

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

д.т.н., доцента Барбина Николая Михайловича на диссертационную работу Лебедченко Ольги Сергеевны на тему «Теплофизические основы пассивных технологий систем пожарной безопасности АЭС с водо-водяными реакторами», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки)

### **Актуальность темы исследования**

Катастрофические последствия пожаров на атомных электростанциях говорят о необходимости высокого уровня надежности противопожарной защиты. Одним из способов повышения надежности является использование пассивных систем пожарной безопасности, так как активные системы пожарной безопасности (пожарная сигнализация, дымоудаление, пожаротушение, оповещение и управление эвакуацией) могут быть разрушены в результате аварии.

Методы пассивной противопожарной защиты предусматривают минимальное влияние человеческого фактора на показатели безопасности. Кроме этого снижается влияние отказов обеспечивающих и управляющих систем безопасности, например, обесточивание в энергосистеме, отказ источников охлаждающей воды и др., на показатели безопасности.

Критически важным для обеспечения безопасности атомных станций является процесс безопасного останова реакторной установки, для которого используются каналы системы безопасности. До этого времени не было представлено научных исследований ряда параметров работоспособности сигнальных и силовых кабелей

Кроме того, до настоящего времени характеристики существующих систем пассивной противопожарной защиты АЭС не определяют с учетом реальных температурных режимов пожара в помещениях с учетом новых данных по свойствам горючих материалов, находящихся в помещениях АЭС.

Поэтому разработка теплофизических основ для создания комплексной системы пассивной противопожарной защиты зданий АЭС с водо-водяными реакторами, в которых расположено оборудование для безопасного останова и расхолаживания реакторной установки с каналами системы безопасности, является актуальной.

### **Структура и содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, степень ее научной и практической значимости, формулируются цели, задачи, объект и предмет исследования, представлена общая концепция и новизна исследования.

**В первой главе** проанализированы причины аварий и пожаров на АЭС на протяжении всего периода использования атомной энергетики. Показано, что пожар на АЭС, чаще всего, является результатом аварии, сопровождающейся разливом масла, выбросом водорода, либо короткого замыкания. Аварии приводят к разрушению активных систем противопожарной защиты, таких как, система дымоудаления и автоматические установки пожаротушения,

следовательно, противопожарная защита должна обеспечиваться, в первую очередь, пассивными мерами.

Представлен состав комплексной системы пассивной противопожарной защиты. Зоны, где расположены элементы разных каналов системы безопасности, представляют особую опасность с точки зрения потери более одного канала системы безопасности при приведении реакторной установки в безопасное состояние.

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

Выявлены особенности водородной безопасности АЭС с водо-водяными реакторами. Показана необходимость разработки математической модели для расчета размеров и параметров локальных взрывопожароопасных водородно-воздушных смесей, образующихся при натекании водорода при различных режимах в объеме гермзоны АЭС в случае приведения реакторной установки в безопасное состояние, а также для обоснования выбора минимального концентрационного предела измерений и расположения датчиков водорода.

Обзор литературных источников позволил сформулировать необходимые методы и методики расчета, которые нужно использовать для обоснования основных параметров пассивных технологий АЭС с водо-водяными реакторами.

**Во второй главе** рассчитаны температурные режимы реального пожара в основных зданиях АЭС с учетом новых данных по свойствам горючей нагрузки (не распространяющие горение кабели), что позволило определить огнестойкость пожарных зон и безопасные расстояния между элементами конструкций, в том числе кабельных коробов, на примерах Ленинградской АЭС-2, «Аккую» и Нововоронежской АЭС-2.

С помощью рассчитанных температурных режимов пожара решены следующие задачи исследования: определены пределы огнестойкости пожарных зон; безопасные расстояния между кабелями; исследована работоспособность кабелей, а так же безопасность эвакуации персонала атомной станции из реакторного здания. Во всех рассматриваемых помещениях при реальном температурном режиме пожара время достижения температуры короткого замыкания не распространяющих горение кабелей 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).

Даны рекомендации для устранения нарушений требований пожарной безопасности в рассматриваемых зданиях АЭС, а именно:

сформулированы требования к температуре вспучивания огнезащитных составов для обработки наружных поверхностей кабелей СБ (вышеуказанная

температура должна быть не более 150°C для распространяющих горение кабелей и 180°C для не распространяющих горение кабелей;

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

**В третьей главе** представлены результаты теоретической и экспериментальной оценки работоспособности кабелей каналов системы безопасности АЭС с водо-водяными реакторами, в том числе, с использованием огнезащитных покрытий.

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 системы безопасности АЭС.

Разработана экспериментальная установка исследования работоспособности кабелей при реальном режиме пожара. Проведена теоретическая и экспериментальная оценка эффективности применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов системы безопасности АЭС с водо-водяными реакторами в условиях пожара при одновременном воздействии токовой нагрузки и различных температурных режимов пожара.

Обнаружено, что при стандартных и реальных температурных режимах пожара может произойти потеря изоляционными материалами силовых кабелей каналов системы безопасности АЭС эксплуатационных свойств без вспучивания огнезащитного состава.

Разработана методика, по которой необходимо проводить испытания кабельной продукции при реальном температурном режиме пожара для обоснования эффективности применения огнезащитных вспучивающихся покрытий.

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

Проведена экспериментальная оценка токсичности газовой среды помещения при терморазложении силовых и сигнальных не распространяющих горение кабелей.

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. При горении не распространяющих горение кабелей в помещениях АЭС кроме

выделения оксида углерода образуется высокотоксичное соединение – циановодород, что обусловлено содержанием азота в антипиренах.

Получены удельные массовые коэффициенты образования циановодорода и монооксида углерода для электрических кабелей с изоляцией, изготовленной из полимеров с огнезащитными добавками, которые необходимы использовать при расчете времени блокирования путей эвакуации из помещений АЭС.

**В пятой главе** показано, что для решения всех задач безопасности, связанной с водородом, нужно уметь рассчитать концентрационные поля водородно-воздушной смеси при различных аварийных ситуациях.

Получены аналитические решения для расчета распределения концентраций водорода в случае ряда модельных задач натекания водорода, что позволило определить коэффициент участия водорода в горении и взрыве.

Разработана зонная модель расчета концентраций водорода при его натекании в помещение большого объема (контейнер реакторного здания).

Проведенные расчеты показали, что при возможном сценарии аварийной ситуации натекания водорода локальные взрыво- и пожароопасные зоны водородно-воздушной смеси могут находиться в любой части контейнера реакторного здания, а не только в припотолочной его части.

Показано, что используемые датчики концентрации водорода в верхней точке подкупольного пространства реакторного здания могут не обнаружить водород при пороге чувствительности в 2 % об, если число Рейнольдса превышает значение 5000. При этом по высоте конвективной колонки образуются водородно-воздушные смеси, находящиеся в пожаро- и взрывоопасных концентрационных пределах.

**Заключение** содержит основные выводы по диссертационной работе, полностью отражающие содержание диссертации.

**Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций** диссертации обусловлена 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** наиболее существенных результатов работы состоит в следующем:

– рассчитаны температурные режимы реального пожара в основных зданиях, позволяющие определить огнестойкость пожарных зон и безопасные расстояния между элементами конструкций в условиях реального пожара;

– разработан новый метод и методика теоретического моделирования работоспособности силовых и сигнальных кабелей, расположенных на АЭС, при стандартных и реальных температурных режимах пожара, что позволяет спрогнозировать времена прогрева от начала пожара до потери работоспособности кабелей;

– получены теоретические данные по максимальным величинам силы тока, что позволяет корректно проводить электрический неискаженный сигнал

по кабелям в течение времени, необходимого для приведения реакторной установки в безопасное состояние в начальной стадии реального режима пожара;

– разработан экспериментальный метод и методика проведения эксперимента, позволяющие исследовать работоспособность силовых и сигнальных кабелей, находящихся в помещениях АЭС без и с огнезащитой, при реальном температурном режиме пожара;

– получены результаты экспериментальных исследований работоспособности силовых и сигнальных кабелей, в том числе с использованием вспучивающего огнезащитного покрытия, которые позволили определить температуру и время наступления короткого замыкания кабелей каналов системы безопасности при реальном температурном режиме пожара;

– получены результаты экспериментальных исследований токсичности силовых и сигнальных кабелей, используемых на АЭС, при реальном температурном режиме пожара, что позволяет определить условия выполнения безопасной эвакуации персонала АЭС и выбрать средства индивидуальной защиты для персонала, приводящего реакторную установку в безопасное состояние;

– разработанные математическая зонная модель и аналитические решения модельных задач, которые позволяют 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 числа Рейнольдса при натекании водорода в нижнюю часть помещения, при котором 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».

Автореферат диссертации по содержанию и оформлению соответствует требованиям ВАК России.

По работе имеются следующие замечания, которые не влияют на положительную оценку работы:

1. В главе 4 диссертационной работы не приведена обработка результатов экспериментов по определению парциальной плотности монооксида углерода и циановодорода.

2. При расчете пределов огнестойкости железобетонных ограждающих конструкций критическая температура принималась равной 500°С. Однако не проведен прочностной расчет, обосновывающий данную температуру.

3. При экспериментальном исследовании токсичности продуктов горения не распространяющих горение кабелей определялся только ограниченный спектр токсичных газов.

4. При исследовании водородной безопасности не рассматривался процесс горения образовавшихся локальных пожаро-взрывоопасных водородно-воздушных смесей.

5. Во второй главе проведено расчетное обоснование пределов огнестойкости ограждающих конструкций Ленинградской АЭС-2, АЭС Аккую и Нововоронежской АЭС-2, но не сделано их сравнение для этих АЭС.

6. Объяснить влияние температуры на электрические параметры (R,C,L) различных кабельных линий.

Следует отметить, что данная работа представляет интерес также для специалистов в области ядерных энергетических установок и радиационной безопасности.

### **Заключение**

Диссертационная работа Лебедченко О. С., выполненная на тему «Теплофизические основы пассивных технологий систем пожарной безопасности АЭС с водо-водяными реакторами», является законченным

научно-квалификационным трудом, в котором решена проблема, имеющая важное социально-экономическое и хозяйственное значение для страны – обеспечение пожарной безопасности АЭС с водо-водяными реакторами с помощью пассивных технологий систем пожарной безопасности.

Диссертация 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».

Считаю, что диссертационная работа Лебедченко О. С. «Теплофизические основы пассивных технологий систем пожарной безопасности АЭС с водо-водяными реакторами» отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор Лебедченко Ольга Сергеевна заслуживает присуждения искомой степени доктора технических наук.

**Официальный оппонент:**

Ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отделения УНК пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Уральского института ГПС МЧС России  
доктор технических наук, доцент

Барбин Николай Михайлович

«05» 12 2024г.

Подпись Барбина Николая Михайловича заверяю:

*Заместитель начальника инспекции по научной работе, полковник в.в. Воронцов М.В. кандидат техн. наук*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий"

Адрес: 620062, Екатеринбург, ул Мира 22, Уральский институт ГПС МЧС России  
E-mail: uigps@uigps.ru  
Тел.: 8(343)374-07-06