

Проектные решения реакторной установки РИТМ-200, предназначенные обеспечить экологически безопасную и экономически эффективную эксплуатацию универсального атомного ледокола на арктических трассах

К. Ю. Князевский¹

ФГУП «Атомфлот», Санкт-Петербург

Ю. П. Фадеев², А. Н. Пахомов³, В. И. Полуничев⁴, К. Б. Вешняков⁵, С. В. Кабин⁶

ОАО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

Приведены основные технические решения, заложенные в проект реакторной установки РИТМ-200 для универсального атомного ледокола, способные обеспечить повышенные технико-экономические показатели по сравнению с действующими ледоколами. В реакторной установке предусматриваются парогенерирующий блок интегрального типа, высокоэффективные парогенераторы, циркуляционные насосы первого контура с регулируемой частотой вращения, оптимизированные параметры теплоносителя первого контура. Заданный высокий уровень безопасности базируется на широком внедрении пассивных систем, безотходной технологии, использовании оборудования с унифицированной элементной базой.

Ключевые слова: универсальный атомный ледокол, реакторная установка, парогенерирующий блок интегрального типа, повышенные технико-экономические показатели, радиационная и экологическая безопасность.

Основные предпосылки создания реакторной установки РИТМ-200

В России успешно эксплуатируется атомный ледокольный флот, обеспечивающий стабильное функционирование арктической транспортной системы. В его состав входят однореакторные ледоколы с ограниченной осадкой, способные работать на мелководье и в устьях рек, и двухреакторные линейные ледоколы. В качестве энергоисточников используются реакторные установки (РУ) типа ОК-900А, которые эксплуатируются более 40 лет. Практика подтвердила высокую надежность этих реакторных установок. Наибольшей наработки достигли РУ атомного ледокола

«Арктика» — свыше 175 тыс. ч, срок службы — 34 года. При этом большинство РУ действующих атомных ледоколов эксплуатируется в рамках поэтапно продляемого ресурса в связи с исчерпанием первоначально назначенных ресурсных характеристик.

Для их замены в настоящее время ведется строительство атомного ледокола нового поколения с более высокими технико-экономическими показателями, что будет достигнуто в первую очередь за счет повышения интенсивности его эксплуатации. Для достижения этой цели ледокол строится универсальным (двухосадочным), способным выполнять функции ледокола с ограниченной осадкой типа «Таймыр» и линейного ледокола типа «Арктика» (рис. 1) при максимальной мощности на винтах 60 МВт.

За счет деления трассы на глубоководные участки и участки мелководья, необходимости обмена караванами время пребывания ледоколов в Арктике в режиме дежурства и ожидания подхода судов к местам формирования и обмена караванами варьируется в весьма широких пределах и может составлять

¹ e-mail: knyazevsriyky@rosatomflot.ru.

² e-mail: fadeev@okbm.nnov.ru.

³ e-mail: dep59@okbm.nnov.ru.

⁴ e-mail: dep59@okbm.nnov.ru.

⁵ e-mail: dep59@okbm.nnov.ru.

⁶ e-mail: dep59@okbm.nnov.ru.

от 60% до 20%. Использование этого времени для выполнения других работ по существу нерационально ввиду значительных затрат времени на автономные переходы ледоколов к местам выполнения таких работ, находящихся на удалении от нескольких сотен до тысячи миль (Обская губа, западное побережье Ямала, Варандей, Белое море). В таких условиях очень привлекательной выглядит концепция двухосадочного ледокола, способного при достаточно оперативном изменении осадки обеспечить ледокольное сопровождение на всех участках трассы без необходимости передачи каравана. Согласно оценкам один двухосадочный ледокол, работая на Дудинском или Обском направлении, способен заменить два ледокола (типа «Арктика» и типа «Таймыр») при более полном и рациональном использовании эксплуатационного периода пребывания в Арктике. Этот фактор будет также способствовать снижению в 1,5—1,8 раза затрат на ледокольную проводку судов и удешевлению стоимости перевозок в целом.

С учетом перспектив освоения месторождений углеводородов на арктическом шельфе с участием атомных ледоколов необходимость строительства универсального двухосадочного атомного ледокола становится еще более очевидной.

Исключительное значение имеет способность двухосадочного ледокола проводить аварийно-спасательные операции с судами на потенциально опасных глубинах менее 15—10 м. Очевидно, что глубоководный ледокол в отличие от двухосадочного не сможет проводить такие операции с судами, опасно дрейфующими или севшими на мель. Ожидание подхода мелководного ледокола в таких случаях может иметь катастрофические последствия.

Все перечисленное создаст условия для более интенсивного использования универсального ледокола с уменьшением



а



б

Рис. 1. Линейный ледокол «Арктика» (а) и ледокол с ограниченной осадкой «Таймыр» (б)

простоев и холостых переходов, что позволит получить положительный экономический эффект.

Были сформулированы технические требования к новой реакторной установке с жесткими ограничениями по массогабаритным характеристикам.

Заявленные высокие потребительские качества универсального атомного ледокола потребовали создания новой ядерной энергетической установки (ЯЭУ). ЯЭУ универсального ледокола будет иметь в своем составе две РУ с водо-водяными реакторами интегрального типа. Выработка пара предусматривается по двухконтурной схеме путем передачи тепла в парогенераторах (ПГ) от теплоносителя первого контура питательной воде и пару второго контура.

В ходе проектирования РУ применен комплексный подход при выборе основных параметров первого контура, его оборудования и компоновки, состава и параметров систем, реализующих принципы обеспечения безопасности проектными средствами. Широко использовались унифицированная элементная база и апробированные технологии с учетом их совершенствования.

Чтобы обеспечить облик реакторной установки с перспективой на первую половину XXI в., в РУ нового поколения учтены результаты эксплуатации и использованы прогрессивные решения, накопленные за полувековой период работы атомного флота.

Разработанная атомная энергетическая установка способна обеспечить более экономичную эксплуатацию нового атомного ледокола по сравнению с действующими при повышенной надежности и безопасности.

В качестве основных направлений совершенствования РУ, которые позволяют снизить капитальные и эксплуатационные затраты, предусмотрены:

- уменьшение состава оборудования и его массогабаритных характеристик;
- повышение маневренности;
- увеличение ресурса оборудования;
- снижение собственного энергопотребления.

В частности, количество циклов изменения мощности РУ, допускаемое по модели эксплуатации, значительно увеличено по сравнению с принятым для РУ действующих ледоколов и сопоставимо с количеством циклов изменения мощности паротурбинной установки (ПТУ). Это позволит исключить или существенно снизить необходимость травления пара при работе ледокола с глубокими маневрами мощности, т. е. реализовать принцип «турбина ведет реактор», что обеспечивает более экономное расходование энергозапаса активной зоны с соответствующим снижением эксплуатационных затрат.

Повышение ресурсных характеристик оборудования РУ позволит обеспечить более интенсивную эксплуатацию ледокола за счет уменьшения простоев на техобслуживание и ремонт, а также сократить расходы на приобретение оборудования для замены при ремонте.

Основные технические характеристики РУ приведены в табл. 1.

На основе эволюционного совершенствования отечественных аналогов и всестороннего анализа различных вариантов систем и оборудования, с учетом мировых тенденций развития атомной энергетики в проекте было принято интегральное исполнение парогенерирующего блока (ПГБ) как более безопасного и в большей степени отвечающего современным требованиям. Основной циркуляционный тракт теплоносителя первого контура с активной зоной и парогенераторами размещен в интегрированном корпусе. Такое конструктивное исполнение позволяет уменьшить количество корпусов оборудования, находящихся под давлением первого контура, а также исключить замыкающие сварные швы между ними, в результате чего повышается технологичность корпуса, сокращаются сроки и стоимость его изготовления. Также существенно уменьшено гидравлическое сопротивление контура циркуляции, что позволило снизить мощность циркуляционного насоса первого контура (ЦНПК) и обеспечить высокий уровень естественной циркуляции. Интегральное

исполнение ПГБ позволило разместить в нем активную зону достаточно больших размеров, обеспечив при этом минимальные массу и габариты РУ, а также возможность транспортировки корпуса ПГБ в сборе по железной дороге. При этом предусмотрена возможность изготовления всех элементов корпуса ПГБ при принятой в настоящее время технологии без модернизации производства.

Снижение флюенса нейтронов на корпус реактора за счет увеличения его диаметра позволит увеличить ресурс реактора и снизить температуру при гидравлических испытаниях первого контура.

В ПГБ принята коллекторная схема с принудительной циркуляцией теплоносителя при нормальной работе и естественной его циркуляцией при аварийном расхолаживании. Коллекторная схема позволяет повысить живучесть ПГБ при отказах ПГ и ЦНПК, так как исключается недостаток петлевой схемы — необходимость отключения исправного оборудования, расположенного в одной петле с неисправным. Данное решение также уменьшает потерю мощности РУ при отказах ЦНПК, а также позволяет уменьшить количество отключений/подключений ПГ, приводящих к глубоким термодинамическим и, соответственно, к повреждаемости РУ.

С точки зрения обеспечения безопасности в авариях с потерей теплоносителя парогенерирующий блок характеризуется большими запасами воды над активной зоной, малыми масштабами разгерметизации, возможностью раннего перехода к паровому истечению и пониженными требованиями к производительности системы аварийного охлаждения активной зоны. В частности, не требуется подсистема рециркуляции теплоносителя, вытекающего из ПГБ. Таким образом, интегральное исполнение парогенерирующего блока позволит повысить безопасность РУ, снизить капитальные и эксплуатационные затраты.

Расположение РУ предусмотрено в индивидуальных защитных оболочках, полностью разделенных физически и пространственно.

В техническом задании на разработку ледокола выставлено требование по использованию в активной зоне топлива, удовлетворяющего условию нераспространения (обогащение менее 20%), тогда как на действующих ледоколах используется высокообогащенное топливо. В таких условиях для обеспечения требуемых ресурсных характеристик в проекте вместо активной зоны с интерметаллидной топливной композицией с высоким обогащением будет использована активная зона кассетного типа с металлокерамическим топливом повышенной ураноемкости.

Активная зона будет содержать 199 тепловыделяющих сборок и иметь объем, в три раза превышающий объем активной зоны РУ действующих атомных ледоколов. В качестве материала оболочки тепловыделяющих элементов на начальной стадии будет применен хромоникелевый сплав. По сравнению с циркониевым сплавом Э110, используемым

Таблица 1. Основные технические характеристики РУ

Характеристика	Значение
Тепловая мощность, МВт	175
Паропроизводительность, т/ч	248
Параметры первого контура: температура на входе в активную зону, °С температура на выходе из активной зоны, °С давление, МПа расход, т/ч	277 313 15,7 3250
Параметры второго контура: температура питательной воды на входе в ПГ, °С температура пара на выходе из ПГ, °С давление пара за ПГ, МПа (абс.)	105 295 3,83
Эксплуатационный диапазон изменения мощности, % $N_{\text{НОМ}}$	10—100
Количество изменений мощности	600 000
Скорость изменения паропроизводительности, %/с: нормальная допустимая (при необходимости срочного увеличения паропроизводительности)	0,1 1,0
Назначенный срок службы, лет: незаменимого оборудования заменимого оборудования	40 20
Назначенный ресурс, ч: незаменимого оборудования, не менее заменимого оборудования	320 000 160 000
Количество средних ремонтов за срок службы	1
Интервал между перегрузками топлива, лет	4,5 (7) *
Коэффициент использования установленной мощности	0,65
Период непрерывной работы, ч	26 000

* В скобках приведен интервал между перегрузками серийных активных зон.

в активных зонах РУ типа ОК-900А, этот материал обладает более высокой коррозионной стойкостью и устойчивостью к нарушению водно-химического режима, однако уступает циркониевым материалам по нейтронно-физическим характеристикам и стоимости. Поэтому в настоящее время продолжают работу по поиску коррозионно-стойких циркониевых сплавов, параметров теплоносителя и водно-химического режима, способных обеспечить повышенный ресурс оболочки из циркониевого сплава и возможность его использования в перспективе.

Конструкция и размеры активной зоны позволяют обеспечить требуемые энергоресурс 7,0 ТВт·ч и период между перегрузками 7 лет. При этом для минимизации финансовых рисков, учитывая инновационность активной зоны и отсутствие опыта ее выгорания, величина назначенного энергоресурса для головных активных зон составит 4,5 ТВт·ч, а период между перегрузками — 4,5 года при коэффициенте использования установленной мощности (КИУМ), равном 0,65.

Для циркуляции теплоносителя первого контура предназначен однообмоточный герметичный насос с частотным регулированием и пониженными по сравнению с ЦНПК РУ действующих атомных ледоколов мощностью, массой и габаритами. Упрощение конструкции, снижение мощности и использование конструктивных элементов с многолетним положительным опытом эксплуатации обеспечат длительный ресурс насосов первого контура. Частотное регулирование позволит при необходимости осуществлять переход циркуляционного насоса первого контура с большой частоты вращения на меньшую и наоборот, т. е. обеспечить возможность уменьшения энергопотребления ЦНПК при работе РУ на пониженных уровнях мощности. Использование данного типа насосов приведет к снижению капитальных затрат и энергопотребления РУ на собственные нужды в процессе эксплуатации.

В реакторной установке применен высокоэффективный прямотрубный парогенератор, удельная паропроизводительность которого практически вдвое



Рис. 2. Проектный облик универсального атомного ледокола

выше эксплуатирующихся змеевиковых. Конфигурация парогенерирующих кассет позволит компактно разместить их в корпусе парогенерирующего блока.

В проекте принята наиболее простая и всесторонне отработанная в отечественной судовой энергетике газовая система компенсации давления с доработками, минимизирующими известные недостатки. Система компенсации давления разделена на две параллельные независимые группы с целью уменьшения диаметра сужающих вставок в компенсаторных патрубках ПГБ и снижения скорости истечения теплоносителя в авариях с разрывом трубопроводов первого контура. Такое решение позволяет также использовать один из компенсаторов давления в качестве гидроаккумулятора, что существенно повысит надежность РУ при потенциальных авариях с разгерметизацией первого контура.

В проекте отсутствуют традиционные для судовых РУ группы баллонов газа высокого давления, размещаемые в аппаратном помещении. Часть газа системы компенсации давления, отсекаемая от ПГБ,

сосредоточена в гидроаккумуляторах, объем воды в которых достаточен и для реализации безотходной технологии при работах, связанных с перегрузками топлива, гидравлическими испытаниями первого контура, ремонтами ПГ. Это позволит практически исключить жидкие радиоактивные отходы, повысить экологическую безопасность РУ.

Установка промежуточных емкостей внутри компенсаторов, экранировка швов в трубопроводах системы компенсации давления, изменение алгоритма поддержания средней температуры в первом контуре будут способствовать снижению повреждаемости трубопроводов системы компенсации давления в переходных режимах, обеспечению требуемого ресурса при большом количестве переходных режимов.

Концепция обеспечения безопасности РУ РИТМ-200

Таким образом, обеспечение безопасности РУ РИТМ-200 базируется на следующих принципах: высокая теплоаккумулирующая способность ПГБ интегрального типа, обеспечение уровня естественной циркуляции теплоносителя первого контура, достаточного

Таблица 2. Основные технические характеристики реакторных установок

Характеристика	РИТМ-200	ОК-900А
Масса двух РУ в пределах ЗО, т	2200	2603
Габариты ЗО двух РУ L×B×H, м	6,0×13,2×15,5	7,6×13,3×20,0
КИУМ	0,65	0,2—0,35
Количество циклов изменения мощности	625 700	64 940
Период непрерывной работы, ч	26 000	8 000
Ресурс основного оборудования, ч	320 000	175 000
Срок службы основного оборудования, лет	40	34
Период между перегрузками серийной активной зоны (при КИУМ 0,65), лет	7	2,1
Мощность ЦНПК, кВт	4×97	4×152
Минимальная температура теплоносителя при гидроиспытаниях на конец эксплуатации, °С	30	140
Уровень естественной циркуляции теплоносителя первого контура, %	30	~ 8

для работы установки на мощности до 30% номинальной и надежного расхолаживания реактора, минимальная протяженность трубопроводов первого контура, применение ограничителей истечения в малых патрубках.

Для ограничения неблагоприятного влияния отказов внешних систем и источников энергии, а также ошибок персонала в проекте используются следующие устройства и системы пассивного принципа действия, функционирующие на основе естественных процессов, не требующих энергии извне:

- система аварийного охлаждения активной зоны с гидроаккумуляторами, подающая воду в реактор за счет давления газовой подушки;
- использование одной из групп компенсации давления в качестве гидроаккумулятора при разгерметизации другой;
- система аварийной защиты реактора;
- система аварийного расхолаживания;
- защитная оболочка (ЗО) с системой снижения аварийного давления.

Система снижения давления и кондиционирования воздуха в ЗО включает в себя теплообменники, расположенные внутри защитной оболочки, что позволяет существенно сократить сечения проходящих через ее стенки вентиляционных каналов с установленной на них локализирующей арматурой, повысить тем самым герметичность ЗО как защитного барьера на пути потенциально возможного распространения радиоактивности при нормальной работе РУ, проектных и запроектных авариях.

Также для обеспечения высокого уровня безопасности при множественных отказах в аппаратуре управления и бездействии персонала в проекте применены устройства, срабатывающие от непосредственного действия давления первого контура и осуществляющие сброс аварийной защиты, а также перевод реакторной установки в режим расхолаживания с помощью пассивных каналов.

Принятая в проекте схема безотходной технологии позволит исключить на судне цистерны (монжусы) с радиационной защитой и соответствующими обслуживающими системами. Ограниченное количество сдренированных контурных вод будет храниться в расположенных в коффердаме между ЗО РУ дренажных емкостях (по одной на каждую РУ), откуда после очистки они возвратятся в контур. Все это повысит экологическую безопасность РУ.

В целом при эксплуатации РУ надежно обеспечивается радиационная и экологическая безопасность. Дозовая нагрузка на население, проживающее вблизи районов эксплуатации и базирования универсального атомного ледокола, при нормальной эксплуатации и проектных авариях не превысит величины 0,01% естественного радиационного фона. Доза облучения населения в запроектных авариях с тяжелым повреждением активной зоны не превысит значений, при которых требуется реализация защитных мероприятий. Активность заборной

воды, обусловленная работой РУ, составит 0,1 Бк/л, что в 100 раз ниже регламентированного значения активности даже для питьевой воды.

Основные преимущества РУ РИТМ-200 над РУ действующих атомных ледоколов

Высокие ресурсные показатели, период непрерывной работы, минимальное количество перегрузок активной зоны, низкий уровень собственного энергопотребления позволят более экономично эксплуатировать универсальный атомный ледокол.

Сравнение РУ нового и действующих ледоколов с точки зрения основных потребительских свойств и уровня безопасности приведено в табл. 2.

Таким образом, реакторная установка РИТМ-200 имеет лучшие технико-коммерческие характеристики и более высокий уровень экологической безопасности по сравнению с установками типа ОК-900А.

Перспективы реализации проекта

В соответствии с постановлением Правительства РФ «Об осуществлении бюджетных инвестиций в строительство универсального атомного ледокола» от 29 июля 2012 г. № 660 ввод в эксплуатацию универсального атомного ледокола с новой реакторной установкой (рис. 2) планируется в 2017 г. Ввод двух серийных ледоколов предусмотрен постановлением Правительства РФ от 19 августа 2013 г. № 715 соответственно в 2019 и 2020 гг.

Сроки эксплуатации большинства действующих атомных ледоколов с РУ типа ОК-900А подходят к концу. Поэтому строительство новых ледоколов в запланированные сроки имеет огромное значение для обеспечения хозяйственной деятельности и жизни населения в районах Крайнего Севера, решения государственных задач утверждения и защиты геополитических интересов Российской Федерации в Арктике в последующие годы.

Литература

1. Зверев Д. Л., Вешняков К. Б., Панов Ю. К., Полуничев В. И. Результаты разработки технического проекта реакторной установки для универсального атомного ледокола // Судостроение. — 2011. — № 3. — С. 32—37.
2. Панов Ю. К., Полуничев В. И., Залугин В. И., Шаманин И. Е. Об улучшении технических параметров энергетических установок перспективных атомных ледоколов // Судостроение. — 2005. — № 1.
3. Пахомов А. Н., Полуничев В. И., Вешняков К. Б., Кабин С. В. Реакторная установка РИТМ-200 нового поколения для перспективного атомного ледокола // Атом. энергия. — 2012. — Т. 113, вып. 6. — С. 323—328.
4. Петрунин В. В., Фадеев Ю. П., Панов В. А. и др. Продление срока эксплуатации и повышение безопасности судовых реакторных установок // Атом. энергия. — 2012. — Т. 113, вып. 6. — С. 328—333.
5. Петрунин В. В., Фадеев Ю. П., Пахомов А. Н. и др. Реакторная установка для перспективных судов и плавучих атомных электростанций // Всемирная морская технологическая конференция, г. Санкт-Петербург, 29—30 мая 2012 г.