

УДК 699.941, 624.07, 699.81

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-87-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-87-102)

EDN: PBZONJ

ОБОСНОВАНИЕ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В ПОМЕЩЕНИИ БЛОЧНОГО ЩИТА УПРАВЛЕНИЯ АЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРА

Д.И. ПУЦЕВ¹, д-р техн. наук

С.Ю. МИШИНА²

Е.А. ТКАЧЕВ³

Ю.М. ГРОШЕВ^{2,✉}, канд. техн. наук

¹ ООО «Научно-технический центр «Промышленная и пожарная безопасность» (ООО «НТЦ ППБ»), ул. Свердлова, д. 65, офис 5, г. Балашиха, 143900, Российская Федерация

² АО «Атомэнергoproject», Бакунинская ул., д. 7, стр. 1, г. Москва, 107996, Российская Федерация

³ АО «Атомэнергoproject», ул. 2-я Советская, д. 9/2а, г. Санкт-Петербург, 191036, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В данной статье приведено обоснование мероприятий по защите систем безопасности при пожаре в помещении блочного щита управления АЭС с применением полевого метода моделирования пожара.

Цель работы: разработка мероприятий по защите систем безопасности при пожаре в помещении блочного щита управления АЭС с применением полевой модели динамики пожара.

Материалы и методы. Проведен анализ назначения и области применения различных методов моделирования динамики развития и распространения опасных факторов пожара. Рассмотрено применение полевого метода для моделирования пожара в помещениях различного назначения.

Результаты. На основании проведенного анализа различных методов моделирования динамики развития и распространения опасных факторов пожара показана возможность использования полевого моделирования пожара для анализа пожарной опасности в помещении блочного щита управления. По результатам представленных расчетов показано, что температура в месте закладки арматуры не достигает критического значения при наиболее опасном варианте развития реального пожара, относящегося к типу пожара, контролируемого вентиляцией. Даже в случае неизолированного помещения распространение опасных факторов пожара через стены невозможно в течение трех часов при любой величине пожарной нагрузки в помещении блочного щита управления.

Выводы. Показана возможность применения полевой модели динамики пожара для проведения расчетов опасных факторов пожара в различных зданиях и помещениях, в том числе для обоснования достаточности предъявляемых требований по огнестойкости строительных конструкций. Данная закономерность получена исходя из обеспечения нераспространения пожара за пределы пожарной зоны в течение расчетного времени выгорания всей пожарной нагрузки. Конкретно в рассматриваемом варианте помещения (кабельный этаж) на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что предусмотренная в проекте огнестойкость барьеров, разделяющих помещения системы безопасности от помещений нормальной эксплуатации, гарантирует нераспространение пожара. Полученные закономерности могут быть использованы при разработке/уточнении нормативных документов по обеспечению пожарной безопасности действующих и строящихся АЭС.

Ключевые слова: полевой метод моделирования пожара, блочный щит управления, опасные факторы пожара, комплекс программного обеспечения

Для цитирования: Пуцев Д.И., Мишина С.Ю., Ткачев Е.А., Грошев Ю.М. Обоснование противопожарных мероприятий в помещении блочного щита управления АЭС с применением полевого моделирования пожара. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):87–102. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-87-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-87-102)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнялось за счет средств ФГБУ ВНИИПО МЧС России, ООО «НТЦ ППБ», АО «Атом-энергопроект».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.03.2024

Поступила после рецензирования 18.04.2024

Принята к публикации 25.04.2024

JUSTIFICATION OF FIRE PROTECTION MEASURES IN THE NPP CONTROL ROOM USING CFD FIRE MODELING

D.I. PUTSEV¹, Dr. Sci. (Engineering)

S.Yu. MISHINA²

E.A. TKACHEV³

Yu.M. GROSHEV^{2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

¹ Scientific and Technical Centre "Industrial and Fire Safety" (NTC PPB), Sverdlova str., 65, office 5, Balashikha, 143900, Russian Federation

² JSC Atomenergoproekt, Bakuninskaya str., 7, bld. 1, Moscow, 107996, Russian Federation

³ JSC Atomenergoproekt, Vtoraya Sovetskaya str., 9/2a, St. Petersburg, 191036, Russian Federation

Abstract

Introduction. The present paper provides justification of fire safety measures to protect systems of the main control room of NPP using computational fluid dynamics fire modeling.

Aim. To develop fire protection measures for systems of the NPP control room using computational fluid dynamics model.

Materials and methods. The study involved analysis into purpose and application scope of various methods for modeling dynamics of development and spread of fire hazards. The application of the computational fluid dynamics fire modeling for multifunctional premises was considered.

Results. Following the analysis of different methods for modeling the dynamics of development and spread of fire hazards, the present paper introduces the potential of using various methods of fire modeling in the evaluation of fire hazards for main control room. The obtained computations show that the temperature at the reinforcement site remains below the critical value in the most dangerous fire development scenarios like ventilation controlled fire. Moreover, fire hazards fail to spread through the walls of an uninsulated room within three hours at any value of fire load in main control room.

Conclusions. The study revealed a potential for using computational fluid dynamics fire modeling for evaluating fire hazards in various buildings and premises, as well as for justifying the sufficiency of fire resistance requirements established for building structures. This regularity is obtained under conditions of preventing the spread of fire beyond the fire zone within the estimated burnout time of the entire fire load. The results

received for this particular type of premises (cable floor) indicate that the designed fire resistance of the barriers separating safety system premises and normal operation premises guarantees non-proliferation of fire. The obtained regularities can be used in the development/revision of regulatory documents on fire safety at operating NPPs and NPPs under construction.

Keywords: CFD fire modeling, main control room, fire hazards, software package

For citation: Putsev D.I., Mishina S.Yu., Tkachev E.A., Groshev Yu.M. Justification of fire protection measures in the NPP control room using CFD fire modeling. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):87–102. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-87-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-87-102)

Authors contribution statement

All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding

The study was carried out with the financial support of FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, NTC PPB, JSC Atomenergoproekt.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.03.2024

Revised 18.04.2024

Accepted 25.04.2024

Введение

Целью работы является обоснование защиты систем безопасности от отказов по общей причине при пожаре в помещении блочного щита управления (БЩУ) в связи с отсутствием установок пожаротушения на блочном щите управления. На БЩУ расположены элементы оборудования и кабели, относящиеся к разным каналам систем безопасности. Канальное оборудование и кабели расположены в одной пожарной зоне, в результате одного исходного события «пожар» возможен выход из строя оборудования и кабелей разных каналов, расположенных в рассматриваемой пожарной зоне. В этом случае отказы оборудования разных каналов системы безопасности (СБ) следует рассматривать как отказ по общей причине по отношению к исходному событию. Оценка достаточности противопожарной защиты и физического разделения элементов разных каналов систем безопасности, включая элементы САЭ, выполняется на основе расчетно-аналитического анализа влияния пожара на БЩУ на безопасность АЭС.

Для проведения расчета динамики скорости развития и возможных режимов пожара, определения требований к безопасным расстояниям и пределам огнестойкости огнепреграждающих конструкций российскими нормами предусмотрено применение расчетных и экспериментальных методов. В последние годы у нас в стране и за рубежом большое внимание уделяется развитию расчетных методов оценки огнестойкости. Сущность расчета в общем виде сводится к оценке распределения температур по сечению конструкции в условиях пожара (теплотехническая часть) и вычислению несущей способности нагретой конструкции (статическая часть). Однако теория огнестойкости строительных конструкций еще недостаточно разработана, поэтому даже опытному конструктору нелегко спроектировать нужную по качеству огнезащиту силовых элементов конструкций. Первая проблема,

которую преодолевает инженер-проектировщик на этом пути, заключается в определении характера распределения температур в сечениях материала строительной конструкции через некоторые интервалы времени. Иными словами, он должен решить задачу нестационарного прогрева материала силового элемента в условиях пожара.

Методики расчета локальных параметров пожара

Для описания термогазодинамических параметров пожара применяются три основные группы детерминистических моделей: интегральные, зонные (зональные) и полевые.

Выбор конкретной модели расчета времени блокирования путей эвакуации следует осуществлять исходя из следующих предпосылок:

а) интегральный метод:

- для зданий, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;
- для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерными размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз);
- для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара.

б) зонный (зональный) метод:

- для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз).

В отличие от интегральных моделей зональный метод может использоваться:

- для помещений большого объема, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;
- для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т. д.).

в) полевой метод:

- для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (атриумы с системой галерей и примыкающих коридоров, многофункциональные центры со сложной системой вертикальных и горизонтальных связей и т. д.);
- для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые автостоянки большой площади и т. д.);
- для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара, и т. д.).

Для определения фактических пределов огнестойкости строительных конструкций использовалась математическая модель расчета прогрева строительных конструкций.

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

За наступление предела огнестойкости строительной конструкции перехода принимается момент времени от начала пожара, когда температура хотя бы в одном месте конструкции достигает критического значения.

Таким образом, в случаях, когда требуется рассчитать локальные параметры развития пожара или область применения не позволяет использовать эмпирические или среднеобъемные модели для расчета динамики пожара, применяется созданная во ВНИИПО полевая модель. Это относится прежде всего к расчетам пожара в больших помещениях, помещениях с неравномерно распределенной пожарной нагрузкой и сложным режимом газообмена, к задаче определения безопасных расстояний для оборудования систем безопасности. Данная модель создана с учетом требований и рекомендаций по применению методов полевого моделирования и предусматривает решение системы уравнений газодинамики и теплообмена с учетом моделирования процессов горения и переноса тепла излучением.

При расчетах использовались программы, официально зарегистрированные в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара, № 2006614238. Определение огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара, № 2006614237).

Методики определения требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкций на основе расчетов динамики пожара в помещении

Эмпирические методы расчета режима пожара и степени воздействия опасных факторов пожара (ОФП) на конструкции во многих случаях дают непосредственную оценку эквивалентной (по степени воздействия) продолжительности для строительных конструкций. При проведении расчетов динамики пожара в помещении на основе среднеобъемных или полевых дифференциальных уравнений возможны более точные расчеты параметров развития пожара, но непосредственных данных об эквивалентной продолжительности пожара из решения не следует. В этих случаях возможны два подхода к определению требований по огнестойкости:

1. По результатам моделирования пожара определяются его продолжительность и динамика среднеобъемных характеристик. На основе эмпирических методов определяется эквивалентная продолжительность пожара для строительных конструкций.

2. Производится решение сопряженной задачи теплообмена, то есть в процессе моделирования пожара проводится непосредственный расчет режимов прогрева строительных конструкций. По результатам максимального (среднего или локального) прогрева конструкций оценивается возможность ее повреждения в условиях реального пожара. В этом случае необходим более сложный анализ прочности в условиях прогрева, в то же время дающий более точные результаты, так как определяется фактическая огнестойкость, а не пересчет на результаты испытаний в стандартных условиях.

Исходные данные для расчетного анализа

Помещения щитов управления предназначены для размещения в них панелей и пультов контроля, управления и регулирования. В качестве щитовых изделий используются как панели, так и щиты шкафные, на которых устанавливаются вторичные приборы: табло, кнопки и ключи управления и т. д. Ограждающие конструкции БЩУ выполнены с пределом огнестойкости не менее 1,5 часа. Двери открываются наружу.

На БЩУ размещены панели и пульта со средствами отображения основных параметров и органы управления основными механизмами и арматурой. С БЩУ осуществляется постоянный оперативный контроль и управление технологическими системами, оборудованием и процессами в основных режимах работы энергоблока. На БЩУ размещаются средства контроля параметров вспомогательных технологических установок, панели автоматического регулирования, защит и блокировок.

Основной пожарной нагрузкой на БЩУ являются кабели: контрольные, управления и электропитания.

На БЩУ предусмотрены приточная и вытяжная системы вентиляции. Во всех приточных воздуховодах при входах в данные помещения и воздуховодах вытяжных вентиляционных систем в местах выходов из данных помещений при пересечении ими противопожарных преград установлены огнезадерживающие воздушные клапаны с электроприводами. На БЩУ располагаются четыре рабочих места оперативного персонала с постоянным их присутствием.

С резервного щита управления (РЩУ) обеспечивается возможность надежного перевода реактора в подкритическое расхолаженное состояние и поддержание его в этом состоянии, а также приведение в действие систем безопасности и получение информации о состоянии реактора. Основную пожарную нагрузку на РЩУ несут кабели контрольные, управления и электропитания. Ограждающие конструкции помещения РЩУ выполнены с пределом огнестойкости не менее 1,5 часа. Проход кабелей в помещение РЩУ осуществляется через кабельные шахты деаэрационной этажерки, не пересекаясь с кабелями БЩУ. Помещение РЩУ оборудовано автоматической установкой газового пожаротушения. Для помещения РЩУ предусмотрены приточная и вытяжная системы вентиляции. На воздуховодах установлены огнезадерживающие воздушные клапаны с электроприводами. По сигналу автоматической установки пожарной сигнализации клапаны автоматически закрываются. Постоянно присутствующего персонала на РЩУ нет.

Системы вентиляции

В помещениях БЩУ, РЩУ, кабельного этажа БЩУ, в которые подводятся кабели от трех каналов безопасности, вентиляция осуществляется отдельными системами для каждого из данных помещений, при этом вентиляционные установки также запитываются от трех каналов. На воздуховодах устанавливаются противопожарные клапаны. Для предотвращения распространения пожара по воздуховодам вентиляционных систем предусмотрены:

- раздельная вентиляция помещений, относящихся к разным каналам безопасности;
- установка огнезадерживающих клапанов в местах пересечения воздуховодами противопожарных перегородок и перекрытий.

Отдельные системы приточно-вытяжной вентиляции предусмотрены для кабельных этажей нормальной эксплуатации, кабельных этажей каналов безопасности.

Оборудование этих вентиляционных систем установлено в отдельных помещениях, на воздуховодах при пересечении ими противопожарных преград устанавливаются огнезадерживающие клапаны.

Вентиляционные системы, обеспечивающие подпор в лестничные клетки, автоматически включаются от извещателей пожарной сигнализации и дублируются ручным включением – от кнопок у входа на лестничную клетку, а также с пожарной панели, находящейся

в БЩУ. Огнезадерживающие клапаны закрываются автоматически от пожарных извещателей, а также от дублирующего термомеханического привода – легкоплавкой вставки, а также дистанционно с пожарной панели БЩУ.

Дублирование выполнения функций безопасности на РЩУ

В инструкциях и оперативных карточках определен порядок действий оперативного персонала при осуществлении управления энергоблоком с РЩУ. В соответствии с приведенными документами определена возможность осуществления основных функций безопасности непосредственно с РЩУ.

Постановка задачи расчетного моделирования и определение сценариев протекания и распространения пожара

При возникновении пожара на БЩУ возможно его тушение первичными средствами пожаротушения оперативным персоналом и прибывающими по вызову пожарными подразделениями.

В то же время, поскольку в помещении отсутствуют обеспечивающие безопасность стационарные установки пожаротушения, тушение пожара не гарантировано. В дальнейшем рассматриваются сценарии, возникающие при неудачном осуществлении операций по тушению, приводящие к развитию пожара на БЩУ. В связи со значительными пожарными нагрузками БЩУ при развитии и распространении пожара возможен его переход из начальной в объемную стадию и потеря всего незащищенного (от воздействия ОФП) оборудования, в том числе оборудования СБ. Расчет максимально возможной скорости развития пожара, временные параметры критического воздействия ОФП на оборудование и оперативный персонал являются основной целью математического моделирования пожара. Вторым этапом анализа пожара является оценка возможности осуществления процедуры безопасного останова и расхолаживания реакторной установки (РУ) в условиях воздействия ОФП при развитии пожара.

Критическим, с точки зрения нарушения процедуры безопасного останова и расхолаживания, предполагается непосредственное развитие пожара в оперативной части БЩУ и работа персонала в условиях воздействия ОФП.

Наиболее консервативным вариантом развития пожара считается начало пламенного горения у одного из пультов управления РУ в результате множественных коротких замыканий. Для определенности выбран вариант пламенного горения пульта № 31. Данный пульт имеет наибольшие размеры (1300 × 1000 мм) и расположен близко к центральной части помещения. Предполагается локализация пожара в пределах одного пульта и отсутствие распространения пожара на соседние пульты до начала критического воздействия ОФП на оперативный персонал. Корректность данного предположения будет оценена по результатам расчетного моделирования динамики пожара.

Определение последовательности действий персонала при переходе на РЦУ

В соответствии с технологическим регламентом эксплуатации энергоблока «Административный» при работе на мощности должен проводиться холодный останов в случае возникновения пожара в помещениях БЩУ, РЩУ. Для ряда аварийных ситуаций, в том числе при пожаре на БЩУ, разработана аварийная процедура.

Таким образом, последовательность действий персонала при пожаре на БЩУ может быть рассмотрена на основе ее положений вне зависимости от режима работы энергоблока. Функции безопасности могут быть выполнены в полном объеме при управлении энергоблоком с РЩУ. Основные функции выполняются персоналом непосредственно на РЩУ, часть функций по контролю состояния РУ выполняется дистанционно, с помощью выделенной телефонной линии. Следовательно, безопасность энергоблока определяется возможностью реализации разработанной процедуры передачи управления на РЩУ в условиях пожара.

Результаты расчетного моделирования

Представление полей ОФП

Динамика полей ОФП представляется в общем объеме БЩУ. Пример аксонометрической проекции с указанием элементов оборудования и конструкций приведен на рис. 1.

Место начала пожара, пульт № 31, выделено на графике (рис. 2).

Результаты расчетов динамики пожара

Результаты расчетов динамики пожара представлены на рис. 3–14.

Поля абсолютной температуры представлены в аксонометрических проекциях. Поля массовой концентрации продуктов горения – в горизонтальной угловой проекции, сечения перпендикулярны продольной оси машинного зала, оси X на графиках (рис. 3–14).

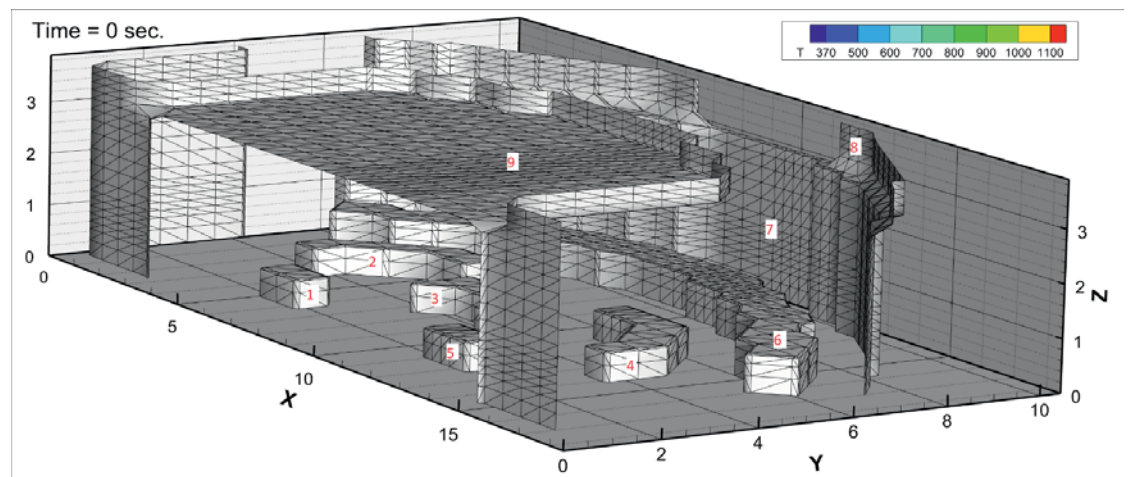


Рис. 1. Общий вид БЩУ. Аксонометрия со стороны машзала. Элементы оборудования и конструкций
Fig. 1. MCC: general view. Axonometric view from the turbine hall. Elements of equipment and structures

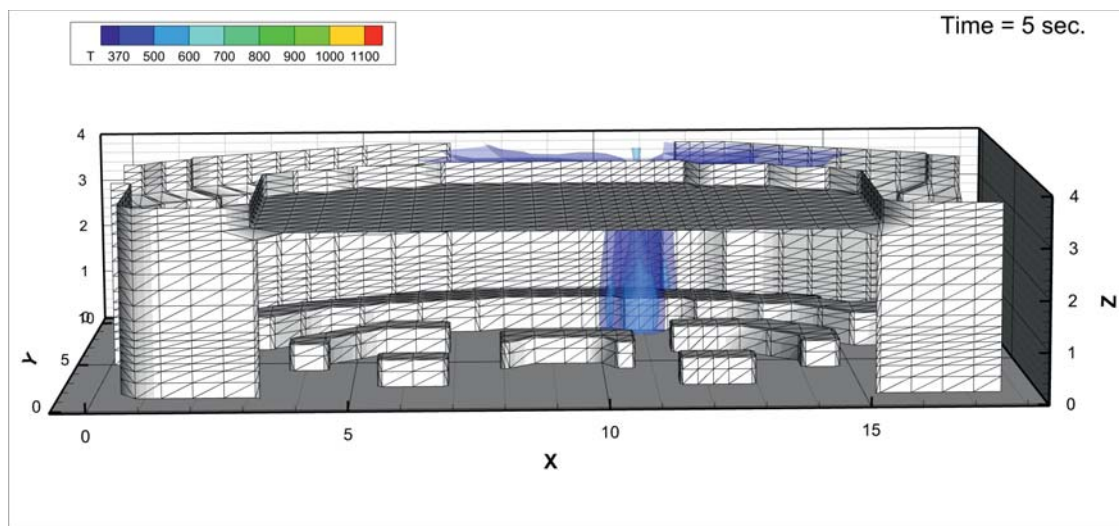


Рис. 2. Общий вид БЩУ. Аксонометрия со стороны машзала. Место начала пожара
Fig. 2. MCR: general view. Axonometric view from the turbine hall. Fire-outbreak site

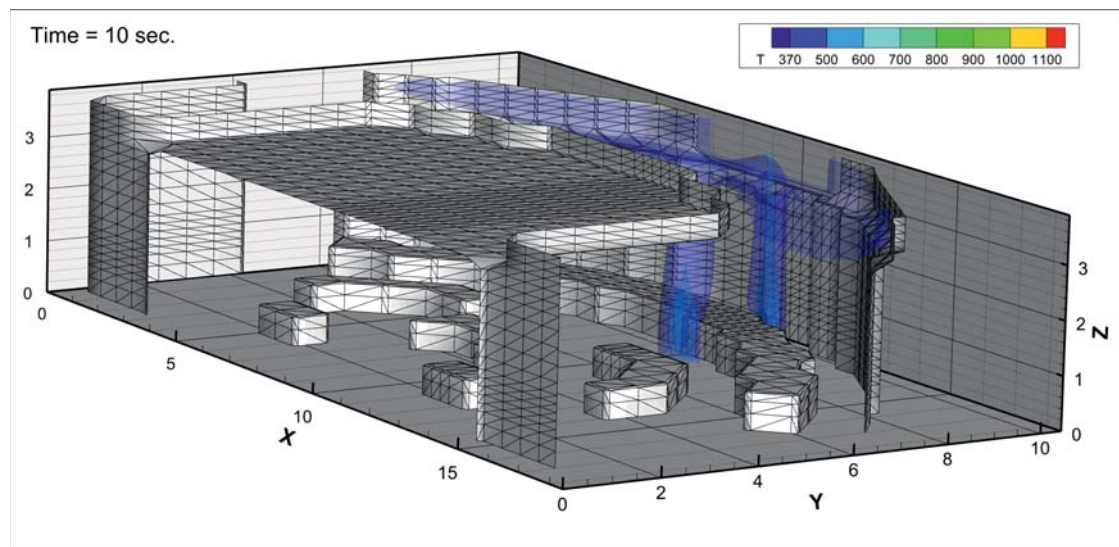


Рис. 3. Поля абсолютной температуры, К. 3D-поверхности 370 и 550 К
Fig. 3. Absolute temperature fields, K. 370 and 550 K: 3D surfaces

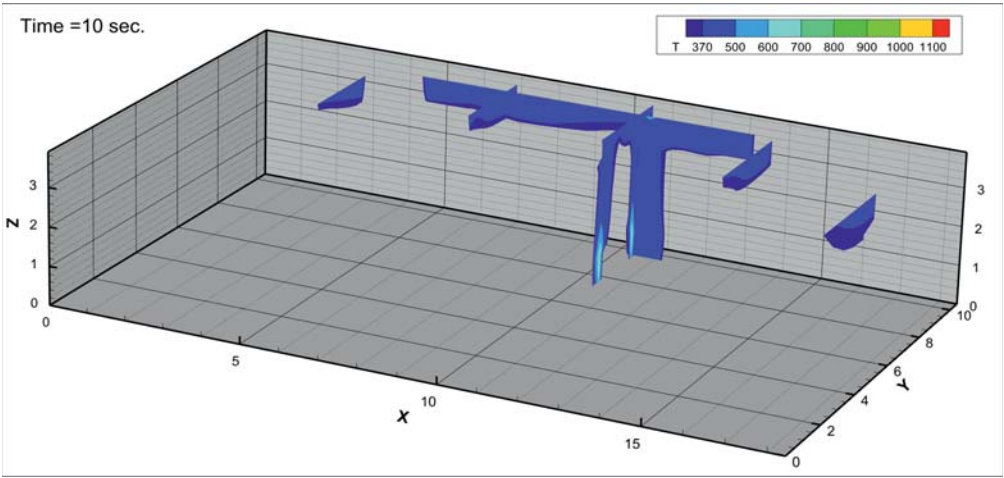


Рис. 4. Поля абсолютной температуры, К. Продольные и поперечные сечения
Fig. 4. Absolute temperature fields, K. Longitudinal and cross sections

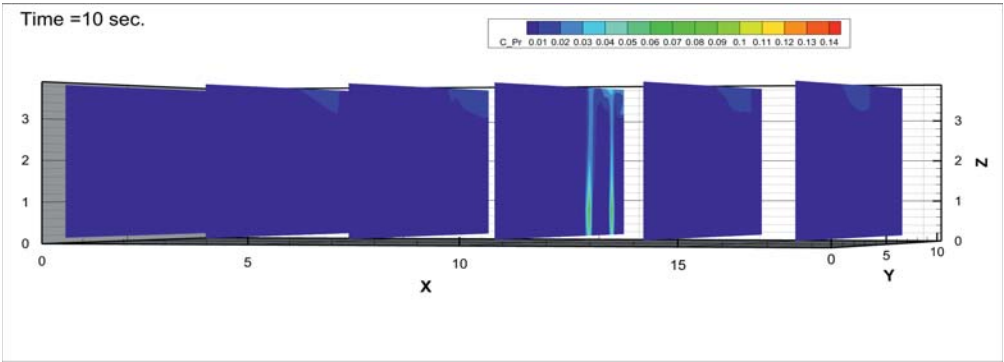


Рис. 5. Поля концентрации продуктов горения. Горизонтальная проекция
Fig. 5. Fields of combustion product concentration. Horizontal view

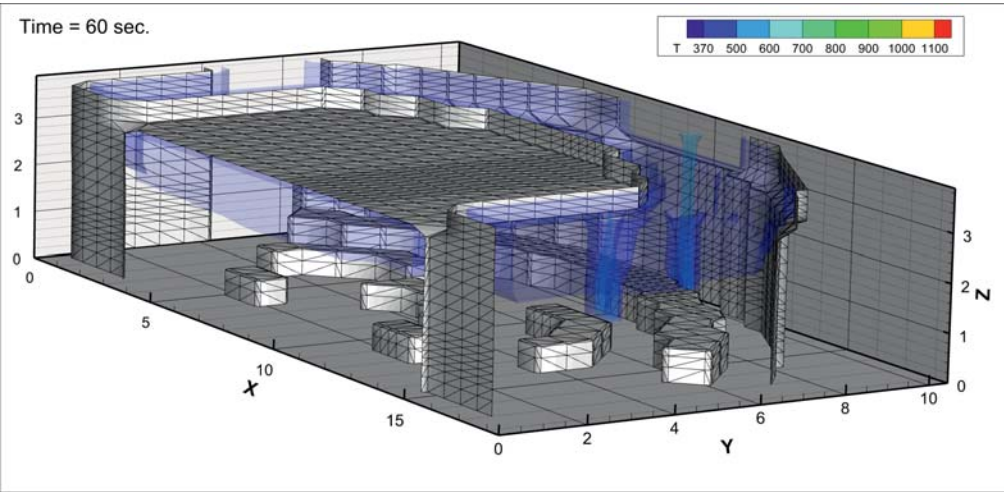


Рис. 6. Поля абсолютной температуры, К. 3D-поверхности 370 и 550 К
Fig. 6. Absolute temperature fields, K. 370 and 550 K: 3D surfaces

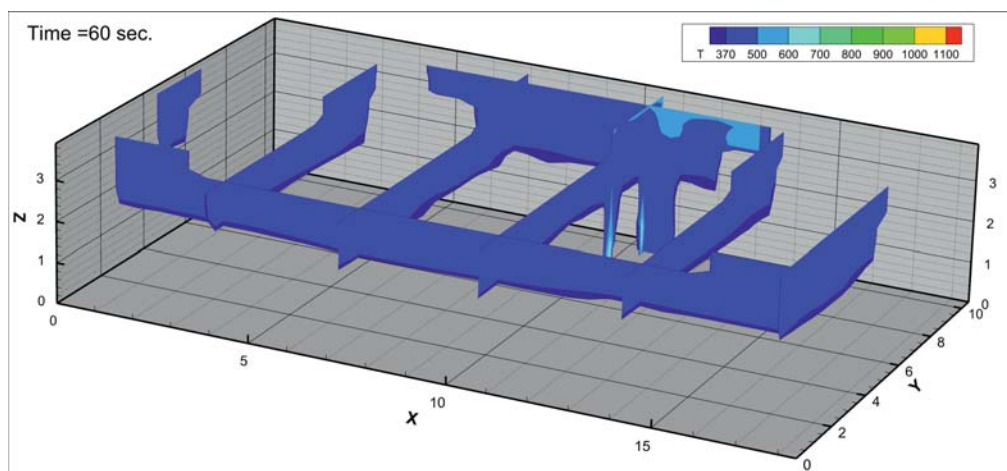


Рис. 7. Поля абсолютной температуры, К. Продольные и поперечные сечения
Fig. 7. Absolute temperature fields, K. Longitudinal and cross sections

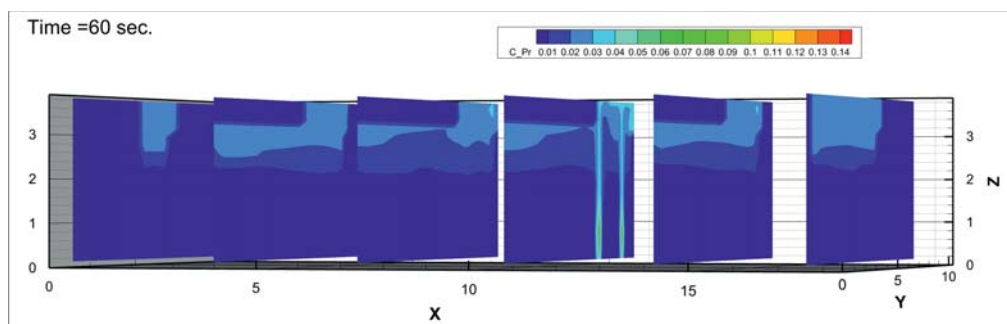


Рис. 8. Поля концентрации продуктов горения. Горизонтальная проекция
Fig. 8. Fields of combustion product concentration. Horizontal view

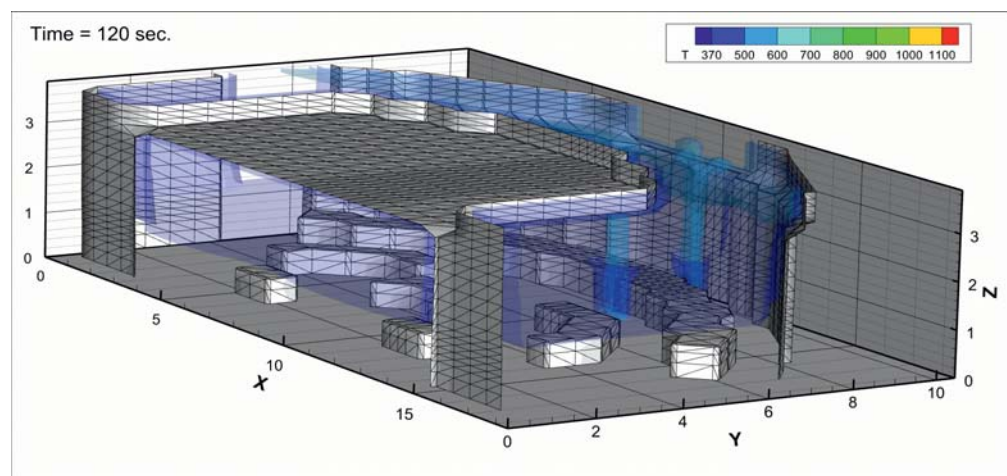


Рис. 9. Поля абсолютной температуры, К. 3D-поверхности 370 и 550 К
Fig. 9. Absolute temperature fields, K. 370 and 550 K: 3D surfaces

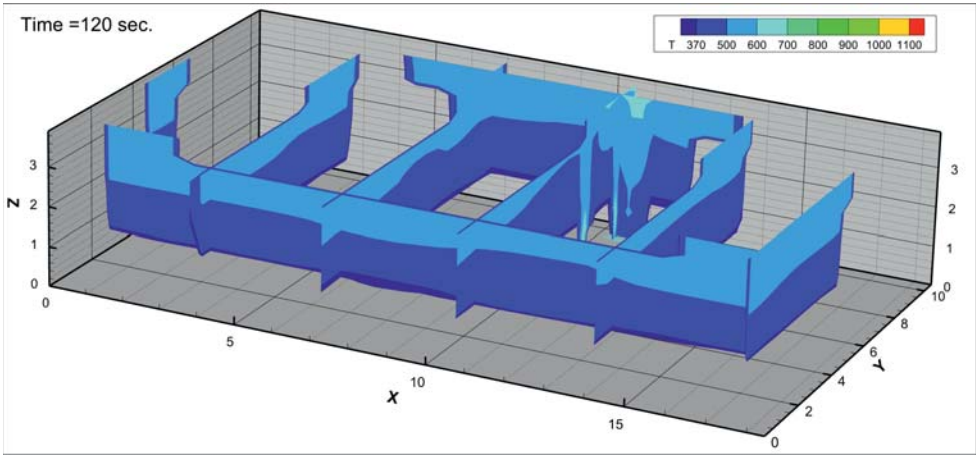


Рис. 10. Поля абсолютной температуры, К. Продольные и поперечные сечения
Fig. 10. Absolute temperature fields, K. Longitudinal and cross sections

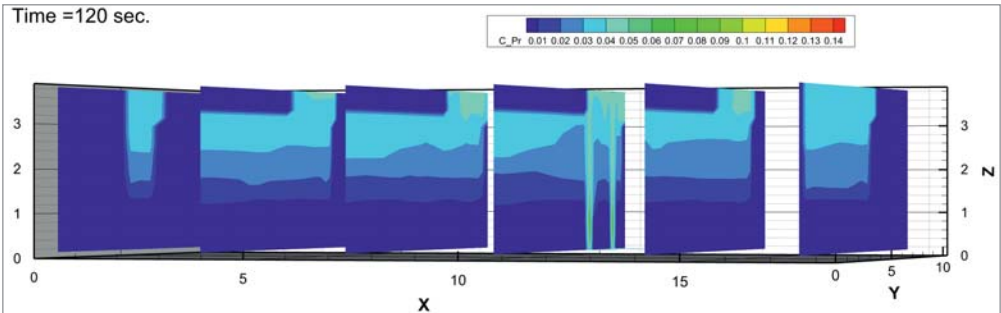


Рис. 11. Поля концентрации продуктов горения. Горизонтальная проекция
Fig. 11. Fields of combustion product concentration. Horizontal view

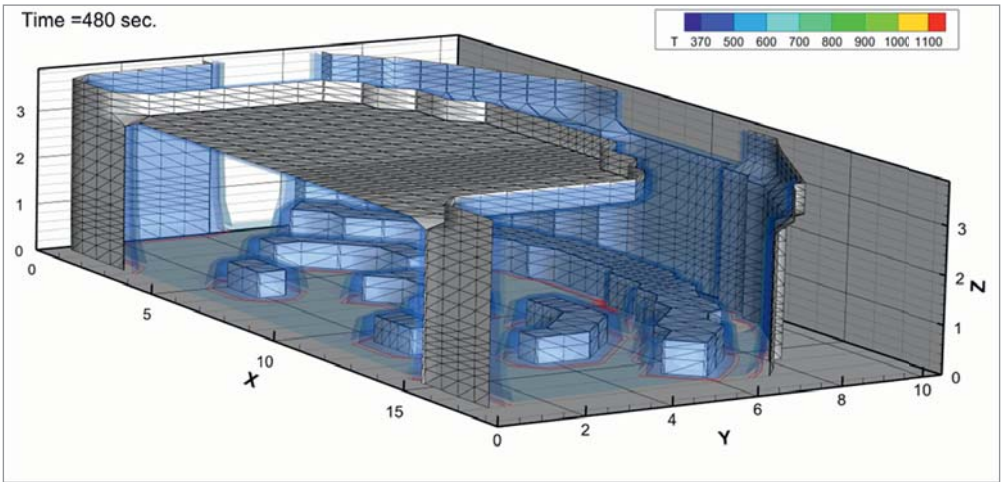


Рис. 12. Поля абсолютной температуры, К. 3D-поверхности 370 и 550 K
Fig. 12. Absolute temperature fields, K. 370 and 550 K: 3D surfaces

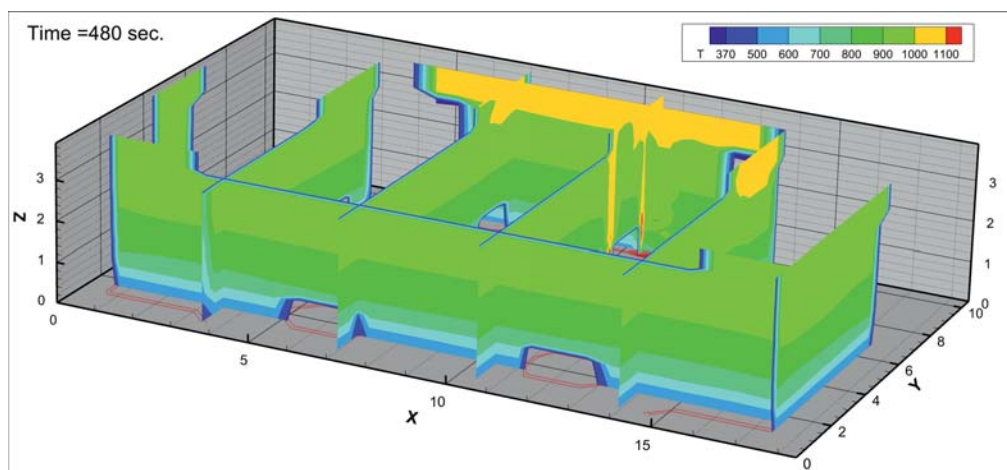


Рис. 13. Поля абсолютной температуры, К. Продольные и поперечные сечения
Fig. 13. Absolute temperature fields, K. Longitudinal and cross sections

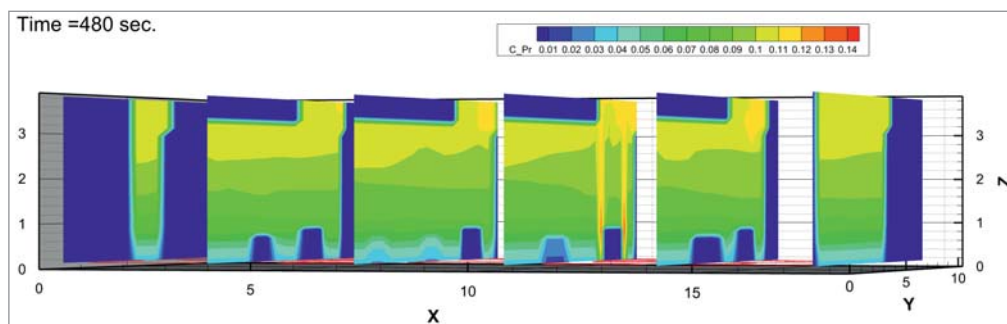


Рис. 14. Поля концентрации продуктов горения. Горизонтальная проекция
Fig. 14. Fields of combustion product concentration. Horizontal view

Расчет времени перехода из БЩУ в РЩУ

Два независимых варианта перехода оперативного персонала из БЩУ в РЩУ определены на плане эвакуации. Максимальная длина пути эвакуации, вариант № 2, составляет 87 м. Время перехода может быть оценено на основе скорости движения людей при эвакуации. Плотность потока менее минимальной, скорость движения – 100 м/мин. Время перехода на РЩУ – не более 53 секунд. Реализация персоналом процедуры перевода управления на РЩУ и ее составных частей с учетом имеющегося времени до потери БЩУ может быть оценена следующим образом:

- Задействование автомата защиты в течение первой минуты с начала пламенного горения – высокая вероятность, поскольку останов является стандартной процедурой, предусмотренной техническим регламентом по эксплуатации РУ.
- Принятие решения по переходу на РЩУ в течение 90 секунд с начала пламенного горения – высокая вероятность с учетом регламентированности процедуры и наблюдаемого интенсивного развития пожара.
- Переход части персонала на РЩУ в течение 53 секунд. Контроль РУ оставшимся на БЩУ персоналом до наступления критического воздействия ОФП.

– Начало действий по контролю РУ на 143-й секунде, покидание персоналом БЩУ до начала потери управления на блочном щите. Общий вывод по результатам расчетного анализа динамики развития пожара на БЩУ и оценки возможности реализации функций безопасности энергоблока на РЩУ: с учетом консервативного рассмотрения аварийной ситуации, связанной с пожаром на БЩУ, определена возможность безопасной реализации функций управления и контроля РУ в рамках предусмотренной на энергоблоке № 1 процедуры передачи управления на РЩУ.

Заключение

1. Созданная и апробированная полевая модель динамики пожара предназначена для проведения расчетов с учетом специфики пожарной опасности и технологических особенностей атомной станции. Полевая модель динамики пожара оптимизирована с учетом специфики АЭС, осуществлена ее реализация в рамках комплекса программного обеспечения Fire Dynamics.

2. Применение предложенной полевой модели позволяет обосновать достаточность принятых пределов огнестойкости строительных конструкций зданий и помещений исходя из обеспечения нераспространения пожара за пределы пожарной зоны в течение расчетного времени свободного выгорания всей пожарной нагрузки.

3. Описан методический подход к определению требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкции помещений АЭС с применением полевого моделирования пожара. Полевой метод является наиболее универсальным из существующих детерминистических методов, поэтому он широко может использоваться для определения/уточнения требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкции помещений АЭС.

На основе анализа документации по обеспечению безопасности энергоблока № 1 Калининской АЭС при пожаре на БЩУ и расчетно-аналитического исследования протекания пожаров можно сделать следующие основные выводы:

1. Значительные пожарные нагрузки, отсутствие стационарных систем пожаротушения на БЩУ определяют пожарную опасность данного помещения. Применение ручных средств пожаротушения не гарантирует тушения пожара при его интенсивном развитии. При интенсивном развитии пожара полное задымление помещения может наступить менее чем через 300 секунд после начала пламенного горения. В этом случае эффективные действия пожарных подразделений по тушению пожара на начальной стадии маловероятны из-за сравнимого и большего времени следования к месту тушения, разведки и развертывания. Примерно через 480 секунд после начала пламенного горения одного пульта практически во всем объеме помещения достигается избыточная температура на уровне 2500 °С.

2. С учетом автоматического отключения вентиляции по сигналу АПТ ожидаемое развитие пожара на начальной стадии в объеме помещения происходит в режиме возникновения и опускания приточного слоя продуктов горения. При рассмотренном консервативном сценарии развития пожара время подъема избыточной температуры до 700 °С и время потери видимости из-за роста концентрации продуктов горения практически совпадают и составляют 90 секунд – на уровне верха дверных проемов с выходами на пути эвакуации; 120 секунд – на уровне головы стоящего человека; 150 секунд – на уровне расположения компьютерных экранов на столах АРМ оперативного персонала. Поскольку персонал оснащен индивидуальными средствами защиты, лимитирующим фактором выполнения функций безопасности на БПУ может считаться потеря видимости.

Список литературы

1. Пуцев Д.И., Кривцов Ю.В., Грошев Ю.М., Лобанова Н.А. Оценка возможности применения полевого моделирования пожара для проведения расчетов пожаров в зданиях и помещениях. Вестник НИЦ «Строительство». 2023;37(2):37–70. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-37-70](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-37-70)
2. Пуцев Д.И., Мишина С.Ю., Грошев Ю.М. Обоснование мероприятий по обеспечению необходимых пределов огнестойкости ограждающих конструкций помещений АЭС с применением полевого моделирования пожара. Вестник НИЦ «Строительство». 2024;40(1):49–60. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-49-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-49-60)
3. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: Методические рекомендации [интернет]. Москва: ВНИИПО; 2003. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293808/4293808018.pdf>.
4. Карпов А.В., Рыжов А.М. Рекомендации по применению полевого метода математического моделирования пожара. Москва: ВНИИПО; 2002.
5. Рекомендации по оценке пожароустойчивости систем (элементов), важных для безопасности, на Российских АЭС. Москва: ВНИИАЭС; 2000.
6. Молчадский И.С., Астахова И.Ф. Математическая модель температурных полей начальной стадии пожара в помещении. Пожаровзрывобезопасность. 1995;4(2):31–33.
7. Верификация трехмерной математической модели расчета динамики пожара для оценки воздействия пожара на оборудование АЭС. Москва: ООО «СТЭМ»; 2001.
8. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Москва: Стандартинформ; 2014.
9. Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Андреев В.В., Козлов Ю.И. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. Москва: Академия ГПС МЧС России; 2012.
10. РД 03-34-2000. Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии [интернет]. Режим доступа: <https://www.secncs.ru/upload/files/rd2000.pdf>.
11. НП-001-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Москва: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»; 2016.
12. СП 13.13130.2009. Атомные станции. Требования пожарной безопасности. Москва: МЧС России; 2009.
13. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. Москва: Стандартинформ; 2006.

References

1. Putsev D.I., Krivtsov Yu.V., Groshev Yu.M., Lobanova N.A. Evaluating feasibility of field modeling of fire to calculate fire characteristics in buildings and premises. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2023;37(2):37–70. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-37-70](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-37-70)
2. Putsev D.I., Mishina S.Yu., Groshev Yu.M. Justification of measures aimed at ensuring the required fire resistance of structures enclosing NPP premises using CFD fire modeling. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2024;40(1):49–60. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-49-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-49-60)
3. Application of the field method of mathematical modeling of indoor fires: Methodological recommendations [internet]. Moscow: VNIPO; 2003. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293808/4293808018.pdf> (In Russian).
4. Karpov A.V., Ryzhov A.M. Recommendations for the use of the field method of mathematical modeling of fire. Moscow: VNIPO; 2002. (In Russian).
5. Recommendations for assessing the fire resistance of systems (elements) important for safety at Russian nuclear power plants. Moscow: VNIIAES; 2000. (In Russian).
6. Molchadsky I.S., Astakhova I.F. Mathematical model of temperature fields of the initial stage of a fire in a room. Fire and Explosion Safety. 1995;4(2):31–33. (In Russian).
7. Verification of a three-dimensional mathematical model for calculating fire dynamics to assess the impact of fire on NPP equipment. Moscow: LLC "STEM"; 2001. (In Russian).

8. State Standard R 12.3.047-2012. Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).
9. Koshmarov Yu.A., Puzach S.V., Andreev V.V., Kozlov Yu.I. Forecasting of fire hazards in the room. Moscow: Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2012. (In Russian).
10. RD 03-34-2000. Requirements for the composition and content of the report on verification and justification of software tools used to justify the safety of nuclear energy facilities [internet]. Available at: <https://www.secnrs.ru/upload/files/rd2000.pdf>. (In Russian).
11. NP-001-15. Federal norms and rules in the field of nuclear energy use. General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants. Moscow: Federal State Budgetary Institution "Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety"; 2016. (In Russian).
12. SP 13.13130.2009. Nuclear Power Plants. Fire Safety Requirements. Moscow: Ministry of Emergency Situations of Russia; 2009. (In Russian).
13. State Standard 12.1.004-91. Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Игоревич Пуцев, д-р техн. наук, генеральный директор, ООО «Научно-технический центр «Промышленная и пожарная безопасность» (ООО «НТЦ ППБ»), Балашиха
e-mail: ntcpb@mail.ru

Dmitry I. Putsev, Dr. Sci. (Engineering), Director General, Scientific and Technical Centre "Industrial and Fire Safety" (NTC PPB), Balashikha
e-mail: ntcpb@mail.ru

Светлана Юрьевна Мишина, начальник отдела, АО «Атомэнергoproject», Москва
e-mail: Michina_SY@aep.ru

Svetlana Yu. Mishina, Department Head, JSC Atomenergoproekt, Moscow
e-mail: Michina_SY@aep.ru

Евгений Алексеевич Ткачев, ведущий инженер-проектировщик, АО «Атомэнергoproject», Санкт-Петербург
e-mail: EATkachev@atomproekt.com

Evgeny A. Tkachev, Leading Design Engineer, JSC Atomenergoproekt, St. Petersburg
e-mail: EATkachev@atomproekt.com

Юрий Михайлович Грошев✉, канд. техн. наук, главный специалист, АО «Атомэнергoproject», Москва
e-mail: Groshev_YM@aep.ru

Yuri M. Groshev✉, Cand. Sci. (Engineering), Chief Specialist, JSC Atomenergoproekt, Moscow
e-mail: Groshev_YM@aep.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author