

УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2024.113.3.002

© 2024. Все права защищены.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПРИМЕНИМОСТИ СТАНДАРТОВ МАГАТЭ К ПРОЕКТУ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ РИТМ-200Н ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Петрунин В. В.* (v.petrinin@okbm.nnov.ru),
Бахметьев А. М.* (alex_bakh@okbm.nnov.ru),
Кураченков А. В.* (kurachenkov_av@okbm.nnov.ru),
Галицких В. Ю.* (alex_z@okbm.nnov.ru),
Макеев Ю. А.* (yamakeev@okbm.nnov.ru),
Щекин Д. В.* (shchekin@okbm.nnov.ru)

Статья поступила в редакцию 29 мая 2024 г.

Аннотация

Нормы безопасности Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) содержат принципы, требования и рекомендации по обеспечению безопасности и являются согласованным и общепринятым ориентиром эффективного выполнения международных обязательств стран, использующих атомную энергию в мирных целях. Действующие нормы Агентства применимы, как правило, к наземным стационарным атомным электростанциям с водоохлаждаемыми реакторами мощностью от 600 до 1 500 МВт. Для других типов реакторов, включая инновационные разработки, в том числе атомные станции малой мощности, некоторые положения по безопасности могут оказаться неприменимыми или же применимыми с определенными изменениями.

В статье представлены основные результаты анализа применимости стандартов МАГАТЭ к проекту реакторной установки РИТМ-200Н для наземных атомных станций малой мощности.

► **Ключевые слова:** атомные станции малой мощности, нормы безопасности МАГАТЭ, реакторная установка, интегральный реактор, безопасность, сравнительный анализ.

* АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Российская Федерация.

MAIN ANALYSIS RESULTS OF THE IAEA STANDARDS APPLICABILITY TO THE RITM-200N DESIGN FOR SMALL NUCLEAR POWER PLANTS

Petrinin V. V.*, Doctor of Engineering Sciences, Prof.,
Bakhmetev A. M.*, Doctor of Engineering Sciences, Prof.,
Kurachenkov A. V.*,
Galitskikh V. Yu.*,
Makeyev Yu. A.*,
Shchekin D. V.*

The article was received by the editors' crew on May 29, 2024.

Abstract

The International Atomic Energy Agency (IAEA) safety standards contain safety principles, requirements and recommendations and are a consistent and generally accepted guideline for the effective fulfilment of international obligations of countries that use nuclear energy for peaceful purposes. The current Agency standards are generally applicable to land-based stationary nuclear power plants with water-cooled reactors with a capacity ranging from 600 to 1 500 mW. For other types of reactors, including innovative designs such as small nuclear power plants, some safety provisions may not be applicable or may be applicable with certain modifications.

The paper provides the main results of the analysis of the applicability of the IAEA standards to the design of the RITM-200N reactor plant for land-based small nuclear power plants.

► **Keywords:** *small nuclear power plants, IAEA safety standards, reactor plant, integral reactor; safety, comparative analysis.*

* Afrikantov OKBM JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Введение

Реакторы малой мощности и атомные электростанции (АЭС) на их основе в настоящее время рассматриваются как перспективное решение актуальных проблем энергообеспечения различных стран и регионов мира, для которых не требуются энергоблоки мощностью 600–1 500 МВт, и где сильна зависимость от стоимости закупки и (или) транспортировки углеводородного топлива.

Согласно данным МАГАТЭ [1] в настоящее время в мире разрабатывается более 70 проектов реакторов малой мощности.

В таблице № 1 представлены проекты разработок по атомным станциям малой мощности (АСММ), находящиеся в стадии, наиболее близкой к реализации.

Для снижения зависимости экономических характеристик АСММ от масштабного фактора разработчиками, как правило, принимаются инновационные (по сравнению с освоенными технологиями) решения по типу теплоносителя, ядерному топливу, компоновке, системам и другим учитываемым аспектам, отличающиеся от принятых на действующих АЭС.

Разработка пилотного проекта АСММ с реакторной установкой (РУ) РИТМ-200Н базируется на требованиях нормативных документов (НД) Российской Федерации (РФ) по безопасности АЭС.

В то же время применение инновационных решений требует внесения изменений в существующие отечественные и зарубежные НД по безопасности АЭС с учетом технологических особенностей этих РУ и АЭС в целом.

Целью статьи является представление результатов оценки применимости требований стандартов Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) к проекту РУ РИТМ-200Н для наземной АСММ.

1. Актуальность анализа норм безопасности МАГАТЭ

Общепризнанным международным правовым полем для стран, использующих атомную энергию в мирных целях, являются нормы безопасности МАГАТЭ [2].

Статья 6 Федерального закона «Об использовании атомной энергии» [3] содержит положение о необходимости учета норм международных

Таблица № 1

Проекты реакторов малой мощности на стадии реализации
Small-sized reactor designs at the implementation stage

| Критерии | РИТМ-200, РИТМ-200Н | АСР-100 (КНР) | CAREM (Аргентина) | NuScale (США) |
|---|---|---|--|---|
| Тип реактора | ВВР интегрального типа | PWR интегрального типа | PWR интегрального типа | PWR интегрального типа |
| Тип циркуляции первичного теплоносителя | Принудительная | Принудительная | Естественная | Естественная |
| Мощность, N_t / N_3 , МВт | 190 / 55 | 385 / 125 | 100 / 30 | 160 / 50 |
| Стадия разработки и лицензирования | Серийное изготовление РУ РИТМ-200 для универсального атомного ледокола. Технический проект РУ РИТМ-200Н для АСММ. В 2023 г. получена лицензия Ростехнадзора на размещение | Рабочая документация для изготовления, обоснование безопасности одобрено надзорными органами КНР, концепция безопасности рассмотрена МАГАТЭ в 2016 г. | Рабочая документация для изготовления, обоснование безопасности одобрено надзорными органами Аргентины (ARN) | Проходил сертификацию в NRC с 2017 г. В 2022 г. одобрен регулятором для использования в США |
| Реализация | Начало сооружения пилотной АСММ в 2024 г. в Республике Саха (Якутия) | Сооружение с 2021 г. на площадке АЭС «Чанцзян» (КНР) | Сооружение с 2014 г. около г. Сарате вблизи АЭС «Агуча-1» (Аргентина) | Данные о планах сооружения отсутствуют |

организаций, в работе которых принимает участие РФ, вступившая в МАГАТЭ в год его основания (1957).

Легитимность российского проекта АСММ с РУ РИТМ-200Н в правовом поле подходов и требований МАГАТЭ будет способствовать его успешному лицензированию и дальнейшему продвижению на рынке ядерных технологий.

Действующие нормы МАГАТЭ применимы, как правило, к наземным стационарным АЭС с водоохлаждаемыми реакторами, основную часть которых составляют реакторы мощностью от 600 до 1 500 МВт.

Для других типов реакторов, включая АСММ, некоторые положения по безопасности могут оказаться неприменимыми или же применимыми с определенными изменениями.

Структура норм безопасности МАГАТЭ, распространяющихся на АЭС, включает три категории (рис. 1):

- основополагающие принципы безопасности (Fundamental Safety Principles – SF-1);

- общие (General Safety Requirements – GSR) и специальные (Specific Safety Requirements – SSR) требования безопасности, устанавливающие требования, которые должны быть выполнены для достижения основ безопасности;

- общие (General Safety Guide – GSG) и специальные руководства по безопасности (Specific Safety Guide – SSG), содержащие более детальные указания и рекомендации по обеспечению соблюдения требований безопасности с учетом специфики технологии.

В феврале 2020 г. Госкорпорацией «Росатом» принято решение о начале реализации пилотного отраслевого проекта «Сооружение атомной станции малой мощности на базе РУ РИТМ-200Н на территории России». Пилотный проект подразумевает строительство АСММ электрической мощностью 55 МВт в поселке Усть-Куйга Усть-Янского улуса Республики Саха (Якутия). В дальнейшем планируется его адаптация для реализации за рубежом,

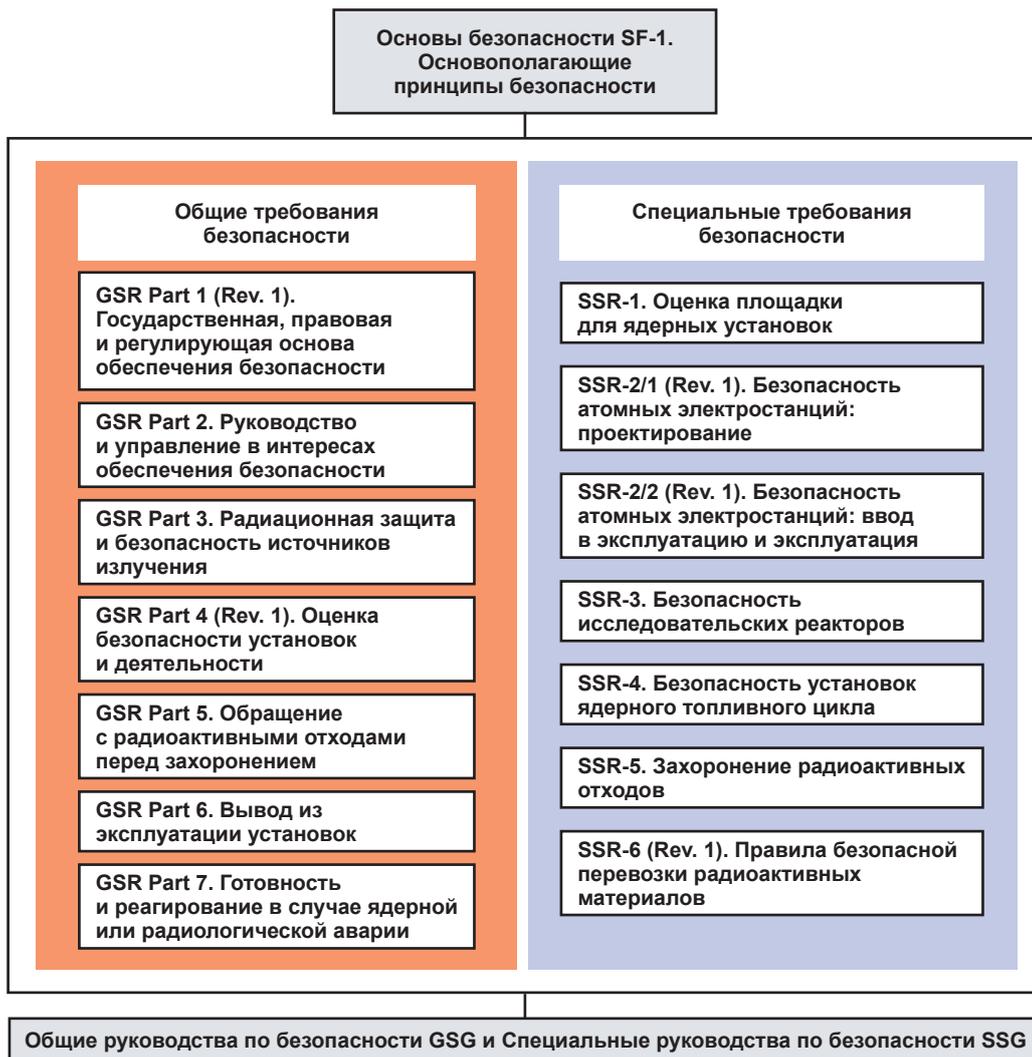


Рис. 1. Структура норм безопасности МАГАТЭ
[Fig. 1. Structure of IAEA safety standards]

и в связи с этим вопросы соответствия международным требованиям приобретают особую актуальность.

В проекте АСММ применена разрабатываемая АО «ОКБМ Африкантов» РУ интегрального типа – РУ РИТМ-200Н, прототипом которой является РУ РИТМ-200 для универсальных атомных ледоколов, имеющая необходимое расчетно-экспериментальное обоснование и изготавливаемая серийно.

2. Особенности проектных решений реакторной установки РИТМ-200Н

Схемно-конструктивные и компоновочные решения, принятые в РУ РИТМ-200Н, унифицированы с ключевыми техническими решениями РУ РИТМ-200 для универсальных атомных ледоколов и РУ РИТМ-200С для модернизированных плавучих энергоблоков [4, 5].

Основным элементом РУ РИТМ-200Н является интегральный реактор. Конструкция интегрального реактора приведена на рис. 2.

Активная зона имеет энергоресурс 8 ТВт·ч, обеспечивая непрерывную работу на протяжении шести лет.

В РУ РИТМ-200Н исключена опасность возникновения пароциркониевой реакции в сценарии максимальной проектной аварии (материал оболочки твэла – сплав 42ХНМ, доля циркониевых сплавов в активной зоне – не более 10 %).

Интегральный реактор представляет собой корпус, выполненный из теплоустойчивой радиационно стойкой стали 15Х2МФА-А. Данный конструкционный материал обеспечивает несущую способность и целостность корпуса реактора в течение назначенного ресурса и срока службы – 60 лет.

Компоновка реактора разработана с размещением оборудования основного циркуляционного тракта первого контура в интегрированном корпусе, представляющем собой комбинированный сосуд, состоящий из корпуса реактора и четырех гидрокамер.

Корпуса гидрокамер объединяются с корпусом реактора короткими силовыми патрубками, выполненными по типу «труба в трубе».

В корпусе реактора размещены активная зона, парогенераторы (ПГ) из титанового сплава. На крышке реактора размещены приводы системы управления и защиты: приводы компенсирующей группы, перемещающие рабочие органы, и приводы аварийной защиты, обеспечивающие ввод в активную зону стержней аварийной защиты.

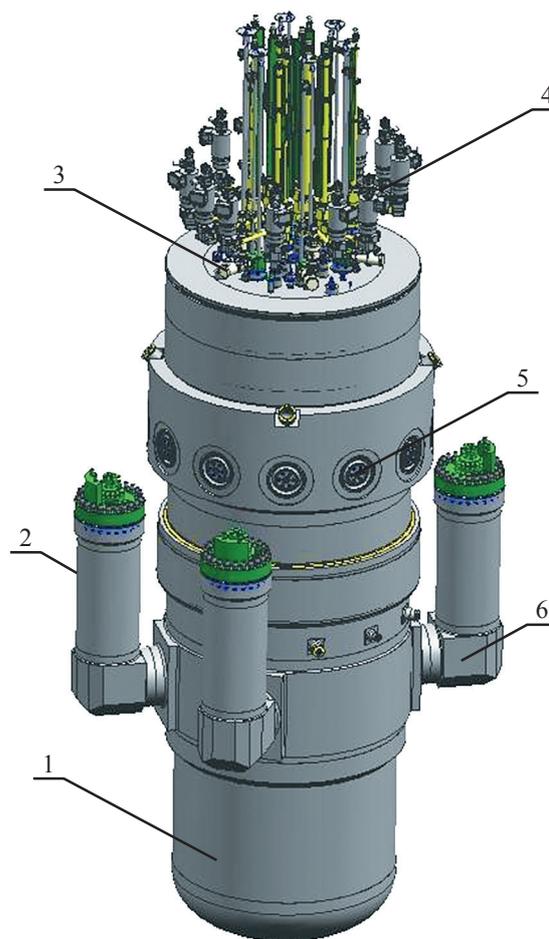


Рис. 2. Интегральный реактор РИТМ-200Н:
 1 – корпус интегрального реактора; 2 – главный циркуляционный насос; 3 – привод аварийной защиты; 4 – привод компенсирующей группы; 5 – патрубки кассет парогенератора; 6 – гидрокамера главного циркуляционного насоса
 [Fig. 2. RITM-200N integral reactor:
 1 – integral reactor vessel; 2 – reactor coolant pump; 3 – safety rod drive; 4 – compensating group drive; 5 – steam generator cassette nozzles; 6 – reactor coolant pump hydraulic chamber]

В гидрокамеры устанавливаются главные циркуляционные насосы вертикального исполнения с герметичным асинхронным электродвигателем и сухим экранированным статором по типу эксплуатирующихся на действующих судовых установках. Для герметичных главных циркуляционных насосов не требуются вспомогательные системы смазки и уплотняющей воды. В корпусе реактора размещаются четыре ПГ, каждый из которых состоит из трех кассет, объединенных между собой по питательной воде и пару. Кассета ПГ представляет собой прямой, вертикальный, прямотрубный теплообменник поверхностного типа с циркуляцией рабочей среды второго контура во внутритрубном пространстве. Конструкция ПГ аналогична ПГ РУ РИТМ-200 для универсальных атомных ледоколов.

В корпусе РУ РИТМ-200Н размещены комплекты образцов-свидетелей для обеспечения эксплуатационного контроля металла.

Интегральная компоновка реактора характеризуется отсутствием трубопроводов главного циркуляционного контура и, соответственно, класса аварий с большой течью теплоносителя.

Основное оборудование РУ, работающее под давлением первого контура (интегральный реактор, система компенсации давления, система очистки и расхолаживания, участки трубопроводов систем первого контура и др.), размещается в цилиндрической стальной защитной оболочке герметичного ограждения РУ (рис. 3).

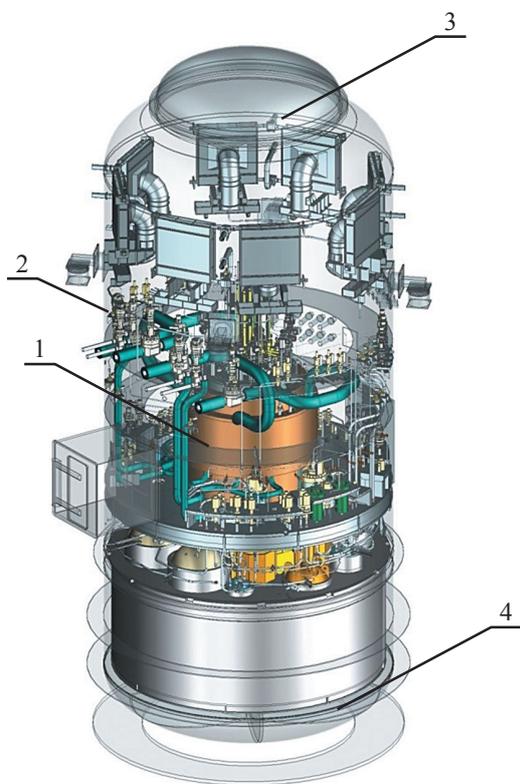


Рис. 3. Реакторная установка РИТМ-200Н в стальной защитной оболочке:

- 1 – реактор; 2 – стальная защитная оболочка;
3 – крышка оболочки; 4 – днище оболочки
[Fig. 3. RITM-200N in the steel containment:
1 – reactor; 2 – steel containment;
3 – containment cover; 4 – containment bottom]

Стальная защитная оболочка имеет эллиптическое днище и крышку, обеспечивает прочность в условиях запроектной аварии при давлении 0,9 МПа и сохранение активной зоны под уровнем теплоносителя в запроектных авариях типа LOCA (разрыве трубопровода первого контура с дополнительным наложением полного обесточивания продолжительностью не менее 72 ч) с отводом тепловыделений системой пассивного отвода тепла.

В качестве водно-химического режима первого контура РУ РИТМ-200Н используется аммиачный водно-химический режим, выбор которого обусловлен многолетним положительным опытом его применения на ядерных энергетических установках атомных ледоколов.

Применение стержней с выгорающим поглотителем на основе гадолиния, размещенных в тепловыделяющих сборках, в совокупности с высокоэффективной системой компенсации реактивности в проекте активной зоны РУ РИТМ-200Н позволяет отказаться от борного регулирования и значительно упростить комплекс систем и алгоритмов управления реактором, а также снизить количество жидких радиоактивных отходов.

Возможность реализации быстрого и глубокого маневрирования, в соответствии с требованиями локальных энергосетей, обусловлена применением металлокерамического топлива дисперсионного типа с высокой теплопроводностью и прямооточного ПГ с перегревом пара.

Технические характеристики РУ РИТМ-200Н приведены в таблице № 2.

Безопасность АСММ обеспечивается сочетанием реализации глубокоэшелонированной защиты, свойств внутренней самозащищенности, применением активных и пассивных систем безопасности. Данный подход уменьшает вероятность тяжелой аварии и минимизирует последствия в случае ее возникновения. Для РУ РИТМ-200Н принята двухканальная структура систем, обеспечивающих безопасность. Все основные функции безопасности выполняются активными системами и резервируются системами пассивного принципа действия.

Оборудование и трубопроводы РУ РИТМ-200Н сохраняют работоспособность при землетрясении интенсивностью в 8 баллов по шкале MSK-64, а при максимальном расчетном землетрясении интенсивностью в 9 баллов по шкале MSK-64 – способность выполнять функции, связанные с обеспечением безопасности РУ.

Все оборудование РУ рассчитано с учетом модели эксплуатации энергоблока, работающего в локальной энергосистеме малой мощности.

3. Методические подходы к анализу международных требований по безопасности

В процессе разработки технического проекта РУ РИТМ-200Н в АО «ОКБМ Африкантов» в период 2020–2022 гг. выполнен сравнительный анализ требований НД МАГАТЭ [6–19], требований европейских

пользователей к АЭС с легководными реакторами (EUR) [20], Российской Федерации [25¹, 26], а также требований к расчетам на прочность кода ASME [21]. Были рассмотрены документы МАГАТЭ, представленные в таблице № 3.

Анализ применимости стандартов МАГАТЭ к проекту РУ РИТМ-200Н был выполнен в 2 этапа:

- 1 этап – сравнение положений требований и руководств МАГАТЭ с соответствующими положениями российских НД;
- 2 этап – анализ соответствия подходов и решений РУ РИТМ-200Н требованиям и рекомендациям МАГАТЭ.

На 1 этапе для каждого требования зарубежного НД:

- осуществлялся поиск аналогичных требований в НД по безопасности АЭС РФ;
- выполнялся сравнительный анализ по существу рассматриваемых требований.

¹ При анализе использованы нормативные правовые акты и НД РФ, относящиеся к сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) в части энергоблоков АЭС и водо-водяных реакторов (ВВЭР).

На 2 этапе выполнялась идентификация требований НД МАГАТЭ применительно к проекту РУ РИТМ-200Н по следующим категориям:

- применимы к проекту;
- не актуальны для проекта;
- в проекте используются иные решения без снижения безопасности.

Требования, отнесенные к категории «используются иные решения без снижения безопасности» представляют собой требования, важные с точки зрения безопасности АСММ на базе РУ РИТМ-200Н, однако существующая формулировка стандарта МАГАТЭ требует адаптации с учетом технических особенностей РУ РИТМ-200Н.

4. Основные результаты сравнительного анализа отечественных требований с подходами и требованиями концептуального характера МАГАТЭ, EUR

4.1. Основы безопасности

Требования НД по безопасности АЭС РФ в целом гармонизированы с требованиями стандарта МАГАТЭ SF-1 (таблица № 4).

Таблица № 2

Основные технические характеристики реакторной установки РИТМ-200Н Basic technical characteristics of the RITM-200N reactor plant

| Наименование характеристики | Значение |
|---|---|
| Тип реактора | Водо-водяной реактор под давлением интегрального типа |
| Тепловая мощность РУ, МВт | 190 |
| Электрическая мощность энергоблока, МВт, не менее | 55 |
| Эксплуатационный диапазон изменения мощности, % $N_{ном}$ | 30–100 |
| Количество тепловыделяющих сборок, шт. | 199 |
| Обогащение топлива по UO_2 , %, не более | 20 |
| Паропроизводительность, т/ч | 305 |
| Температура на выходе из активной зоны, °С | 321 |
| Давление в первом контуре, МПа | 15,7 |
| Расход теплоносителя первого контура, т/ч | 3 250 |
| Температура питательной воды на входе в ПГ, °С | 170 |
| Температура пара на выходе из ПГ, °С | 295 |
| Давление пара за ПГ, МПа (абс.) | 3,82 |
| Назначенный срок службы РУ, лет | 60 |

Таблица № 3

**Перечень документов МАГАТЭ
List of IAEA documents**

| № п/п | Наименование документа | Обозначение |
|-------|---|-------------|
| 1. | Стандарт МАГАТЭ «Основополагающие принципы безопасности. Основы безопасности» | SF-1 |
| 2. | Доклад МАГАТЭ «Основные принципы безопасности атомных электростанций» | INSAG-12 |
| 3. | Стандарт МАГАТЭ «Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности» | GSR Part3 |
| 4. | Стандарт МАГАТЭ «Оценка безопасности установок и деятельности. Общие требования безопасности» | GSR Part4 |
| 5. | Стандарт МАГАТЭ «Безопасность атомных электростанций: проектирование. Конкретные требования безопасности» | SSR-2/1 |
| 6. | Стандарт МАГАТЭ «Безопасность атомных электростанций: ввод в эксплуатацию и эксплуатация. Конкретные требования безопасности» | SSR-2/2 |
| 7. | Руководство МАГАТЭ «Оценка безопасности и независимая проверка для атомных электрических станций» | NS-G-1.2 |
| 8. | Руководство МАГАТЭ «Детерминистский анализ безопасности атомных электрических станций» | SSG-2 [13] |
| 9. | Руководство МАГАТЭ «Классификация по безопасности сооружений, систем и компонентов атомных электрических станций» | SSG-30 |
| 10. | Руководство МАГАТЭ «Проектирование систем контроля и управления для атомных станций» | SSG-39 |
| 11. | Руководство МАГАТЭ «Проектирование активной зоны для атомных электростанций» | SSG-52 |
| 12. | Руководство МАГАТЭ «Проектирование системы охлаждения реактора и связанных систем АЭС» | SSG-56 |
| 13. | Руководство МАГАТЭ «Проектирование систем по обращению с топливом и его хранению для АЭС» | SSG-63 |

Таблица № 4

**Результаты сравнительного анализа стандарта SF-1
Comparative analysis results for SF-1**

| Области сравнения | Результаты сравнения |
|--|--------------------------------|
| Цель безопасности | Подходы одинаковы ² |
| Принцип 1. Ответственность за обеспечение безопасности | Различий нет |
| Принцип 2. Роль правительства | Различий нет |
| Принцип 3. Руководство и управление в интересах обеспечения безопасности | Подходы одинаковы |
| Принцип 4. Обоснование установок и деятельности | Подходы одинаковы |
| Принцип 5. Оптимизация защиты | Подходы одинаковы |
| Принцип 6. Ограничение рисков в отношении физических лиц | Подходы одинаковы |
| Принцип 7. Защита настоящего и будущих поколений | Подходы одинаковы |
| Принцип 8. Предотвращение аварий | Подходы одинаковы |
| Принцип 9. Аварийная готовность и реагирование | Подходы одинаковы |
| Принцип 10. Защитные меры по уменьшению имеющихся или нерегулируемых радиационных рисков | Не распространяется на АЭС |

² Понятие «подходы одинаковы» аналогично определению этого понятия А. М. Букринским в работе [22] – «требования одинаковы по совокупности общих и конкретных требований».

Ряд принципов безопасности стандарта SF-1 касается только организационных вопросов обеспечения безопасности и не содержит требований к техническим решениям проекта АЭС (1–2) либо не распространяется на АЭС (10). Остальные принципы (3–9) включают требования, применимые к проекту АС, в том числе к проекту АСММ с РУ РИТМ-200Н.

По результатам выполненного сравнительного анализа других стандартов МАГАТЭ (GSR Part 3, GSR Part 4, SSR-2/1 и SSR-2/2) установлено, что требования отечественных НД в основном синхронизированы с современными зарубежными подходами и требованиями, а имеющиеся различия не носят принципиального характера.

Выявленные различия в требованиях, позволяющие оценить возможные риски реализации проекта за рубежом, представлены ниже.

4.2. Радиологические критерии безопасности атомной станции

Радиологические критерии безопасности АЭС в требованиях МАГАТЭ, EUR и РФ во многом совпадают, но в ряде случаев критерии МАГАТЭ и EUR более жесткие, чем в НД РФ.

В соответствии с НД РФ и зарубежными требованиями в проекте АЭС должны быть оценены расстояния, на которых при проектных и запроектных авариях возможно достижение критериев для принятия решений о мерах защиты населения: на начальном периоде аварии – эвакуация, укрытие, йодная профилактика; на поздних стадиях аварии – отселение, ограничение потребления загрязненных пищевых продуктов.

Для проектных аварий в НД РФ и EUR установлены радиологические критерии, предполагающие отсутствие мер по защите населения на начальном периоде аварии, а в требованиях МАГАТЭ критерии не привязаны к периоду аварии: предполагается отсутствие мер по защите населения за пределами площадки на всех стадиях аварии.

В требованиях МАГАТЭ и EUR выделены запроектные аварии без значительного повреждения топлива, для которых регламентируются последствия для населения такие же, как для проектных аварий, а в НД РФ для этой категории аварий последствия отдельно не регламентируются.

Для тяжелых аварий с плавлением топлива требования EUR более жесткие, чем в НД РФ.

При разработке пилотного проекта АСММ предполагается ориентироваться на наиболее

консервативные требования из НД РФ, МАГАТЭ и EUR по радиологическим критериям безопасности.

4.3. Расчеты на прочность

Основные требования НД РФ, используемых при обосновании прочности, во многих случаях являются более жесткими по сравнению с кодом ASME [21]. В отдельных случаях код ASME имеет более консервативные требования относительно норм РФ.

При разработке экспортного варианта проекта предполагается ориентироваться на наиболее консервативные требования из НД РФ и кода ASME.

4.4. Уровни глубокоэшелонированной защиты

Различия в уровнях глубокоэшелонированной защиты состоят в том, что уровень 3 в требованиях WENRA и EUR включает подуровень (3b), соответствующий предотвращению повреждения активной зоны для сценариев с множественными отказами в системах безопасности. При этом требуется, чтобы последствия таких нарушений были аналогичны или близки к регламентированным для проектных аварий – отсутствие плавления активной зоны и радиологического воздействия за пределами площадки АЭС.

Обеспечение безопасности АЭС в сценариях с множественными отказами в системах безопасности, согласно [23], входит в состав уровня 4 глубокоэшелонированной защиты – управление запроектными авариями. Соответственно, в отечественных НД последствия сценариев с отказами систем безопасности регламентируются пределами, установленными в НД РФ для запроектных аварий.

Разработка проекта пилотной АСММ выполняется на основе требований НД РФ. При этом в проекте пилотной АСММ предполагается определить запроектные аварии, последствия которых аналогичны или близки к последствиям, регламентированным для проектных аварий.

При адаптации проекта для его реализации за рубежом различие в классификации уровней глубокоэшелонированной защиты учитывается при наличии соответствующих требований со стороны страны-заказчика.

4.5. Независимость уровней глубокоэшелонированной защиты

Требования МАГАТЭ и WENRA определяют последовательный системный подход к обеспечению

независимости уровней глубокоэшелонированной защиты. В частности, требования WENRA предполагают в разумно достижимой степени обеспечить независимость между разными уровнями глубокоэшелонированной защиты так, чтобы отказ одного уровня не ухудшал защиту других уровней от определенного события или для его смягчения.

НД РФ, ориентируясь в общем на обеспечение независимости средств обеспечения безопасности на разных уровнях глубокоэшелонированной защиты, в то же время допускает совмещение одними и теми же системами функций нормальной эксплуатации и систем безопасности.

Разработка проекта пилотной АСММ выполняется на основе требований НД РФ.

При разработке экспортного варианта проекта учитываются требования по независимости уровней страны-заказчика.

4.6. Классификация по безопасности элементов атомной станции

Процедуры классификации и критерии классификации по безопасности в НД РФ и МАГАТЭ различаются. В НД РФ используются конкретные, содержащиеся в [23], критерии классификации непосредственно элементов нормальной эксплуатации, элементов систем безопасности и специальных технических средств в зависимости от последствий отказа элемента.

Критерии классификации элементов по безопасности, установленные в SSG-30 [14], отличаются от установленных в НД РФ критериев. В частности, так же, как и в требованиях EUR, в качестве критериев в [14] учитывается превышение:

- дозовой нагрузки облучения персонала (класс 3);
- радиологических критериев безопасности или пределов, установленных для нарушений нормальной эксплуатации (класс 2);
- радиологических критериев безопасности или пределов, установленных для проектных аварий (класс 1).

Несмотря на имеющиеся отличия, общие принципы подхода к классификации элементов АЭС по безопасности в НД РФ и в SSG-30 [14] близки. В них содержатся:

- три класса важных для безопасности элементов;
- учет назначения и характера выполняемой функции безопасности (элементы системы нормаль-

ной эксплуатации, системы безопасности, технических средств управления запроектными авариями);

- учет последствий отказа элемента.

В проекте АСММ с РУ РИТМ-200Н классификация по безопасности выполняется по требованиям НД РФ.

В экспортном варианте проекта выполняются требования страны-заказчика.

4.7. Детерминистский анализ безопасности

Требования МАГАТЭ к детерминистскому анализу безопасности (ДАБ) во многом совпадают с аналогичными требованиями НД РФ. Однако требования, содержащиеся в руководстве SSG-2 [13], отличаются большей степенью детализации информации по вопросам ДАБ и выполнения его процедур. Основные отличия:

- в НД МАГАТЭ выводы о безопасности АЭС делаются на основании выполнения приемочных критериев. В НД РФ понятие приемочного критерия отсутствует. На практике при разработке отчета по обоснованию безопасности АЭС в РФ также используется понятие приемочных критериев (проектных пределов для аварий), что должно быть в полной мере продемонстрировано в проекте АСММ;
- в НД РФ указываются два подхода к ДАБ: консервативный подход для нормальной эксплуатации, нарушений нормальной эксплуатации, не перешедших в аварию, а также для проектных аварий и реалистический подход для запроектных аварий. В НД МАГАТЭ указываются четыре подхода к ДАБ (консервативный, комбинированный, основанный на использовании моделей и расчетных кодов наилучшей оценки в комбинации с консервативными начальными и граничными условиями, реалистический и реалистический с анализом неопределенностей).

Указанные особенности требований МАГАТЭ целесообразно учесть в экспортном варианте проекта АСММ с РУ РИТМ-200Н.

4.8. Вероятностный анализ безопасности

Требования МАГАТЭ и EUR к вероятностному анализу безопасности во многом совпадают с аналогичными требованиями НД РФ с отдельными отличиями по детализации процедур анализа.

Различия в требованиях к вероятностным критериям безопасности в НД РФ, МАГАТЭ и EUR приведены в таблице № 5.

Разработка вероятностного анализа безопасности для проекта АСММ с РУ РИТМ-200Н выполняется на основе требований отечественных НД.

На стадии подготовки к реализации проекта АСММ за рубежом дополнительно будет выполнена адаптация вероятностного анализа безопасности с учетом возможных различий требований к вероятностным критериям безопасности страны-заказчика.

4.9. Требования к учету внешних воздействий на атомной станции

Требования МАГАТЭ и WENRA к учету внешних воздействий на АЭС предполагают учет редких и тяжелых внешних воздействий, рассматриваемых сверх учитываемых в проекте, с целью исключения «порогового эффекта».

Таблица № 5

Вероятностные критерии безопасности в нормативных документах Российской Федерации, МАГАТЭ и EUR Probabilistic safety criteria in Russian Federation, IAEA and EUR regulatory documents

| Нормативные документы | | |
|--|--|---|
| Российской Федерации | МАГАТЭ (INSAG-12) | EUR |
| Непревышение суммарной вероятности тяжелых аварий для каждого энергоблока АЭС на интервале в один год, равной 10^{-5} | Реализация основных принципов безопасности и задач на будущих станциях должна привести к достижению улучшенного целевого показателя (вероятности тяжелого повреждения активной зоны), не превышающего 10^{-5} таких событий на год эксплуатации АЭС | Кумулятивная частота повреждений активной зоны должна быть менее 10^{-5} за один год работы реактора |
| Непревышение суммарной вероятности большого аварийного выброса для каждого энергоблока АЭС на интервале в один год, равной 10^{-7} | Меры по управлению тяжелыми авариями и смягчению их последствий могут снизить вероятность больших выбросов за пределы площадки, для которых необходимы краткосрочные меры реагирования за пределами площадки, по меньшей мере в 10 раз ³ | Кумулятивная частота последовательностей развития аварии, несколько превышающих критерий ограниченного воздействия ⁴ , должна быть менее 10^{-6} за один год работы реактора |
| | Еще одной задачей для этих будущих АЭС станет практическое исключение ⁵ тех путей развития аварии, которые могли бы привести к большому ранним выбросам радиоактивности, в то время как тяжелые аварии, подразумевающие поздний отказ защитной оболочки, были бы учтены при проектировании на основе реалистичных предположений и анализа, использующего наилучшую оценку, с тем чтобы последствия таких аварий требовали применения только защитных мер, ограниченных по времени и территории их применения | |

³ Примечание: по отношению к вероятности тяжелого повреждения активной зоны (10^{-5} на год эксплуатации станции).

⁴ Для аварий с плавлением активной зоны требуется соблюдение следующих целей безопасности:

- отсутствие мер по: эвакуации в радиусе свыше 3 км от реактора; предоставлению укрытия в радиусе свыше 5 км от реактора; йодной профилактике в радиусе свыше 5 км от реактора; переселению на постоянное жительство на любом расстоянии;

- отсутствие долгосрочных ограничений на потребление продуктов питания спустя один год после аварии за пределами зоны укрытия (5 км).

⁵ Возможность возникновения определенных состояний может считаться «практически исключенной» в случае отсутствия физической возможности их возникновения или в случае, если существует высокая степень уверенности в крайне малой вероятности их возникновения.

Параметры таких воздействий конкретизированы в требованиях EUR, в которых, как правило, используется повышающий коэффициент 1,5 применительно к амплитуде экстремального воздействия, учитываемого в проекте. Это касается учета воздействия природных факторов, характерных для площадки размещения АС, включая следующие природные воздействия: землетрясение, внешнее затопление, торнадо, экстремальные температуры, снеговая нагрузка, молния.

Кроме того, согласно требованиям WENRA, необходимо учитывать преднамеренное падение коммерческого самолета на АЭС безотносительно к оценке вероятности такого события.

Тенденция учета запроектных внешних воздействий большей тяжести, чем учитываемые в проекте, имеет место и в отечественных НД, что будет учтено в пилотном проекте:

- НП-001-15 [23] предписывает исключение «пороговых эффектов» при разработке проекта АС;
- НП-064-17 [24] предписывает рассмотрение при анализе запроектных аварий внешних воздействий большей тяжести, чем учитываемые в проекте.

В экспортном варианте проекта данный аспект будет рассматриваться с учетом требований страны-заказчика.

4.10. Основные результаты сравнительного анализа отечественных требований с требованиями руководств МАГАТЭ

При анализе применимости стандартов МАГАТЭ к проекту РУ РИТМ-200Н для наземных АСММ рассматривались руководства МАГАТЭ уровня SSG, содержащие конкретные рекомендации по проектированию систем и оборудования АЭС:

- активной зоны – SSG-52;
- системы охлаждения реактора и связанных систем – SSG-56;
- систем по обращению с топливом и его хранению – SSG-63;
- систем контроля и управления – SSG-39.

Указанные руководства применимы к наземным стационарным АЭС с водоохлаждаемыми реакторами.

По результатам сравнительного анализа можно заключить, что большинство требований, содержащихся в руководствах, имеют аналоги в НД РФ, и подходы (за некоторой разницей формулировок) можно идентифицировать как одинаковые. Такие требования в основном применимы для проекта АСММ с РУ РИТМ-200Н, в том числе все требования

руководства № SSG-39 «Проектирование систем контроля и управления для атомных станций».

Из рассмотрения исключаются конкретные требования, адресованные к оборудованию и системам кипящих ВВЭР и реакторов с тяжеловодным теплоносителем.

В результате анализа идентифицированы требования, важные с точки зрения безопасности АЭС, которые в существующей формулировке неприменимы к проекту АСММ с РУ РИТМ-200Н в силу технологических особенностей РУ или адресации требования к решениям для петлевых реакторов типа ВВЭР/PWR (таблица № 6). При этом в РУ РИТМ-200Н реализуются иные технические решения без снижения безопасности.

Анализ НД уровня руководств с оценкой их применимости к проекту АСММ с РУ РИТМ-200Н показал необходимость корректировки действующих и (или) создания новых руководств МАГАТЭ, учитывающих технологические особенности установок данного типа.

Заключение

Проведенный анализ требований НД РФ и норм безопасности МАГАТЭ, а также требований EUR показал, что требования отечественных НД в основном синхронизированы с современными зарубежными подходами и требованиями.

Разработка пилотного проекта АСММ осуществляется исходя из ориентации на наиболее консервативные требования к радиологическим критериям безопасности из НД РФ, МАГАТЭ и EUR.

Экспортный вариант проекта АСММ будет разрабатываться по наиболее консервативным из требований НД РФ и страны-заказчика.

Необходимость разработки новых документов или корректировки стандартов МАГАТЭ (уровня SF-1, GSR, SSR) отсутствует.

Оценка применимости руководств МАГАТЭ для проекта АСММ показала необходимость корректировки существующих документов или разработки новых применительно к технологическим особенностям инновационных проектов.

Результаты проведенных анализов предложено учесть в проводимых Госкорпорацией «Росатом» разработках предложений по гармонизации федеральных норм и правил в области использования атомной энергии Российской Федерации со стандартами МАГАТЭ в части АСММ и инновационных реакторов.

Анализ требований руководств МАГАТЭ и нормативных документов Российской Федерации для проекта атомной станции малой мощности с реакторной установкой РИТМ-200Н
Analysis of requirements in IAEA guides and Russian Federation regulatory documents for the RITM-200N small-sized nuclear power plant design

| Руководство МАГАТЭ | Нормативные документы Российской Федерации | Содержание требований | Принципиальные отличия в проекте реакторной установки РИТМ-200Н |
|---|--|---|---|
| SSG-56 «Проектирование системы охлаждения реактора и связанных систем АЭС» | ГОСТ 24693-81 «Реакторы ядерные энергетические корпусные с водой под давлением. Общие требования к системе борного регулирования» | Требования, связанные с использованием борного регулирования | В АСММ отсутствует система борного регулирования, и неактуальны требования по непрерывному контролю концентрации борного раствора в реакторе и системе первого контура при нормальной эксплуатации. Концентрация бора не входит в число ключевых параметров безопасности, отсутствует необходимость ее контроля, нет необходимости рассмотрения разбавления бора в качестве исходных событий |
| | НП-089-15 «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» | Требования к системам ПГ по: - контролю заполнения первым контуром; - контролю уровня второго контура в ПГ (котловой воды) при эксплуатации | В РУ применен прямоточный вертикальный ПГ, размещаемый в корпусе реактора, со вторым контуром в трубах ПГ и первым контуром в межтрубном пространстве. Контроль заполнения межтрубного пространства ПГ осуществляется по уровню в первом контуре с использованием внутриреакторных сигнализаторов уровня. Конструктивное исполнение ПГ не требует контроля уровня воды второго контура при эксплуатации. Расход второго контура в ПГ является регулируемым параметром для управления мощностью совместно с исполнительным механизмом систем управления защитой |
| НП-084-15 «Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций» | | Требования, связанные с эксплуатационным контролем корпуса реактора Требования, связанные с эксплуатационным контролем труб ПГ | Контроль корпуса реактора (неразрушающий и разрушающий с использованием образцов-свидетелей) осуществляется в зонах, требующих полной разборки реактора при средних ремонтах через каждые 20 лет В ПГ РУ РИТМ-200Н отсутствует возможность эксплуатационного контроля состояния металла, однако обеспечен непрерывный параметрический контроль целостности кассеты ПГ в процессе эксплуатации. Безопасность обеспечивается при использовании иных проектных решений. Конструктивное исполнение ПГ РУ РИТМ-200Н исключает возможность проведения вихревого контроля труб ПГ в процессе эксплуатации, но при этом обеспечен непрерывный параметрический контроль целостности кассеты ПГ. |

| Руководство МАГАТЭ | Нормативные документы Российской Федерации | Содержание требований | Принципиальные отличия в проекте реакторной установки РИТМ-200Н |
|--|--|--|---|
| SSG-52 «Проектирование активных зон реакторов атомных электростанций» | НП-094-15 «Основные требования к обособлению прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих сборок и тепловыделяющих элементов в активной зоне водо-водяных энергетических реакторов» | Требования, направленные на обеспечение работоспособности и надежности твэлов с учетом повреждающих факторов и аспектов, специфичных для твэлов контейнерного типа с топливными таблетками и циркониевой оболочкой, традиционно применяемых в реакторах типа PWR и ВВЭР Требования, специфичные для режима частичных перегрузок | <p>В РУ РИТМ-200Н предусмотрена возможность раннего диагностирования течи, быстрой локализации запорной арматурой по воде и пару, что исключает распространение радиоактивных веществ за пределы границ первого контура за счет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - непрерывного контроля активности пара; - высокой чувствительности датчиков активности пара («газовая» неплотность, микротечь 0,01–0,3 кг/ч); - непрерывного контроля давления в первом контуре; - дистанционного или автоматического отключения группы кассет с негерметичной кассетой ПГ двойной запорной арматурой по воде и пару при повышении активности пара до уровня предупредительной или аварийной сигнализации. <p>При этом вывод РУ из действия не требуется, эксплуатация РУ может быть продолжена на пониженном до 60 % уровне мощности. В дальнейшем производится поиск негерметичного модуля и восстановление работоспособности кассеты ПГ путем глушения негерметичного модуля в кассете ПГ. Выход радиоактивных продуктов за пределы границ первого контура не происходит</p> <p>В АСММ РИТМ-200Н применяется дисперсионное топливо, что исключает такой фактор, как взаимодействие «таблетка – оболочка», а применение в качестве оболочечного материала коррозионно- и радиационно стойкого сплава вместо циркония исключает коррозионное растрескивание под напряжением, гидрирование оболочки и парциркулиевую реакцию с образованием водорода. Соответственно, требования, содержащие упоминание этих аспектов, неприменимы без адаптации с учетом специфики поведения дисперсионного топлива</p> <p>Частичные перегрузки, вариации карбограммы загрузки и изменения конфигурации активной зоны проектом не предусмотрены. Каждая загружаемая активная зона проходит стендовые испытания на соответствие проектным характеристикам. Любые изменения активной зоны (модернизация, оптимизация) сопровождаются выпуском нового технического проекта активной зоны и дополнения к отчету по обоснованию безопасности АЭС, согласованных с регулятором</p> <p>В РУ для управления реактивностью не используется растворенный в теплоносителе бор. Соответственно, концентрация бора не входит в число ключевых параметров безопасности, отсутствует необходимость ее контроля и рассмотрения разбавления бора в качестве исходных событий</p> |

| Руководство МАГАТЭ | Нормативные документы Российской Федерации | Содержание требований | Принципиальные отличия в проекте реакторной установки РИТМ-200Н |
|--|---|--|---|
| <p>SSG-63 «Проектирование систем для обращения с топливом и его хранения на атомных электростанциях»</p> | <p>НП-061-05 «Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии»</p> | <p>Требования к машине перегрузочной</p> | <p>Конструктивные особенности РУ РИТМ-200Н исключают возможность перегрузки топлива с использованием машины перегрузочной, аналогичной применяемым для пеллетных реакторов ВВЭР, РWR.</p> <p>В проекте АСММ в качестве референтного решения по системе обращения с ядерным топливом принята технология перегрузки топлива из реактора в хранилище отработавшего ядерного топлива с помощью перегрузочного контейнера. Технология перегрузки отработавших теплоделяющих сборок с помощью перегрузочного контейнера применяется на плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов», а также при перезарядке атомных ледоколов.</p> <p>Безопасность данной технологии перегрузки применительно к проекту АСММ с РУ РИТМ-200Н обеспечивается выбором конструктивных материалов и оптимальных толщин конструкций оборудования для выполнения требований по защите персонала от излучения, а также использованием свойств внутренней самозащитенности контейнера с необходимыми запасами воды и наличием средств для оперативного восполнения ее запасов.</p> <p>Безопасность обеспечивается при использовании иных проектных решений</p> |

Литература

1. Advances in small modular reactor technology development. 2022 Edition. A supplement to: IAEA advanced reactors information system (ARIS), Vienna, Austria, 2022.
2. Конвенция о ядерной безопасности. – МАГАТЭ, Вена, Австрия, 1994.
3. Об использовании атомной энергии: Федер. закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ (с изм. от 30.04.2021).
4. Петрунин В. В. Реакторные установки для атомных станций малой мощности / Академия наук и атомная отрасль. Научные сессии Общего собрания членов РАН и Общих собраний отделений РАН (декабрь, 2020 г.): сб. докладов. – М., 2021. – С. 213–231.
5. Петрунин В. В. Особенности и принципы нормативного регулирования проекта наземной АСММ с реакторной установкой РИТМ-200Н с водо-водяным реактором судового типа: доклад / XVI Международный ядерный форум «Безопасность ядерных технологий: культура безопасности» (октябрь, 2022 г.). – СПб, 2022.
6. основополагающие принципы безопасности. Основы безопасности, № SF-1. – МАГАТЭ, 2007.
7. Основные принципы безопасности атомных электростанций, 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG-12. Доклад международной консультативной группы по ядерной безопасности. – МАГАТЭ, 2015.
8. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности, часть 3, № GSR Part 3. – МАГАТЭ, Вена, 2015.
9. Оценка безопасности установок и деятельности. Общие требования безопасности, № GSR Part 4 (Rev. 1). – МАГАТЭ, Вена, 2016.
10. Безопасность атомных электростанций: проектирование. Конкретные требования безопасности, № SSR-2/1 (Rev. 1). – МАГАТЭ, Вена, 2016.
11. Безопасность атомных электростанций: ввод в эксплуатацию и эксплуатация. Конкретные требования безопасности, № SSR-2/2 (Rev. 1). – МАГАТЭ, Вена, 2016.
12. Оценка безопасности и независимая проверка для атомных электрических станций. Руководство по безопасности, № NS-G-1.2. – МАГАТЭ, Вена, 2004.
13. Детерминистский анализ безопасности атомных электрических станций. Руководство по безопасности, № SSG-2 (Rev. 1). – МАГАТЭ, 2019.
14. Классификация по безопасности сооружений, систем и компонентов атомных электрических станций. Руководство по безопасности, SSG-30. – МАГАТЭ, Вена, 2014.
15. Проектирование систем контроля и управления для атомных станций. Руководство по безопасности, № SSG-39. – МАГАТЭ, 2018.
16. Проектирование активной зоны для атомных электростанций. Руководство по безопасности, № SSG-52. – МАГАТЭ, Вена, 2019.
17. Проектирование системы охлаждения реактора и связанных систем АЭС. Руководство по безопасности, № SSG-56. – МАГАТЭ, Вена, 2020.
18. Проектирование систем по обращению с топливом и его хранению для АЭС. Руководство по безопасности, SSG-63. – МАГАТЭ, Вена, 2020.
19. Безопасность новых проектов АЭС. Отчет рабочей группы по гармонизации безопасности реакторов ассоциации западноевропейских регулирующих органов по ядерной безопасности. – WENRA, 2013.
20. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. Vol. 2. Generic and Nuclear Island Requirements. Charter 1. Safety Requirements, Revision E, 1995.
21. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1, ASME BPVC.III.1-2015.
22. Букринский А. М. Безопасность атомных станций по федеральным нормам и правилам России и стандартам МАГАТЭ (Сравнение основных принципов и требований по обеспечению безопасности). Третье обновленное издание / Труды «НТЦ ЯРБ». – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2012.
23. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-15: утв. приказом Ростехнадзора от 17.12.2015 № 522.
24. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-17: утв. приказом Ростехнадзора от 30.11.2017 № 514.

25. Перечень нормативных правовых актов и нормативных документов, относящихся к сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (П-01-01-2021). Раздел II. Государственное регулирование безопасности при использовании атомной энергии. Подраздел 2. Атомные станции: утв. приказом Ростехнадзора от 04.02.2022 № 33.

26. ГОСТ 24693-81. Реакторы ядерные энергетические корпусные с водой под давлением. Общие требования к системе борного регулирования. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 337 с.

References

1. Advances in small modular reactor technology development. 2022 Edition. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), Vienna, Austria, 2022.
2. Convention on Nuclear Safety is an International Atomic Energy Agency (IAEA) Treaty, Vienna, Austria, 1994.
3. Federal'nyi zakon ot 21.11.1995 No. 170-FZ "Ob ispol'zovanii atomnoi ehnergii" (s izm. ot 30.04.2021) [Federal Law No. 170-FZ of 21 November 1995 "On the Use of Atomic Energy" (as amended on April 30, 2021)]. 2021.
4. Petrunin V. V. (2021). Reaktornye ustanovki dlya atomnykh stantsii maloi moshchnosti / Akademiya nauk i atomnaya otrasl': sb. dokladov [Reactor plants for small NPPs / In the collection: Academy of Sciences and the Nuclear Industry]. Nauchnye sessii Obshchego sobraniya chlenov RAN i Obshchikh sobraniy otdelenii RAN (dekabr', 2020 g.) – Scientific Sessions of the General Assembly of Members of the RAS and General Assemblies of the RAS Branches (December, 2020). Moscow, pp. 213–231. [in Russian].
5. Petrunin V. V. (2022). Osobennosti i printsipy normativnogo regulirovaniya proekta nazemnoi ASMM s reaktornoj ustanovkoi RITM-200N s vodo-vodyanym reaktorom sudovogo tipa: doklad [Specifics and Principles for Normative Regulation of the Land-Based SNPP Design with RITM-200N Reactor Plant with a Marine-Type Pressurized Water Reactor: Report]. XVI Mezhdunarodnyi yadernyi forum "Bezopasnost' yadernykh tekhnologii: kul'tura bezopasnosti" (oktyabr', 2022 g.) – XVI International Nuclear Forum "Safety of Nuclear Technologies: Safety Culture" (October, 2022). [in Russian].
6. Fundamental Safety Principles. Safety Fundamentals. No. SF-1, IAEA, 2007.
7. Basic safety principles for nuclear power plants, 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG-12, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group, IAEA, 2015.
8. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3, No. GSR Part 3, IAEA, Vienna, 2014.
9. Safety Assessment for Facilities and Activities. General Safety Requirements, No. GSR Part 4 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2016.
10. Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific Safety Requirements, No. SSR-2/1 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2016.
11. Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation. Specific Safety Requirements, No. SSR-2/2 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2016.
12. Safety Assessment and Verification for Nuclear Power Plants. Safety Guide, No. NS-G-1.2, IAEA, Vienna, 2001.
13. Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide, No. SSG-2 (Rev. 1), IAEA, Vienna, 2019.
14. Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide, No. SSG-30, IAEA, Vienna, 2014.
15. Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide, No. SSG-39, IAEA, Vienna, 2018.
16. Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide, No. SSG-52, IAEA, Vienna, 2019.
17. Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide, No. SSG-56, IAEA, Vienna, 2020.
18. Design of Fuel Handling and Storage Systems for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide, No. SSG-63, IAEA, Vienna, 2020.

19. Safety of new NPP designs. Report of the Reactor Harmonization Working Group of the Western Europe Nuclear Regulators Association (WENRA), 2013.

20. European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. Vol. 2. Generic and Nuclear Island Requirements. Charter 1. Safety Requirements, Revision E, 1995.

21. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Division 1, ASME BPVC.III.1-2015.

22. Bukrinskii A. M. (2019). Bezopasnost' atomnykh stantsii po federal'nym normam i pravilam Rossii i standartam MAGATEH (Sravnenie osnovnykh printsipov i trebovaniy po obespecheniyu bezopasnosti). Tre'te obnovennoe izdanie [Safety of nuclear power plants compliant with the russian federal rules and regulations and IAEA standards (Comparison of basic safety principles and requirements). Third updated edition]. Trudy "NTTS YARB" – Proceedings of SEC NRS, Moscow: SEC NRS. [in Russian].

23. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii "Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsii" (NP-001-15) [Federal rules and regulations of atomic energy use "General provisions for nuclear power plant safety assurance" (NP-001-15)]. 2015.

24. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii "Uchet vneshnikh vozdeistvii prirodnogo i tekhnogenno go proiskhozhdeniya na ob"ekty ispol'zovaniya atomnoi ehnergii" (NP-064-17) [Federal rules and regulations of atomic energy use "Record of external natural and human-induced impacts on nuclear facilities" (NP-064-17)]. 2017.

25. Perechen' normativnykh pravovykh aktov i normativnykh dokumentov, odnosyashchikhsya k sfere deyatelnosti Federal'noi sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru (P-01-01-2021). Razdel II. Gosudarstvennoe regulirovanie bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoi ehnergii. Podrazdel 2. Atomnye stantsii [List of regulatory legal acts and regulatory documents related to the sphere of activity of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision (P-01-01-2021). Section II. State regulation of safety in the use of atomic energy. Subsection 2. Nuclear power plants]. 2022.

26. GOST 24693-81 "Reaktory yadernye ehnergeticheskie korpusnye s vodoi pod davleniem. Obshchie trebovaniya k sisteme bornogo regulirovaniya" [GOST 24693-81 "Nuclear power vessel-encapsulated, water-pressurized reactors. General requirements to boric regularitic system"]. 1982.

Сведения об авторах

Петрунин Виталий Владимирович, первый заместитель генерального директора – генерального конструктора, Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15).

Бахметьев Александр Михайлович, начальник департамента научного развития и ВАБ, Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15).

Кураченко Андрей Валентинович, главный специалист по реакторным установкам с реакторами типа ВВР конструкторско-компоновочного отдела водо-водяных РУ и общестанционного оборудования, Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15).

Галицких Владимир Юрьевич, заместитель начальника отдела нейтронно-физических, тепло-гидравлических расчетов водо-водяных реакторов и расчетного анализа аварийных режимов РУ, Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15).

Макеев Юрий Александрович, главный специалист отдела системных разработок по надежности и безопасности ядерных установок, Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15).

Щекин Дмитрий Владимирович, заместитель главного конструктора РУ ВВР АСММ, Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения имени И.И. Африкантова» (603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15).

Authors credentials

Petrinin Vitalii Vladimirovich, First Deputy General Director – First Deputy General Designer, Afrikantov OKBM Joint-Stock Company (15, Burnakovsky proyezd, Nizhny Novgorod, 603074), e-mail: v.petrinin@okbm.nnov.ru.

Bakhmetev Aleksandr Mikhailovich, Head of the Division for the Scientific Development and PSA, Afrikantov OKBM Joint-Stock Company (15, Burnakovsky proyezd, Nizhny Novgorod, 603074), e-mail: alexbakh@okbm.nnov.ru.

Kurachenkov Andrey Valentinovich, Chief Specialist for PWR Plants in the Design Layout Department for Pressurized Water Reactors and Plant Shared Equipment, Afrikantov OKBM Joint-Stock Company (15, Burnakovsky proyezd, Nizhny Novgorod, 603074), e-mail: kurachenkov_av@okbm.nnov.ru.

Galitskikh Vladimir Yur'evich, Deputy Head of the Department for PWR Neutronic, Thermal-Hydraulic Analyses and for Reactor Plant Accident Analysis, Afrikantov OKBM Joint-Stock Company (15, Burnakovsky proyezd, Nizhny Novgorod, 603074), e-mail: alex_z@okbm.nnov.ru.

Makeyev Yuriy Aleksandrovich, Chief Specialist in the Department for Systematic Developments for Reliability and Safety of Nuclear Plants, Afrikantov OKBM Joint-Stock Company (15, Burnakovsky proyezd, Nizhny Novgorod, 603074), e-mail: yamakeev@okbm.nnov.ru.

Shchekin Dmitrii Vladimirovich, Deputy Chief Designer of PWR Plants for Small-Sized NPPs, Afrikantov OKBM Joint-Stock Company (15 Burnakovsky proyezd, Nizhny Novgorod, 603074), e-mail: shchekin@okbm.nnov.ru.

Для цитирования

Петрунин В. В., Бахметьев А. М., Кураченков А. В., Галицких В. Ю., Макеев Ю. А., Щекин Д. В. Основные результаты анализа применимости стандартов МАГАТЭ к проекту реакторной установки РИТМ-200Н для атомных станций малой мощности // Ядерная и радиационная безопасность. 2024. № 3 (113). С. 14–32. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.113.3.002.

For citation

Petrinin V. V., Bakhmetev A. M., Kurachenkov A. V., Galitskikh V. Yu., Makeyev Yu. A., Shchekin D. V. Main analysis results of the IAEA standards applicability to the RITM-200N design for small nuclear power plants. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2024, No. 3 (113), pp. 14–32. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.113.3.002.

