

Пожарная безопасность (2.10.1. технические науки)

Научная статья

УДК 624.13

doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.68.43.017

К вопросу о противопожарной защите атомных станций малой мощности с реакторной установкой РИТМ-200Н в Заполярье

Сергей Петрович Амелчугов¹

Алексей Николаевич Батуро²

Дмитрий Владимирович Седов²

Михаил Александрович Никулин³

¹ Сибирский федеральный университет

² Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России.

³ Государственный аграрный университет Северного Зауралья»

Автор ответственный за переписку: Дмитрий Владимирович Седов, sedov_irk@list.ru

Аннотация: В статье рассматривается проблема противопожарной защиты атомных станций малой мощности с реакторной установкой РИТМ-200Н в условиях Заполярья. В рамках проектирования системы обеспечения пожарной безопасности данных станций введено понятие «пожарных зон», рассмотрены принципы их выделения и применения. Предложено использовать для целей пожаротушения специальный технологический персонал, обозначены требования к его подготовке и квалификации. Рассмотрен вопрос технического обслуживания систем пожарной безопасности, в том числе аспект деградации данных систем при старении. Рассмотрено влияние тундровых пожаров на особенности доставки персонала, материалов и оборудования, что должно учитываться при разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности станций в Заполярье.

Ключевые слова: противопожарная защита, атомная станция малой мощности, пожарная зона, специальный технологический персонал, тундровый пожар.

Для цитирования: Амелчугов С.П., Батуро А.Н., Седов Д.В., Никулин М.А. К вопросу о противопожарной защите атомных станций малой мощности с реакторной установкой РИТМ-200Н в Заполярье // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 4 (31). С. 160-168. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2023.68.43.017>.

Original article

ON THE ISSUE OF FIRE PROTECTION OF LOW-POWER NUCLEAR POWER PLANTS WITH THE RITM-200N REACTOR PLANT IN THE ARCTIC

Sergey P. Amelchugov¹

Alexey N. Baturо²

Dmitry V. Sedov²

Mikhail A. Nikulin³

¹ Siberian Federal University

² *Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*

³ *State Agrarian University of the Northern Trans-Urals*

Corresponding author: Dmitry V. Sedov, sedov_irk@list.ru

Abstract: The article discusses the problem of fire protection of low-power nuclear power plants with the RITM-200N reactor plant in the Arctic. As part of the design of the fire safety system for these stations, the concept of “fire zones” was introduced, and the principles of their identification and application were considered. It is proposed to use special technological personnel for fire extinguishing purposes, and the requirements for their training and qualifications are outlined. The issue of maintenance of fire safety systems, including the aspect of degradation of these systems during aging, is considered. The influence of tundra fires on the characteristics of the delivery of personnel, materials and equipment is considered, which should be taken into account when developing measures to ensure fire safety of stations in the Arctic.

Key words: fire protection, low-power nuclear power plant, fire zone, special technological personnel, tundra fire.

For citation: Amelchugov S.P., Baturo A.N., Sedov D.V., Nikulin M.A. On the issue of fire protection of low-power nuclear power plants with the RITM-200N reactor plant in the Arctic // *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2023. № 4 (31): 160-168. (In Russ.). <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2023.68.43.017>.

Введение

Темпы освоения природных ресурсов арктического региона Российской Федерации ограничиваются доступными источниками энергии. Поэтому главным условием реализации данного направления развития экономики является создание надёжной и безопасной системы энергообеспечения [1], [2]. Одним из перспективных решений сокращения дефицита тепловой и электрической энергии является строительство атомных станций малой мощности, которые позволят обеспечить стабильное и экологичное энергообеспечение на территориях Заполярья, отдаленных от центров поставки данных ресурсов [3], [4]. Атомные станции малой мощности (далее – АСММ) могут быть спроектированы и построены для локальных объектов добычи полезных ископаемых и обеспечивать теплом и электричеством жилые и производственные здания [5].

Проекты АСММ имеют высокую степень адаптивности техникоэкономических и эксплуатационных характеристик, в том числе возможность подземного и надводного размещения, а также широкий спектр мощностей: от единиц до сотен МВт [7]. Ядром АСММ является реактор, от конструктивных и технологических особенностей которого зависят необходимые системы обеспечения работы станции [6]. В России активно прорабатываются проекты АСММ с реактором на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем [8]. Варианты расчётов тепловых схем для такого реактора приведены в работе [9]. Другие проекты АСММ также обладают специфическими особенностями, что позволяет решить проблему энергодефицита в различных зонах децентрализованного энергоснабжения [10]. В работе [11] разработаны математические модели топливных циклов активных зон реакторных установок типа АБВ, КЛТ-40С, УНИТЕРМ, СВБР-10 и СВБР-100. В работах [12], [13] представлены перспективы расширения области применения атомных технологий благодаря модульности и возможности обеспечения высоких показателей безопасности.

Объект и предмет исследования

В настоящей статье рассматриваются проблемы противопожарной защиты АСММ нового поколения, в которых применяется реакторная установка РИТМ-200Н. Установка является разновидностью реакторов РИТМ-200 (Рис. 1), которые применяются в универсальных атомных ледоколах «Арктика», «Сибирь», «Урал», «Якутия» [14]. Установка имеет тепловую мощность

190 МВт, производительность 305 т/ч, срок эксплуатации – 60 лет, период перезагрузки топлива – 5–6 лет.

РИТМ-200	РИТМ-200Н	РИТМ-200М	РИТМ-400
			
Тепловая мощность, МВт 175	Тепловая мощность, МВт 190	Тепловая мощность, МВт 175	Тепловая мощность, МВт 315
Паропроизводительность, т/ч 248	Паропроизводительность, т/ч 305	Паропроизводительность, т/ч 280	Паропроизводительность, т/ч 450
Срок эксплуатации 40 лет с возможностью продления срока службы РУ	Срок эксплуатации 60 лет	Срок эксплуатации 60 лет	Срок эксплуатации 40 лет с возможностью продления срока службы РУ
Топливный цикл 3-4 года	Топливный цикл 5-6 лет	Топливный цикл 10 лет	Топливный цикл 4-5 лет
Статус проекта 6 реакторов установлены на ледоколы проекта 22220, головной ледокол принят в состав флота	Статус проекта Реализация проекта пилотной АСММ	Статус проекта Эскизный проект ОПЭБ завершен	Статус проекта Начато строительство ледокола «Лидер»
Ввод в эксплуатацию 2019	Ввод в эксплуатацию 2027/2028	Ввод в эксплуатацию 2027/2028	Ввод в эксплуатацию 2027

Рис. 1. Линейка реакторов серии РИТМ

Известен опыт создания и эксплуатации реакторных установок для гражданских судов и их недостатки [15]. Однако в рассматриваемой установке РИТМ-200Н обеспечиваются минимальные массогабаритные характеристики за счет того, что активная зона и парогенераторы реактора размещаются в едином корпусе, а сам корпус непосредственно соединен с гидрокамерами главных циркуляционных насосов (без трубопроводов главного циркуляционного тракта). Такое исполнение значительно повышает безопасность установки РИТМ-200Н, исключая такой класс аварий, как утечки теплоносителя первого контура. Разработаны решения по обеспечению экологически безопасной и эффективной эксплуатации данной установки [16].

Принципы обеспечения пожарной безопасности станции

Требования пожарной безопасности, предъявляемые к зданиям для размещения реакторной установки РИТМ-200Н, на сегодняшний день не установлены стандартами и сводами правил, действующими в Российской Федерации (Рис. 2).



Рис. 2. Общий вид перспективной АСММ с реакторной установкой РИТМ-200Н

Отсутствуют также и нормы проектирования в части обеспечения своевременной и безопасной эвакуации людей. Следует учитывать, что обслуживающий персонал при пожаре должен находиться на рабочих местах в течение времени, необходимого для принятия мер по обеспечению безопасности АСММ, поскольку существует риск причинения значительного ущерба ценностям, охраняемым в рамках Федерального закона от 31 июля 2020 года № 247-ФЗ [17].

В силу технологических и конструктивных особенностей АСММ необходим специфический взгляд на принципы обеспечения их пожарной безопасности. Пожар в зданиях и сооружениях АСММ необходимо рассматривать как событие, которое является следствием выхода из строя технологического оборудования, а значит, требуется учитывать то, что данное аварийное оборудование будет находиться в зоне пожара. В связи с этим для обеспечения пожарной безопасности АСММ необходимо проведение анализа того, как именно пожар и сопутствующие ему процессы будут влиять на возможность останова и расхолаживания реакторной установки, а также локализацию и контроль радиоактивных выбросов из энергоблока в окружающую среду.

Одним из принципов обеспечения пожарной безопасности рассматриваемых АСММ является применение «пожарных зон», которые призваны предотвратить распространение пожара. Под «пожарной зоной» понимается помещение (участок помещения), сооружение (участок сооружения), участок промплощадки АСММ, в пределах которых постоянно или периодически, в том числе при нарушении технологического процесса, обращаются горючие вещества и материалы, и которые отделены от других аналогичных участков безопасными (предельными) расстояниями или противопожарными преградами. Данное проектное решение реализуется путем обеспечения соответствующей огнестойкости ограждающих строительных конструкций «пожарной зоны» при возникновении проектного пожара с любой стороны. Также для реализации данного решения применяются средства активной противопожарной защиты, которые в сочетании с огнестойкостью ограждающих конструкций обеспечивают нераспространение пожара.

Для корректного выделения «пожарных зон» на АСММ предлагается предусматривать следующие этапы:

- проведение расчёта пожарной нагрузки в помещениях с системами останова и расхолаживания реакторной установки, локализации и контроля радиоактивных выбросов в окружающую среду, а также расчета пожарной нагрузки в смежных помещениях;
- определение возможных видов пожаров в помещениях, их динамики, безопасных расстояний, соответствующих противопожарных преград и противопожарных барьеров;
- выбор конструктивного исполнения границ «пожарных зон», а также противопожарных, компоновочных и технологических решений, обеспечивающих безопасные расстояния.

Для обеспечения эффективного функционирования системы предотвращения пожара с учетом специфики технологических процессов АСММ необходимо предусматривать разделение зданий на «пожарные зоны» по условиям их ответственности за радиационную и ядерную безопасность. «Пожарные зоны» должны подразделяться на три категории в соответствии с действующими правилами и нормами в атомной энергетике [18], а именно: «Ядерный остров», «Электротехнический корпус», «Вспомогательные объекты».

Для объектов, входящих в «пожарную зону» категории «Ядерный остров», предусматривается резервирование всех систем обеспечения пожарной безопасности. Резервирование достигается путем сочетания мер активной и пассивной противопожарной защиты. Установки автоматического пожаротушения в данном случае будут относиться к обеспечивающим системам безопасности.

Для объектов, входящих в «пожарную зону» категории «Электротехнический корпус», предусматривается повышенный уровень обеспечения пожарной безопасности (по сравнению с требованиями нормативных документов по пожарной безопасности). Основу обеспечения пожарной безопасности данной «пожарной зоны» составляет скоординированная работа двух

сил пожаротушения: 1) автоматических систем обнаружения и тушения пожара; 2) квалифицированных пожарных подразделений АСММ.

Для объектов, входящих в «пожарную зону» категории «Вспомогательные объекты», предусматривается полное выполнение требований пожарной безопасности, установленных нормативными документами по пожарной безопасности.

Таким образом, противопожарная защита зданий, сооружений и помещений комплекса АСММ должна обеспечиваться за счет создания единой системы, включающей в себя комплекс технических решений по предотвращению и ограничению распространения пожара, его обнаружению

и ликвидации, обеспечению безопасности персонала. Указанная система обеспечения пожарной безопасности АСММ должна предусматривать выполнение следующих принципов:

- компоновка должна исключать размещение элементов и систем разных каналов безопасности в одной «пожарной зоне»;
- локализация пожара в пределах «пожарной зоны» должна осуществляться противопожарными преградами и противопожарными барьерами;
- ликвидация пожара должна осуществляться системой автоматического пожаротушения и подразделениями пожарной охраны;
- при размещении в «пожарной зоне» элементов или систем разных каналов систем безопасности должна обеспечиваться противопожарная защита элементов или систем каждого канала;
- оповещение персонала АСММ о возникновении пожара, его эвакуация или работа при пожаре должны обеспечиваться в течение времени, необходимого для принятия мер по обеспечению безопасности АСММ;
- тушение пожара в помещениях, где размещается оборудование систем пожаротушения, должно осуществляться другими системами пожаротушения.

Для обоснования проектных решений и достаточности уровня противопожарной защиты АСММ необходимо проведение анализа влияния пожаров и их последствий на безопасность с использованием детерминистических и вероятностных методов, позволяющих получать качественные и количественные характеристики пожаров, отслеживать динамику их развития, в том числе фиксировать время достижения опасными факторами пожара критических значений.

Возможность организации дымоудаления в «пожарных зонах» главного корпуса АСММ, где размещаются радиоактивные вещества и материалы, должна обосновываться расчетами. Если по результатам расчетов пожар может привести к выбросу радиоактивных веществ с превышением допустимого содержания радиоактивных компонентов, то проектными решениями должна предусматриваться блокировка вентиляция противопожарными клапанами и другими средствами. Герметичность и устойчивость указанных клапанов должны также подтверждаться расчетами и отражаться в проекте.

Принципы создания противопожарной службы станции

Строительство пожарного депо с организацией на его базе противопожарной службы следует осуществлять в приоритетном порядке, то есть в первую очередь строительства (к моменту проведения пуско-наладочных работ на основных зданиях и сооружениях АСММ). Мощность, численность, техническая оснащенность пожарного депо должна обосновываться расчетом.

Основной проблемой эффективного тушения пожаров на АСММ в Заполярье подразделениями пожарной охраны является ограниченность пожарных гарнизонов и их территориальная разобщенность, не позволяющая наращивать количество сил и средств. В связи с этим для защиты АСММ следует рассматривать возможность использования для целей пожаротушения специального технологического персонала.

Для выполнения работ по тушению и локализации пожаров указанный специальный технологический персонал должен проходить специальную подготовку, иметь

соответствующую квалификацию. Отобранные должностные лица должны проходить обучение как на заводах-изготовителях, так и на месте, во время строительства, изготовления, сборки и испытаний конкретных изделий, уязвимых с точки зрения пожарной безопасности. Необходимо обеспечить участие специального технологического персонала в мероприятиях по техническому обслуживанию, инспектированию и испытанию оборудования АСММ на этапах ее строительства и ввода в эксплуатацию.

Техническое обслуживание систем противопожарной защиты

Узлы и системы, предназначенные для обеспечения пожарной безопасности АСММ, в процесс ее эксплуатации находятся в резервном или автономном состояниях. Тестирование и наблюдение за условиями, в которых работают указанные узлы и системы, как правило, трудновоспроизводимы. В связи с этим тестирование и наблюдение должно проводиться в имитационных (моделируемых) условиях, которые необходимо тщательно планировать. Результаты данных тестирований и наблюдений должны разумно интерпретироваться.

Особое внимание при планировании технического обслуживания должно уделяться таким этапам жизненного цикла АСММ, как начало эксплуатации (сразу после ввода в эксплуатацию) и период, когда процессы старения начинают вносить значительный вклад в ухудшение состояния систем пожарной безопасности. Невозможно выделить конкретный момент, в который процессы старения начинают активизироваться, в связи с чем необходимо проведение исследований, направленных на выявление характера их влияния на потенциал возможных отказов (зарождающихся, деградирующих и катастрофических). Поэтому мониторинг надежности

и характеристик узлов и систем пожарной безопасности на предмет старения должен быть частью программы управления безопасностью. Кроме того, должна быть разработана соответствующая программа профилактического технического обслуживания.

Следует рассмотреть вопрос об использовании стратегий технического обслуживания, которые основаны на оценке пожарного риска. Подобные стратегии позволят обеспечить разумный баланс между различными видами технического обслуживания (корректирующим, профилактическим, прогнозирующим).

Влияние тундровых пожаров на безопасность станции

Функционирование АСММ должно не зависеть от внешних негативных природных факторов, в частности, тундровых пожаров. Поэтому вопрос размещения АСММ в Заполярье должен учитывать необходимость реагирования на них. Основным опасным фактором тундровых пожаров является задымление, влияющее на работу авиационного, речного, автомобильного транспорта. Поэтому основные риски, возникающие из-за развития тундровых пожаров, связаны с доставкой персонала, ведущего работу вахтовым методом, а также транспортировкой упаковочных комплектов, материалов и оборудования, необходимых для эксплуатации АСММ.

Пик весенней природной пожарной опасности в Заполярье наступает, как правило, в мае, когда происходит активное иссушение почвы и напочвенного покрова под действием ветров (характеризуются наибольшей частотой, достигают значительных скоростей, переходя в пыльные бури) на фоне незначительного количества осадков и низкой относительной влажности воздуха (до 20 %). При небольших осадках повышенная природная пожарная опасность в Заполярье продолжает сохраняться и в июне.

Тундровые пожары, возникающие в весенний и ранний летний периоды, имеют характер низовых пожаров средней интенсивности. В пределах однородных растительности и фенопериодов района все факторы, кроме погодных, можно условно считать постоянными. Поэтому изменение природной пожарной опасности Заполярья можно связать только с погодными факторами. Наиболее важными циклами, определяющими динамику природных пожаров в Заполярье, являются сверхвековые циклы, вековые циклы (61–62 года) и

внутривековые циклы (11-летние и 3–4-летние). С указанной периодичностью на территории, прилегающей к АСММ, можно ожидать задымленность с превышением ПДК по взвешенным веществам в 2–2,5 раза. Таким образом, при разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности АСММ следует рассматривать ограничения, накладываемые тундровыми пожарами на различные виды транспортировки в период с июня по август.

Заключение

Таким образом, противопожарная защита атомных станций малой мощности с реакторной установкой РИТМ-200Н в Заполярье имеет существенные отличия от устоявшейся практики обеспечения пожарной безопасности атомных станций. При проектировании данных объектов необходимо применять «пожарные зоны» с учетом принципов их выделения и размещения. В условиях ограниченности пожарных гарнизонов и их территориальной разобщенности необходимо использовать для целей пожаротушения специальный технологический персонал. Должны проводиться исследования, касающиеся аспектов технического обслуживания систем пожарной безопасности, в том числе, связанных с их деградацией при старении. При разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности АСММ в Заполярье должно учитываться влияние тундровых пожаров, которые осложняют доставку персонала, материалов и оборудования.

Список источников

1. Ковальчук М.В. Арктический вектор энергетики России / М.В. Ковальчук // XXII Александровские чтения 15 февраля 2016 г.: Мат. конф., посвящ. 113-й годовщине со дня рождения акад. А.П. Александрова. – Москва, 2016. – С. 37–42.
2. Ковальчук М.В. Арктический вектор энергетики России / М.В. Ковальчук // Природа. – 2016. – № 9. – С. 24–31.
3. АЭС малой мощности. Направления деятельности / АО «Русатом Оверсиз» // Официальный сайт Русатом Оверсиз. URL: <https://rusatom-overseas.com/ru/smr/>.
4. Ковальчук М.В. К вопросу выбора ядерного энергоисточника для Арктики / М.В. Ковальчук, Б.Б. Чайванов, С.С. Абалин и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2020. – Вып. 3. – С. 4–12.
5. Петрунин В.В. Перспективы развития атомных станций с реакторами малой и средней мощности / В.В. Петрунин, Л.В. Гуреева, Ю.П. Фадеев и др. // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. – Т. 2. – М.: Академ-Принт, 2015. – С. 36–49.
6. Мельников Н.Н. Реакторные установки для энергоснабжения удаленных и труднодоступных регионов: проблема выбора / Н.Н. Мельников, В.П. Конухин, В.А. Наумов и др. // Вестник МГТУ. – 2015. – Т. 18. – № 2. – С. 198–208.
7. Смоленцев Д.О. Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации / Д.О. Смоленцев // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 3 (7). – С. 22–29.
8. Климов Н.Н. Свинцово-висмутовые быстрые реакторы для атомных станций малой и средней мощности / Н.Н. Климов // Международный форум «АТОМЭКСПО 2009» 26–28 мая 2009 г. – Москва, 2009. – С. 33.
9. Литвинов Д.Н. Малогабаритная АЭС малой мощности с жидкометаллическим теплоносителем для арктических условий / Д.Н. Литвинов, В.С. Костарев, И.А. Ширманов и др. // Физика. Технологии. Инновации: Тезисы докладов VIII Междунар. науч. конф. (Екатеринбург, 17–21 мая 2021 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2021. — С. 1004–1005.
10. Санеев Б.Г. Роль атомных станций малой мощности в зонах децентрализованного энергоснабжения на Востоке России / Б.Г. Санеев, И.Ю. Иванова, Т.Ф. Тугузова и др. // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. – М.: Наука, 2011. – С. 88–100.

11. Наумов В.А. Атомные станции малой мощности для энергоснабжения арктических регионов: оценка радиоактивности отработавшего ядерного топлива / В.А. Наумов, С.А. Гусак, А.В. Наумов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 1. – С. 75-86.
12. Соловьев С.Л. Перспективные направления развития атомных станций малой мощности в России / С.Л. Соловьев, Д.Г. Зарюгин, С.Г. Калякин // Вестник РАН, 2023. – Т. 93. – № 2, – С. 103-111.
13. Соловьев С.Л. Определение основных направлений развития атомных станций малой мощности / С.Л. Соловьев, Д.Г. Зарюгин, С.Г. Калякин и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 1. – С. 22–31.
14. Воропай Н.И. Сравнительная эффективность использования атомных станций малой мощности в локальных энергосистемах на востоке России / Н.И. Воропай, Б.Г. Санеев, И.Ю. Иванова и др. // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. – Т.2. – М.: Академ-Принт, 2015. – С. 59-71.
15. Макаров В.И. Опыт создания и эксплуатации реакторных установок гражданских судов / В.И. Макаров, Б.Г. Пологих, Н.С. Хлопкин и др. // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89. – Вып. 3. – С. 179-188.
16. Князевский К.Ю. Проектные решения реакторной установки РИТМ-200, предназначенные обеспечить экологически безопасную и экономически эффективную эксплуатацию универсального атомного ледокола на арктических трассах / К.Ю. Князевский, Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов и др. // Арктика: экология и экономика. – 2014. – № 3 (15). – С. 86-91.
17. Об обязательных требованиях в Российской Федерации (с изменениями на 24.09.2022). Федеральный закон от 31 июля 2020 года № 247-ФЗ // Российская газета, № 171, 05.08.2020.
18. ПиНАЭ-5.6 Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа / Приняты Минатомэнерго СССР 29.12.1986; Минатомэнерго СССР. – М., 1986.

List of sources

1. Kovalchuk M.V. Arctic vector of Russian energy / M.V. Kovalchuk // XXII Alexander Readings February 15, 2016: Mat. conf., dedicated 113th anniversary of the birth of academician. A.P. Alexandrova. – Moscow, 2016. – pp. 37–42.
2. Kovalchuk M.V. Arctic vector of Russian energy / M.V. Kovalchuk // Nature. – 2016. – No. 9. – P. 24–31.
3. Low-power nuclear power plants. Areas of activity / JSC Rusatom Overseas // Official website of Rusatom Overseas. URL: <https://rusatom-overseas.com/ru/smr/>.
4. Kovalchuk M.V. On the issue of choosing a nuclear energy source for the Arctic / M.V. Kovalchuk, B.B. Chayvanov, S.S. Abalin et al. // Questions of atomic science and technology. Series: Physics of nuclear reactors. – 2020. – Issue. 3. – P. 4–12.
5. Petrunin V.V. Prospects for the development of nuclear power plants with low- and medium-power reactors / V.V. Petrunin, L.V. Gureeva, Yu.P. Fadeev et al. // Low-power nuclear power plants: a new direction in energy development. – Т. 2. – М.: Academ-Print, 2015. – P. 36–49.
6. Melnikov N.N. Reactor installations for power supply to remote and hard-to-reach regions: the problem of choice / N.N. Melnikov, V.P. Konukhin, V.A. Naumov and others // Bulletin of MSTU. – 2015. – Т. 18. – No. 2. – P. 198–208.
7. Smolentsev D.O. Development of Arctic energy: problems and opportunities of small-scale generation / D.O. Smolentsev // Arctic: ecology and economics. – 2015. – No. 3 (7). – pp. 22–29.
8. Klimov N.N. Lead-bismuth fast reactors for nuclear power plants of small and medium power / N.N. Klimov // International Forum “ATOMEXPO 2009” May 26–28, 2009 – Moscow, 2009. – P. 33.
9. Litvinov D.N. Small-sized low-power nuclear power plant with liquid metal coolant for Arctic conditions / D.N. Litvinov, V.S. Kostarev, I.A. Shirmanov et al. // Physics. Technologies. Innovations: Abstracts of the VIII International. scientific conf. (Ekaterinburg, May 17–21, 2021). - Ekaterinburg: UrFU, 2021. - pp. 1004–1005.

10. Saneev B.G. The role of low-power nuclear power plants in zones of decentralized energy supply in the East of Russia / B.G. Saneev, I.Yu. Ivanova, T.F. Tuguzova et al. // Low-power nuclear power plants: a new direction in energy development. – М.: Nauka, 2011. – P. 88-100.
11. Naumov V.A. Low-power nuclear power plants for power supply to Arctic regions: assessment of radioactivity of spent nuclear fuel / V.A. Naumov, S.A. Gusak, A.V. Naumov // News of universities. Nuclear energy. – 2018. – No. 1. – P. 75-86.
12. Soloviev S.L. Promising directions for the development of low-power nuclear power plants in Russia / S.L. Soloviev, D.G. Zaryugin, S.G. Kalyakin // Bulletin of the Russian Academy of Sciences, 2023. - T. 93. - No. 2, - P. 103-111.
13. Soloviev S.L. Determination of the main directions of development of low-power nuclear power plants / S.L. Soloviev, D.G. Zaryugin, S.G. Kalyakin and others // News of universities. Nuclear energy. – 2022. – No. 1. – P. 22–31.
14. Voropai N.I. Comparative efficiency of using low-power nuclear power plants in local power systems in the east of Russia / N.I. Voropai, B.G. Saneev, I.Yu. Ivanova et al. // Low-power nuclear power plants: a new direction for energy development. – Т.2. – М.: Akadem-Print, 2015. – P. 59-71.
15. Makarov V.I. Experience in the creation and operation of reactor installations for civil vessels / V.I. Makarov, B.G. Pologikh, N.S. Khlopin et al. // Atomic energy. – 2000. – Т. 89. – Issue. 3. – pp. 179-188.
16. Knyazevsky K.Yu. Design solutions for the RITM-200 reactor plant, designed to ensure environmentally safe and cost-effective operation of a universal nuclear icebreaker on Arctic routes / K.Yu. Knyazevsky, Yu.P. Fadeev, A.N. Pakhomov and others // Arctic: ecology and economics. – 2014. – No. 3 (15). – pp. 86-91.
17. On mandatory requirements in the Russian Federation (as amended as of September 24, 2022). Federal Law of July 31, 2020 No. 247-FZ // Rossiyskaya Gazeta, No. 171, 08/05/2020.
18. PiNAE-5.6 Standards for the construction design of nuclear power plants with reactors of various types / Adopted by the USSR Ministry of Atomic Energy on December 29, 1986; Ministry of Atomic Energy of the USSR. – М., 1986.

Информация об авторах

С.П. Амелчугов – доктор технических наук

А.Н. Батуро – кандидат технических наук

Д.В. Седов – кандидат технических наук

Information about the authors

S.P. Amelchugov – Doctor of Engineering Sciences

A.N. Baturo – Candidate of Engineering Sciences

D.V. Sedov – Candidate of Engineering Sciences

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.11.2023; одобрена после рецензирования 10.12.2023; принята к публикации 15.12.2023.

The article was submitted 27.11.2023, approved after reviewing 10.12.2023, accepted for publication 15.12.2023