

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ РУ РИТМ-200Н ДЛЯ АСММ

Фатеев С.А., Петрунин В.В., Щекин Д.В.
(АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, РФ)

Аннотация

Развитие атомной энергетики непосредственно связано с малой мощностью. Госкорпорация «Росатом» имеет колоссальный опыт в разработке и создании реакторов малой мощности. На сегодняшнее время перспективным направлением деятельности Госкорпорации «Росатом» является создание атомных станций малой мощности в наземном и плавучем исполнении на базе новейших реакторных установок серии РИТМ, обладающих высоким уровнем безопасности и надежности.

Реакторная установка РИТМ-200Н является модификацией судовой реакторной установки РИТМ-200 и разрабатывается для применения в составе наземной атомной станции малой мощности, предназначенной для удаленных северных регионов с неразвитой сетевой инфраструктурой и позволяющей обеспечить их энергонезависимость, стабильное электро- и теплоснабжение энергией, снижение выбросов вредных веществ в атмосферу вследствие замещения действующих источников генерации.

В докладе отражены основные результаты разработки технического проекта реакторной установки РИТМ-200Н, активной зоны кассетного типа и выполнения части научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в обоснование проекта.

Введение

Основу атомной энергетики составляют энергоблоки большой мощности, доступность которых возможна ограниченному кругу стран, связанная, прежде всего, с финансово-экономической составляющей.

Кроме того, рядом европейских стран приняты стратегии по отказу от атомной энергетики, и постепенно осуществляется вывод из эксплуатации атомных объектов.

В условиях сокращения спроса в мире на блоки большой мощности, а также опираясь на экономическую привлекательность и доступность атомной энергетики для других стран, атомное сообщество предлагает создание и реализацию нового продукта – атомные станции малой мощности (далее – АСММ). Уменьшение мощности и массогабаритных показателей открывает перспективу для использования энергоисточников такого типа в странах с ограниченными финансово-экономическими возможностями.

АСММ рассматриваются мировым сообществом в позитивном ключе вследствие применения высокоуровневой концепции безопасности: интегральная компоновка, исключающая аварии разгерметизации с «большими» течами теплоносителя первого контура, естественная циркуляция, системы безопасности пассивного и активного принципа действия, функционирующие длительный период. Концептуальные решения по безопасности, предусмотренные в АСММ, не реализованы в блоках большой мощности.

Данные МАГАТЭ о 72 проектах реакторов малой мощности [1] подтверждают убеждение о том, что в настоящее время атомные станции на базе маломощных реакторов позиционируются как перспективный класс энергоисточников для эффективного решения актуальных проблем энергообеспечения различных регионов.

Уменьшение единичной мощности в атомной энергетике обусловлено ростом удельных капитальных затрат. Руководствуясь условием обеспечения конкурентоспособности большинство разработчиков как отечественных, так и

зарубежных проектов энергоблоков малой мощности реализуют новые инновационные решения по компоновке, системам, оборудованию, размещению, автоматизации управления, позволяющие снизить удельные капитальные затраты. Подобного рода внедрения требуют немалых финансовых вложений и продолжительных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (далее – НИОКР), необходимых для подтверждения обоснования схемно-компоновочных, конструктивных и технических решений.

График зависимости удельных капитальных затрат энергоблоков от мощности реакторов построен по данным технико-экономических исследований АО «ОКБМ Африкантов», информации по проектам SMART-100 [2], NuScale Power [3]. Зависимость продемонстрирована на графике, приведенном на рис. 1.

По данным МАГАТЭ [1] в проектах станций с реакторами малой мощности предлагается использование газовых и жидкометаллических теплоносителей, применение в качестве топлива расплава урановой или ториевой соли, размещение реакторных модулей в бассейне, заглубление под землю, замена реакторного модуля на новый модуль после завершения топливной компании.

В числе зарубежных разработок в стадии наиболее близкой к реализации находятся несколько проектов: CAREM (CNEA, Argentina), ACP100 (CNNC, China), DHR400 (CNNC, China), SMART (KAERI, Republic of Korea and K.A.CARE, Saudi Arabia), NuScale (NuScale Power, LLC, United States of America).

При сравнении реакторной установки (далее – РУ) РИТМ-200Н с зарубежными проектами реакторов малой мощности (таблица) российская разработка обладает существенными преимуществами по референтности, топливу, маневренным характеристикам [4].

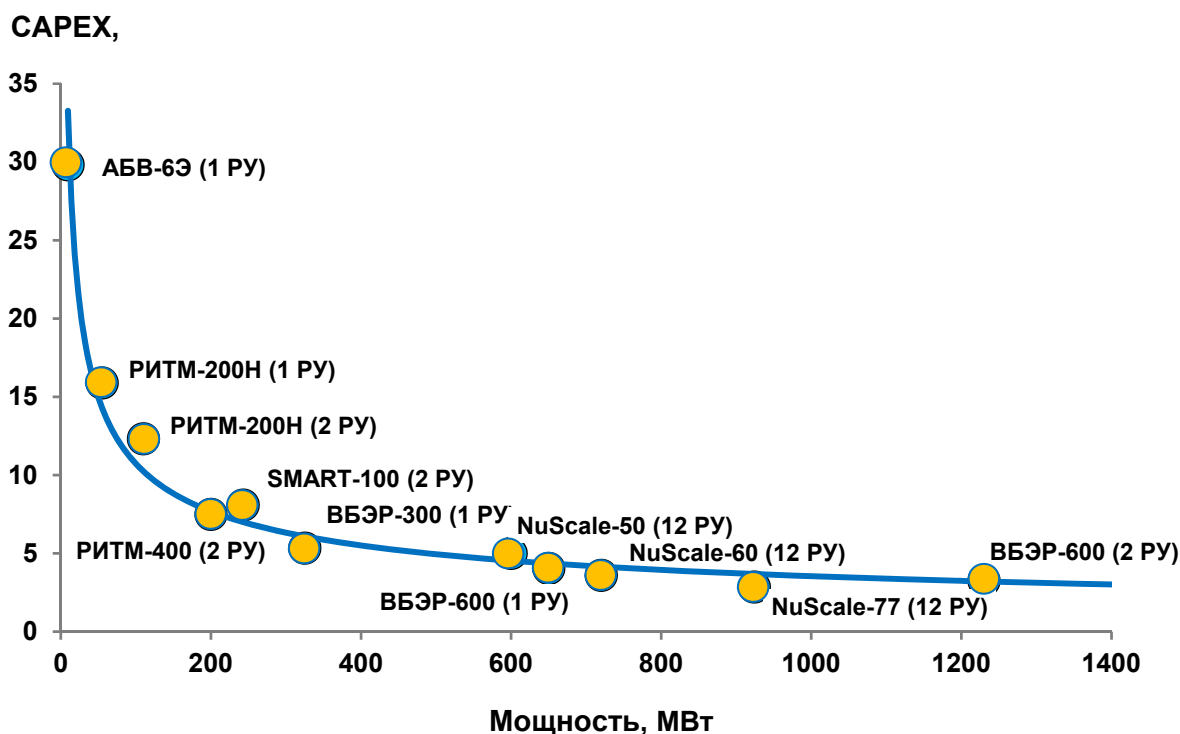


Рис. 1. График зависимости удельных капитальных затрат энергоблоков от мощности реакторов малой мощности

Сравнение РУ РИТМ-200Н с зарубежными проектами реакторов малой мощности

Критерии	РИТМ-200Н	ACP-100 (КНР)	ACPR50S (КНР)	SMART (Корея)	NuScale (США)
Тип реактора	ВВР интегрального типа	PWR интегрального типа	PWR блочного типа	PWR интегрального типа	PWR интегрального типа
Мощность, N _т /N _э , МВт	190 / 55	385 / 125	200 / 50	330 / 100	160 / 50
Стадия разработки	РКД, серийное изготовление для УАП	Basic design (технический проект)	Preliminary design	Certified (одобрен типовой проект)	Сертифицирован NRC
Референтность	Опыт эксплуатации судовых РУ	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Безопасность	Активные и пассивные системы безопасности, самосрабатывающие устройства	Пассивные системы безопасности	Пассивные системы безопасности	Активные и пассивные системы безопасности	Пассивные системы безопасности
	Время функционирования пассивных систем безопасности не менее 72 часов				
Проектный срок службы, лет	60 лет – корпус реактора; 20 лет – ПГ	60 лет – корпус реактора; ПГ – данные отсутствуют	40 лет – корпус реактора; ПГ – данные отсутствуют	60 лет – корпус реактора; 15 лет – ПГ	40 лет – корпус реактора; ПГ – данные отсутствуют
Топливо	UO ₂ в силуминовой матрице, 42ХНМ , обогащение < 20%; гексагональные ТВС 199 шт.; кампания а.з. 2000 эфф. сут. (6 лет)	UO ₂ , циркониевые сплавы, обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 57 шт.; кампания а.з. 730 эфф. сут (2 года)	UO ₂ , циркониевые сплавы, обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 57 шт.; кампания а.з. 915 эфф. сут (2,5 года)	UO ₂ , обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 57 шт.; кампания а.з. 990 эфф. сут (3 года)	UO ₂ , обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 37 шт.; кампания а.з. 730 эфф. сут (2 года)
Габариты реактора, В × Д, м	8 (без учета габаритов приводов КГ и АЗ) × 4,55	10 × 3,35	7,2 × 2,2 (реактор блока)	18,5 × 6,5	17,8 × 3,0
Маневренность	Топливо обеспечивает маневренные режимы 10–100% со скоростью 6% N_{ном}/мин.	Используемое топливо ограничивает возможности маневрирования (опыт PWR)			

Создание инновационного реактора нового типа с учетом выполнения значительного объема НИОКР в обоснование проектных решений и разработки новых сводов норм, правил и требований по безопасности предполагает срок в диапазоне 10–15 лет, в связи с чем развитие ядерной энергетики в части АСММ на ближайшие десятилетия должно базироваться на апробированных решениях известных и максимально изученных конструкций водо-водяных реакторов малой мощности, усовершенствованных с учетом накопленного опыта эксплуатации, практического опыта реализации подобных проектов и ужесточающихся требований по безопасности, тем самым руководствуясь принципом «апробированная технология»¹, регламентированным в докладе МАГАТЭ [5].

Российские технологии занимают лидирующие позиции в мире в области создания судовых ядерных энергетических установок, обладающих предельной компактностью, маневренностью, герметичностью, низким объемом радиоактивных отходов, повышенной надежностью и живучестью.

¹ Принцип: в проекте используются технологии, проверенные опытом и подтвержденные испытаниями. Внедрение новых важных проектных решений или новых типов реакторов осуществляется только после тщательных научных исследований и прототипных испытаний на уровне элементов, систем или, по возможности, станции».

Предприятием АО «ОКБМ Африкантов» создано более 460 транспортных установок с суммарным опытом эксплуатации более 10500 реакторо-лет.

Реакторы типа РИТМ-200, спроектированные АО «ОКБМ Африкантов», являются новейшей разработкой в линейке реакторов малой мощности поколения III+, обладающие наилучшими характеристиками своих предшественников и основанные на проверенной технологии и опыте эксплуатации водо-водяных реакторов (PWR) в 400 реакторо-лет в составе атомных ледоколов [4].

Четыре РУ РИТМ-200 смонтированы и эксплуатируются на атомных ледоколах проекта 22220: «Арктика», «Сибирь». Головной ледокол «Арктика» с двумя реакторами на борту передан в эксплуатацию в октябре 2020 г., первый серийный атомный ледокол «Сибирь» – в январе 2022 г. На конец 2022 г. запланирован ввод в эксплуатацию ледокола «Урал». Планируются к постройке ещё два ледокола с двумя РУ РИТМ-200: «Якутия» и «Чукотка».

Заимствование концепции и технических решений РУ РИТМ-200 является основой для разработки и создания РУ РИТМ-200Н для пилотной наземной АСММ.

В феврале 2020 г. Госкорпорацией «Росатом» принято решение о начале реализации пилотного отраслевого проекта «Сооружение атомной станции малой мощности на базе реакторной установки РИТМ-200Н на территории России». Пилотный проект подразумевает строительство АСММ с РУ РИТМ-200Н электрической мощностью 55 МВт в поселке Усть-Куйга Усть-Янского улуса Республики Саха (Якутия) со сроком ввода в промышленную эксплуатацию в 2028 г. Общий вид станции приведен на рис. 2.

Проект АСММ с РУ РИТМ-200Н включен в генеральную схему размещения объектов электроэнергетики и схему территориального планирования Российской Федерации, утвержденную Правительством РФ.

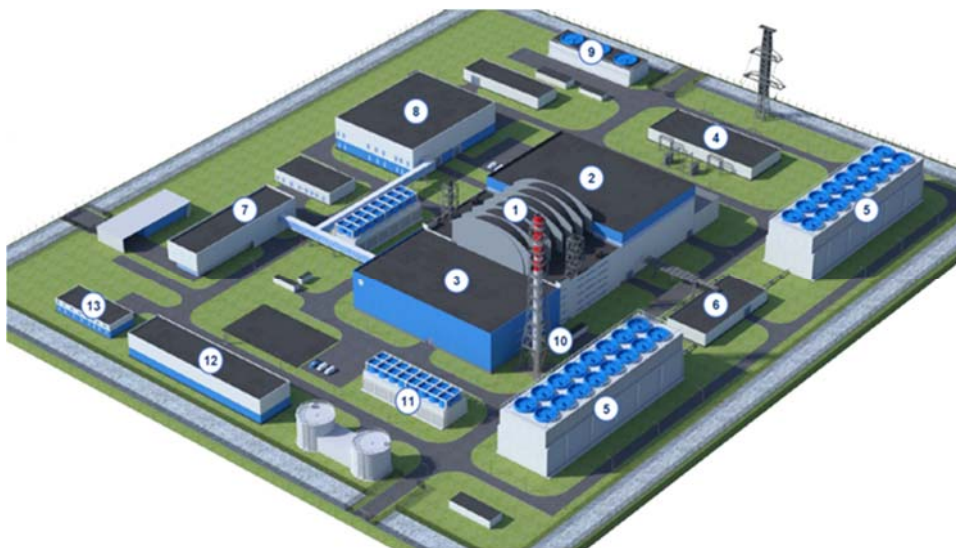


Рис. 2 Общий вид АСММ:

1 – реакторное здание, 2 – здание машинного зала, 3 – спецкорпус, 4 – ЗРУ-110 кВ, 5 – градирни, 6 – насосная станция технического водоснабжения, 7 – административный корпус, 8 – Объединенный вспомогательный корпус, 9 – пуско-резервная котельная, 10 – РДЭС, 11 – градирни ответственных потребителей, 12 – гараж спецтехники, 13 – здание охраны

Объективно существует ряд факторов, которые необходимо учитывать при разработке и эксплуатации РУ РИТМ-200Н в составе АСММ: обеспечение безопасности и экономической эффективности, нормативное сопровождение проекта, особенности эксплуатации и т.п.

В условиях динамично развивающегося энергетического рынка возникает необходимость непрерывно и итеративно совершенствовать проектные решения в ответ на изменение рыночной конъюнктуры и требований заказчиков.

В РУ РИТМ-200Н реализуется ряд инновационных технических решений и выполняется комплекс НИОКР, направленных на повышение безопасности и улучшение технико-экономических показателей АСММ в целом:

- применение металлокерамического топлива с увеличенным энергоресурсом с 4,5 до 8 ТВт·ч;
- увеличение срока службы незаменимого оборудования РУ с 40 до 60 лет;
- создание комплекса систем безопасности, функционирующего на пассивных принципах действия и обеспечивающего безопасное состояние РУ в течение не менее 72 ч при полном длительном обесточивании, включая аварии типа LOCA (loss of coolant accident).

Выполняются НИОКР по обоснованию безопасности РУ РИТМ-200Н в постулированных тяжелых авариях: разработка тяжелоаварийного расчетного кода, разработка и верификация программ, проведение экспериментальных исследований и создание базы данных по поведению топлива в режимах, имитирующих тяжёлую аварию, обоснование водородной взрывобезопасности.

Наряду с опытно-конструкторскими работами применяются технологии численных экспериментов по исследованию и обоснованию технических характеристик установки и разрабатывается «цифровой двойник» АСММ.

Комплекс НИОКР включает в себя проведение испытаний крупномасштабных моделей системы пассивного отвода тепла от первого контура на экспериментальной площадке АО «ОКБМ Африкантов».

Краткое описание реакторной установки РИТМ-200Н

Схемно-конструктивные и компоновочные решения, принятые в РУ РИТМ-200Н, максимально унифицированы с ключевыми техническими решениями РУ РИТМ-200 для УАЛ и РУ РИТМ-200С для модернизированных плавучих энергоблоков [6].

Основным элементом РУ является интегральный реактор. Конструкция интегрального реактора приведена на рис. 3.

Активная зона имеет энергоресурс 8 ТВт·ч, обеспечивая непрерывную работу на протяжении 6 лет при коэффициенте использования установленной мощности, равном 0,8 (при максимальном коэффициенте использования установленной мощности, равном 0,9, интервал между перегрузками уменьшается до 5 лет).

В РУ РИТМ-200Н исключена опасность возникновения паро-циркониевой 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 модификации А. Данный конструкционный материал обеспечивает несущую способность и целостность корпуса реактора в течение назначенного ресурса и назначенного срока службы – 60 лет.

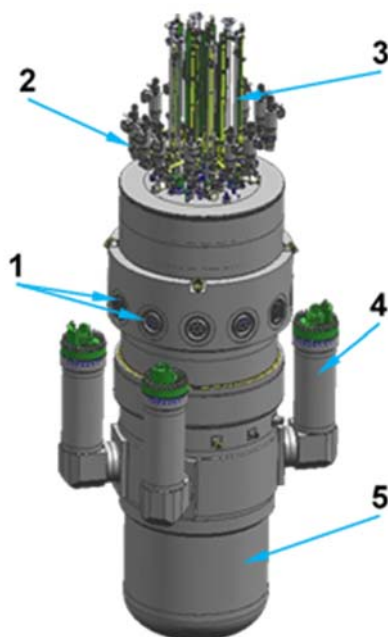


Рис. 3. Интегральный реактор РИТМ-200Н:

*1 – патрубki кассет парогенератора, 2 – привод компенсирующей группы,
3 – привод аварийной защиты, 4 – главный циркуляционный насос с гидрокамерой,
5 – корпус интегрального реактора*

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 объединяются путем сварки между собой короткими силовыми патрубками, выполненными по типу «труба в трубе». В корпусе реактора размещены активная зона, парогенераторы 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.

В гидрокамеры устанавливаются лопастные, одноступенчатые, вертикального исполнения главные циркуляционные насосы с клапанными коробками, в конструкции которых предусмотрены колесо осевого типа и герметичный асинхронный электродвигатель с сухим экранированным статором. Максимально реализованы технические решения, широко используемые в конструкциях электронасосов-прототипов, длительно эксплуатирующихся на действующих судовых установках.

В корпусе интегрального реактора размещаются четыре парогенератора. Каждый парогенератор состоит из трех кассет, объединенных между собой по питательной воде и пару. Кассета парогенератора в сборе представляет собой прямоточный, вертикальный, прямотрубный теплообменник поверхностного типа. Конструкция кассеты разработана на основе решений, работоспособность которых подтверждена значительным объемом выполненных НИОКР, а также опытом эксплуатации аналогичных изделий.

В корпусе реактора размещены комплекты образцов-свидетелей для обеспечения эксплуатационного контроля металла.

Применение интегральной компоновки в реакторах типа РИТМ и остальных перспективных разработках является результатом эволюции проектов РУ АО «ОКБМ Африкантов», опыта их эксплуатации и оптимизации технических решений.

Эволюция РУ демонстрируется на примере выбора компоновочных решений установок для атомных ледоколов: в ходе развития реакторных технологий были применены три типа компоновочных схем установок: петлевая, блочная, интегральная. Компоновочная схема РУ имеет принципиальное значение для определения способов и средств обеспечения безопасности, строительных решений, условий эксплуатации и в конечном итоге экономических показателей (рис. 4) [7-9].

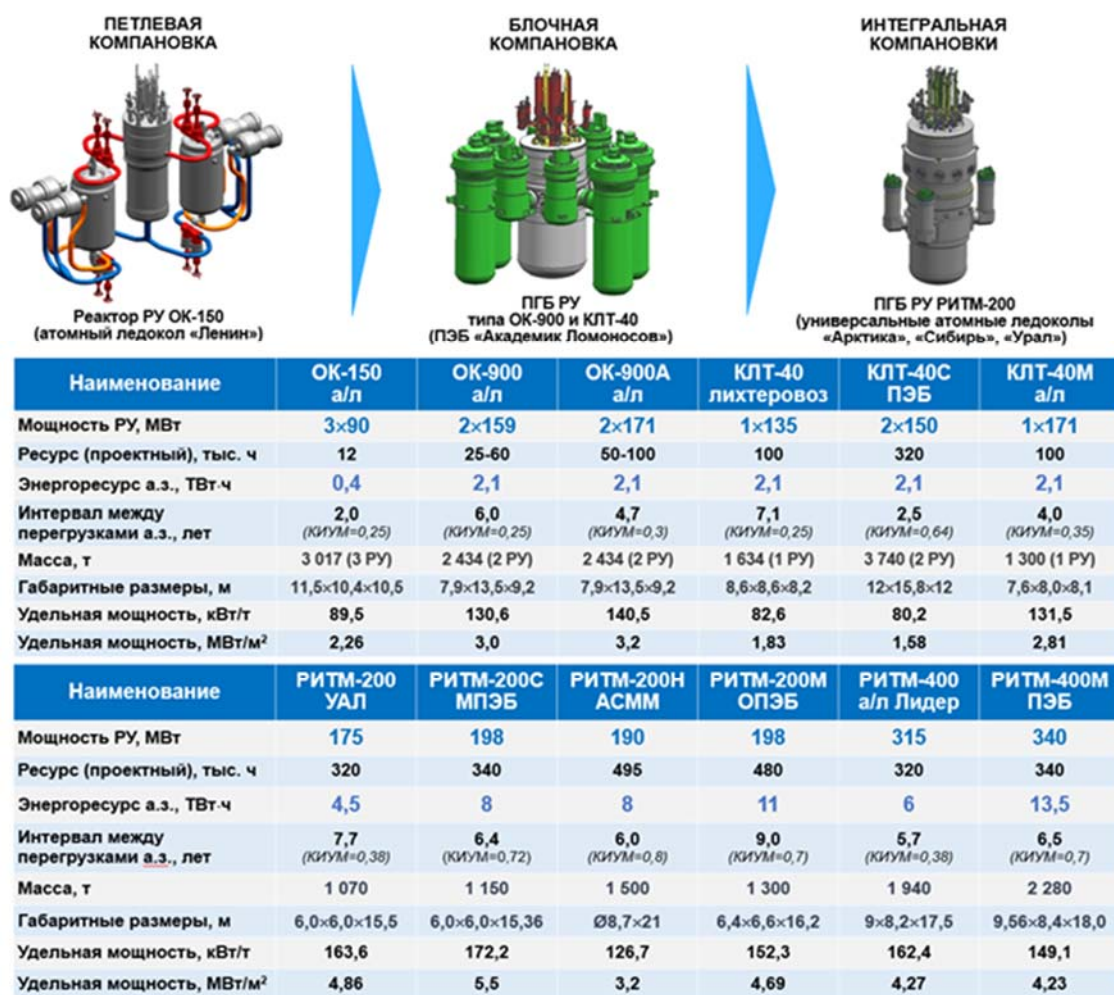


Рис. 4. Технологическая эволюция РУ (разработки АО «ОКБМ Африкантов»)

Очевидным преимуществом интегральной компоновки является локализация теплоносителя первого контура в одном объеме (в корпусе) и отсутствие патрубков и трубопроводов большого диаметра, уменьшающее вероятность аварии с большой течью теплоносителя.

Однако, в реакторе затруднен доступ для выполнения планового технического обслуживания и ремонта оборудования вследствие его затесненного размещения в корпусе, по этой причине в интегральной компоновке применяется высоконадежное оборудование, созданное на основе технических решений, подтвержденных длительной эксплуатацией.

Достигнутые показатели прогресса реакторных технологий от блочной РУ КЛТ-40С, смонтированной и эксплуатирующейся на плавучем энергоблоке «Академик Ломоносов», к интегральной РУ РИТМ-200 для универсальных атомных ледоколов приведены на рис. 5.



Рис. 5. Прогресс реакторных технологий: от блочной РУ КЛТ-40С к интегральной РУ РИТМ-200

В первом контуре предусмотрена газовая (азотная) система компенсации давления, основным оборудованием которой являются компенсатор давления, гидроаккумулятор, и система очистки и расхолаживания, обеспечивающая охлаждение теплоносителя через теплообменник системы, поступающего на очистку, и подогрев теплоносителя, возвращаемого в реактор после очистки, а также его охлаждение при нормальном и аварийном расхолаживаниях РУ.

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 высокоэффективной системы компенсации реактивности в проекте активной зоны РУ РИТМ-200Н исключает борное регулирование. Возможности реализации режимов маневрирования в соответствии с требованиями локальных энергосетей обусловлены применением металлокерамического топлива, наличием прямоточного парогенератора с перегревом пара. Во втором контуре предлагается к использованию бескоррекционный нейтральный водно-химический режим, характеризующийся отсутствием подпитки химическими добавками.

Технические характеристики РУ РИТМ-200Н

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 ТВС, 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	3250
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

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. 6).

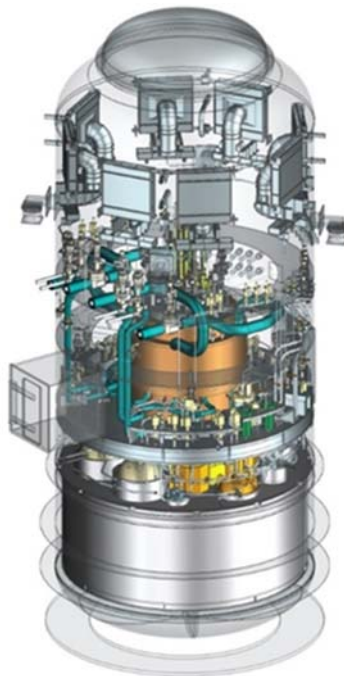


Рис. 6. РУ РИТМ-200Н в стальной защитной оболочке

Стальная защитная оболочка имеет эллиптическое днище и крышку, согласно проектным данным, обеспечивает прочность в условиях запроектной аварии при давлении 0,9 МПа и расхолаживание РУ в запроектных авариях типа LOCA (разрыве трубопровода первого контура с дополнительным наложением полного обесточивания продолжительностью не менее 72 часов) совместно с системой пассивного отвода тепла.

Повышенные показатели безопасности достигаются сочетанием реализации глубокоэшелонированной защиты, свойств внутренней самозащищенности и сбалансированным применением активных и пассивных систем безопасности. Данный подход исключает максимально возможное количество рисков, уменьшает вероятность тяжелой аварии и минимизирует последствия в случае её возникновения.

При разработке систем руководствуются необходимостью обеспечения увеличенного периода автономной работы в случае аварии с потерей теплоносителя в условиях обесточивания атомной станции.

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 сохраняют способность выполнять функции, связанные с обеспечением безопасности РУ. Все оборудование РУ рассчитано с учетом модели эксплуатации энергоблока, работающего в локальной энергосистеме малой мощности.

Совершенствование топлива для АСММ

Для проекта АСММ выполняется опытно-конструкторская работа по кассетной активной зоне РУ, удовлетворяющей требованиям нераспространения с ураноемким металлокерамическим топливом.

Кассетная структура активной зоны способствует повышению ураноемкости благодаря более эффективному использованию объема для размещения ТВЭЛов в обеспечение увеличения энергоресурса при сравнении с канальными зонами.

При разработке активной зоны для РУ РИТМ-200Н учитывается максимальное заимствование технических решений, принятых для активной зоны РУ РИТМ-200 универсальных атомных ледоколов.

Основным отличием активной зоны РУ РИТМ-200Н от активной зоны РУ РИТМ-200 является необходимость обеспечить максимально возможный энергоресурс в заданных габаритах и максимально увеличенный интервал между перегрузками при безусловном выполнении требований по нераспространению, потребовавшая увеличения до 1650 мм высоты активной части. Общий вид и поперечное сечение штатной ТВС активной зоны реактора РИТМ-200Н показаны на рис. 7 [10].

Исследования по активным зонам проводятся в области увеличения энергоресурса до 8–11 ТВт·ч, совершенствования топливной композиции и материалов оболочек ТВЭЛов, элементной базы активной зоны (ТВЭЛы, стержни выгорающего поглотителя, поглощающие элементы и стержни аварийной защиты) с выполнением необходимого комплекса НИОКР и верификацией, аттестацией кодов нейтронно-физических расчетов и теплогидравлических кодов (рис. 8).

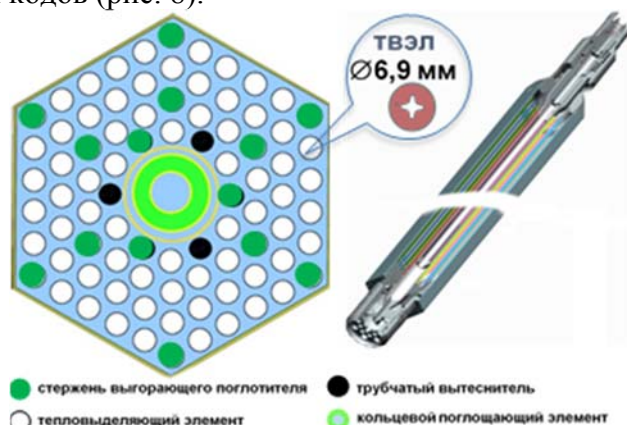


Рис. 7. Общий вид и поперечное сечение штатной ТВС активной зоны реактора РИТМ-200Н



Рис. 8. Характеристики активных зон УАЛ, ПЭБ «Академик Ломоносов», АСММ и ОПЭБ

Для оболочек твэлов активной зоны РУ РИТМ-200Н применен коррозионностойкий сплав 42ХНМ. Сплав прошел обширный комплекс испытаний и зарекомендовал себя успешной эксплуатацией активных зон 14–15-1 на универсальных атомных ледоколах.

Основой для обоснования применения металлокерамического топлива в активной зоне РУ РИТМ-200Н являются результаты испытаний и послереакторных исследований тепловыделяющих сборок в реакторе МИР до выгорания $1,05 \text{ г/см}^3$.

Комплекс ОКР предусматривает разработку технического проекта кассетной активной зоны и её составных элементов с проведением необходимого комплекса опытно-конструкторских, расчетно-аналитических, технологических работ и испытаний.

В выполнении опытно-конструкторской работы по разработке активной зоны для РУ РИТМ-200Н принимают участие АО «ОКБМ Африкантов» (главный конструктор РУ и активной зоны), АО «ВНИИНМ», АО «МСЗ», АО «ГНЦ НИИАР» и другие предприятия.

На сегодняшнее время АО «ОКБМ Африкантов» и предприятиями-участниками опытно-конструкторской работы выполнены:

- разработка технических проектов пускового источника нейтронов, стержня аварийной защиты, стержня выгорающего поглотителя, поглощающего элемента, твэлов (АО «ВНИИНМ»);
- разработка технического проекта тепловыделяющей сборки (АО «ОКБМ Африкантов»);
- отработка технологии изготовления и контроля длинномерных твэл, стержней выгорающего поглотителя и изготовлению двух макетных и одной опытной тепловыделяющей сборки (АО «МСЗ»);
- ресурсно-гидравлические испытания макета тепловыделяющей сборки для подтверждения её работоспособности при гидродинамическом воздействии теплоносителя штатных параметров и определения гидравлических характеристик и теплофизические исследования на модели пучка элементов с целью исследования кризиса теплообмена с поверхности твэлов в тепловыделяющей сборке (АО «ОКБМ Африкантов»);
- комплексно-механические испытания макета тепловыделяющей сборки на сейсмостойкость, ударостойкость, проверку самохода поглощающих элементов, механические испытания макета тепловыделяющей сборки для изучения изгибных и виброударных характеристик, реакторно-механические испытания макетов и опытной тепловыделяющей сборки в составе критстенда (АО «ОКБМ Африкантов»);
- послереакторные исследования твэл из петлевой ТВС-31М с металлокерамическим топливом, подтвердившие достижение глубины выгорания топлива $\sim 1,05 \text{ г/см}^3$ (АО «ГНЦ НИИАР»);
- разработка верификационного отчета для аттестации кодов нейтронно-физических расчетов и теплогидравлических кодов для удлиненной активной зоны по сравнению с аналогами.

Выполненные работы подтвердили возможность реализации проектных требований к активной зоне реактора РИТМ-200Н.

При определении закризисного резерва по мощности до допустимой температуры оболочки ТВЭЛ выполнены расчеты с использованием CFD-кода STAR-CCM+. По результатам неравномерного охлаждения оболочки ТВЭЛ на одной четверти его поверхности критический тепловой поток выше. Расчеты проведены для натурной сборки и экспериментальной модели. В условиях натурной сборки резерв по мощности в допустимой области закризисного режима теплоотдачи (температура оболочки до 400 °С) возрастает по сравнению с экспериментальными данными с 2 % до 10 % и 6 % для свежего и выгоревшего топлива соответственно [11].

В настоящее время АО «ОКБМ Африкантов» завершает разработку технического проекта активной зоны.

Обоснование увеличения ресурсных характеристик основного оборудования

На сегодняшнее время проектный срок службы РУ универсальных атомных ледоколов составляет 40 лет. Увеличение срока службы незаменимого оборудования до 60 лет позволяет существенно улучшить экономические показатели энергоблока АСММ.

НИОКР в рамках обоснования повышения назначенных ресурсных характеристик основного оборудования РУ РИТМ-200Н предусматривает последующее применение в проектах АСММ для размещения на площадках с широким диапазоном природно-климатических условий в расчёте на весь спектр внутренних экстремальных и внешних техногенных воздействий, характерных для всех потенциальных площадок сооружения.

Ресурсные характеристики оборудования обосновываются с учетом применения полученных результатов НИОКР в последующих проектах, позволяющих не вносить изменения в основные концептуальные, конструктивные и компоновочные решения.

В рамках НИОКР выполнены:

- разработка цифровых двойников системы компенсации давления первого контура РУ, приводов компенсирующей группы, аварийной защиты и блоков биологической защиты;
- проведены численные эксперименты по определению температурного состояния и напряженно-деформированного состояния с целью подтверждения ресурсных характеристик системы компенсации давления для условий эксплуатации АСММ и назначенного срока службы, составляющего 60 лет;
- проведены численные эксперименты в обеспечение сейсмостойкости приводов компенсирующей группы и аварийной защиты при назначенном сроке службы в 30 лет;
- проведение численных экспериментов в обеспечение прочности и сейсмостойкости блоков биологической защиты при назначенном сроке службы в 60 лет.

Методология численного эксперимента подразумевает решение связанных задач на основе численного моделирования процессов теплогидравлики, тепломассопереноса, кинетики напряженно-деформированного состояния и накопления повреждений. При моделировании используются суперкомпьютерные технологии и современные вычислительные программы трехмерного теплогидравлического расчета, расчета напряженно-деформированного состояния и ресурсных характеристик, прошедших экспериментальное подтверждение [11].

Основные этапы расчетного исследования и визуализированные результаты численного эксперимента на примере биологической защиты реактора представлены на рис. 9 и 10.

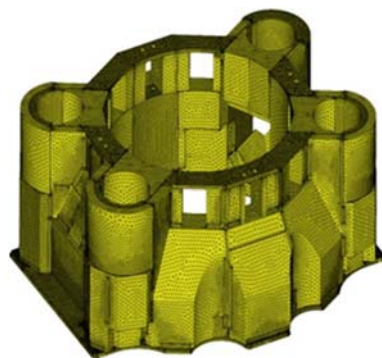


Рис. 9. Цифровая конечно-элементная модель блоков биологической защиты

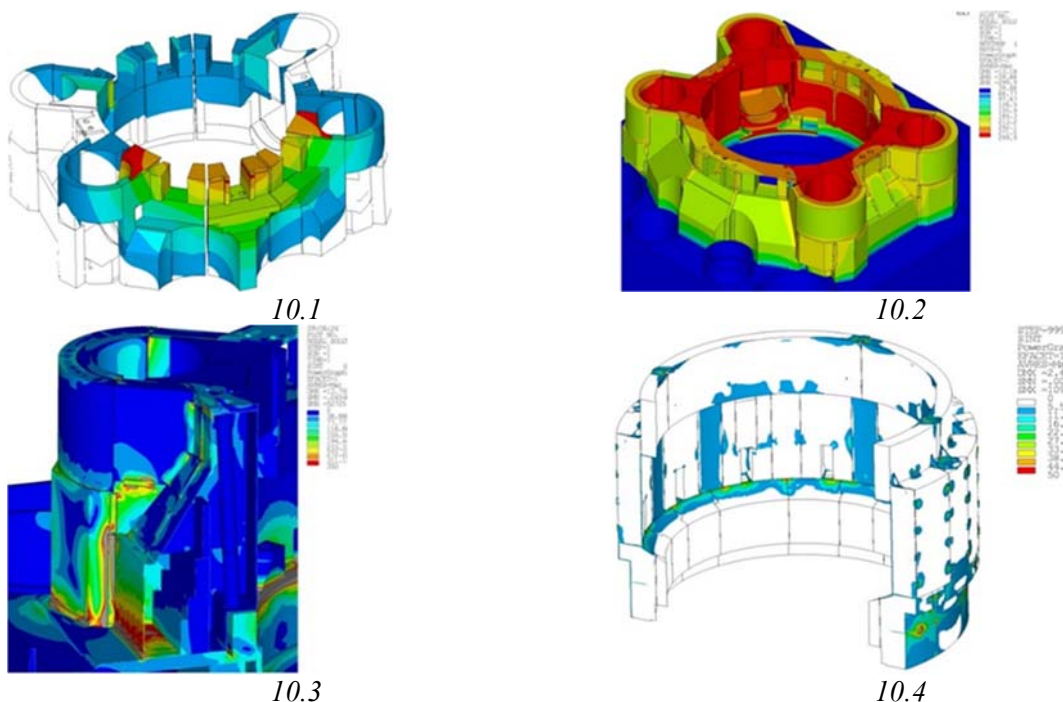


Рис. 10. Результаты численных экспериментов:

10.1 – определение собственных частот колебаний блоков биологической защиты;

10.2 – определение температурного состояния блоков биологической защиты;

10.3 – определение напряженно-деформированного состояния блоков биологической защиты;

10.4 – анализ сейсмостойкости блоков биологической защиты

Данный подход позволяет максимально снизить консерватизм, заложенный при определении ресурсных характеристик оборудования РУ РИТМ-200, за счет адекватного моделирования основных физических закономерностей, нелинейных процессов накопления повреждений в конструкционных материалах при эксплуатационных воздействиях как внутреннего, так и внешнего характера.

Расчетные исследования, выполненные в рамках НИОКР, позволили обосновать увеличение назначенных ресурсных характеристик основного оборудования РУ РИТМ-200Н.

Расчетно-экспериментальное обоснование комплекса систем безопасности

Руководствуясь принципами повышения уровня безопасности современных реакторов и размещения энергоблоков АСММ вблизи потребителей, к РУ РИТМ-200Н

предъявляются более «жесткие» по сравнению с современными ВВЭР проектные пределы безопасной эксплуатации.

Цель НИОКР – выполнить обоснование комплекса систем безопасности, функционирование которого основано на пассивных принципах действия, с реализацией в проекте следующих требований:

- обеспечение высокого уровня ядерной безопасности АСММ при авариях с полным обесточиванием, включая аварии типа LOCA;
- сохранение работоспособности АСММ без ограничений по длительности работы и без необходимости вмешательства персонала при полном обесточивании;
- исключение тяжелой аварии с наложением полного обесточивания продолжительностью не менее 72 часов;
- Комплексно подобными свойствами в настоящее время не обладает ни одна из существующих систем, используемых в ядерной энергетике.

В основу технического решения комплекса систем безопасности заложены технологические и функциональные объединения и взаимодействие:

- системы пассивного отвода тепла с использованием запаса выпариваемой воды и воздушных теплообменников;
- стальной защитной оболочки РУ, рассчитанной на внутреннее избыточное давление 0,9 МПа при запроектных авариях, обеспечивающей высокую эффективность системы пассивного отвода тепла при авариях типа LOCA и длительное поддержание активной зоны под уровнем теплоносителя;
- пассивного аварийного охлаждения активной зоны за счет подачи воды из гидроаккумуляторов, входящих в состав системы компенсации давления.

Исследования выполняются на двух стендах: на стенде системы аварийного расхолаживания (далее – САР) и на стенде системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки (далее – СПОТ ЗО), расположенных на экспериментальных площадках АО «ОКБМ Африкантов».

Основной задачей испытаний является исследование работы системы в условиях аварии с потерей теплоносителя первого контура (отравление теплообменной поверхности ПГ неконденсирующимися газами) и отработка решений по противодействию накопления водорода (в качестве имитатора используется гелий) для обеспечения водородной безопасности.

Результаты экспериментов на стендах САР и СПОТ ЗО с использованием крупномасштабных полноразмерных моделей будут применены для доработки и верификации кодов, предназначенных для отработки проектных решений и обоснования безопасности АСММ: кодов улучшенной оценки КУПОЛ-МТ и КОРСАР/BR, инженерного кода УРОВЕНЬ-4 и CFD-кода ЛОГОС.

Все претестовые расчеты, выполненные в период 2019–2021 гг. с учетом неопределенности исходных данных, показывают эффективность принятых решений системы пассивного отвода тепла для обеспечения требуемого уровня безопасности АСММ. На базе расчетного планирования экспериментов разработаны программы и методики испытаний моделей на стендах. Проведен монтаж стенда СПОТ ЗО, завершены пуско-наладочные работы, начаты испытания в соответствии с утвержденной программой. Осуществляется монтаж стенда САР.

Схемы стендов САР и СПОТ ЗО приведены на рис. 11 и 12.

Целью проведения НИОКР на стендах является создание новой инновационной системы аварийного расхолаживания, обеспечивающей эффективность и надежность в условиях проектных и запроектных аварий, отработка технических решений.

На стенде инновационной САР проводятся и выполняются следующие работы:

- исследование работоспособности системы в условиях аварии с потерей теплоносителя первого контура (отравление теплообменной поверхности ПГ неконденсирующимися газами);
- исследование устойчивости и эффективности работы САР при различном давлении в промежуточном контуре и низких балансных паросодержаниях (менее 0,2);
- отработка конструкции емкости сепаратора;
- испытания воздушного теплообменника в режиме горячего резерва;
- испытания работы системы при различной конфигурации работающего оборудования;
- верификация программ для ЭВМ.

Заключение

Судовые водо-водяные реакторы под давлением, разработанные АО «ОКБМ Африкантов», наряду с энергетическими реакторами типа ВВЭР-PWR являются наиболее освоенной реакторной технологией, подтвержденной успешным опытом эксплуатации.

В проекте инновационной РУ РИТМ-200Н для наземной АСММ реализуется уникальный научно-технический и производственный потенциал ядерных судовых технологий для решения задачи создания атомных энергоисточников малой мощности для внутреннего и внешнего рынка с небольшими сроками реализации и привлекательными технико-экономическими показателями.

По результатам разработки технического проекта РУ РИТМ-200Н и активной зоны подтверждены заявленные уникальные характеристики и возможность адаптации судовой РУ РИТМ-200 к использованию в составе наземной АСММ:

- увеличен срок службы незаменимого оборудования с 40 до 60 лет;
- увеличена тепловая мощность реактора со 175 до 190 МВт;
- повышена паропроизводительность РУ с 250 до 305 т/ч;
- увеличен энергоресурс активной зоны с 4,5 до 8 ТВт·ч;
- оптимизированы системы безопасности и получены технические характеристики комплекса систем безопасности, обеспечивающего высокий уровень ядерной безопасности АСММ в случае возникновения аварии с полным обесточиванием, включая аварии типа LOCA, сохранение непрерывной работы РУ при обесточивании и без необходимости вмешательства персонала станции, исключение тяжелой аварии с наложением полного обесточивания продолжительностью не менее 72 часов.

Научно-технический потенциал и имеющийся задел по проекту РУ РИТМ-200Н позволяет на базе унифицированных проектов РУ и энергоблоков создавать атомные станции для покрытия энергодефицита регионов России и зарубежа. В условиях меняющегося и динамично развивающегося энергетического рынка проект предусматривает оперативную адаптацию под изменение рыночной конъюнктуры и требований заказчиков.

Список литературы

1. Advances in small modular reactor technology development. 2020 Edition. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS).
2. SMART100 for the Czech Republic, 2016.
3. URL: www.powermag.com/commercial-nuscale-smr-in-sight-as-uamps-secures-1-4b-for-plant.

4. Реакторные установки для атомных станций малой мощности. /Петрунин В.В. //В сборнике: Академия наук и атомная отрасль. Научные сессии Общего собрания членов РАН и Общих собраний отделений РАН. Декабрь 2020 г. Москва, 2021. С. 213–231.
5. Основные принципы безопасности атомных электростанций, 75-INSAG-3 Rev.1, INSAG-12. Доклад международной консультативной группы по ядерной безопасности, МАГАТЭ, Вена, 2015/
6. Scientific-Technical and Economic Aspects for Development of Innovative Reactor Plants for Small and Medium Nuclear Power Plants. /S.M. Dmitriev, A.V. Kurachenkov and V.V. Petrunin. //Journal of Physics: Conference Series, Volume 1683, pap. 042032. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/4/042032.
7. Проекты атомных станций малой и средней мощности, направления их технико-экономической оптимизации / В.В. Петрунин, Ю.П. Фадеев, Л.В. Гуреева, С.Е. Скородумов// Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики/под редакцией академика РАН А.А. Саркисова. – М: Наука, 2011. – С. 182–186.
8. Перспективы развития атомных станций с реакторами малой и средней мощности / В.В. Петрунин, Л.В. Гуреева, Ю.П. Фадеев, И.В. Шмелев, А.Н. Лепехин, С.В. Удалищев// Атомные станции малой мощности: новое направление развития науки/ Том 2/ под редакцией академика РАН А.А. Саркисова. – М: Академ-Принт, 2015. – С. 36–49.
9. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2018 Edition.
10. Верификация и использование CFD кодов при анализе гидродинамики и тепломассообмена в активных зонах водо-водяных реакторов/ А.А. Фальков, М.А. Большухин, А.С. Носков, В.Е. Лукьянов, А.С. Савиновский // Доклад на Всероссийской конференции «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар», 29–31 августа, 2022.
11. Методические вопросы и некоторые результаты экспериментальных и расчетных исследований критических тепловых потоков в ТВС реактора РИТМ-200 для АСММ / А.А. Захарычев, Г.Ш. Иксанова, А.В. Куприянов, А.Б. Осин, В.В. Петрунин, О.Б. Самойлов, Д.Л. Шипов // Атомная энергия. 2020. Т. 130. № 2. С. 63–68.
12. Подходы к созданию и применение суперкомпьютерного двойника ЯЭУ / М.А. Большухин, В.А. Болнов, А.В. Будников, М.Н. Ереев, М.В. Зотова, И.С. Зотов, А.Н. Лепехин, В.А. Панов, В.В. Петрунин, С.А. Рогожкин, Р.И. Романов, В.И. Фомичев //Атомная энергия. 2020. Т. 129. № 2. С. 83–87.
13. Доклад «Обликовый проект атомной станции малой мощности с реакторной установкой РИТМ-200»/ Полуничев В.И.// Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ, 2–5 октября, 2018 г.).