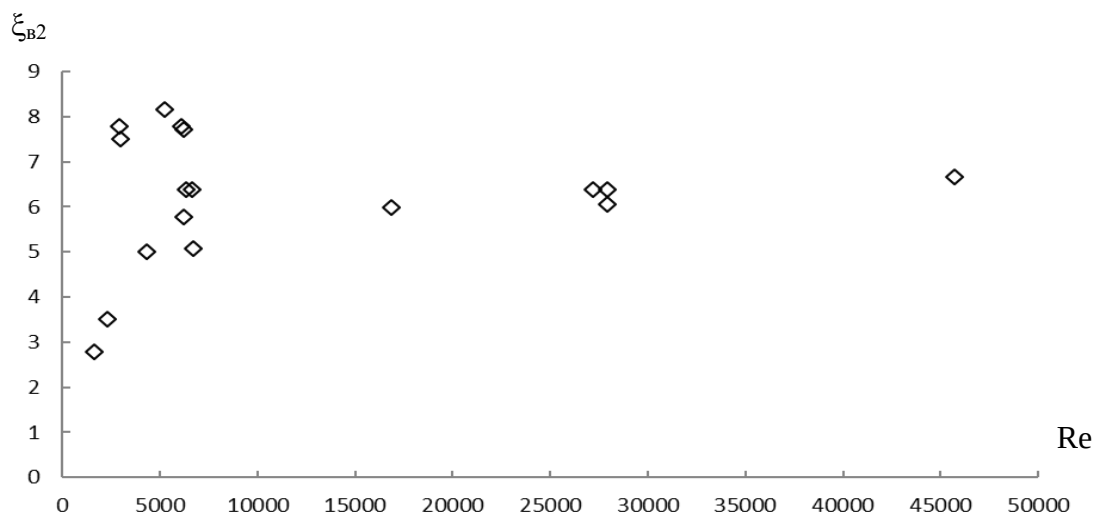


Рисунок 5.8 – Зависимость безразмерной координаты ξ_{B2} до поперечного сечения колонки, в котором средняя массовая концентрация водорода равна верхнему концентрационному пределу детонации, от числа Рейнольдса; $\xi_{B2}=z_{B2}/d$; z_{B2} – координата по оси z до поперечного сечения колонки, где $X_h=X_{B2}$

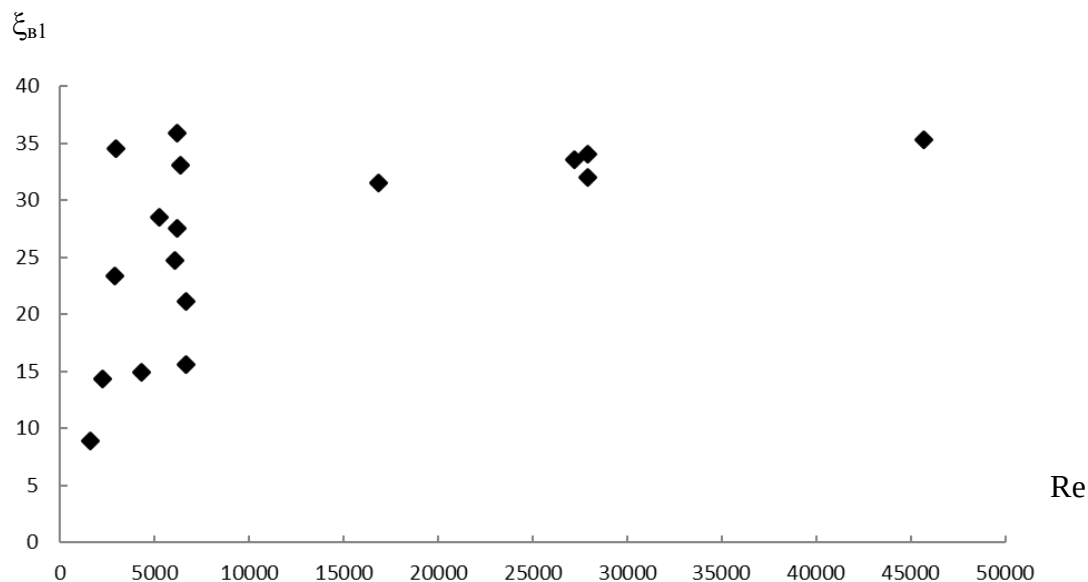


Рисунок 5.9 – Зависимость безразмерной координаты ξ_{B1} до поперечного сечения колонки, в котором средняя массовая концентрация водорода равна нижнему концентрационному пределу детонации, от числа Рейнольдса; $\xi_{B1}=z_{B1}/d$; z_{B1} – координата по оси z до поперечного сечения колонки, где $X_h=X_{B1}$

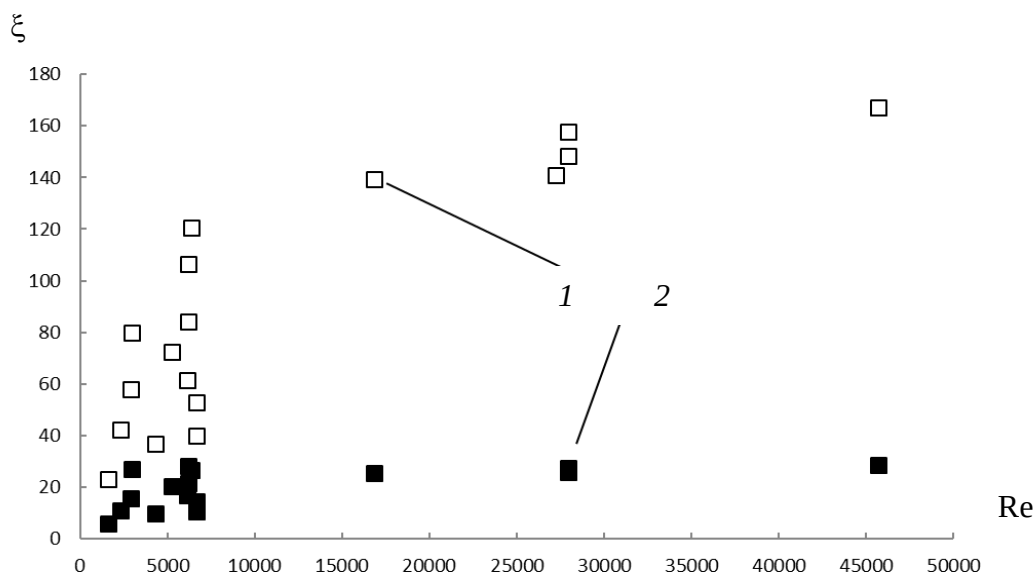


Рисунок 5.10 – Зависимости безразмерных длин пожароопасных (1) и взрывоопасных (2) участков водородно-воздушной смеси, находящейся внутри конвективной колонки:

$$1 - \xi = h_r/d; \quad 2 - \xi = h_v/d$$

Из рисунков 5.6-5.10 видно:

– при ламинарном ($Re < 2300$) и переходном ($2300 < Re < 10^4$) режимах истечения струи водорода из отверстия безразмерные координаты по высоте пожароопасных и взрывоопасных участков конвективной колонки существенно зависят от числа Рейнольдса;

– при турбулентном режиме истечения ($Re > 10^4$) 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 – $\xi_v = h_v/d = 25,1 \div 28,7$.

Для более точной оценки распространения водорода в конвективной колонке, образующейся над источником его натекания в помещение необходимо учитывать трехмерную нестационарную конвекцию, возникающую при испарении водорода в помещение, например, по методу расчета, предложенному в [241, 254].

5.5 Особенности образования пожаро- и взрывоопасных зон при натекании газообразного водорода в нижнюю часть условно герметичного помещения

Динамика образования и развития локальных пожаро- и взрывоопасных зон в водородно-воздушной смеси, образующейся при натекании водорода в помещение, исследована в большом количестве работ [39, 219, 256, 263]. Образование и пожаро- и взрывоопасных зон на производственных объектах исследована в работе [116]. Однако из-за сложности протекающих турбулентных процессов тепломассообмена задача до конца не решена.

В нормативной литературе коэффициенты участия водорода в горении и взрыве принимаются равными $Z_h=1$ (таблица А.1 [196]). Однако результаты численных экспериментов [254] и расчеты с использованием аналитических решений ряда модельных задач натекания водорода в помещение [132, 137, 148] показывают, что вышеуказанные коэффициенты могут быть существенно меньше единицы.

Закономерности образования взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в верхнюю часть помещения большого объема изучены достаточно широко [48]. Характерное время выравнивания концентраций водорода по всему объему помещения при этом составляет порядка нескольких часов [48]. При натекании водорода в нижнюю часть помещения это время составляет порядка нескольких минут [48, 254]. Поэтому актуальной задачей является изучение закономерностей образования локальных взрыво- и пожароопасных концентраций при натекании газа вблизи пола помещения.

В параграфе представлены результаты численного исследования особенностей образования пожаровзрывоопасных зон при натекании газообразного водорода в условно герметичное помещение в трехмерной нестационарной постановке задачи.

Обобщенное трехмерное нестационарное дифференциальное уравнение

законов сохранения массы, импульса и энергии имеет вид [113]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \operatorname{div}(\rho w \Phi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \Phi) + S, \quad (5.38)$$

где τ – время, с; ρ – плотность водородно-воздушной смеси, кг/м³; w – скорость газовой смеси, м/с; Φ – зависящая переменная (проекция скорости на координатные оси, массовые концентрации компонентов газовой смеси O₂, H₂, N₂, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации); Γ – коэффициент диффузии для Φ ; S – источниковый член.

Начальные условия к уравнению (5.38) принимаются следующими:

- температуры газовой среды помещения, водорода, ограждающих конструкций помещения и наружного воздуха равны 293 К;
- давления в газовой среде помещения и наружном воздухе на уровне пола равны 10⁵ Па;
- массовые концентрации: кислорода - $X_{O_2}=0,23$, азота - $X_{N_2}=0,77$, остальных газов - равны нулю.

Граничные условия к уравнению (5.38) на поверхностях ограждающих конструкций: условие «прилипания» [72] для уравнения неразрывности.

Уравнение (5.38) решено численно методом контрольных объемов [113] с использованием компьютерной программы [131].

Дифференциальное уравнение для расчета распределения массовой концентрации водорода по высоте стационарной конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода в помещение, имеет вид [148]:

$$\begin{aligned} \frac{dX_h}{dz} = & \left[\frac{B}{X_h(\mu_a - \mu_h) + \mu_h} - \rho_a \right] \frac{g(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)^4}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]} - \\ & - \frac{2 \operatorname{tg} \gamma [(\mu_a - \mu_h)X_h - \mu_h]}{(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]} + \frac{2p_o(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)^3 \operatorname{tg} \gamma \cdot X_h^2}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]}, \quad (5.39) \end{aligned}$$

где X_h – средняя по поперечному сечению колонки на высоте z массовая концентрация водорода; z – координата вдоль высоты конвективной колонки,

отсчитываемая от уровня выходного сечения отверстия, через которое водород поступает в помещение, м; γ – угол полураскрытия конвективной колонки, град;
 d – эквивалентный диаметр отверстия, через которое водород поступает в помещение, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $A = \frac{G_h^2}{\pi^2 B}$ – размерный параметр, м³·кмоль/с²; $B = \frac{p_o \mu_h \mu_a}{R_\mu T}$ – размерный параметр, кг²/(м³·кмоль);

G_h – массовый расход водорода, поступающего через отверстие в помещение, кг/с; μ_a , μ_h – молекулярные массы воздуха и водорода, соответственно, кг/кмоль;
 T – температура воздуха и водорода, К; p_o – давление воздуха на высоте $z=0$, Па;
 R_μ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); ρ_a – плотность воздуха, кг/м³.

Рассматривается условно герметичное помещение с размерами 6×6×6 м ($V=218$ м³). Натекание водорода происходит на высоте 0,5 м над геометрическим центром пола помещения.

Массовый расход водорода изменяется в пределах 0,000665÷0,00665 кг/с как в работе [106, 138], посвященной изучению закономерностей образования пожаро- и взрывоопасных зон по высоте стационарной конвективной колонки с использованием дифференциального уравнения (5.39).

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 5.11.

Координаты x и z на рисунке 5.11 направлены соответственно вдоль длины и высоты помещения. Выделенными линиями обозначены линии равной массовой концентрации $X_h=0,0029$ (нижний массовый концентрационный предел горения [118]).

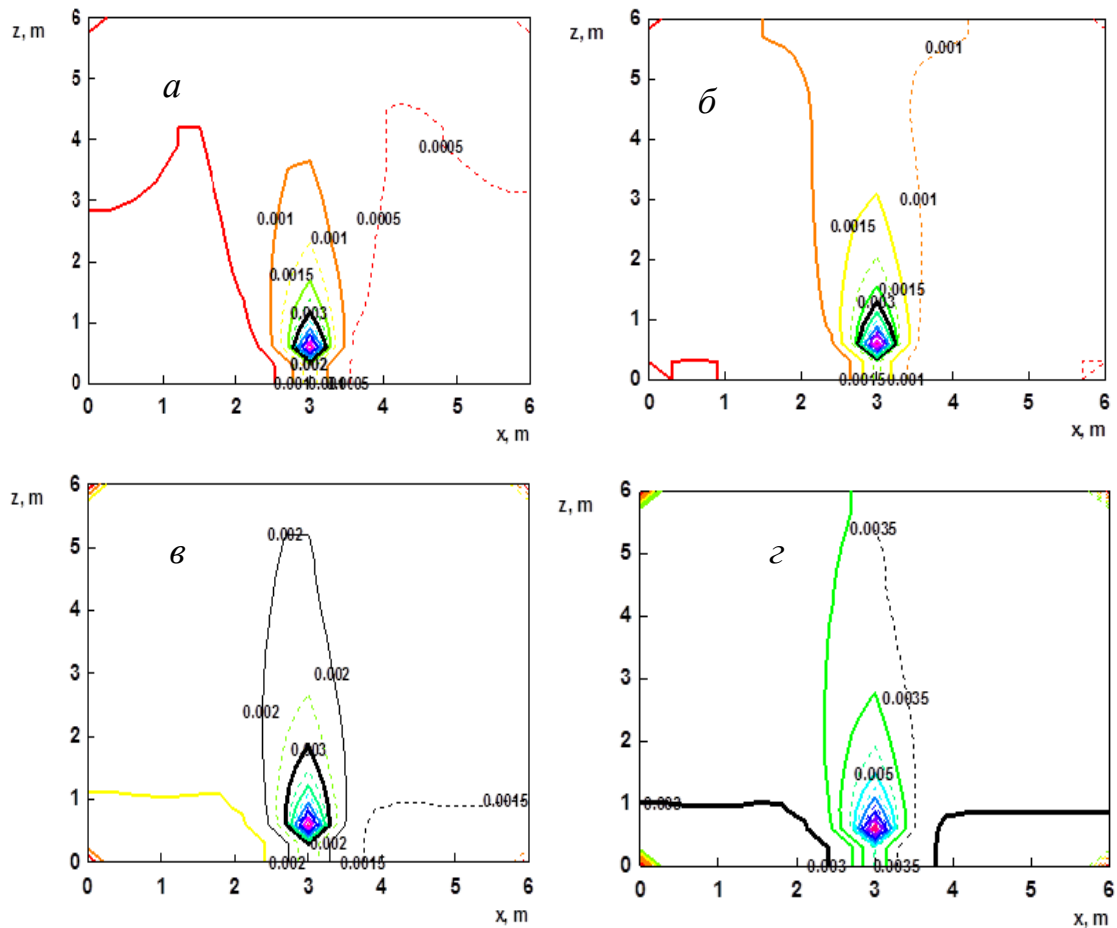


Рисунок 5.11– Поля массовых концентраций водорода в вертикальной плоскости, проходящей через центр пола, через 120 (а), 300 (б), 600 (в) и 1140 с (г) от начала натекания водорода через отверстие с $d=0,06$ м при $G_h=0,000665$ кг/с

Зависимости высоты пожароопасной зоны (где массовая концентрация водорода равна нижнему концентрационному пределу его горения в воздухе $X_h=0,0029$), образующейся внутри конвективной колонки, от времени с начала натекания водорода через отверстие с $d=0,06$ м при $G_h=0,000665$ кг/с приведены на рисунке 5.12.

Из рисунков 5.11 и 5.12 видно, 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 практически не меняет свою высоту. При этом весь остальной объем помещения не представляет пожаро- и взрывоопасности.

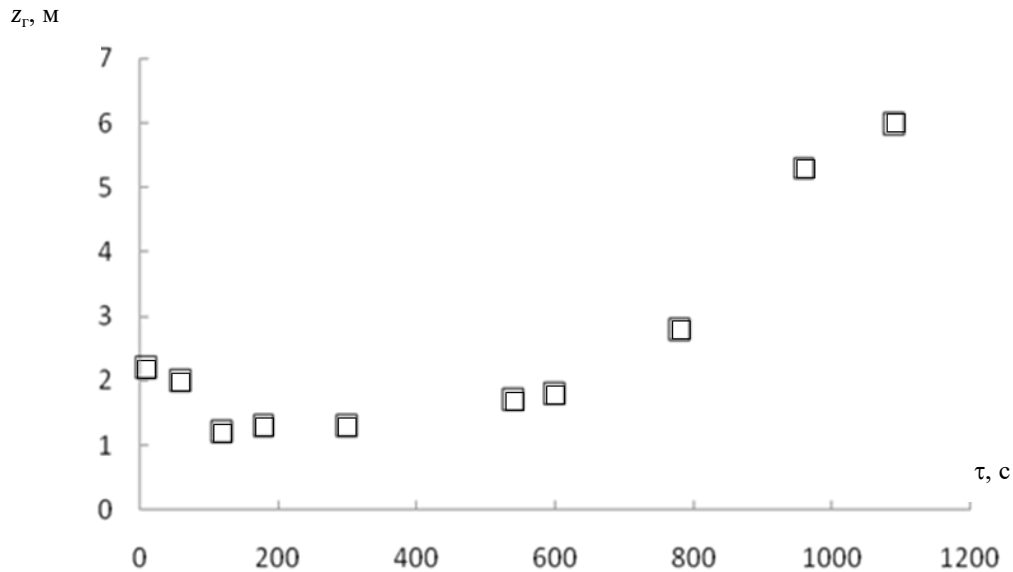


Рисунок 5.12 – Зависимости высоты пожароопасной зоны, образующейся внутри конвективной колонки, от времени с начала натекания водорода через отверстие с $d=0,06$ м при $G_h=0,000665$ кг/с; z_T – координата по оси z до поперечного сечения колонки, где $X_h=0,0029$

Анализ результатов численных экспериментов показал, что вышеуказанная зона является «квазистационарной» только при небольших расходах натекающего водорода $G_h < 0,0046$ кг/с.

При больших расходах высоты пожаро- и взрывоопасных зон быстро достигают перекрытия помещения и помещение в течение небольшого промежутка времени (порядка 1-2 мин) заполняется пожаро- и взрывоопасной водородно-воздушной смесью, что согласуется с результатами работ [48, 241, 254].

Зависимости безразмерной высоты ξ пожароопасной зоны от числа Рейнольдса, представлены на рисунке 5.13.

Из рисунка 5.13 видно, что результаты расчета ξ в трехмерной нестационарной постановке задачи (уравнение (5.38), «квазистационарная» колонка) с достаточной точностью для инженерного метода расчета (погрешность менее 10 %) совпадают с величиной ξ , полученной с использованием одномерного стационарного уравнения (5.39) (стационарная колонка).

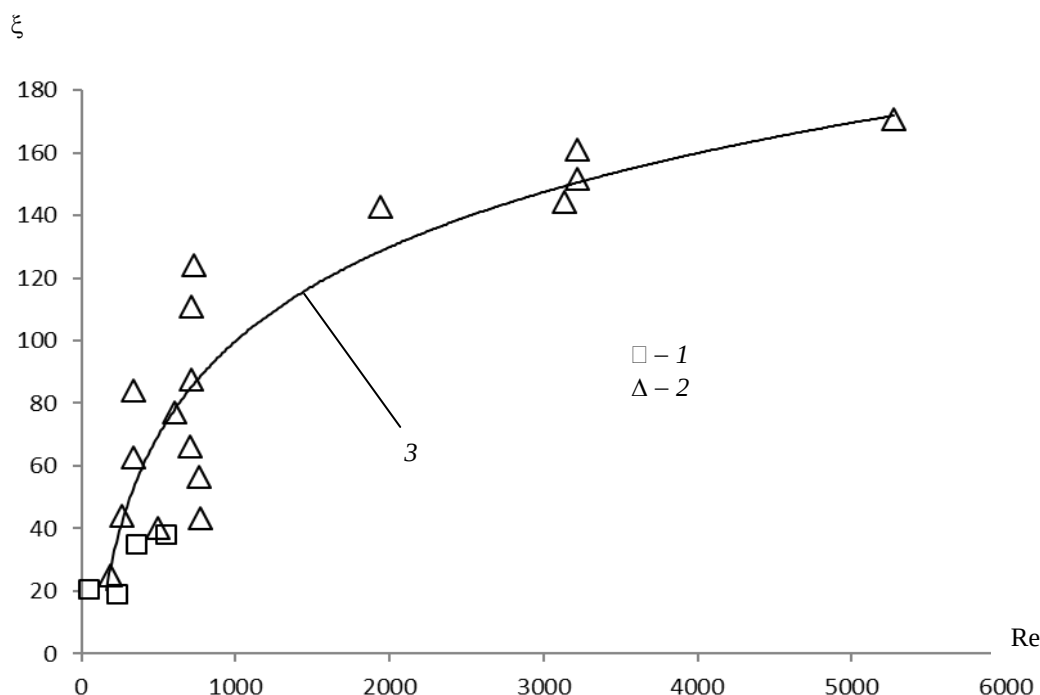


Рисунок 5.13 – Зависимость безразмерной высоты ξ до поперечного сечения колонки, в котором средняя массовая концентрация водорода равна нижнему концентрационному пределу горения, от числа Рейнольдса: 1 – уравнение (5.38); 2 – уравнение (5.39);

3 – $\xi = 43,31 \ln(Re) - 199,34$ (аппроксимация результатов расчетов с достоверностью аппроксимации 0,79); $\xi = z_r/d$; $Re = \frac{\rho_h w_o d}{\mu_h}$ – число Рейнольдса; ρ_h – плотность водорода на срезе отверстия, кг/м³; μ_h – коэффициент кинематической вязкости водорода, кг/(м·с)

Таким образом, существует критическое значение массового расхода газообразного водорода, натекающего в нижнюю часть помещения, при превышении которого резко увеличивается опасность возникновения горения и взрыва во всем объеме помещения.

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 высота вышеуказанных зон слабо меняется, т.е. эти зоны являются «квазистационарными».

Для расчета высот «квазистационарных» пожаро- и взрывоопасных зон можно использовать одномерный подход к расчету концентраций водорода по высоте стационарной конвективной колонки (уравнение (5.39)).

5.6 Математическое моделирование натекания водорода в гермзоне реакторного здания АЭС с ВВЭР-1200

Возможность горения водородно-воздушных смесей, угрожающих жизни людей, целостности защитной оболочки или работоспособности критичного для безопасности оборудования на АЭС с ВВЭР изложена, например, в работах и нормативных документах [12, 20, 26, 30, 31, 165]. В работе А. А. Desoky [238] доказано, что при ламинарном горении соотношения между коэффициентом сжигания массы и коэффициентом приращения давления могут быть преобразованы в кривую независимо от различий в топливе и начальных давлениях.

При нормальной эксплуатации водород всегда присутствует в теплоносителе первого контура реакторной установки вследствие радиолиза, термолиза и других физико-химических процессов. Поэтому проблема обоснования водородной взрывобезопасности АЭС с ВВЭР является актуальной как для аварийных ситуаций, так и для условий нормальной эксплуатации. Места выделения водорода из теплоносителя первого контура РУ ВВЭР и случаи с взрывом водорода в оборудовании описаны в [12]. В состоянии «останов для ремонта» и в переходных режимах выделение газообразного водорода происходит, в том числе, и в полостях оборудования реакторной установки [12].

В большинстве работ рассматривается только горение и детонация водородно-паровоздушной смеси [63, 231, 261]. В ИБРАЭ РАН [12, 20] проведены экспериментальные и теоретические исследования физических аспектов процессов горения и детонации, исследования процессов стратификации и горения водородо-паровоздушных смесей в присутствии мелкодисперсных капель

воды. В результате этих исследований проведено трехмерное компьютерное моделирование процесса стратификации водородо-паровоздушной смеси под защитной оболочкой АЭС.

Расчеты в работе [12] выполнены для горения и детонации водорода в гермзоне реакторного здания. В то время как натекание водорода, образовавшегося при радиолизе воды, используемой в технологическом процессе, и возможность образования взрывопожароопасных водородно-воздушных смесей до настоящего времени исследовалось только в небольшом количестве работ, например, в [136, 254].

На АЭС непрерывный контроль концентрации водорода во время проектных и запроектных аварий в возможных местах его скопления с представлением информации на блочный пульт управления (БПУ) и резервный пульт управления (РПУ) осуществляет система контроля концентрации водорода, включающая концентрационные датчики водорода с пределом чувствительности 2% об. Расположение и количество концентрационных датчиков принимается в зависимости от мест наибольшего скопления водорода в случае его натекания в гермзоне.

Закономерности образования взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в верхнюю часть помещения большого объема изучены достаточно широко [48]. Характерное время выравнивания концентраций водорода по всему объему помещения при этом составляет порядка нескольких часов. Однако динамика натекания в начальные моменты времени процесса недостаточно изучена. Поэтому определение закономерностей образования локальных взрыво- и пожароопасных водородно-воздушных смесей при натекании водорода в нижнюю часть подкупольного пространства реакторного здания является актуальным.

Целью параграфа является теоретическое исследование образования локальных пожаровзрывоопасных зон водородно-воздушной смеси, образующейся при натекании водорода в гермзоне реакторного здания, для

обоснования параметров концентрационных датчиков системы контроля концентрации водорода. Комплексный подход к определению параметров пожаровзрывоопасных зон при натекании водорода в реакторном здании АЭС с ВВЭР приведен автором в работе [73]

Обобщенное трехмерное нестационарное дифференциальное уравнение законов сохранения массы, импульса и энергии имеет вид [113]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \text{div}(\rho w \Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi) + S, \quad (5.40)$$

где τ – время, с; ρ – плотность водородно-воздушной смеси, кг/м³; w – скорость водородно-воздушной смеси, м/с; Φ – зависимая переменная (проекция скорости на координатные оси, массовые концентрации компонентов газовой смеси O₂, H₂, N₂, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации); Γ – коэффициент диффузии для Φ ; S – источниковый член.

Начальные условия к уравнению (5.40) принимаются следующими:

- температуры газовой среды помещения, водорода, ограждающих конструкций помещения и наружного воздуха равны 293 К;
- давления в газовой среде помещения и наружном воздухе на уровне нижней отметки гермзоны равны 10⁵ Па;
- массовые концентрации: кислорода - $X_{\text{O}_2}=0,23$, азота - $X_{\text{N}_2}=0,77$, остальных газов - равны нулю.

Граничные условия к уравнению (5.40) на поверхностях ограждающих конструкций: условие «прилипания» [72] для уравнения неразрывности.

Уравнение (5.40) решено численно методом контрольных объемов [113] с использованием компьютерной программы [131].

Распределения концентрации водорода в помещении, полученные с помощью уравнения (5.40), протестированы в работе [148] на экспериментальных данных [218]. Получено удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом.

Из-за больших размеров гермзоны и, соответственно, больших размеров

конечно-разностной сетки расчет с использованием полевой модели требует значительных затрат машинного времени (порядка 180 часов).

Поэтому предложена более простая зонная модель, в которой помещение подобно зонной модели для расчета динамики пожара [136; 148] разбивается на 3 зоны: зона конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода, зона припотолочного слоя, содержащая водородно-воздушную смесь, и зона чистого воздуха.

Дифференциальное уравнение для расчета распределения массовой концентрации водорода по высоте конвективной колонки, образующейся над источником натекания водорода в помещение, имеет вид [148]:

$$\frac{dX_h}{dz} = \left[\frac{B}{X_h(\mu_a - \mu_h) + \mu_h} - \rho_a \right] \frac{g(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)^4}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]} - \frac{2 \operatorname{tg} \gamma [(\mu_a - \mu_h)X_h - \mu_h]}{(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]} + \frac{2p_o(d/2 + z \operatorname{tg} \gamma)^3 \operatorname{tg} \gamma \cdot X_h^2}{A[\mu_a - \mu_h + 2\mu_h / X_h]}, \quad (5.41)$$

где X_h – средняя по поперечному сечению колонки на высоте z массовая концентрация водорода; z – координата вдоль высоты конвективной колонки, отсчитываемая от уровня выходного сечения отверстия, через которое водород поступает в помещение, м; γ – угол полуоткрытия конвективной колонки, град;

d – эквивалентный диаметр отверстия, через которое водород поступает в помещение, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; $A = \frac{G_h^2}{\pi^2 B}$ – размерный

параметр, м³·кмоль/с²; $B = \frac{p_o \mu_h \mu_a}{R_\mu T}$ – размерный параметр, кг²/(м³·кмоль);

G_h – массовый расход водорода, поступающего через отверстие в помещение, кг/с; μ_a, μ_h – молекулярные массы воздуха и водорода, соответственно, кг/кмоль; T – температура в помещении, К; p_o – давление воздуха на высоте $z = 0$, Па;

R_μ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); ρ_a – плотность воздуха, кг/м³.

Распределения концентрации водорода по высоте конвективной колонки, полученные с помощью уравнения (5.41), протестированы в работе [148] на экспериментальных данных [218]. Получено удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом.

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

$$\frac{d(\rho_c V)}{dt} = G_k, \quad (5.42)$$

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:

$$G = G_h + G_a, \quad (5.43)$$

где G_a – массовый расход воздуха, подмешивающегося в конвективную колонку до высоты z , кг/с.

Массовый расход G можно также представить в виде:

$$G = G_h / X_h, \quad (5.44)$$

где X_h находится из уравнения (5.41).

Объем зоны припотолочного слоя равен:

$$V = \int_{z_k}^H F dz, \quad (5.45)$$

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, м².

Интегро-дифференциальное уравнение для определения скорости опускания нижней границы припотолочного слоя после преобразования

уравнения (5.42) с учетом уравнений (5.43), (5.44) и (5.45) имеет вид:

$$\frac{d}{d\tau} \left(\rho \int_{z_k}^H F dz \right) = G_k. \quad (5.46)$$

Высота нижней границы припотолочного слоя в различные моменты времени определяется из численного решения уравнения (5.41) методом итераций с помощью разработанной компьютерной программы на языке программирования Fortran.

Компьютерные программы для решения полевой модели (уравнение (5.40)) и расчета распределения массовой концентрации водорода по высоте конвективной колонки (уравнение (5.41)) верифицированы в работе [148] на экспериментальных данных [218].

Модельная задача решена для случая натекания водорода в подкупольное пространство гермзоны реакторного здания АЭС на отметке +26,300 м из-под крышки реактора в соответствии с данными [165].

Внешний вид подкупольного пространства гермзоны АЭС с ВВЭР и место натекания водорода представлены на рисунке 5.14.

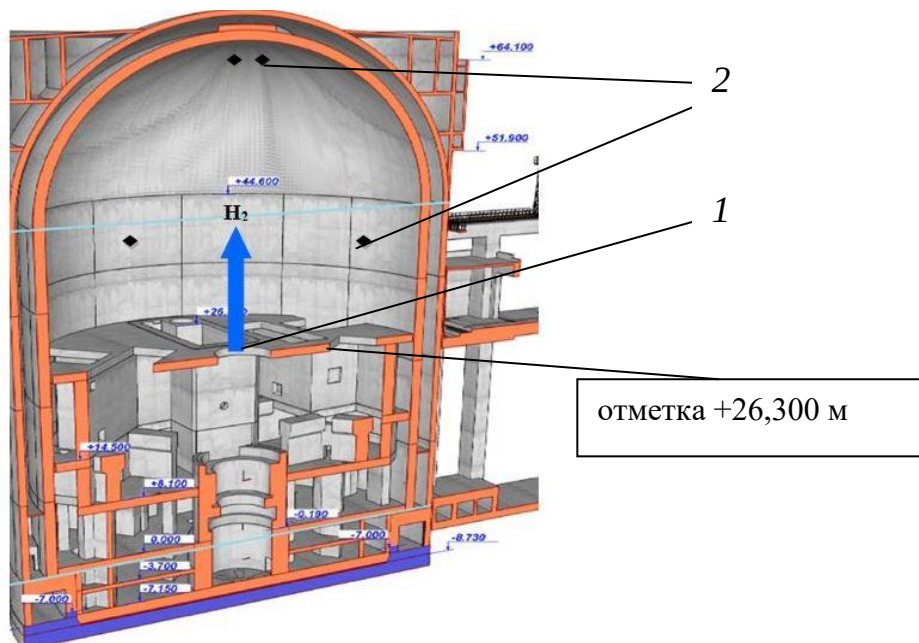


Рисунок 5.14 – Подкупольное пространство гермзоны АЭС с ВВЭР: 1– место возможного поступления водорода в гермзону ; 2– датчики системы контроля концентрации водорода

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 [101].

На рисунке 5.15 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 реакторного здания выше отметки +26,300 м соответственно.

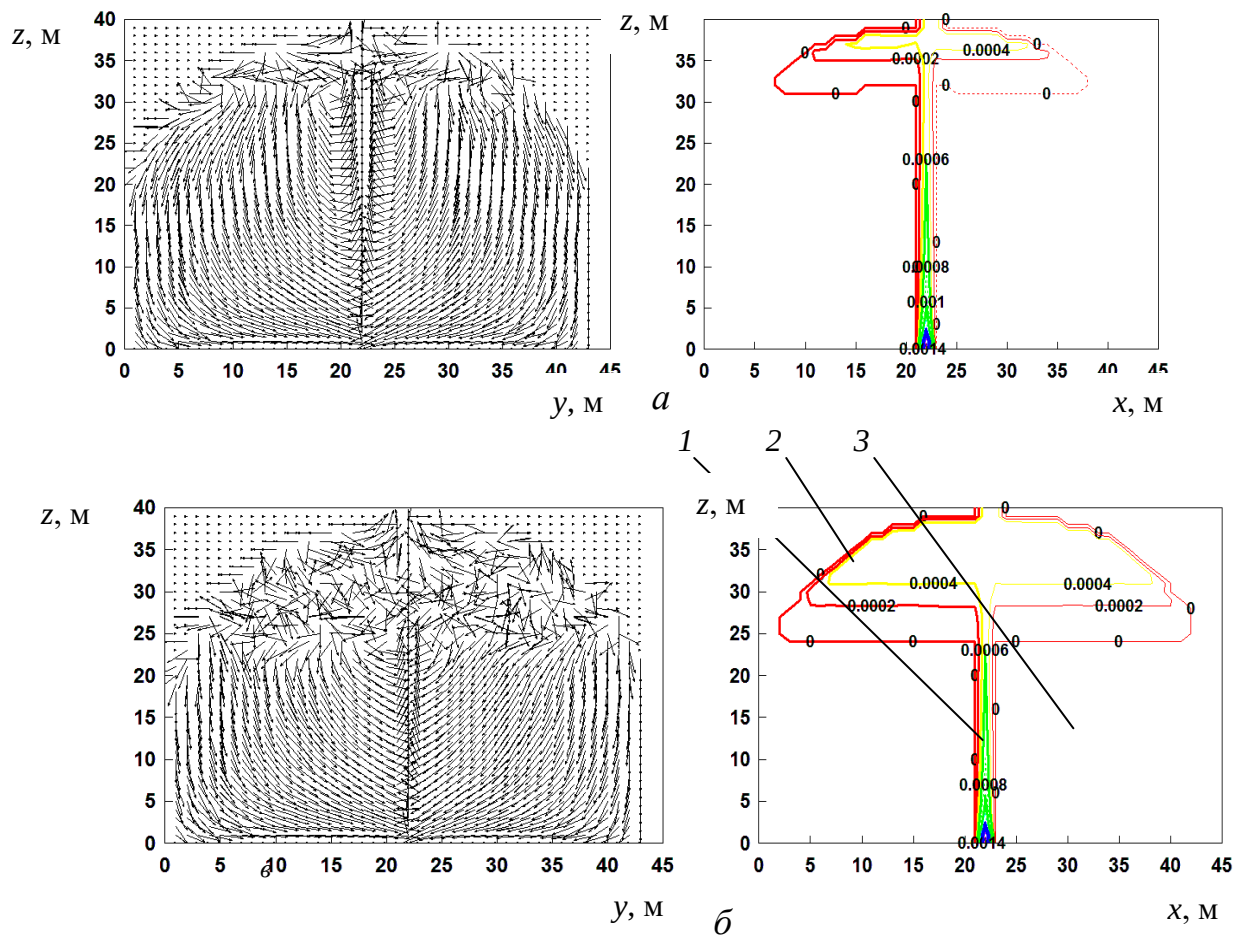


Рисунок 5.15 – Схемы течения и поля массовой концентрации водорода в вертикальном сечении, проходящем через место натекания водорода: *а* – через 10 мин от начала истечения водорода; *б* – через 1 час; 1 – зона конвективной колонки; 2 – зона припотолочного слоя; 3 – зона чистого воздуха

Из рисунка 5.15 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 колонки практически не меняются по времени процесса.

Расчет распределения объемных концентраций водорода (X_{ho}) по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия представлен на рисунке 5.16.

Из рисунка 5.16 видно, что расчет объемных концентраций водорода с использованием предложенной зонной модели и полевой модели показал удовлетворительную сходимость при высоте, большей 4 м.

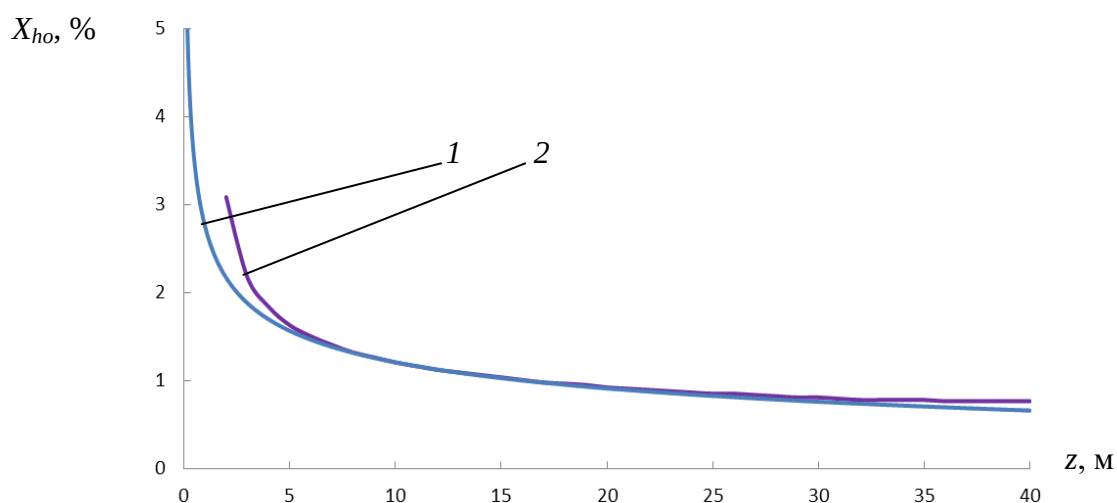


Рисунок 5.16 – Распределения объемных концентраций водорода по высоте конвективной колонки при $d=1,0$ м и $G_h=0,00116$ кг/с: расчет: 1 – зонная модель; 2 – полевая модель

Динамика опускания нижней границы припотолочного слоя над конвективной колонкой, образовавшейся при натекании водорода в подкупольное пространство, показана на рисунке 5.17.

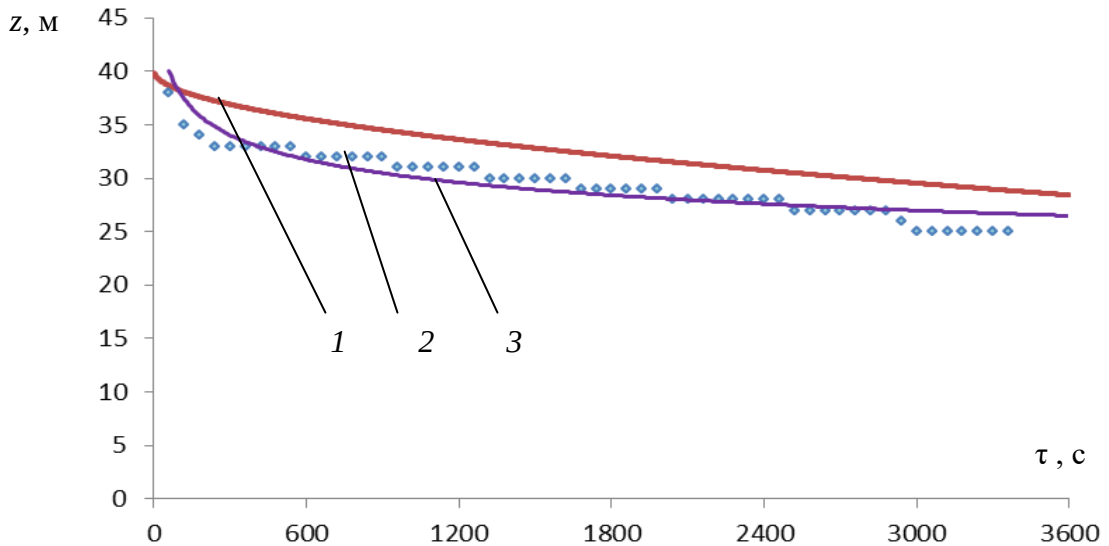


Рисунок 5.17 – Зависимость высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство при $d=1,0$ м и $G_h=0,00116$ кг/с:

1 – расчет по зонной модели; 2 – расчет по полевой модели; 3 – линия тренда значений, полученных по полевой модели

Из рисунка 5.17 видно, что расчет высоты нижней границы припотолочного слоя с использованием предложенной зонной модели распространения водорода в подкупольном пространстве и полевой модели показал удовлетворительную сходимость. Отличие вышеуказанной высоты, рассчитанной по разным моделям, обусловлено тем, что в зонной модели пренебрегаем работой расширения, совершаемой водородно-воздушной смесью в конвективной колонке.

Численные эксперименты по влиянию числа Рейнольдса в отверстии натекания водорода на распределение концентраций водорода по высоте конвективной колонки проводились с использованием зонной модели для отверстий с диапазоном изменения диаметров $d = 0,01 \div 1$ м при расходе $G_h = 0,00116$ кг/с.

Число Рейнольдса определялось как:

$$Re = \frac{\rho_h w d}{\mu}, \quad (5.47)$$

где ρ_h – плотность водорода в отверстии истечения водорода, кг/м³; w – средняя скорость течения в отверстии истечения водорода, м/с; $\mu = 8,8 \cdot 10^{-6}$ кг/(м·с) –

коэффициент динамической вязкости водорода при температуре 293 К и давлении 10^5 Па.

Произведение средней скорости на плотность водорода в уравнении (5.47) находится из величины расхода натекания водорода:

$$G_h = \rho_h w \frac{\pi d^2}{4}. \quad (5.48)$$

С учетом уравнений (5.47) и (5.48) числа Рейнольдса равны:

- при $d=1$ м: $Re=167,9$ (ламинарный режим течения);
- при $d=0,1$ м: $Re=1679$ (ламинарный режим течения);
- при $d=0,01$ м: $Re=16790$ (турбулентный режим течения).

Расчет распределения концентраций водорода по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия представлен на рисунке 5.18.

Обозначения на рисунке 5.18: НКПР, ВКПР – нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени.

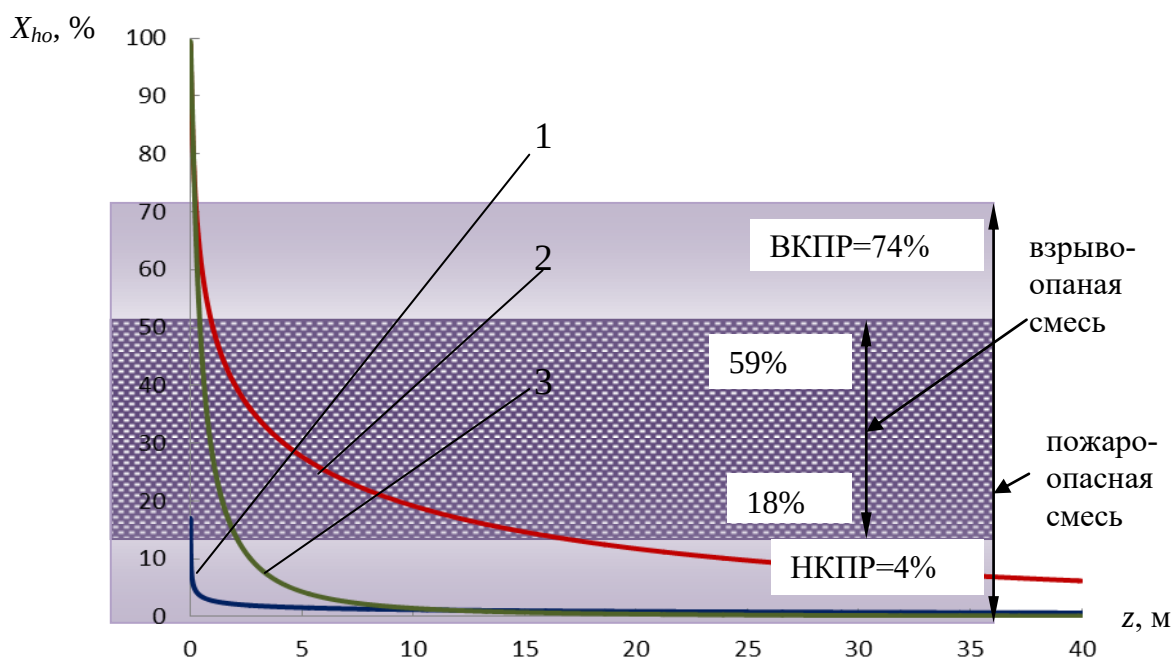


Рисунок 5.18 – Распределения объемных концентраций водорода по высоте конвективной колонки для различных диаметров отверстия: 1 – $d=1$ м; 2 – 0,1 м; 3 – 0,01 м; НКПР, ВКПР – нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени; 18%–59% – концентрационные пределы детонации водорода в воздухе

Из рисунка 5.18 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 5.19 приведены зависимости высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство.

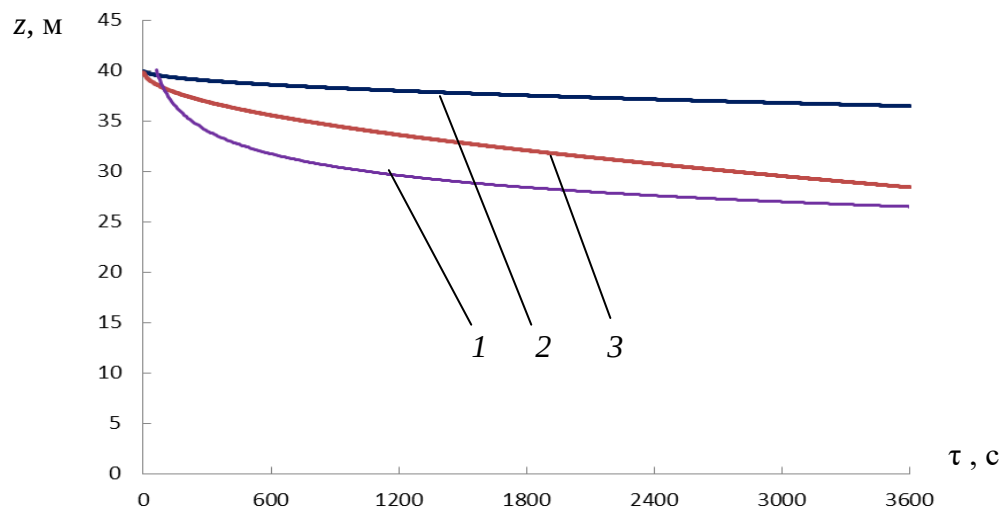


Рисунок 5.19 – Зависимости высоты нижней границы припотолочного слоя от времени с начала натекания водорода в подкупольное пространство для различных диаметров отверстия: расчет по зонной модели: 1 – $d=1$ м; 2 – $0,1$ м; 3 – $0,01$ м

На рисунке 5.20 представлена зависимость объемной концентрации водорода X_{hc} в верхней точке купола (место расположения концентрационных датчиков водорода) от числа Рейнольдса

Из рисунка 5.20 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 5.20 – Зависимость объемной концентрации водорода в верхней точке купола (место расположения концентрационных датчиков водорода) от числа Рейнольдса при различных диаметрах отверстий истечения водорода ($d = 1 \text{ м}; 0,1; 0,05; 0,03; 0,025; 0,01 \text{ м}$)

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, если $Re > 5000$. При этом по высоте конвективной колонки образуются водородно-воздушные смеси, находящиеся в пожаро- и взрывоопасных концентрационных пределах.

5.7 Выводы по 5 главе

1. Разработаны аналитические решения для основных модельных задач натекания водорода, позволяющие получить размеры взрыво- и пожароопасных зон, а также коэффициенты участия всей массы водорода в горении и взрыве, которые показали, что в СП 12 131 30.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» [196] величина коэффициента участия водорода в горении и взрыве сильно завышена.

2. Проведена валидация трехмерной модели на экспериментальных данных, приведенных в литературных источниках. Показана удовлетворительная точность трехмерной модели.

3. Разработана зонная модель расчета концентраций водорода при его натекании в помещение большого объема (например, в гермзону реакторного здания). В отличие от приведенных в литературе работ, в которых в уравнении изменения расхода водородно-воздушной смеси по высоте конвективной колонки расход воздуха, вовлекаемого в колонку, определяется с использованием эмпирического коэффициента подмешивания или не учитывается подсос воздуха в колонку, в данной работе используется угол полураскрытия колонки. Расчет объемных концентраций водорода с использованием предложенной зонной модели и полевой модели показал удовлетворительную сходимость.

4. Проведены численные эксперименты по особенностям образования пожаро- и взрывоопасных водородно-воздушных зон при натекании водорода в помещении. Показано, что при возможном сценарии аварийной ситуации натекания водорода в гермзону локальные взрыво- и пожароопасные зоны водородно-воздушной смеси могут находиться в любой части гермзоны, а не только в припотолочной части гермзоны.

5. Выявлено, что существует критическое значение числа Рейнольдса газообразного 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.

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 высота вышеуказанных зон слабо меняется, т.е. эти зоны являются «квазистационарными» (рисунки 5.11 и 5.15). Для расчета высот «квазистационарных» пожаро- и взрывоопасных зон можно так же можно использовать одномерный подход к расчету концентраций водорода по высоте стационарной конвективной колонки.

6. Проведены численные эксперименты по особенностям образования пожаро- и взрывоопасных водородно-воздушных зон при натекании водорода в гермзону реакторного здания как наиболее опасного с точки зрения выделения водорода в реакторном здании. Показано, 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, если $Re > 5000$. При этом по высоте конвективной колонки образуются водородно-воздушные смеси, находящиеся в пожаро- и взрывоопасных концентрационных пределах.

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 газообразного 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 сокращений и условных обозначений

АЭС	– атомная электрическая станция
ВВЭР	– водо-водяной энергетический реактор в котором замедлителем нейтронов и теплоносителем служит вода
ППЗ	– пассивная противопожарная защита
АСУ ТП	– автоматическая система управления технологическим процессом
БПУ	– блочный пункт управления
ВНИИПО МЧС РФ	– Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства по чрезвычайным ситуациям Российской Федерации
ГЖ	– горючие жидкости
НЭ	– канал нормальной эксплуатации
РДЭС	– резервная дизельная электростанция
РПУ	– резервный пункт управления
САЭ	– система аварийного электроснабжения
СКУ ПЗ	– система контроля и управления противопожарной защиты
СППЗ	– система пассивной противопожарной защиты
ГЦНА	– главный циркуляционный насосный агрегат
АСУ ТП	– автоматизированная система управления технологическими процессами
ЗЛА	– зона локализации аварии
ПГ	– парогенератор
ЗПА	– запроектная авария
СБ	– система безопасности
НГ кабели	– кабели не распространяющие горение
РГ кабели	– кабели распространяющие горение
ОФП	– опасные факторы пожара
масло ОМТИ	– масло турбинное синтетическое огнестойкое
МАГАТЭ	– международное агентство по атомной энергии
ОНУА	– отходы с очень низким уровнем активности

СПО-Э-11	– проходки кабельные универсальные– системы пассивной защиты
ПВХ	– поливинилхлорид
ВНИИПИЭТ СПбАЭП	– Восточно-Европейский головной научно-исследовательский и проектный институт энергетических технологий Санкт-Петербургский Атомэнергопроект
ПН	– пожарная нагрузка
турбинное масло ТП-22	– турбинное масло с присадками, имеющее кинематическую вязкость 22 мм ² /с
трансформаторное масло ГК	– трансформаторное масло полученное гидрокрекингом и каталитической депарафинизацией
Силотерм ЭП-6	– огнезащитная краска для стальных конструкций
ПД АЭС	– проектная документация атомной электрической станции
ИБРАЭ РАН	– Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской Академии наук
УДУ	– устройство дистанционного управления
САОЗ	– система аварийного охлаждения активной зоны
ППЗ	– пассивная противопожарная защита
FDS	– программный продукт для моделирования пожара, использующий гидродинамическую модель для расчёта потоков газовой фазы
PHOENICS	– программное обеспечение для численного решения задач механики жидкости и газа
STAR-CD	– многоцелевой программный комплекс, предназначенный для проведения расчетов в области механики жидкости и газа, предназначена для решения задач механики жидкостей и газов в промышленном производстве
PWR	– pressurized water reactor - Реактор с водой под давлением в качестве теплоносителя, тип западных реакторов (Российская модель реактора с водой под давлением называется ВВЭР)
BWR	– кипящий водо-водяной реактор — тип корпусного водо-водяного ядерного реактора, в котором пар генерируется непосредственно в активной зоне и направляется в турбину

Список литературы

1. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика [Текст] / Г. Н. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 842 с.
2. Азатян, В. В. Температурная зависимость скорости разветвлено-цепных процессов [Текст] / В. В. Азатян // АН СССР. – 1977. – № 11. – С. 2460-2464.
3. Азатян, В. В. Эффективные химические методы управления горением, взрывом и детонацией газов [Электронный ресурс] / В. В. Азатян // Cyberleninka : [сайт]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnye-himicheskie-metody-upravleniya-goreniem-vzryvom-i-detonatsiey-gazov/viewer> (дата обращения: 25.07.2023).
4. Акперов, Р.Г. Анализ современных методов определения токсичности веществ и материалов [Текст] / Р.Г. Акперов, Е.В. Лендель // Материалы международной научно-практической конференции Молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2014». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – С. 234-235.
5. Актуализация нормативных противопожарных требований к кабельным изделиям [Текст] / Г. И. Смелков, А. А. Варламкин, В. А. Пехотиков [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 2(65). – С. 94-98.
6. Актуальные вопросы обеспечения работоспособности электрооборудования систем противопожарной защиты объектов [Текст] / Г. И. Смелков, В. А. Пехотиков, А. А. Варламкин, О. И. Грузинова // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 11. – С. 72-78. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-11-72-78.
7. Актуальные вопросы пожарной безопасности кабельных изделий [Текст] / С. Лупанов, В. Сибирко, А. Рябиков [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2016. – № 3. – С. 88-93.
8. Анализ влияния пожаров на безопасный останов и расхолаживание реакторной установки энергоблоков атомных станций (на этапах проектирования и перед физическим пуском). Методические указания. [Текст] / АО «Концерн Росэнергоатом». – 2017. – 63 с.

9. Артеменко, А. Н. Расчет тепломассопереноса при термосорбционном взаимодействии металлогидрида с водородом [Текст] / А. Н. Артеменко // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Атомно-водородная энергетика и технология. – 1987. – № 3. – С. 61-63.
10. Астапенко, В. М. Термогазодинамика пожаров в помещениях [Текст] / В. М. Астапенко. – М.: Стройиздат, 1988. – 447 с.
11. Басманов, П.И. Средства индивидуальной защиты органов дыхания [Текст] / П.И. Басманов, С.Л. Каминский, А.В. Коробейникова, М.Е. Трубицына // – СПб.: ГИПП «Искусство России», 2002. – 400 с.
12. Беркович, В. М. Методы и средства обеспечения водородной безопасности АЭС [Электронный ресурс] / В. М. Беркович, Ю.Г. Давыдов, А.Д. Ефанов, А.А. Лукьянов, П.Н. Мартынов // podolsk.ru: [сайт]. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report2/misovba0.pdf> (дата обращения: 25.07.2023).
13. Болдрушкиев, О. Б. Определение парциальной плотности циановодорода при пожарах на объектах энергетики [Текст] / О.Б. Болдрушкиев // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – № 3. – С. 5-10.
14. Болдрушкиев, О.Б. Определение удельного коэффициента образования и критической парциальной плотности циановодорода и монооксида углерода при пожаре в помещении [Текст] / О.Б. Болдрушкиев, С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. – Т. 28. – №5. – С. 19-26.
15. Болдырев, А. С. Строительные материалы: Справочник [Текст] / А. С. Болдырев. – М.: Стройиздат, 1989. – 569 с.
16. Безлепкин, В.В. Применение пассивных систем безопасности в проекте АЭС 91/99М [Электронный ресурс] / В.В. Безлепкин // podolsk.ru: [сайт]. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005/section2-ru.htm> (дата обращения: 25.07.2023).

17. Варламкин, А. А. Методы испытаний кабельных линий на сохранение работоспособности в условиях пожара [Текст] / А. А. Варламкин, Г. И. Смелков, А. И. Рябиков // Пожарная безопасность. – 2011. – № 1. – С. 114-117.

18. Влияние неоднородности распределения температуры по высоте помещения на высоту плоскости равных давлений при пожаре в помещении [Текст] / С. В. Пузач, И. В. Ситников, О. С. Лебедченко, П. В. Комраков, До Тхань Тунг // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – № 8. – С. 24-32.

19. Влияние эксплуатационного старения кабельных изделий на их пожарную опасность / Г. И. Смелков, А. В. Пехотиков, Г. В. Боков [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXV Международной научно-практической конференции, Москва, 31 мая 2023 года. – Москва: Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2023. – С. 389-395.

20. Водородная безопасность АЭС. Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/60/> (дата обращения: 25.07.2023).

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

22. Выполнение требований национальных и международных стандартов к ограничению радиационных последствий тяжелых аварий в проекте Тяньваньской АЭС [Электронный ресурс] / М.А.Карасева [и др.]//podolsk.ru: [сайт]. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005/section2-ru.htm> (дата обращения: 25.07.2023).

23. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справ. [Текст] / Ю.С. Борисов [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1987. – 543 с.

24. Газочувствительные датчики на основе металлооксидных полупроводников [Текст] / А. И. Бутурлин [и др.] // Зарубежная электронная техника. – 1983. – № 10. – С. 3–39.

25. Голоднова, О. С. Уплотнения вала турбогенераторов с водородным охлаждением и их системы маслоснабжения (часть 2) [Текст] / О. С. Голоднова М: НТФ «Энергопрогресс», 2000. – 56 с. ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып.1(13)] – Режим доступа: https://fileskachat.com/file/95815_1a55f9649fefae5f96ad48e227dab288.html или <https://obuchalka.org/20221002148031/uplotneniya-vala-turbogeneratorov-s-vodorodnim-ohlajdeniem-i-ih-sistemi-maslosnabzheniya-chast-2-golodnova-o-s-2000.html> (дата обращения: 25.07.2023).

26. Горев, В. А. О концентрационных пределах распространения пламени в системе водород – воздух [Текст] / В. А. Горев // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т.20. – № 12. – С. 23-26.

27. Горячева, М. Н. Оценка критической продолжительности пожара по нескольким токсичным продуктам горения [Текст] / М. Н. Горячева // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2014. – № 1. – С. 36-40.

28. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Госстандарт России, 1992. – 78 с.

29. ГОСТ 12.0.230-2007 Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Общие требования. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200052851> (дата обращения: 26.07.2023).

30. ГОСТ 12.1.011-78 (СТ СЭВ 2775-80) Смеси взрывоопасные. Классификация и методы испытаний. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/871001049> (дата обращения: 26.07.2023).

31. ГОСТ 31610.20-1-2020 Взрывоопасные среды. Часть 20-1. Характеристики веществ для классификации газа и пара. Методы испытаний и данные. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/566418382> (дата обращения: 26.07.2023).

32. ГОСТ Р 12.3.047-2012 (ССБТ) Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200103505> (дата обращения: 26.07.2023).

33. 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». [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200180684> (дата обращения: 26.07.2023).

34. ГОСТ Р 53316—2021 «Электропроводки. Сохранение работоспособности в условиях стандартного температурного режима пожара. Методы испытаний» [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200180917> (дата обращения: 26.07.2023).

35. ГОСТ Р МЭК 60331-21–2003 (ССБТ) Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Сохранение работоспособности. Часть 21. Проведение испытаний и требования к ним. Кабели на номинальное напряжение до 0,6/1,0 кВ включительно. Часть 23. Проведение испытаний и требования к ним. Кабели электрические для передачи данных. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200031632> и <https://docs.cntd.ru/document/1200031633> (дата обращения: 26.07.2023).

36. ГОСТ Р ЕН 1363-2-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Альтернативные и дополнительные методы. Дата введения 2015-06-01. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200113419> (дата обращения: 26.07.2023).

37. Гусев, С. С. Безопасное управление атомными электростанциями [Текст] / С. С. Гусев // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2017. – № 12. – С. 42-45.

38. Дедов, А. В. Энергобудущее. Перспективные технологии [Текст] / А. В. Дедов. – М.: МЭИ, 2018. – 122 с.

39. Домашенко, А. М. Проблемы взрывобезопасности при создании и эксплуатации промышленных систем хранения и транспортирования жидкого водорода. Стандарты [Текст] / А. М. Домашенко // Первый всемирный конгресс «Альтернативная энергетика и экология» WCAEE. – 2006. – №11(43). – С. 28-38.

40. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров [Текст] / Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

41. Еремина, Т.Ю. Проблемы и перспективы повышения эффективности контроля огнезащитных свойств вспучивающихся покрытий, предназначенных для защиты металлических конструкций на стадии эксплуатации [Текст] / Т.Ю. Еремина, Д.А.Минайлов, Е.А.Николаева. // XXIX Международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России: Материалы конференции: в 2-х частях. – 2017. – С. 261-264.

42. Еремина, Т.Ю. К вопросу оценки коэффициента эффективной теплопроводности вспученных составов [Текст] / Т.Ю.Еремина, Н.М. Бессонов, П.В. Дьяченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. № 5. – С.13-18.

43. Еремина, Т.Ю. Модель оценки огнезащитной эффективности вспучивающихся водосодержащих составов [Текст] / Т.Ю.Еремина, Н.М. Бессонов // Пожаровзрывобезопасность.– 2000. № 3. . — С. 17-20.

44. Есин, В. М. Проблемы противодымной защиты зданий и сооружений / В. М. Есин, М. В. Панов, Ю. И. Перцев // Юбилейный сборник трудов Академии ГПС МЧС России: Под редакцией Е.А. Мешалкина. – Москва : Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2003. – С. 136-142.

45. Житарев, В.Е. Вопросы атомной науки и техники [Текст] / В. Е. Житарев, В. М. Качанов, Г. В. Лебедев, А. Ю. Сергевнин. // Физика ядерных реакторов. – Вып. 4. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 2013. – 46 с.

46. Журавлев, Д. Е. Разработка системы комплексного мониторинга пожарной безопасности объектов энергетики [Текст]/ Д. Е. Журавлев, В.И. Зыков // Проблемы техносферной безопасности: материалы Международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов.– 2019. – № 8. – С. 22-25.

47. Зависимость электрического сопротивления от температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elektrik.info/main/school/1654-elektricheskoe-soprotivlenie-i-ego-zavisimost-ot-temperatury.html> (дата обращения: 25.07.2023).

48. Закономерности образования и горения локальных водородовоздушных смесей в большом объеме [Текст] / Шебеко Ю.Н., Келлер В.Д., Еременко О.Я. и др. // Химическая промышленность. – 1988. – № 12. – С. 24-27.

49. Зотов, Ю.С. Математическая оценка токсической опасности продуктов горения/ Ю.С. Зотов // – Сборник: "Безопасность людей на пожарах".- М.: ВНИИПО, 1982, с.14-19.

50. Зыков, В. И. Оценка пожарной опасности электрических сетей [Текст] / В. И. Зыков, Г. Н. Малащенко // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация.. – 2009. – № 2. – С. 71-77.

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

52. Иличкин, В.С. Токсичность продуктов горения полимерных материалов [Текст] / В.С. Иличкин. – СПб.: Химия, 1993. – 131 с.

53. Исследование горения локальных водородовоздушных смесей в негерметичном сосуде с препятствиями [Текст] / Корольченко А.Я., Трунев А.В., Шебеко Ю.Н., Цариченко С.Г., Простов Е.Н. // Физика горения и взрыва. – 1995. – Т. 31. – № 1. – С. 17-22.

54. Ищенко, А.Д. Комплексный подход к минимизации последствий токсического воздействия дыма на пожарных / А.Д. Ищенко, Л.А. Коннова // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2012. – № 1. С. 1–11.

55. К вопросу о применении электропроводок в пожароопасных зонах [Текст] / Г. И. Смелков, А. И. Рябиков, В. А. Пехотиков [и др.] // Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции, посвященной проведению в Российской Федерации Года науки и технологий в 2021 году и 55-летию учебного заведения, Иваново, 10–11 ноября 2021 года. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2021. – С. 163-166.

56. К вопросу об актуализации нормативной базы на средства огнезащиты кабелей [Текст] / Г. И. Смелков, А. И. Рябиков, В. А. Пехотиков [и др.] // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сборник материалов IV международной научно-практической конференции, посвященной 30-й годовщине МЧС России, Иваново, 15 октября 2020 года. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной

службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2020. – С. 400-402.

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

58. Кабель FRLS и FRHF, НГ и НГ-LS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.220.ru/es2/articles/kabel-frls-i-frhf-ng-i-ng-ls-chto-kuda> (дата обращения: 25.07.2023).

59. Кабельная линия из двухжильного нагревательного провода типа ПНСВ 1х1,2 // [сайт]. – Режим доступа: http://www.tdm-rus.ru/goods/tdm_sq0125-0001.htm?frommarket=&ymclid=164914905402_70571_198500014 (дата обращения: 25.07.2023).

60. Кабельная линия типа КМВЭВ 1х2х1,5 // [сайт]. – Режим доступа: <https://kabtex.ru/kmvev> (дата обращения: 25.07.2023).

61. Кабельная линия типа витая пара «hold-key e191267 ul cm 75 с utp 4pr 24awg etl verified cat5e tia/eia-568-b.2 0262ft (12/03)» // [сайт]. – Режим доступа: <https://darudar.org/gift/2989512/> (дата обращения: 25.07.2023).

62. Кириллов, И. А. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы [Текст] / И. А. Кириллов // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – № 5. – С. 2460-2464.

63. Кириллов, И. А. Проблемы нормативного, экспериментального и расчетно-теоретического обеспечения безопасности водородной энергетики [Текст] / И. А. Кириллов, В. А. Симоненко, Н. Л. Харитоновна // Российские нанотехнологии. – 2020. – Т. 15, № 3. – С. 402-414.

64. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. — М.: Наука, 1968. — 720 с.

65. Кошмаров, Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении [Текст] / Ю. А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
66. Кошмаров, Ю.А. Тепломассоперенос при пожаре [Текст] / Ю.А. Кошмаров. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
67. Кошмаров, Ю.А. Термогазодинамика пожаров в помещениях [Текст] / Ю.А. Кошмаров, В.Н. Остапенко, И.С. Молчадский и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
68. Курносов, М.М. Теплогидравлические параметры зон перемешивания теплоносителя и воды САОЗ в РУ С ВВЭР при авариях с течью (сравнение известных методик и результатов расчётов по ним) [Электронный ресурс] / М.М. Курносов, В.М. Лапатин, Н.А. Стребнев // podolsk.ru: [сайт]. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005/section2-ru.htm> (дата обращения: 25.07.2023).
69. Кузнецов, Е. В. Альбом технологических схем производства полимеров и пластических масс на их основе [Текст] / Е. В. Кузнецов, И. П. Прохорова, Д. А. Файзуллина. – М.: Химия, 1976. – 108 с.
70. Кулев, Д.В. Морфологические свойства дисперсной фазы дыма при горении полимерных материалов [Текст] // Д.В. Кулев, В.Л. Млынский, В.А. Марченко // Безопасность людей при пожарах: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1984. – С. 100–107.
71. Кулев, Д.В. Опасность продуктов горения полимерных материалов [Текст] / Обзорная информация. Серия «Пожарная безопасность». – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1983. – 22 с.
72. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена [Текст] / С. С. Кутателадзе. — М.: Химия, 1979. – 416 с.
73. 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.

74. 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.

75. Лебедченко, О. С. Расчетное обоснование пределов огнестойкости ограждающих конструкций пожарных зон здания обращения с твердыми радиоактивными отходами АЭС [Текст] / О. С. Лебедченко, Пузач С.В., Николаев А.Н. // Материалы 29-ой Международной научно-технической конференции «Системы безопасности»-СБ-2020. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 145-151.

76. Лебедченко, О. С. Особенности обоснования технологии пассивной противопожарной защиты основных зданий атомных электростанций с водо-водяными реакторами [Текст] / О. С. Лебедченко // Материалы 28-ой Международной научно-технической конференции «Системы безопасности»-СБ-2019. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 291-297.

77. Лебедченко, О. С. Оценка обеспечения корректной работы кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара [Текст] / О. С. Лебедченко // Сборник материалов 8-ой научно-практической конференции «Ройтмановские чтения». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 72-75.

78. Лебедченко, О. С. Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций в условиях пожара [Текст] / О. С. Лебедченко, С. В. Пузач, В. И. Зыков // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30. – № 4. – С. 36-47.

79. Лебедченко, О.С. Оценка функционирования сигнальных кабелей каналов безопасности атомных станций в условиях пожара [Текст] / О. С. Лебедченко, В. И. Зыков, С. В. Пузач // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – №4. – С. 51-58.

80. 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.
81. Лобанова, Н. А. Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР при пожаре в контейненте [Электронный ресурс] / Н. А. Лобанова, Д.И. Пуцев// podolsk.ru: [сайт]. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005/section2-ru.htm> (дата обращения: 25.07.2023).
82. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
83. Макеев, В. И. Горение и детонация водородно-воздушных смесей в свободных объемах [Текст] / В. И. Макеев, Ю. М. Гостинцев, В. В. Строгонов // Физика горения и взрыва. – 1983. – № 5. – С. 16-18.
84. Малышенко, С. П. Аккумулирование водорода [Текст] / С. П. Малышенко, О. В. Назарова // Атомно-водородная энергетика и технология. – 1988. – № 8. – С. 52-60.
85. Математическая теория горения [Текст] / Я. Б. Зельдович, Г. Б. Баренблат, Г. М. Махвиладзе, В. Н. Либрович. – М.: Наука, 1981. – 419 с.
86. Медведев, Г. У. Чернобыльская тетрадь [Текст] / Г. У. – Санкт-Петербург [и др.] : Питер, 2020. – 336 с.
87. Мещанов, Г. И. Анализ особенностей горения полимерной изоляции кабелей при их групповой прокладке [Текст] / Г. И. Мещанов, С. Д. Холодный // Наука и техника. – 2010. – № 5. – С. 10-14.
88. Микеев, А. К. Аprobация на практике положений статьи 6 технического регламента о требованиях пожарной безопасности / А. К. Микеев, Д.Г. Пронин // Актуальные проблемы пожарной безопасности. материалы XXVIII международной научно-практической конференции : в 2 ч. – 2016. – С. 296-299.
89. Микеев, А.К. Противопожарная защита АЭС [Текст] / А.К. Микеев – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 432 с.

90. Моделирование номограмм прогрева стальных конструкций с огнезащитными покрытиями различной толщины (на воде)/ Д.А. Корольченко, Т.Ю.Еремина, С.В. Пузач, Ф.А. Портнов //Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31. – № 6. – С. 30-46.

91. Молчадский, И.С. Определение удельной интенсивности тепловыделения при горении веществ и материалов в условиях пожара [Текст] / И.С. Молчадский. – М.: ВНИИПО, 1989. – 25 с

92. Молчадский, И.С. Пожар в помещении [Текст] / И.С. Молчадский. – М.: ВНИИПО МЧС России, 2005. – 456 с.

93. На Курской АЭС отключился энергоблок из-за возгорания на трансформаторе // ТАСС Режим доступа: <https://tass.ru/proisshestviya/4969457> (дата обращения: 04.02.2023).

94. Научно-технические разработки ВНИИПО в области обеспечения пожарной безопасности атомных электростанций [Текст] / А. К. Микеев, Д. И. Пуцев, А. В. Томилин, В. Н. Борисов // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 89-93.

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

96. Новые нормативные требования по обеспечению пожарной безопасности кабельных изделий [Текст] / Г. И. Смелков, А. И. Рябиков, В. А. Пехотиков [и др.] // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXXIII Международной научно-практической конференции, посвященной Году науки и технологий, Москва, 12–16 мая 2021 года. – Москва: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2021. – С. 457-463.

97. Новые представления о расчете необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих

самоспасателей при эвакуации на пожарах [Текст] / С. В. Пузач, А. В. Смагин, О. С. Лебедченко, Е. С. Абакумов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2007. – 222 с.

98. Новый подход к испытаниям веществ и материалов на токсичность при пожаре [Текст] / С. В. Пузач, Н.В. Комаревцев, Н.В. Королева, Т.Г. Меркушкина // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2023. – № 2. – С. 5-11.

99. Нормативное регулирование вопросов обеспечения пожарной безопасности реакторов на быстрых нейтронах [Текст] / П. М. Комков, А. В. Уваров, А. И. Рябиков [и др.]. // Актуальные проблемы пожарной безопасности. Материалы XXVIII Международной научно-практической конференции: в 2 частях. – 2016. – С. 222-230.

100. О физической природе взрыва на 4-м энергоблоке ЧАЭС [Электронный ресурс] // Москва: Научная цифровая библиотека PORTALUS.RU. Режим доступа: https://portalus.ru/modules/ecology/rus_readme.php?subaction=showfull&id=1096468666&archive=&start_from=&ucat=& (дата обращения: 08.04.2023).

101. Обеспечение локализующих функций защитной оболочки НВ АЭС-2 (АЭС-2006) при ЗПА с течами из реакторной установки В-392М» [Электронный ресурс] / Д. И. Козлов и др. // ФГУП «Атомэнергопроект»: [сайт]. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/documents/f128.pdf> (дата обращения: 25.07.2023).

102. Обеспечение пожарной безопасности объектов энергетики путем разработки и применения мобильной робототехники пожаротушения [Текст] / М. В. Алешков, С. Г. Цариченко, А. Л. Холостов, И. А. Гусев // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т27. – №9. – С. 35-49.

103. Обеспечение безопасности РУ ВБЭР-300 [Электронный ресурс] – /О.Б. Самойлов, А. В. Кураченков, В.С. Кууль, и др. // podolsk.ru: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005/section2-ru.htm> (дата обращения: 25.07.2023).

104. Огнетушащие концентрации газовых средств тушения по отношению к факелу водорода при их одновременной подаче в горючее и окислитель [Текст] / А. Ю. Шебеко, Ю. Н. Шебеко, А. В. Зубань, В. Ю. Навценя // Пожарная безопасность. – 2010. – № 3. – С. 88-95.

105. Особенности эвакуации людей из современных офисных зданий при пожаре [Текст] / Т.Г. Меркушкина, Д.А. Самошин, З.С. Хасуева, М.Ю. Зыкова// Технологии техносферной безопасности. – 2015. – № 5 (63). – С. 73-81.[Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_26249906_69772164.pdf.

106. 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.

107. Основные результаты применения вероятностных методов механики разрушения в анализах надежности оборудования и трубопроводов РУ АЭС с ВВЭР [Электронный ресурс] / В.А. Григорьев, С.П. Юременко, В.В. Уланов и др.// podolsk.ru: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005/section2-ru.htm> (дата обращения: 25.07.2023).

108. Оценка пожарного риска для уникальных производственных зданий [Текст] / Д. М. Гордиенко, А. Ю. Шебеко, В. А. Трунева, Ю. Н. Шебеко // Пожарная безопасность. – 2014. – №2. – С. 83-92.

109. Оценка работоспособности электрических проводов и кабелей при одновременном воздействии пожара и токовой нагрузки [Текст] / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, В. И. Зыков, Т. И. Чистяков // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – № 6. – С. 56-67.

110. Оценка токсичности не распространяющих горение сигнальных кабелей при пожаре в производственных помещениях [Текст] / С. В. Пузач, Р. Г.

Акперов, О. С. Лебедченко, О. Б. Болдрушкиев // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 5. – С. 621-626.

111. Оцисик, М. Н. Сложный теплообмен [Текст] / М. Н. Оцисик. – М.: Мир, 1976. – 616 с.

112. Пантелеев, В. А. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций [Текст] / В. А. Пантелеев, И. А. Кириллов // Пожарная безопасность. – 2019. – № 5. – С. 53.

113. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

114. ПИН АЭ 5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. Утверждены Минатомэнерго СССР, 29.12.1986 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293846/4293846843.htm> (дата обращения: 25.07.2023).

115. Пожар на останкинской телебашне в 2000 году Хроника событий [Текст] / В. А. Пехотиков, И. А. Болодьян, А. И. Рябиков, О. И. Грузинова // Пожарная безопасность. – 2017. – № 4. – С. 108-112.

116. Пожарная безопасность технологических процессов [Текст] / Швырков С.А. и др. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. – 338 с.

117. Пожарная безопасность. Общие требования. — М.: Госстандарт России, 1992. – 78 с.

118. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. в 2 книгах; кн. 1 [Текст] / Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Ковальчук Г. Н. и др. – М.: Химия. 1990. – 496 с.

119. Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200034921> (дата обращения: 26.07.2023).

120. Пожарная профилактика в строительстве [Текст]/ Б.В. Грушевский, А.И. Яковлев, И.Н. Кривошеев и др. Под ред. В.Ф. Кудаленкина. – М: ВИПТШ МВД СССР, 1985. – 453 с.

121. Правила устройства электроустановок. Седьмое издание. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200030218> (дата обращения: 26.07.2023).

122. Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 Об утверждении методики определения расчётных величин пожарного риска на производственных объектах [Электронный ресурс] // МЧС России: [сайт]. – Режим доступа: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/667> (дата обращения: 25.07.2023).

123. Приказ МЧС России от 14 ноября 2022 г. № 1140 “Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и пожарных отсеках различных классов функциональной пожарной опасности” [Электронный ресурс] // Гарант: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/406477165/> (дата обращения: 25.07.2023).

124. Приведение расчетного режима пожара к пределу огнестойкости через эквивалентную продолжительность пожара [Текст] / Д.И. Приступюк, В.Н. Иванов, В.Ю. Федоров [и др.] // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2023. – № 4(65). – С. 34-36.

125. Проблемы нормирования показателей огнестойкости (работоспособности) кабельных линий [Текст] / Г. И. Смелков, А. И. Рябиков, Ю. В. Точилкин [и др.] // Пожарная безопасность. – 2015. – № 3. – С. 129-135.

126. Проблемы обеспечения показателей огнестойкости (работоспособности) электропроводок [Текст] / Г. И. Смелков, А. И. Рябиков, Ю. В. Точилкин [и др.] // Пожарная безопасность. – 2016. – № 4. – С. 130-137.

127. Проводные и кабельные сети пожароопасных зон [Текст] / Г. И. Смелков, В. А. Пехотиков, А. И. Рябиков, А. А. Назаров // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 9. – С. 63-68.

128. Противопожарная защита машинных залов атомных электростанций с использованием многофункциональных робототехнических комплексов [Текст] / С. Г. Немчинов, В. А. Харевский, Ю. И. Горбань, С. Г. Цариченко // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 2. – С. 20-26.

129. Пузач, С. В. Автоматизированная информационная система по требованиям пожарной безопасности в строительстве «Экспертиза» [Текст] / С. В. Пузач. – М.: ВНИИПО, 2003. – 327 с.

130. 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.

131. Пузач, С. В. Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 8.12.2006 г. [Электронный ресурс] / С. В. Пузач // StudFile: [сайт]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/6463470/> (дата обращения: 25.07.2023).

132. Пузач, С. В. Коэффициенты участия водорода в горении и взрыве при ламинарной и турбулентной конвекции на горизонтальной пластине [Текст] / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, Е. Н. Болдырев // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. – Т23. – № 6. – С. 26-30.

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

134. Пузач, С. В. Математическое моделирование динамики опасных факторов пожара при пассивной противопожарной защите в основных зданиях

атомных электростанций с водно-водяными реакторами. Монография. [Текст] / С.В.Пузач, О.С. Лебедченко – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – 304 с.

135. Пузач, С. В. Математическое моделирование тепломассообмена в гидридном аккумуляторе водорода при пожаре [Текст] / С. В. Пузач // Теплофизика высоких температур. – 1999. – № 2. – С. 319-325.

136. 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.

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

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

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

140. Пузач, С. В. Неоднородность температурного поля в газовом задымленном 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.

141. 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.

142. 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.

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

144. Пузач, С. В. Обоснование технологии пассивной противопожарной защиты основных зданий АЭС с водо-водяными реакторами на основе расчета фактических пределов огнестойкости ограждающих конструкций [Текст] / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко, С. В. Сизухин // Пожары и чрезвычайные ситуации. – 2020. – № 1. – С. 22-29.

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

146. Пузач, С. В. Определение огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614237 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 8.12.2006 г. [Электронный ресурс] / С. В. Пузач // Cyberleninka: [сайт]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-tehnologii-passivnoy-protivopozharnoy-zaschity-osnovnyh-zdaniy-aess-vodo-vodyanyimi-reaktorami-na-osnove-raschyota> (дата обращения: 25.07.2023).

147. Пузач, С. В. Особенности тепломассообмена в гидридном аккумуляторе водорода при утилизации теплоты реакции сорбции [Текст] / С. В. Пузач // Известия РАН. Энергетика. – 1999. – № 4. – С. 138-143.

148. Пузач, С. В. Расположение взрыво- и пожароопасных участков водородно-воздушной смеси по высоте конвективной колонки, образующейся над

источником натекания водорода в помещении [Текст] / С. В. Пузач, О. С. Лебедченко. // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. — Т. 26. — № 1. — С. 18-24.

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

150. Пузач, С. В. Рекомендации по оптимизации действия систем пожаротушения, дымоудаления и вентиляции при пожарах от 30.05.2005 [Электронный ресурс] / С. В. Пузач // Гост РФ: [сайт]. – Режим доступа: https://znaytovar.ru/gost/2/RekomendaciiRekomendacii_po_op10.html (дата обращения: 25.07.2023).

151. Пузач, С. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614804 от 03 июня 2010 г. [Электронный ресурс] / С. В. Пузач// Studfile: [сайт]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/6463470/> (дата обращения: 25.07.2023).

152. Пузач С.В., Сулейкин Е.В., Акперов Р.Г. Установка для определения пожарной опасности конденсированных материалов при их термическом разложении. Патент Российской Федерации на полезную модель № 174688. Заявка №2017113747, приоритет полезной модели 20.04.2017 г., дата государственной регистрации 26.10.2017 г.

153. Пузач, С. В. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования монооксида углерода при пожаре в помещении [Текст] / С.В. Пузач, Р.Г. Акперов // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2016. – Т. 25. – № 5.

154. Пузач, С.В. Трехмерное математическое моделирование начальной стадии пожара в помещении [Текст] / С.В. Пузач // Инженерно-физический журнал. - 2000. - Т. 73, № 3. - С. 621-626.

155. Пузач, С.В. К определению показателя токсичности продуктов горения веществ и материалов в помещении [Текст] / С.В. Пузач, В.Г. Пузач, М.В.

Доан // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2011. – Т. 20. – № 4. – С. 4-13.

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

157. Пузач, С.В. Определение удельного выхода циановодорода входящего в состав продуктов горения для моделирования пожара [Текст] / С.В. Пузач, О.Б. Болдрушкиев, Е.В. Сулейкин // Материалы XII научно - практической конференции «Ройтмановские чтения». – Москва.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2019. – С. 104-107

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

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

160. Пузач, С.В. Оптимизация толщин огнезащитных вспучивающихся покрытий металлических конструкций с учетом термогазодинамики реального пожара [Текст] / С.В. Пузач, Полевода И.И., Иваницкий А.Г. // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2009. – № 1(9). – С. 63-70.

161. Пуцев Д.И., Борисов В.Н., Рябиков А.И. Анализ безопасности и решения противопожарной защиты АЭС [Текст] // Пожарная и аварийная безопасность. Материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию МЧС России. – 2015. – №3. – С. 67-75.

162. Пуцев, Д. И. Специальные требования пожарной безопасности для атомных станций [Текст] / Д. И. Пуцев // Пожарная безопасность. – 2010. – № 3. – С. 138-140.

163. Пуцев, Д.И. Оценка возможности применения полевого моделирования пожара для проведения расчетов пожаров в зданиях и помещениях [Текст] / Д.И. Пуцев, Ю.В. Кривцов, Ю.М. Грошев // Вестник НИЦ «Строительство» №2(37), 2023. – С 37-70.

164. Пуцев, Д.И. Методика определения пожарных зон, влияющих на безопасность / В.Н. Борисов, А.В. Томилин // Материалы XXII международной научно-практической конференции: «Актуальные проблемы пожарной безопасности». - М.: ВНИИПО, 2010. С.32-38.

165. Рабенков, Е.С. Выделение водорода из теплоносителя первого контура РУ ВВЭР-1000 А.В. Мартынов, Е.С. Рабенков [Электронный ресурс] – Режим доступа:<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2014/documents/kms2014-010.pdf> (дата обращения: 25.07.2023).

166. Развитие системы нормирования пожарной безопасности атомных электростанций [Текст] / Ю. И. Дешевых, А. Н. Гилетич, П. М. Комков [и др.]. // Пожарная безопасность. – 2011. – № 3. – С. 66-70.

167. Расчет фактических пределов огнестойкости строительных конструкций с учетом реальных параметров пожара, действий систем пожаротушения, механической вентиляции и дымоудаления (математическая модель и методика расчета) [Текст] / С. В. Пузач, С. И. Зернов, А. И. Богатищев, С. Ю. Карпов. — Саранск: Мордовское книжное издательство, 2004. – 80 с.

168. 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.

169. Ройтман, М. Я. Пожарная профилактика в строительном деле [Текст] / М. Я. Ройтман. — М.: ВИПТШ МВД СССР, 1975. – 145 с.

170. Ройтман, М. Я. Противопожарное нормирование в строительстве [Текст] / М. Я. Ройтман. – М.: Стройиздат, 1985. – 590 с.

171. Руководящий документ «Инструкция по проектированию противопожарной защиты энергетических предприятий» РД153-34.0-49.101-2003. - М.: ЗАО «Энергетические технологии». 2001. – 24 с.

172. Руководящий документ «Нормы проектирования автоматических установок водяного пожаротушения кабельных сооружений» РД 153-34.0-49.105-01. – М.: ЗАО «Энергетические технологии». 2001. – 24 с.

173. Руководящий документ «Правила технологического проектирования АЭС с реакторами ВВЭР» РД 210.006-90. – М.: ЗАО «Энергетические технологии». 2001. – 24 с.

174. Рясный, С.И. Сравнение экспериментальных условий термо-нагруженных узлов реакторных установок В-320 И В-428 в некоторых режимах [Электронный ресурс] / С.И. Рясный // podolsk.ru: [сайт]. – Режим доступа: <https://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2005/section3-ru.htm> (дата обращения: 25.07.2023).

175. Самошин, Д. А. Современные программные комплексы для моделирования процесса эвакуации людей / Д. А. Самошин // Пожарная безопасность в строительстве.- 2011. - № 1. - С. 62-65. Самошин, Д.А. Проблемы нормирования времени начала эвакуации/ Д.А. Самошин, В.В. Холщевников//Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25. – № 5. – С. 37-51.

176. Свод правил 56.13330.2011 Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001 [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200085105> (дата обращения: 26.07.2023).

177. Свод правил СП 13.13130.2009. Атомные станции. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200075283> (дата обращения: 26.07.2023).

178. Свод правил. СП 1.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/565248961> (дата обращения: 26.07.2023).

179. Свод правил. СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения. Приложение А (рекомендуемое). Методика определения необходимого времени эвакуации людей из помещения при пожаре [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200071155> (дата обращения: 26.07.2023).

180. Свод правил. СП 18.13330.2011. Генеральные планы промышленных предприятий Актуализированная редакция СНиП II-89-80 [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200084088> (дата обращения: 26.07.2023).

181. Свод правил. СП 2.13130.2012. Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200096437> (дата обращения: 26.07.2023).

182. Свод правил. СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200101593> (дата обращения: 26.07.2023).

183. Свод правил. СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. –

Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200092709> (дата обращения: 26.07.2023).

184. Свод правил. СП 5.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200071148> (дата обращения: 26.07.2023).

185. Свод правил. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная версия СНиП 41-01-2003 [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200095527> (дата обращения: 26.07.2023).

186. Свод правил. СП 8.13130.2009. Системы противопожарной защиты. Источники наружного противопожарного водоснабжения. Требования пожарной безопасности [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200071151> (дата обращения: 26.07.2023).

187. Сгорание локального объема газа в закрытом объеме [Текст] / Бабкин В.С., Кононенко Ю.Г., Выхристюк А.Я. и др. // Физика горения и взрыва– 1985 – Т. 21– № 6 – С. 43-49.

188. Сертификат соответствия огнезащитной краски ОГНЕЗА ВД-К RU №0321918 [Электронный ресурс] // [сайт]. – Режим доступа: <https://ogneza.com/upload/iblock/2d5/udbhoa2lwb95jhdntjl1qkwuxneouwao.pdf> (дата обращения: 25.07.2023).

189. Система пожарного мониторинга на объектах энергетики с использованием термомагнитных газоанализаторов кислорода [Текст] / В. И. Зыков, М. С. Левчук, М. В. Крупин [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2012. – № 3. – С. 64-70.

190. Смелков, Г. И. К вопросу о модификации национальной нормативной базы, регламентирующей требования пожарной безопасности электропроводок [Текст] / Г. И. Смелков, В. А. Пехотиков, О. И. Грузинова // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 28 октября 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2021. – С. 209-213.

191. Смелков, Г. И. Пожарная безопасность электроустановок [Текст] / Г. И. Смелков. — М.: ООО Кабель, 2009. — 328 с.

192. Смелков, Г. И. Проблемы обеспечения пожарной безопасности кабельных потоков в городских коммуникационных коллекторах [Текст] / Г. И. Смелков, А. И. Рябиков, В. Б. Пельцер // Кабели и провода. – 2007. – № 4. – С. 20-25.

193. Снижение пожарной опасности кабельных изделий с изоляцией и оболочками из ПВХ материалов [Текст] / Г. И. Смелков, А. И. Рябиков, В. И. Ильин, Т. М. Дмитриева // Пожарная безопасность. – 2011. – № 2. – С. 66-72.

194. Специфика пассивной противопожарной защиты для атомных электрических станций [Текст] / Д.Г. Ланин, С.Г. Цариченко, А.А. Варламкин, А.В. Чумаченко // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 8. – С. 47-54.

195. Солдатов, Г. Е. О путях снижения риска пожаров в машинных залах АЭС [Текст] / Г. Е. Солдатов, О. С. Голоднова // Атомкон. – 2009. – № 2. – С. 2460-2464.

196. СП 12 131 30.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. – 34 с.

197. 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.

198. Стандарты безопасности МАГАТЭ SSR-2/1, SSR-2/2 по вопросам безопасности атомных станций NS-G-1.7 «Защита от внутренних пожаров и взрывов при проектировании атомных электростанций», МАГАТЭ (2008) [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [сайт]. – Режим доступа: <https://www.iaea.org/ru/publications/6999/zashchita-ot-vnutrennih-pozharov-i-vzryvov-pri-proektirovanii-atomnyh-elektrostantsiy> (дата обращения: 25.07.2023).

199. СТО 1.1.1.03.002.1069-2015. Противопожарные требования при проектировании атомных электростанций [Текст]. – Введ. 21.03.2016. – АО «Концерн Росэнергоатом» 2015. – 60 с.

200. Стрижевский, И. И. Инженерные средства безопасности при работе с водородом [Текст] / И. И. Стрижевский // Атомно-водородная энергетика и технология. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 229-243.

201. Теплопроводность металлов [Электронный ресурс] // [сайт]. — Режим доступа: <https://prompriem.ru/metally/teploprovodnost.html> (дата обращения: 25.07.2023).

202. Теплопроводность пластиков и пластмасс, плотность пластмассы — физические свойства полимеров [Электронный ресурс] // [сайт]. — Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/plastmassa-i-plastik/teploprovodnost-plastikov-i-plastmass-fizicheskie-svojstva-polimerov> (дата обращения: 25.07.2023).

203. Тестовые задачи для проверки точности моделирования времени эвакуации людей в случае пожара. Часть 1 / В. В. Холщевников, Д. А. Самошин Р. Н. Истратов, М. М. Шаранова. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. – 26 с.

204. Технические исследования процессов механодеструкции строительных полимерных материалов / Р. Х. Эркенов, С. К. Эгизов, А. В.

Мещеряков, А. Б. Плаксицкий // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – М.: Энергоатомиздат, 2018. – С. 1018-1019.

205. Титков, В. В. Влияние способов прокладки на температурный режим кабельных линий 6-10 кВ и выше / В. В. Титков, С. М. Дудкин // Новости ЭлектроТехники. – 2012. – № 75. – С. 23-29.

206. Указ Президента РФ от 13.05.2019 № 216. Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации [Электронный ресурс] // Гарант: [сайт]. — Режим доступа: <https://base.garant.ru/72240884/> (дата обращения: 26.07.2023).

207. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Приказ №522 Ростехнадзора России от 17.12.2015 г. (Зарегистрировано в Минюсте России 2.02.2016 г. № 40939) [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420329007> (дата обращения: 26.07.2023).

208. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 N 116-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ (дата обращения: 26.07.2023).

209. Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 N 384-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (дата обращения: 26.07.2023).

210. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 N 123-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа:

https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/ (дата обращения: 26.07.2023).

211. Федеральный закон от 27.12.02 г. №184-ФЗ «О техническом регулировании» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (дата обращения: 26.07.2023).

212. Федеральный закон Российской Федерации от 21.12.1994 № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» (ред. от 28.05.2017) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5438/ (дата обращения: 26.07.2023).

213. Хасанов, И. Р. Экспериментальные методы определения огнестойкости кабельных проходок при пожаре с учетом влияния токов нагрузки [Текст] / И. Р. Хасанов, А. А. Варламкин // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. XVII научно-практическая конференция. – М.: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России, 2018. – С. 77-78.

214. Холщевников, В.В. Исследование людских потоков и методология нормирования эвакуации людей из зданий при пожаре / В.В.Холщевников – М.: МИПБ МВД России. – 1999. – 93 с.

215. Цариченко, С.Г. Вопросы водородной по-жаровзрывобезопасности оборудования и помещения атомных станций / С.Г. Цариченко, А.Я. Корольченко, Ю.Н. Шебеко и др.// В кн. Рефераты конференции. 4-ая Ежегодная Научно-техническая Конференция Ядерного Общества. Ядерная энергия и безопасность человека NE-93, 1993. Нижний Новгород, С. 705-707.

216. Численное моделирование самовоспламенения водородовоздушных смесей в присутствии флегматизаторов [Текст] / В. В. Азатян, А. Ю. Шебеко, Ю. Н. Шебеко, А. В. Зубань // Пожарная безопасность. – 2010. – № 3. – С. 78-97.

217. Шебеко, Ю. Н. Определение требуемой толщины вспучивающегося огнезащитного покрытия на стальных конструкциях для заданных пределов

огнестойкости / Ю. Н. Шебеко, А. Ю. Шебеко, А. В. Зубань // Пожарная безопасность. – 2020. – № 1. – С. 26-29.

218. Шевяков, Г. Г. Распространение и горение струи водорода в открытой атмосфере / Г. Г. Шевяков, Н. И. Савельева // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2003. – №1. – С. 54.

219. Шмалько, Ю. Ф. Металлогидридная система хранения, очистки и программированного напуска водорода / Ю. Ф. Шмалько, М. В. Лотоцкий, Г. И. Медведев // Атомно-водородная энергетика и технология. – М.: Энергоатомиздат, 1985. — С. 49-51.

220. Численное решение многомерных задач газовой динамики. [Текст] / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов, А. Н. Крайко, Г. П. Прокопов - М.: Наука, 1976. - 400 с.

221. 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.

222. Экспериментальное определение массовой скорости выгорания резины / А.А. Киреев, А.Б. Каракулин, К.В. Жерноклев [и др.] //Сборник научных трудов. Выпуск 35, 2014. – С.82-87

223. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1523-р от 09.06.2020 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 25.07.2023).

224. Энергобудущее. Перспективные технологии. Хрестоматия [Текст]/А.В.Андрюшин, Э.К. Аракелян, В.П. Будаев и др. Под ред. А.В. Дедова. М.: Издательство МЭИ, 2018. – 122 с.

225. Яблоков, А. В. Международная шкала ядерных событий [Электронный ресурс] / А. В. Яблоков // INES: [сайт]. — Режим доступа: <https://portal.tpu.ru/departments/kafedra/feu/Student/Tab2/Avarii.doc> (дата обращения: 26.07.2023).

226. A Study on the Risk of Particulate Materials Included in the Combustion Products of Building Materials / Kim, Nam-Kyun, Cho // Fire Science and Engineering. – 2016. – No 30. – P. 43-48.

227. Acute toxicity when concentration varies with time: A case study with carbon monoxide inhalation by rats / M. S. Lisa, R. S. Douglas, R. G. Michelle // Regulatory Toxicology and Pharmacology. – 2016. – No 80. – P. 102-115.

228. Agrawal, N. A method to characterize mixing and flammability of hydrogen – air mixtures in enclosures / N. Agrawal, K. Velusamy, S. K. Das // International Journal of Hydrogen Energy. – 2011. – No 19. – P. 126-127.

229. Anna, A. S. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials / A. S. Anna, Richard T // Energy and Buildings. – 2011. – No 2. – P. 298-506.

230. Babrauskas, V. Fire performance of Wire and Cable: Reaction to Fire Tests / V. Babrauskas, R. D. Peacock, E. Braun // A Critical Review of the Existing Methods and of New Concepts. – 1991. – No 2. – P. 298-506.

231. Barilo, N. Hydrogen Safety Panel, Safety Knowledge Tools, and First Responder Training Resources, Hydrogen Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting / N. Barilo. — Washington, 2019. — 328 p.

232. Braun, M. Oil fire in a power plant / M. Braun // Munich Re. – 2006. – No 2. – P.34-36.

233. Cable Ageing in Nuclear Power Plants. Report on the first and second terms (2012-2017) of the NEA Cable Ageing Data and Knowledge (CADAK) Project // NEA/CSNI/R. – 2018. – No 2. – 58 p.

234. Compartment temperature estimation of a multiple-layer cable tray fire with different cable arrangements in a closed compartment / H. Xianjia, W. Yuhong, Z. Wuyong, P. Lan // Journal of Fire Sciences. – 2019. – No 4. – 89 p.

235. Csanyi, E. Internal electrical systems within nuclear power plant stations (power sources) [Electronic resource] / E. Csanyi // Electrical Engineering Portal: [website]. – Available at: <https://electrical-engineering-portal.com/electrical-systems-nuclear-power-plant-stations>. (accessed: 26.07.2023).

236. Deflagration to detonation transition in large confined volume of lean hydrogen-air mixtures / Dorofeev, S. V. P. Sidorov, A. E. Dvoinishnikov, W. Breitung // Combustion and Flame. – 1996. – No 104. – P.95-110.

237. Dehjourian, M. Investigation of a Hydrogen Mitigation System During Large Break Loss-Of-Coolant Accident for a Two-Loop Pressurized Water Reactor / M. Dehjourian // Nuclear Engineering and Technology. – 2016. – No 48. – P.1174-1183.

238. Desoky, A. A. Hydrogen, propane and gasoline laminar flame development in a spherical vessel / A. A. Desoky, Y. A. Abdel-Ghafar, R. M. El-Badrawy // Hydrogen Energy. – 1990. – No 15. – P.895-905.

239. Detonation propagation in hydrogen–air mixtures with transverse concentration gradients / L. R. Boeck, F. M. Berger, J. Hasslberger, T. Sattelmayer// Shock Waves. – 2015. – No 2. – P.181-192.

240. Finger, V. Achievements in the field of testing electrical equipment for fire resistance / V. Finger// Journal of electrical insulation EEE. – 1986. – No 2. – 128 p.

241. Gharari, R. A Review on Hydrogen Generation, Explosion and Mitigation During Severe Accidents in Light Water Nuclear Reactors / R. Gharari // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – No 4. – P.1939-1965.

242. Hostikka, S. International Atomic Energy Agency (IAEA), Mitigation of hydrogen hazards in water cooled power reactors / S. Hostikka. – Vienna, 2001. – 328 p.

243. Hostikka, S. International atomic energy agency, Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants; Final Results of a Coordinated Research Project / S. Hostikka. – Vienna, 2017. – 328 p.

244. Hostikka, S. Modelling the fire behaviour of electrical cables, in Conference SMIRT 19th, 10th Post Conference Seminar on "Fire Safety in Nuclear Power Plants and Installations / S. Hostikka. – Toronto, 2007. – 328 p.

245. Hoyes, J. R. CFD modeling of hydrogen stratification in enclosures: Model validation and application to PAR performance / J. R. Hoyes, M. J. Iving // Nuclear Engineering and Design. – 2016. – No 310. – P.142-153.

246. IAEA The Management System for the Processing, Handling and Storage of Radioactive Waste [Electronic resource] // [iaea.org: \[website\]](https://www.iaea.org/publications/7879/the-management-system-for-the-processing-handling-and-storage-of-radioactive-waste). – Available at: <https://www.iaea.org/publications/7879/the-management-system-for-the-processing-handling-and-storage-of-radioactive-waste> (accessed: 26.07.2023).

247. Karim, G. A. Flame propagation and extinction within mixtures involving hydrogen and diluent inert gases / G. A. Karim, V. P. Panlilio // Hydrogen Energy. – 1993. – No 2. – P.157-162.

248. Liu, F. Combustion and flow of premixed lean hydrogen-air mixtures in the connected compartments / F. Liu, Y. Yoshizawa // Hydrogen Energy. – 1998. – No 5. – P.373-380.

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

250. Nguyen, T.D. Experimental-theoretical approach to carbon monoxide density calculation at the incipient stage of the fire indoors/ S. V. Puzach, E. V. Suleykin, R. G. Akperov and T. D. Nguyen // Journal of Physics: Conference Series 891. – 2017.

251. Orloff, K. G. Hydrogen cyanide in ambient air near a gold heap leach field: Measured vs. modeled concentrations / K.G. Orloff, B. Kaplan, P. Kowalski // Atmospheric Environment. – 2006. – Vol. 40, Issue 17. – P. 3022-3029.

252. Pauluhn, J. Acute inhalation toxicity of carbon monoxide and hydrogen cyanide revisited: Comparison of models to disentangle the concentration $\times$ time conundrum of lethality and incapacitation / J. Pauluhn // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. – 2016. – No 80. – P.173-182.

253. Pauluhn, J. NFPA 92B Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces. / J. Pauluhn. – Massachusetts: NFPA, 2009. – 65 p.

254. Puzach, S. V. Some features of formation of local combustible hydrogen-air mixtures during continuous release of hydrogen in a room / S. V. Puzach // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2003. – No 28. – P.1019-1026.

255. Rozen, A. Simulation of Start-Up Behaviour of a Passive Autocatalytic Hydrogen Recombiner / A. Rozen // *Nukleonika*. – 2018. – No 2. – P.27-41.

256. Rubtsov, N. M. Concentration limits of combustion in rich hydrogen – air mixtures in the presence of inhibitors / N. M. Rubtsov, B. S. Seplyarskii // *Mendeleev Communications*. – 2010. – No 5. – P.296-298.

257. Sakurai, T. Toxic gas tests with several pure and mixed gases using mice / T. Sakurai // *Fire sciences*. – 1989. – No 1. – P.22-27.

258. SAND 2013-2388 NPP cable materials: review of qualification and currently available ageing data for margin assessments in cable performance, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2013 [Electronic resource] // Sandia National Laboratories: [website]. – Available at: [https:// share.ansi.org/shared %20 documents/Meetings%20and%20Events/NESCC/NESCC-Final-Report-Electrical-Cabling-Task-Group-Current-Status-Recommendations-Future-Development.pdf](https://share.ansi.org/shared_documents/Meetings%20and%20Events/NESCC/NESCC-Final-Report-Electrical-Cabling-Task-Group-Current-Status-Recommendations-Future-Development.pdf) (accessed: 26.07.2023).

259. Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations / J. Smagorinsky // *Month.Weath. Rev.* – 1963. – No 91. – P.99-164.

260. Status Report on Hydrogen Management and Related Computer Codes. NEA/CSNI/R [Electronic resource] // Nuclear Energy Agency: [website]. – Available at: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_19516/status-report-on-hydrogen-management-and-related-computer-codes?details=true (Accessed: 26.07.2023).

261. Safety standard for hydrogen and hydrogen systems NSS 1740.16, Office of Safety and Mission Assurance Washington, DC 20546 [Electronic resource] // National Aeronautics and Space Administration: [website]. – Available at: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f11/871916.pdf> (Accessed: 26.07.2023).

262. UNSCEA. [Electronic resource] // un-ilibrary.org: [website]. – Available at: <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210010061> (accessed: 26.07.2023).

263. Vollmer, K. G. Deflagration-to-detonation transition in hydrogen/air mixtures with a concentration gradient / K. G. Vollmer, F. Ettner, T. Sattelmayer// Combustion Science and Technology. – 2012. – No 10. – P. 1903-1915.

Приложение А (обязательное)

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

“УТВЕРЖДАЮ”

Начальник отдела организации и контроля
единой технической политики
АО «Атомэнергoproject»



С.Л. Егоров

« 03 » марта 2023 г.

АКТ

на внедрение результатов исследований, полученных при выполнении
диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук
Лебедченко Ольги Сергеевны

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Лебедченко Ольги Сергеевны использованы для подтверждения (обоснования) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности объектов Курская АЭС-2 при:

- расчете динамики развития пожаров с учётом наихудших сценариев, при которых ожидаются наихудшие последствия;
- определении требуемых пределов огнестойкости ограждающих строительных конструкций с учётом времени полного свободного выгорания пожарной нагрузки в помещениях (в объёме пожарного отсека);
- расчете промежутков времени от начала пожара до момента выгорания кислорода (прекращение горения) в помещениях с закрытыми дверями для всех рассматриваемых наиболее опасных сценариев развития пожара при горении кабелей НГ.

Главный инженер по пожарной безопасности

В.И. Захаров

Главный специалист,
кандидат технических наук

К.Н. Орлов

Главный специалист

Д.С. Никонов

« 03 » марта 2023 г.

“УТВЕРЖДАЮ”
Генеральный директор
ООО «ЦБС»
А.А. Харланов
«09» февраля 2022 г.

АКТ

на внедрение результатов исследований, полученных при выполнении
диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук
Лебедченко Ольги Сергеевны

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Лебедченко Ольги Сергеевны использованы для подтверждения (обоснования) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности энергоблока №1 Курская АЭС-2 при:

– определении уровня обеспечения безопасности людей в помещениях класса функциональной пожарной опасности Ф 4.3 для реакторного здания UJA, вспомогательного реакторного здания UKC, здания резервного пункта управлением блоком UCB, здания обессоливающей установки UGD, здания переработки и хранения UKS и здания электроснабжения нормальной эксплуатации UBA при возможном пожаре;

– проверке выполнения условия безопасной эвакуации людей и расчете пожарных рисков для реакторного здания UJA, вспомогательного реакторного здания UKC, здания резервного пункта управлением блоком UCB, здания обессоливающей установки UGD, здания переработки и хранения UKS и здания электроснабжения нормальной эксплуатации UBA.

Руководитель проектного отдела

Начальник сектора пожарной безопасности
Главный инженер проекта

М. В. Грязнов

С.А. Щеглов

С.А. Дубровин

«09» февраля 2022 г.

“УТВЕРЖДАЮ”

Начальник отдела организации и контроля
единой технической политики
АО «Атомэнергoproject»

С.Л. Егоров

« 03 » марта 2023 г.

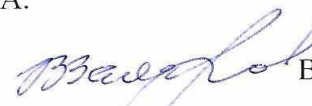
АКТ

на внедрение результатов исследований, полученных при выполнении
диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук
Лебедченко Ольги Сергеевны

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Лебедченко Ольги Сергеевны использованы для подтверждения (обоснования) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности объектов Нововоронежская АЭС-2 при:

- определении уровня обеспечения безопасности людей в помещениях класса функциональной пожарной опасности Ф 4.3 для реакторного здания UJA, вспомогательного реакторного здания UKC, здания турбины UMA, здания резервной дизельной электростанции UBN, здание электроснабжения нормальной эксплуатации UBA, здание переработки и хранения радиоактивных отходов UKS, здания UKU при возможном пожаре;
- определении мер пожарной безопасности для персонала, находящегося в реакторном здании UJA и выполняющего функции по приведению энергоблока в безопасное состояние, подлежащего спасению, при защите помещений управления и путей эвакуации от воздействия ОФП в течение времени, необходимого для начала спасательных работ и тушения пожара;
- определении требуемых пределов огнестойкости ограждающих строительных конструкций с учётом времени полного свободного выгорания пожарной нагрузки в помещениях (в объёме пожарного отсека);
- предотвращения одновременного выхода из строя 1-го и 2-го каналов системы безопасности в реакторном здании UJA.

Главный инженер по пожарной безопасности
Главный специалист,
кандидат технических наук
Главный специалист

 В.И. Захаров
 К.Н. Орлов
 Д.С. Никонов

« 03 » марта 2023 г.

“УТВЕРЖДАЮ”

Начальник отдела организации и контроля
единой технической политики
АО «Атомэнергoproject»



С.Л. Егоров

« 03 » марта 2023 г.

АКТ

на внедрение результатов исследований, полученных при выполнении
диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук
Лебедченко Ольги Сергеевны

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Лебедченко Ольги Сергеевны использованы для подтверждения (обоснования) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности объектов АЭС «Руппур» в Народной Республике Бангладеш при:

- определении уровня обеспечения безопасности людей в помещениях класса функциональной пожарной опасности Ф 4.3 для реакторного здания UJA, вспомогательного реакторного здания UKC, здания турбины UMA, здания резервной дизельной электростанции UBN, здание электроснабжения нормальной эксплуатации UBA, здание переработки и хранения радиоактивных отходов UKS, здания UKU при возможном пожаре;

- определении мер пожарной безопасности для персонала, находящегося в реакторном здании UJA и выполняющего функции по приведению энергоблока в безопасное состояние, подлежащего спасению, при защите помещений управления и путей эвакуации от воздействия ОФП в течение времени, необходимого для начала спасательных работ и тушения пожара;

- определении требуемых пределов огнестойкости ограждающих строительных конструкций с учётом времени полного свободного выгорания пожарной нагрузки в помещениях (в объёме пожарного отсека);

Главный инженер по пожарной безопасности

 В.И. Захаров

Главный специалист,
кандидат технических наук

 К.Н. Орлов

Главный специалист

 Д.С. Никонов

« 03 » марта 2023 г.



01@pogexpert.ru

8 473 280 20 01
многоканальный

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «Пожарный Эксперт»


 Д.В. Блинов
 «14» февраля 2021 г.

АКТ

на внедрение результатов исследований, полученных при выполнении
диссертационной работы на соискание ученой степени доктора
технических наук Лебедченко Ольги Сергеевны

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Лебедченко Ольги Сергеевны использованы для подтверждения (обоснования) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности объектов АЭС «Аккую» в Турецкой Республике при:

- расчёте динамики развития пожаров с учётом наихудших сценариев, при которых ожидаются наихудшие последствия;
- определении требуемых пределов огнестойкости ограждающих строительных конструкций с учётом времени полного свободного выгорания пожарной нагрузки в помещениях (в объёме пожарных зон);
- определении требуемых (минимальных) расстояний и пределов огнестойкости противопожарных преград между каналами систем безопасности АЭС при размещении их в одной пожарной зоне;
- разработке мероприятий по обеспечению безопасности каналов СБ АЭС при невозможности обеспечения безопасных расстояний между каналами при размещении их в одной пожарной зоне.

Технический директор



А.М. Ненуженко

Главный инженер

Г.А. Зинченко

“УТВЕРЖДАЮ”
 Генеральный директор
 ООО «ЦБС»
 А.А. Харланов
 «04» октября 2022 г.

АКТ

на внедрение результатов исследований, полученных при выполнении
 диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук
 Лебедченко Ольги Сергеевны

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Лебедченко Ольги Сергеевны использованы для разработки 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 при:

- актуализации перечня помещений, в которых располагается оборудование, важное для безопасности, и регистрация их на чертежах сооружений АС;
- актуализации оценки расчетной (проектной) продолжительности пожара и усредненной температуры в отсеках/зонах объекта капитального строительства;
- актуализации выделенных Генеральным проектировщиком в категорию «пожарная зона» помещений, в которых находится оборудование, содержащее горючие вещества и материалы, и которые в результате строительства отделены от других помещений безопасными предельными расстояниями или противопожарными преградами;
- актуализации перечня выделенных в категорию «пожарный отсек (зона)» частей зданий АС, отделенных от других его частей противопожарными преградами;
- анализе способности противопожарных преград отсеков/зон выполнять функции по нераспространению расчетного (проектного) пожара (как внешнего, так и внутреннего) за пределы их границ;
- анализе достаточности принятых и реализованных решений по конструктивной огнезащите кабельных трасс, в том числе расположенных в межблочном пространстве и гермообъеме и в коридорах, являющихся путями эвакуации;
- анализе достаточности принятых и реализованных решений в помещениях с отсутствием предусмотренных требованиями нормативно - технических документов установок автоматического пожаротушения,
- анализе возможных сценариев развития пожара и его последствий для оборудования, важного для безопасности;

- выявлении тех систем и оборудования, важных для безопасности, функции которых могут быть нарушены при возникновении пожара внутри или вне того помещения, в котором размещено данное оборудование;
- составлении перечня видов опасности для оборудования, важного для безопасности, в том числе таких как: возможность возникновения отказа по общей причине оборудования, важного для безопасности из-за пожара;
- выявлении несоответствия системы противопожарной защиты объекта капитального строительства требованиям пожарной безопасности и проектным решениям;
- анализе влияния потери функций оборудованием, находящимся в отсеке/зоне, на безопасность энергоблока, на возможность осуществления его безопасного останова;
- анализе способности средств пассивной противопожарной защиты, имеющихся в отсеках/зонах, гарантировать сохранение функций расположенного там оборудования, важного для безопасности, включая оборудование, принимающее участие в процедуре безопасного останова и расхолаживания энергоблока;
- разработке обоснования комплекса технических решений и организационных мероприятий по обеспечению необходимого уровня противопожарной защиты оборудования, важного для безопасности, как от внутреннего, так и от внешнего пожаров, в том числе мероприятий по повышению огнестойкости конструкций и преград на границах пожарных отсеков/зон, через которые пожар может распространиться в соседние помещения;
- обосновании, невозможности нарушения функций безопасности более, чем в одном канале безопасности, при реализации предлагаемых компенсирующих мероприятий;
- разработке комплекса мероприятий, обосновывающего обеспечение безопасности персонала при пожаре: своевременное обнаружение и оповещение о пожаре, возможность беспрепятственной эвакуации персонала и защита его от воздействия опасных факторов пожара на эвакуационных путях и в помещениях щитов управления, спасение персонала, который может подвергнуться воздействию опасных факторов пожара;
- разработке комплекса мероприятий, обосновывающего обеспечение предотвращения распространения пожаров: конструктивные и объемно-планировочные решения, препятствующие распространению опасных факторов пожара по помещению, между помещениями, между группами помещений различной взрывопожарной и пожарной опасности, между пожарными отсеками и зонами, а также между зданиями.

Руководитель проектного отдела

Начальник сектора пожарной безопасности
Главный инженер проекта

М. В. Грязнов

С.А. Щеглов

С.А. Дубровин

« 04 » Октября 2022 г.

УТВЕРЖДАЮ

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

В.С.ШНЫПКО

января 2024 г.

AKT

на внедрение результатов исследований, полученных при выполнении

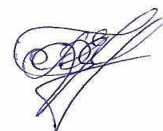
диссертационной работы на соискание ученой степени

доктора технических наук Лебедченко Ольги Сергеевны

Комиссия в составе: председателя комиссии заместителя начальника кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, полковника внутренней службы, Болдырева Е.Н; начальника кафедры пожарной автоматики, полковника внутренней службы, к.т.н, доцента Рубцова Д.Н.; заместителя начальника кафедры пожарной безопасности технологических процессов капитана внутренней службы, к.т.н. Грохотова М.А.; профессора кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, к.т.н, доцента Спиридонова В.П; профессора учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности, к.т.н, доцента, Комракова П.В. составила настоящий акт о том, что материалы диссертационной работы Лебедченко Ольги Сергеевны внедрены в учебный процесс кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, а именно при разработке фондовых лекций, проведении лекционных, лабораторных и практических занятий по направлению подготовки 20.05.01 «Пожарная безопасность» (квалификация специалист), 20.03.01 «Техносферная безопасность» (квалификация магистр, бакалавр) и 40.05.03 «Судебная экспертиза» (квалификация специалист) Академии ГПС МЧС России по дисциплине «Прогнозирование опасных факторов пожара» по темам: «Основные положения зонного моделирования пожаров», «Основы дифференциального метода прогнозирования ОФП», а так же по дисциплине «Теория динамики пожаров» по разделам: «Современные методы расчета

динамики пожара», «Влияние динамики пожара на огнестойкость конструкций», «Применение расчета динамики пожаров при расчете рисков».

Заместитель начальника кафедры
инженерной теплофизики и гидравлики
полковник внутренней службы



Болдырев Е.Н.

Начальник кафедры пожарной автоматики,
полковник внутренней службы,
к.т.н, доцент



Рубцов Д.Н.

Заместитель начальника кафедры
пожарной автоматики,
капитан внутренней службы, к.т.н



Грохотов М.А.

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



Спиридонов В.П.

Профессор учебно-научного комплекса
процессов горения и экологической безопасности,
к.т.н, доцент



Комраков П.В.

УТВЕРЖДАЮ

Директор Департамента
надзорной деятельности и
профилактической работы
МЧС России



кандидат технических наук

С.П. Воронов

«16» августа 2024 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы на соискание степени
доктора технических наук доцента кафедры инженерной теплофизики и
гидравлики ФГБОУ ВО Академия ГПС МЧС России

Лебедченко Ольги Сергеевны в Приказ МЧС России № 533 от 26.06.2024 г.
«Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска
на производственных объектах»

Комиссия в составе: заместителя начальника нормативно-технического отдела Миронова Романа Вячеславовича, старшего инспектора нормативно-технического отдела Нестерова Михаила Юрьевича, старшего инспектора нормативно-технического отдела, кандидата технических наук Панова Алексея Алексеевича подтверждает, что результаты диссертационного исследования Лебедченко Ольги Сергеевны были использованы при выполнении составной части научно-исследовательской работы на тему: «Переработка методики определения величин пожарного риска на производственных объектах» (пункт 1.10 раздела II Плана научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ МЧС России на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов, утвержденного приказом МЧС России от 24.01.2023 № 44) и внедрены в Приказ МЧС России № 533 от 26.06.2024 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», а именно в раздел I Приложения № 5 «Методы определения критической продолжительности пожара по опасным факторам пожара».

Лебедченко О.С. предложено в качестве исходных данных для моделирования динамики распространения токсичных газов в помещениях производственных объектов использовать экспериментальные данные по удельным коэффициентам образования токсичных газов и зависимостям парциальных плотностей токсичных газов от изменения парциальной

плотности кислорода, полученным в маломасштабной экспериментальной установке. Такой подход позволяет более точно, чем существующий метод, определить время блокирования путей эвакуации токсичными продуктами горения при пожаре.

Старший инспектор отдела
нормативно-технического Департамента
надзорной деятельности
и профилактической работы МЧС России



М.Ю. Нестеров

Старший инспектор отдела
нормативно-технического Департамента
надзорной деятельности
и профилактической работы МЧС России
кандидат технических наук



А.А. Панов

Заместитель начальника отдела
нормативно-технического Департамента
надзорной деятельности
и профилактической работы МЧС России



Р.В. Миронов