

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника Академии
ГПС МЧС России по научной работе
доктор технических наук, профессор

М. В. Алешков

«05» сентября 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (Академия ГПС МЧС России)

Диссертация «Теплофизические основы пассивных технологий систем пожарной безопасности АЭС с водо-водяными реакторами» выполнена на кафедре инженерной теплофизики и гидравлики Академии ГПС МЧС России.

В период подготовки диссертации и по настоящее время соискатель Лебедченко Ольга Сергеевна является доцентом кафедры инженерной теплофизики и гидравлики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».

В 1993 году окончила Московский институт тонкой химической технологии им. Ломоносова с присвоением квалификации «Инженер-технолог»

Ученая степень кандидата юридических наук по специальности 12.00.02 «Конституционное право; государственное управление; административное право; муниципальное право» присуждена в 1999 году диссертационным советом Академии управления МВД России.

Научный консультант – Пузач Сергей Викторович, заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», кафедра инженерной теплофизики и гидравлики, заведующий.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Общая оценка работы

Докторская диссертация Лебедченко Ольги Сергеевны представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, в которой содержится *научное решение* проблемы, имеющей важное социально-экономическое и хозяйственное значение – обеспечение пожарной безопасности АЭС с водо-водяными реакторами с помощью пассивных технологий систем пожарной безопасности.

Решение данной проблемы достигается реализацией комплексного подхода к разработке методов и методик расчета тепломассообмена, позволяющих обосновать параметры систем пассивной противопожарной защиты АЭС с ВВЭР для выполнения безопасного останова и расхолаживания реакторной установки при реальном режиме пожара.

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.

Актуальность темы исследования.

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

Радиационная и ядерная безопасность при пожарах на АЭС должна достигаться, в том числе и с помощью систем противопожарной защиты.

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

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

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

Методы пассивной защиты предусматривают минимальное влияние человеческого фактора (ошибочные действия персонала и т.п.) на показатели

безопасности. Помимо этого снижается влияние отказов обеспечивающих и управляющих СБ (обесточивание в энергосистеме, отказ источников охлаждающей воды и т.д.) на показатели безопасности.

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

Степень разработанности темы исследования.

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

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

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

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

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

В литературе, посвященной обеспечению водородной безопасности на АЭС, как правило, предложены варианты активной защиты от горения и взрыва водорода. Подавление горения и детонации водорода при аварии осуществляется за счет использования имеющихся на АЭС с РУ ВВЭР-1000 запасов воды, которые

находятся в деаэраторах, при аварии в гермзоне. Распространение и гашение пламени в смесях, содержащих водород и инертные газы-разбавители, исследовали *G. A. Karim u V. P. Panlilio*.

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

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

Д.т.н. С.Г. Цариченко разработал комплекс инженерных методов расчета предельных условий дефлаграционного горения предварительно перемешанных водородосодержащих смесей при различных начальных параметрах среды. С.Г. Цариченко, Ю.Н. Шебеко и А.Я. Корольченко провели численное моделирование распространения детонации в газовом слое с учетом химической кинетики и рассчитали концентрационные пределы детонации в трубах для смесей водород-воздух-инертный газ. При этом, образование взрывопожароопасной водородно-воздушной смеси при натекании водорода в помещение, не предусмотренной технологическим процессом при безопасном останове и расхолаживании реакторной установки, не было исследовано.

В работах Г.И. Смелкова рассмотрены теория и инженерная практика определения пожарной опасности электроустановок и их причастности к пожарам

на объектах при различного рода аварийных режимах. Им введено понятие «огнестойкость кабеля» как его работоспособность в условиях пожара.

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

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

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

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

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

Личный вклад автора в получении научных результатов.

Результаты диссертационного исследования получены автором лично и при ее непосредственном участии. Опубликованные по результатам диссертационной

работы научные монографии и статьи написаны ею лично и в соавторстве, ее личный вклад в эти работы не вызывает сомнений.

Лебедченко О.С. сформулировала проблему, цель и задачи научного исследования, а так же разработала методы и методики проведения численных и натуральных экспериментов. Лично участвовала в проведении экспериментов, осуществляла обработку и анализ экспериментальных данных. Сформулировала основные положения и выводы диссертационного исследования.

Достоверность представленных в диссертации результатов достигалась:

- внутренней непротиворечивостью полученных данных;
- положительными результатами внедрения;
- 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.

Научная новизна диссертационной работы:

- рассчитаны на основе разработанных методик расчета параметров систем ГПЗ по проекту «АЭС-2006» для ВВЭР-1200 температурные режимы реального пожара в основных зданиях АЭС с учетом новых данных по свойствам горючей нагрузки (кабели НГ), что позволило определить огнестойкость пожарных зон и безопасные расстояния между элементами конструкций, в том числе кабельных коробов;

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

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

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

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

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

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

Теоретическая значимость работы заключается в:

– обосновании температурных режимов реального пожара в зданиях АЭС;

– обосновании огнестойкости пожарных зон и безопасных расстояний между элементами конструкций, в том числе кабельных коробов;

– выявлении температуры пожара в помещении, при которой происходит короткое замыкание кабелей, используемых на АЭС;

– обосновании эффективности применения огнезащитных вспучивающихся покрытий кабелей при реальном температурном режиме пожара в зданиях АЭС;

– получении аналитических решений модельных задач натекания водорода в помещение;

– обнаружении существования критического значения массового расхода газообразного водорода, натекающего в нижнюю часть помещения, при превышении которого резко увеличивается опасность возникновения горения и взрыва во всем гермообъеме реакторного здания АЭС.

Практическая значимость работы подтверждена использованием результатов исследования при:

– подтверждении (обосновании) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности энергоблока №1 Курской АЭС-2;

– подтверждении (обосновании) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности объектов Нововоронежской АЭС-2;

– подтверждении (обосновании) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности объектов АЭС «Руппур» в Народной Республике Бангладеш;

– подтверждении (обосновании) правильности принятых проектных решений по обеспечению пожарной безопасности объектов АЭС «Аккую» в Турецкой республике;

– разработке актуализированной версии анализа влияния пожаров и их последствий на безопасный останов и расхолаживание реакторной установки, локализацию и контроль радиоактивных выбросов в окружающую среду энергоблока №1 Ленинградской АЭС-2;

– разработке Приказа МЧС России №533 от 26.06.2024 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах»;

– разработке фондовых лекций, проведении лекционных, лабораторных и практических занятий со специалистами, бакалаврами и магистрами Академии ГПС МЧС России по дисциплинам «Прогнозирование опасных факторов пожара» и «Теория динамики пожаров».

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Полученные результаты могут быть использованы:

– при расчете огнестойкости пожарных зон АЭС и безопасных расстояний между элементами конструкций, в том числе кабельных коробов при реальном температурном режиме пожара;

– для определения времени прогрева изоляции кабелей от начала возгорания до потери работоспособности кабелей при реальном температурном режиме пожара;

– для определения работоспособности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС без и с использованием вспучивающего огнезащитного покрытия, в условиях реальном температурном режиме пожара;

– для определения условий безопасной эвакуации персонала АЭС и выбора средств индивидуальной защиты для персонала, приводящего реакторную установку в безопасное состояние;

– для выявления не предусмотренных технологическим процессом образования взрывопожароопасной водородно-воздушной смеси и определения необходимой степени чувствительности приборов контроля концентрации водорода в реакторном здании АЭС, а также рекомендации по их оптимальному расположению;

– для аналитической оценки коэффициентов участия водорода в горении и взрыве при натекании водорода в помещение;

– в научно-исследовательских работах и учебном процессе образовательных учреждений пожарно-технического профиля.

Полнота опубликования основных научных результатов, полученных автором.

Все основные результаты исследования, полученные автором, достаточно полно 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.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.10.1 «Пожарная безопасность» (технические науки), а именно:

пункту 3 «Разработка научных основ, моделей и методов исследования процессов горения, пожаро- и взрывоопасных свойств веществ, материалов, производственного оборудования и конструкций»;

пункту 4 «Исследование процессов протекания аварий, пожаров и взрывов, условий их каскадного и катастрофического развития, разработка методов оценки различных опасных воздействий на людей, объекты защиты и прилегающие территории, а также способов их снижения»;

пункту 5 «Исследование проблем повышения устойчивости объектов защиты к воздействию опасных факторов пожаров и их сопутствующих проявлений»

Диссертация «Теплофизические основы пассивных технологий систем пожарной безопасности АЭС с водо-водяными реакторами» Лебедченко Ольги Сергеевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки).

Заключение принято на заседании профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников учебно-научного комплекса учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты Академии ГПС МЧС России.

Присутствовали на заседании 17 чел. Результаты голосования: «за» – 17 чел.; «против» – 0; «воздержавшихся» – 0, протокол № 9 от 29.08.2024.

Начальник учебно-научного комплекса
пожарной безопасности объектов защиты
Академии ГПС МЧС России,
д.т.н., профессор

05.09.2024

З

Д.А. Самошин