

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106
УДК 629.5.03-81:621.039

И.В. Кудинович, А.Ж. Сутеева, В.Г. Хорошев
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Объект и цель научной работы. Объектом научной работы являются ядерные энергетические установки (ЯЭУ) перспективных объектов морской техники гражданского назначения. Целью работы является разработка предложений по облику ЯЭУ перспективных ледоколов, арктических судов и плавучих энергоблоков (ПЭБ).

Материалы и методы. Анализ развития судовой ядерной энергетики и технических характеристик ЯЭУ, методы оценки стоимостных показателей судовых ЯЭУ.

Основные результаты. В результате проведенного исследования выполнено сравнение вариантов ЯЭУ перспективных объектов морской техники гражданского назначения.

Заключение. На основе анализа развития судовой ядерной энергетики, технических требований к реакторным и паротурбинным установкам разработаны предложения по облику ЯЭУ перспективных ледоколов, арктических судов и ПЭБ, учитывающие их стоимостные показатели.

Ключевые слова: ядерная энергетическая установка, атомные ледоколы, объекты морской техники, реакторная установка, паротурбинная установка.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP POWERPLANTS

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106
UDC 629.5.03-81:621.039

I. Kudinovich, A. Suteeva, V. Khoroshev
Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

NUCLEAR POWER PLANTS FOR ADVANCED CIVIL MARINE TECHNOLOGY

Object and purpose of research. This paper studies nuclear power plants of advanced civil marine technology. The purpose of the work is to suggest concepts of nuclear power plants for new icebreakers, Arctic ships and floating power stations.

Materials and methods. Analysis of marine nuclear power plants, their evolution and performance parameters, cost assessment methods for marine nuclear power plants.

Main results. This paper compares different options for nuclear power plants suggested for advanced civil marine technology.

Conclusion. This paper suggests possible concepts of nuclear power plants for new icebreakers, Arctic ships and floating power plants based on evolution analysis of marine nuclear power systems and technical requirements to reactors and steam turbines taking into account their cost efficiency.

Keywords: nuclear power plant, nuclear icebreakers, marine technology, reactor, steam turbine.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Для цитирования: Кудинович И.В., Сутеева А.Ж., Хорошев В.Г. Ядерные энергетические установки перспективных объектов морской техники гражданского назначения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 95–106.

For citations: Kudinovich I., Suteeva A., Khoroshev V. Nuclear power plants for advanced civil marine technology. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 95–106 (in Russian).

Введение

Introduction

Россия является единственной страной, обладающей ледокольным атомным флотом, что объясняется наличием стратегических интересов в Арктике. В Морской доктрине Российской Федерации к числу долгосрочных задач относится строительство атомного ледокольного флота [1]. Необходимость создания новых атомных ледоколов разных типов связана с возрастающей ролью северного морского пути (СМП), включая обеспечение круглогодичной транзитной перевозки грузов и освоение газовых месторождений Ямала. Освоение шельфовых месторождений также потребует ледокольного обеспечения.

В связи с выработкой ресурса реакторных установок происходит последовательный вывод из эксплуатации атомных ледоколов, построенных в конце XX века. К 2025 г. из действующих атомных ледоколов в эксплуатации останется только ледокол «50 лет Победы» [2]. В настоящее время для обеспечения круглогодичной навигации в западном районе Арктики осуществляется строительство трех двухосадочных универсальных атомных ледоколов (УАЛ) пр. 22220, имеющих также возможность работать на мелководных участках шельфа арктического побережья и в устьях сибирских рек. Для обеспечения круглогодичной навигации на всей трассе СМП и лидирования при высокоширотных проводках крупнотоннажных транспортных судов ПАО «ЦКБ «Айсберг» разработан технический проект ледокола-лидера (пр. 10510). Атомный ледокол-лидер позволит обеспечить круглогодичную поставку углеводородов газозовами типа «Кристоф де Маржери» с месторождений полуострова Ямал в страны Азиатско-Тихоокеанского региона.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр» совместно с ПАО «ЦКБ «Айсберг» разработан эскизный проект многофункционального мелкосидящего атомного ледокола офшорного типа (пр. 10570), предназначенного для работы на арктическом шельфе, включая обеспечение ледовой безопасности буровых платформ, снабжение и проведение технологических операций, обеспечивающих обустройство и эксплуатацию нефте- и газодобывающих сооружений [3].

Положительный опыт эксплуатации атомного лихтеровоза-контейнеровоза «Севморпуть» подтвердил эффективность использования ЯЭУ на транспортных судах в Арктике [4]. Атомные суда

имеют преимущества перед судами на органическом топливе не только за счет повышенной автономности, но и благодаря отсутствию вредных выбросов, что особенно актуально в связи с принятием Полярного кодекса [5]. ЯЭУ позволяет иметь большую мощность на валах, что обеспечивает значительную ледопробитость судов и высокую скорость на чистой воде. Сравнительный анализ стоимости контейнерных перевозок из Европы в Азию атомным контейнеровозом арктического класса по СМП и обычным контейнеровозом через Суэцкий канал показал, что атомное судно конкурентоспособно, если учитывается плата за загрязнение окружающей среды [6–8]. Необходимым условием для широкого применения ядерной энергетики на коммерческих судах является разработка международных правовых норм, определяющих правила эксплуатации и обслуживания атомных судов в портах [9].

Устойчивое промышленное и социальное развитие труднодоступных регионов Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, а также защита геополитических интересов Российской Федерации в Арктической зоне невозможны без решения проблемы энергообеспечения. Атомные станции малой мощности (АСММ) могут рассматриваться в качестве источника энергоснабжения удаленных населенных пунктов и промышленных производств, расположенных вне развитых энергосистем [10, 11]. Строительство АСММ в регионах с неразвитой транспортной и промышленной инфраструктурой трудно осуществить традиционными методами. Одним из вариантов решения данной проблемы является поставка готового к эксплуатации энергоблока, который при выводе из эксплуатации не оставляет на площадке радиоактивных материалов. В прибрежных территориях существует возможность создания АСММ на базе ПЭБ, технология создания которых учитывает опыт развития судовой ядерной энергетики. ПЭБ для выработки электроэнергии и опреснения морской воды могут быть востребованы в различных регионах мира [12–14]. В настоящее время построен ПЭБ пр. 20870 «Академик Ломоносов» с реакторными установками КЛТ-40С [15–19], который будет установлен в пос. Певек, республика Саха (Якутия), для работы в составе Чуан-Билибинского энергоузла [19].

Комплекс маркетинговых исследований по поиску перспективных площадок для АСММ вдоль СМП: в Мурманской, Архангельской, Камчатской и Магаданской областях, Таймырском, Чукотском и Корякском автономных округах, в северных райо-

нах республики Саха (Якутия), в Хабаровском и Приморском краях показал, что количество пунктов для перспективного размещения ПЭБ электрической мощностью 6–12 МВт значительно больше, чем для ПЭБ проекта 20870 мощностью 70 МВт [20].

К настоящему времени наиболее проработанным является проект ПЭБ малой мощности «Волнолом-3» [21] (технический проект разработан ЦКБ «Балтсудопроект» в 1993 г.). ПЭБ с электрической мощностью 12 МВт и мощностью теплофикации 24 Гкал/час предназначен для базирования на побережье морей Северного Ледовитого океана и Дальнего Востока.

Судовые реакторные установки Marine nuclear reactors

В связи с расширением задач, стоящих перед ледокольным флотом, изменились технические требования к атомным ледоколам (увеличение ширины ледокола для проводки крупнотоннажных судов; увеличение мощности на валах для обеспечения большей ледопроеходимости; повышение коэффициента использования мощности энергетической установки при увеличении скорости проводки каравана). Соответственно, возникли предпосылки для создания нового поколения судовых ЯЭУ. Они должны обладать улучшенными ресурсными характеристиками, позволяющими увеличить срок службы атомных судов и, следовательно, повысить экономическую эффективность их использования. Также важным является требование межпроектной унификации основного комплектующего оборудования как средства снижения стоимости и уменьшения сроков создания ЯЭУ.

Основными требованиями к перспективным судовым ЯЭУ по сравнению с действующими установками являются увеличение ресурса оборудования: основного оборудования – не менее 320 000 ч; заменяемого оборудования – не менее 160 000 ч; срока службы (40 лет); интервала времени между перегрузками активной зоны (не менее 7 лет) [22] и повышение уровня безопасности.

На основе анализа необходимой мощности для различных атомных объектов морской техники можно определить мощностной ряд базовых реакторных установок (РУ). При этом следует учитывать количество реакторов на объекте морской техники, коэффициент полезного действия энергетической установки, принимаемые запасы по паропроизводительности, возможный диапазон изменения номинальной мощности (форсирование и дефорси-

рование) базовой РУ для использования на различных объектах морской техники.

Опыт развития транспортной атомной энергетики показал, что на современных судах и кораблях устанавливается не более двух реакторов.

В составе первой паропроизводящей установки (ППУ) ОК-150 ледокола «Ленин» было три РУ мощностью по 90 МВт. Два реактора при работе на уровне мощности около 80 % обеспечивали полную пропульсивную мощность ледокола, при этом третья РУ находилась в резерве. Установка трех РУ была обусловлена отсутствием опыта эксплуатации реакторов на ледоколах, что не позволяло оценить вероятность их безотказной работы. В 1959–1966 гг. ледокол «Ленин» выполнил шесть навигаций, в результате которых была продемонстрирована достаточно высокая надежность РУ. После выработки ресурса основного оборудования ППУ ОК-150 была проведена модернизация ледокола «Ленин», и на нем была установлена новая двухреакторная ППУ ОК-900 тепловой мощностью 2×159 МВт. В дальнейшем на линейных ледоколах устанавливались двухреакторные ППУ, на мелкосидящих – однореакторные, на лихтеровозе «Севморпуть» также установлена однореакторная ППУ.

АСММ могут состоять из нескольких ПЭБ, что позволяет ограничить предельную мощность одного блока и дает возможность устанавливать не более двух реакторов на один ПЭБ.

В табл. 1 представлены оценки мощности реакторов для перспективных ледоколов, судов и ПЭБ. При оценке тепловой мощности реактора учитывалась характерное значение КПД энергетической установки, а также запас по паропроизводительности. На двухреакторных ледоколах принята кольцевая схема «пар – конденсат», которая обеспечивает возможность подачи пара от одного работающего реактора на все главные турбогенераторы и другие потребители паротурбинной установки (ПТУ), также возможна объединенная работа реакторов, различающихся уровнем мощности. Такая схема, в принципе, позволяет «гибко» использовать энергозапас активных зон реакторов и реализовывать запас по паропроизводительности каждого из реакторов, который на действующих линейных ледоколах и УАЛ составляет около 15 %. На однореакторных ледоколах и судах, а также при эшелонной схеме ЯЭУ, характерной для ПЭБ (каждый эшелон, включающий реактор и ПТУ, работает независимо), реализовать большой запас по паропроизводительности невозможно, и при оценке необходимой мощности реактора его значение принято равным 3 %.

Таблица 1. Мощностные характеристики реакторов для перспективных ледоколов, судов и плавучих энергоблоков

Table 1. Power of reactors for advanced icebreakers, ships and floating power stations

Объект	Полезная мощность, МВт	КПД	Кол-во РУ	Запас паропроизводительности, %	Тепловая мощность реактора, МВт
УАЛ, линейный ледокол	60–70	0,2	2	15	173–202
			1	3	309–361
Ледокол-лидер	110–130	0,2	2	15 3	315–374 283–335
Мелкосидящий ледокол	30–40	0,2	1	3	155–206
Судно арктическое	30–50	0,24	1	3	129–215
ПЭБ	60 (эл) 60 (эл)+57 (теплофикация)	0,24	2	3	129
					158
ПЭБ	6 (эл) 10 (эл) 12 (эл)+28 (теплофикация)	0,24	1	3	26
			1		43
			2		40

Опыт создания отечественных судовых ЯЭУ показал, что базовый парогенерирующий блок ОК-900 может быть использован как на двухреакторных и однореакторных ледоколах при номинальной мощности реактора 171 МВт, так и на контейнеровозе «Севморпуть» при номинальной мощности реактора 135 МВт. Таким образом, показана возможность создания базовой РУ для разных объектов морской техники, которая может быть модифицирована для достаточно широкого диапазона номинальных мощностей.

На основании данных табл. 1 можно сделать вывод, что основу мощностного ряда реакторных установок для перспективных объектов морской техники могут составлять три базовых установки тепловой мощностью 40 МВт (малой мощности), 175 МВт (средней мощности) и 350 МВт (большой мощности).

Реакторные установки тепловой мощностью 25–45 МВт могут создаваться на основе базовой установки малой мощности и применяться на однореакторных ПЭБ электрической мощностью 6–10 МВт и двухреакторных ПЭБ электрической мощностью 12–20 МВт.

Реакторные установки тепловой мощностью 130–215 МВт могут создаваться на основе базовой установки средней мощности и применяться на ледоколах и судах с пропульсивной мощностью 30–

40 МВт (однореакторная ППУ) и 50–70 МВт (двухреакторная ППУ), а также на ПЭБ электрической мощностью 30–70 МВт.

Реакторные установки тепловой мощностью 220–360 МВт могут создаваться на основе базовой установки большой мощности и применяться на ледоколах и судах с пропульсивной мощностью 50–70 МВт (однореакторная ЯЭУ) и ледоколе-лидере с пропульсивной мощностью 100–130 МВт (двухреакторная ЯЭУ).

Наиболее перспективным вариантом судового реактора является интегральный реактор, характеризующийся размещением в едином корпусе реактора активной зоны и парогенератора. Преимуществами реактора интегрального типа являются: повышенный радиационный ресурс корпуса реактора; уменьшение масса и габаритов РУ в защитной оболочке; снижение энергопотребления на собственные нужды. Высокий уровень безопасности интегральных реакторов обеспечивается за счет реализации свойств внутренней самозащищенности.

В качестве базовых РУ для объектов морской техники могут рассматриваться следующие установки, разработанные АО «ОКБМ Африкантов» [23–25] (рис. 1, табл. 2):

- АБВ-6Э тепловой мощностью около 40 МВт с реактором интегрального типа и естественной циркуляцией теплоносителя для однореактор-

ных ПЭБ электрической мощностью 6–10 МВт и двухреакторных ПЭБ электрической мощностью 12–20 МВт;

- РИТМ-200 тепловой мощностью 150–175 МВт с интегральным реактором и принудительной циркуляцией для однореакторных ледоколов и судов пропульсивной мощностью 30–40 МВт и двухреакторных ледоколов и судов пропульсивной мощностью 50–70 МВт, а также на ПЭБ электрической мощностью 30–70 МВт. В РУ РИТМ-200 номинальная мощность реактора 175 МВт реализуется при температуре питательной воды 105 °С, характерной для атомных ледоколов. При температуре питательной воды 170 °С, характерной для ПЭБ, номинальная мощность снизится до 150 МВт;

РИТМ-400 тепловой мощностью 300–350 МВт, принципиальные конструктивные решения для которой унифицированы с реактором РИТМ-200 для однореакторных ледоколов и судов пропульсивной мощностью 50–70 МВт и двухреакторного ледокола-лидера пропульсивной мощностью 110–130 МВт.

Повышенная безопасность РУ перспективных объектов морской техники может быть обеспечена применением пассивных каналов с воздушными теплообменниками в системе аварийного расхолаживания, обеспечивающих расхолаживание в течение неограниченного времени, что реализовано в проекте ледокола-лидера пр. 10510.

Паротурбинные установки

Marine steam turbines

Анализ различных вариантов ПТУ показал, что на атомных судах целесообразно устанавливать глав-

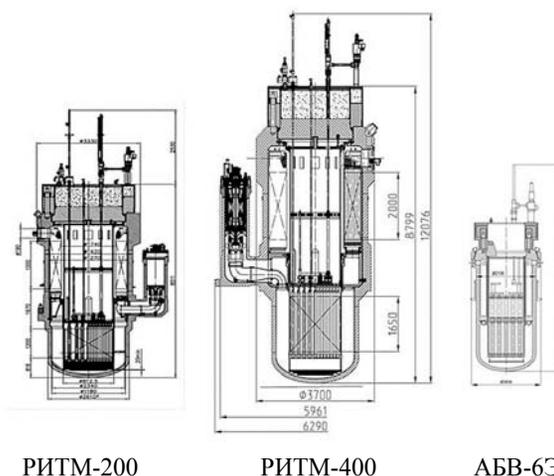


Рис. 1. Реакторные установки перспективных объектов морской техники

Fig. 1. Reactors of advanced marine technology

ный турбоагрегат (ГТА) мощностью около 40 МВт с возможностью его использования на ледоколах с электродвижением и ограниченной регенерацией тепла (температура питательной воды 105 °С), на ПЭБ с развитой регенерацией тепла (температура питательной воды около 170 °С), а также применять их турбины в составе ГТЗА на транспортных судах. Оптимальной для атомных судов и ПЭБ является ПТУ с полностью электрифицированными вспомогательными механизмами. АО «Киров Энергомаш» разработан ГТА, который устанавливается на УАЛ пр.22220 (ПТУ 72 с двумя ГТА) и планируется установить на ледоколе-лидере пр.10510 (ПТУ с четырьмя ГТА). АО «КТЗ» разработан ГТА К-35-3,4 для ПЭБ пр. 20870. Технические характеристики ГТА представлены в табл. 3.

Таблица 2. Технические характеристики реакторных установок (РИТМ-200, РИТМ-400, АБВ-6Э)

Table 2. Technical parameters of nuclear reactors (RITM-200, RITM-400, ABV-6E)

Характеристика	РИТМ-200	РИТМ-400	АБВ-6Э
Тепловая мощность, МВт	175	315	38
Паропроизводительность, т/ч	248	450	56
Параметры пара: температура, °С	295	295	295
давление, МПа	3,82	3,83	3,82
Температура питательной воды, °С	105	105	105
Температура первого контура: давление, Мпа	15,7	15,7	15,7
температура на входе/выходе	276/314	281/318	288/313
Кол-во и мощность ЦНПК, кВт	4×98	6×128	ЕЦ
Масса РУ в ЗО, т	1100	1920	950
Габаритные размеры ЗО, м	6×6×15,5	9×8,2×17	5×5×13

Таблица 3. Технические характеристики главных турбоагрегатов

Table 3. Technical parameters of main turbosets

Характеристики	ГТА К-35-3,4 (АО «КТЗ»)	ГТА ПТУ72 (АО «Киров Энергомаш»)
Номинальная мощность, МВт (эл.)	35	35
Параметры пара (перед ПТУ): – давление, МПа – температура, °С		3,4 285
Номинальное давление в главном конденсаторе, кПа	6	7,6
Температура забортной охлаждающей воды, °С		10
Расход забортной охлаждающей воды на главный конденсатор, м ³ /ч	5400	6000
Габаритные размеры ГТА: – длина, м – ширина, м – высота, м	7,4 9,1 8,9	8,5 5,1 11,0
Масса, т	188	148

Таблица 4. Ядерная энергетическая установка линейного ледокола (КИУМ = 0,6)

Table 4. Nuclear power plant of line icebreaker (capacity factor 0.6)

Характеристики	Вариант 1	Вариант 2
Мощность на валах, МВт	60	60
РУ	РИТМ-200 2×160 МВт	РИТМ-400 1×320 МВт
ГТА	2×37 МВт	2×37 МВт
РДГ	2РДГ×2000 кВт	2РДГ×4000 кВт
Масса ЯЭУ, т	3200	2700
Стоимость ЯЭУ, млн руб.	9200	8000
Топливные затраты, млн руб./год	435	420

Давление пара на выходе парогенераторов РУ РИТМ-200 и РИТМ-400 (3,8 МПа) превышает значения, реализованные на атомных ледоколах предыдущего поколения (3,4 МПа). Повышение давления пара перед соплами турбины приводит к необходимости принятия дополнительных мер по сепарации влаги с целью уменьшения эрозионного износа и обеспечения необходимого ресурса лопаточного аппарата.

ГТА К-35-3,4 – однопоточный однокорпусный с внутрикорпусной сепарацией влаги. В ГТА ПТУ 72 использована двухкорпусная турбина, соответственно, в этой установке может быть использована эффективная межкорпусная сепарация, отбор пара в деаэрактор может осуществляться после корпуса высокого давления. Учитывая, что характеристики обоих ГТА достаточно близки, окончательный вывод о том, какой из них целесообразно выбрать в качестве унифицированного для перспективных атомных ледоколов и ПЭБ, может быть сделан только по результатам эксплуатации УАЛ и ПЭБ.

Унифицированные главные ГТА электрической мощностью 6 МВт и напряжением 6,3 или 10,5 кВ, могут применяться в качестве главных турбоагрега-

тов для ПЭБ малой мощности, а также устанавливаться в качестве вспомогательных турбогенераторов на атомных судах с ГТЗА, в которых дополнительно используется электродвижение, например, винто-рулевые колонки.

Облик ядерных энергетических установок атомных ледоколов, арктических судов и плавучих энергоблоков

Concept of nuclear power plants for icebreakers, Arctic ships and floating power stations

На основании опыта эксплуатации атомных ледоколов можно сделать вывод, что работоспособность и оперативные возможности однореакторных и двухреакторных ЯЭУ практически одинаковы [26]. В случае выхода из строя одного из реакторов ледокол с двухреакторной установкой не сможет возвратиться в базу в тяжелой ледовой обстановке, а в легких ледовых условиях будет достаточно резервной установки, которой, в соответствии с Правилами РМРС [27], должно быть оснащено атомное судно с одним реак-

тором. Таким образом, для перспективных атомных судов могут рассматриваться как двухреакторные, так и однореакторные ЯЭУ.

Реакторные установки РИТМ-200 и РИТМ-400 обеспечивают возможность создания ЯЭУ для всех типов ледоколов и арктических судов. При этом на ледоколе-лидере должна быть применена двухреакторная ЯЭУ на базе реакторов РИТМ-400. На линейных (универсальных) и мелкосидящих ледоколах и арктических судах с электродвижением возможно применение однореакторных ЯЭУ с обеспечением аварийного хода от резервных дизель-генераторов повышенной мощности или от резервного котла на судах с механической пропульсивной установкой.

Состав и основные характеристики вариантов однореакторной и двухреакторной ЯЭУ линейного ледокола представлены в табл. 4.

Оценка стоимости вариантов ЯЭУ показала, что однореакторная установка на 15 % дешевле двухреакторной, при этом увеличение стоимости органического топлива для резервных дизель-генераторов (РДГ) не оказывает существенного влияния на топливные затраты.

В табл. 5 представлены четыре варианта ЯЭУ для ледокола-лидера. В первом и четвертом вариантах ЯЭУ включает две РУ РИТМ-400, во втором варианте – четыре РУ РИТМ-200, а в третьем варианте – комбинированную ЯЭУ с двумя форсированными РУ РИТМ-200 мощностью по 215 МВт и две котельные установки (КУ) на органическом топливе паропроизводительностью по 110 т/ч. В случае комбинированной ЯЭУ основную часть эксплуатационного времени ледокола-лидера КУ находится в резерве, совместная работа РУ и КУ осуществляется при мощности на валах более 75 % от номинальной.

Таблица 5. Ядерная энергетическая установка ледокола-лидера (КИУМ = 0,45)

Table 5. Nuclear power plant of leader icebreaker (capacity factor 0.45)

Характеристики	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Мощность на валах, МВт	120	120	110	130
РУ	РИТМ-400 2×310 МВт	РИТМ-200 4×155 МВт	РИТМ-200 2×215 МВт	РИТМ-400 2×350 МВт
КУ	–	–	2КУ×110 т/ч	
ГТА	4×35,5 МВт	4×35,5 МВт	4×33 МВт	4×38 МВт
РДГ	2РДГ×2000 кВт			
Масса ЯЭУ, т	5300	6400	4300	5300
Стоимость ЯЭУ, млн руб.	14 800	18 300	13 400	15 200
Топливные затраты, млн руб./год	611	632	552 (98)*	690

* затраты на органическое топливо

Таблица 6. Ядерная энергетическая установка мелкосидящего ледокола (КИУМ = 0,5)

Table 6. Nuclear power plant of shallow-draught icebreaker (capacity factor = 0.5)

Характеристики	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Мощность на валах, МВт	40	40	40	40
РУ	РИТМ-200 1×210 МВт	РИТМ-400 1×220 МВт	РИТМ-200 1×185 МВт	РИТМ-400 1×220 МВт
ГТА	2×24 МВт	1×42 МВт	1×42 МВт	2×25 МВт
ВТГ	–	1ТГУ×8 МВт	–	
РДГ	2РДГ×3000 кВт	2РДГ×3000 кВт	2РДГ×4000 кВт	2РДГ×3000 кВт
Масса ЯЭУ, т	2200	2300	1700	2700
Стоимость ЯЭУ, млн руб.	6300	6200	5300	6500
Топливные затраты, млн руб./год	238 (25)*	241	210 (34)*	241

* затраты на органическое топливо

Таблица 7. Варианты ядерной энергетической установки для судна ледового класса

Table 7. Variants of nuclear power plant for and ice-going ship

Характеристики АЭУ	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Мощность на валах, МВт	30	30 (6 ВРК)	50	50
РУ	РИТМ-200 1×135 МВт	РИТМ-200 1×135 МВт	РИТМ-400 1×225 МВт	РИТМ-400 1×225 МВт
ГТЗА (ГТА)	1×30 МВт	1×30 МВт	2×25 МВт	2 ГТА×30 МВт
ВТГ	2ВТГ×2 МВт	2ТГУ×6 МВт	2ВТГ×3 МВт	–
Установка резервного хода	1КУ×50 т/ч		РДГ	
РДГ, АДГ	2 РДГ×600 кВт 2 АДГ×200 кВт	2 РДГ×600 кВт 2 АДГ×200 кВт	2РДГ×1000 кВт 2 АДГ×200 кВт	2РДГ×1000 кВт 2 АДГ×200 кВт
Масса АЭУ, т	1900	2000	2900	2700
Масса ЯЭУс БЗ, МВЗ, ЗО, т	3200	3300	4400	4200
Удельная масса, т/МВт	106	110	88	84
Стоимость АЭУ, млн руб.	5900	6300	8500	8600
Удельная стоимость АЭУ, млн руб./МВт	197	210	170	172
Топливные затраты, млн руб./год	200	200	320	320
Затраты на органическое топливо, млн руб./год	22	22	17	17

Во всех вариантах ЯЭУ основными источниками электроэнергии для единой энергетической электро-системы (ЕЭЭС) и системы электродвижения (СЭД) являются четыре ГТА.

Оценка стоимости рассмотренных вариантов ЯЭУ показала, что стоимость комбинированной установки меньше, чем у чисто атомных вариантов, при этом годовые затраты на топливо (с учетом затрат на органическое топливо) – больше. В качестве основного варианта для ледокола пр. 10510 следует рассматривать ЯЭУ с двумя РУ РИТМ-400.

Для мелкосидящего ледокола с мощностью на валах 40 МВт рассматриваются однореакторные ЯЭУ на основе форсированных по мощности РУ РИТМ-200 и дефорсированных РУ РИТМ-400 (табл. 6).

Требуемая мощность источников электроэнергии для мелкосидящего ледокола – 50 МВт. В случае применения РУ РИТМ-400 в качестве основного источника электроэнергии ЕЭЭС с СЭД могут выступать два дефорсированных ГТА мощностью по 25 МВт либо один форсированный ГТА мощностью 42 МВт и вспомогательная турбогенераторная установка (ТГУ) мощностью 8 МВт. Для вариантов ЯЭУ с РУ РИТМ-200, тепловая мощность которых меньше, чем у РУ РИТМ-400, в качестве основных источников электроэнергии рассматриваются два де-

форсированных ГТА мощностью по 24 МВт либо один форсированный ГТА мощностью 42 МВт. В этих случаях при работе ЯЭУ на уровнях мощности от номинальной более 96 % (вариант 1) или 84 % (вариант 3) в качестве дополнительных источников электроэнергии для судовых потребителей используются дизель-генераторы установки резервного хода (РДГ повышенной мощности). Вариант 1 рассматривался как основной для ледокола пр. 10570.

Оценка стоимости рассмотренных вариантов ЯЭУ показала, что наиболее дешевым является вариант 2 с одной РУ РИТМ-200 мощностью 185 МВт и одним ГТА мощностью 42 МВт.

На атомных судах ледового класса применяется механическая пропульсивная установка, включающая ГТЗА и винт регулируемого шага в качестве движителя (лихтеровоз «Севморпуть»). Повышение маневренности арктического судна может быть достигнуто за счет частичного электродвижения, например, использования винторулевых колонок.

Для арктического судна с мощностью на валу 30 МВт ЯЭУ по составу соответствует энергетической установке атомного лихтеровоза «Севморпуть» и включает дефорсированную РУ РИТМ-200 мощностью 135 МВт. Гребная установка с винтом регулируемого шага приводится в действие одним ГТЗА мощ-

ностью 30 МВт. Все судовые потребители получают электропитание от двух вспомогательных турбогенераторов (ВТГ) типа ОК 3С мощностью 2 МВт каждый.

Для судна с основной механической пропульсивной установкой мощностью 30 МВт и дополнительными винторулевыми колонками суммарной мощностью 6 МВт вместо двух ВТГ типа ОК 3С могут быть использованы две ТГУ мощностью по 6 МВт. Одной ТГУ достаточно для электроснабжения всех потребителей при движении судна с использованием механической пропульсивной установки, при использовании винторулевых колонок электроснабжение судна обеспечивают обе ТГУ.

Для судна ледового класса с мощностью на валах 50 МВт рассматривается как механическая пропульсивная установка (вариант 3), так и электродвижение (вариант 4).

В случае двухвального судна с механической пропульсивной установкой в состав ЯЭУ входит одна РУ РИТМ-400 тепловой мощностью 225 МВт и два ГТЗА мощностью по 25 МВт, все судовые потребители получают электропитание от двух ВТГ типа ОК 3С мощностью 2 МВт каждый, в состав ПТУ входят 2 АТГ.

При реализации электродвижения ЯЭУ судна включает одну РУ РИТМ-400 тепловой мощностью 225 МВт и ПТУ с двумя ГТА по 30 МВт, являющимися основными источниками электроэнергии для единой ЭЭС с СЭД. Для повышения термодинамической эффективности энергетической установки в состав ПТУ включены регенеративные подогреватели питательной воды высокого и низкого давления.

Во всех вариантах ЯЭУ в качестве источника пара для обеспечения хода судна при выводе из действия РУ используется резервная котельная установка.

Состав и основные характеристики ЯЭУс КИ-УМ = 0,65 представлены в табл. 7.

Требование по надежности энергоснабжения потребителей обуславливает применение на ПЭБ двухреакторных ЯЭУ на базе реакторов РИТМ-200 для ПЭБ большой мощности или АБВ-6Э для ПЭБ малой мощности.

Использование на ПЭБ двух дефорсированных РУ РИТМ-200 с тепловой мощностью по 150 МВт и увеличенным энергоресурсом активных зон обеспечивает работу ПЭБ без перегрузки топлива на площадке базирования в течение 10 лет, что позволит отказаться от хранилища отработавших ТВС, уменьшить водоизмещение и габариты ПЭБ. В остальном состав ЯЭУ соответствует ПЭБ пр. 20870.

На базе РУ АБВ-6Э и ТГУ мощностью 6–8 МВт может быть создана ЯЭУ для ПЭБ малой мощности типа «Волнолом-3»; соответственно, электрическая мощность станции находится в диапазоне от 6 до 32 МВт, а теплофикационная мощность – от 12 до 48 Гкал/час.

Основные характеристики ПЭБ и блочно-транспортного энергоблока (БТЭБ) с КИ-УМ = 0,7 представлены в табл. 8.

Заключение

Conclusion

Анализ развития ЯЭУ для ледоколов и арктического судна позволяет сделать вывод о возможности унификации основного энергетического оборудования. Обоснован мощный ряд базовых реакторных установок: малой мощности (38 МВт) – АБВ-6Э, средней мощности (175 МВт) – РИТМ-200, большой мощности (350 МВт) – РИТМ-400.

Таблица 8. Основные характеристики плавучего и блочно-транспортного энергоблоков

Table 8. Main parameters of floating and modular power stations

Характеристики АЭУ	ПЭБ	ПЭБ малой мощности
Электрическая мощность, МВт	60	12 (16)
Теплофикация, Гкал/час	–	24 (0)
РУ	РИТМ-200 2×150 МВт	АБВ-6Э 2×38 МВт
ГТА	2ГТА×36 МВт	2ТГУ×6 (8) МВт
РДГ, АДГ	4РДГ×1000 кВт; 4АДГ×200 кВт	2РДГ×600 кВт; 2АДГ×200 кВт
Масса АЭУ, т	3300	720
Масса ЯЭУс БЗ, МВЗ, ЗО, т	5900	2220
Удельная масса, т/МВт	98	185 (139)
Стоимость АЭУ, млн руб.	9000	4300
Удельная стоимость АЭУ, млн руб./МВт	150	360 (270)
Топливные затраты, млн руб./год	475	130
Затраты на органическое топливо, млн руб./год	22	8

Мощностной ряд базовых турбоагрегатов: ГТА малой мощности (6–8 МВт), ГТА средней мощности (35–40 МВт), ГТЗА мощностью 30 МВт на базе турбоагрегата средней мощности.

Варианты ЯЭУ на базе унифицированного оборудования:

- ЯЭУ линейного ледокола и УАЛ мощностью на валах 60–70 МВт с двухреакторной (РИТМ-200) или однореакторной (РИТМ-400) ППУ, ПТУ с двумя ГТА средней мощности, единой ЭЭС с СЭД;
- ЯЭУ ледокола-лидера мощностью на валах 120 МВт с двухреакторной (РИТМ-400) ППУ, ПТУ с четырьмя ГТА средней мощности, размещенными в двух машинных отделениях, единой ЭЭС с СЭД;
- ЯЭУ мелкосидящего ледокола мощностью на валах 40 МВт с однореакторной (форсированный РИТМ-200) ППУ, ПТУ с одним ГТА средней мощности, единой ЭЭС с СЭД и возможностью подключения РДГ для работы на гребную электрическую установку при мощности на валах более 90 % от номинальной;
- ЯЭУ судна ледового плавания мощностью на валу 30 МВт и двумя винторулевыми колонками по 3 МВт с однореакторной (РИТМ-200) ППУ, ПТУ с одним ГТЗА и двумя ГТА малой мощности;
- ПЭБ электрической мощностью 60 МВт с двумя РУ РИТМ-200 и двумя ГТА средней мощности;
- ПЭБ электрической мощностью 12 МВт с двумя РУ АБВ-6Э и двумя ГТА малой мощности (на основе ЯЭУ одного эшелона данного ПЭБ может быть создан БТЭБ мощностью 6–8 МВт).

Библиографический список

1. Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 года. Утв. Президентом РФ 27 июля 2001 г. № 1387, ред. 2015 г.
2. Рукша В.В. Новый этап развития Северного морского пути // XVIII Александровские чтения. НИЦ «Курчатовский институт», 13 февраля 2012 г. С. 56–75.
3. Морская политика России. Спецвыпуск. 2015. № 14.
4. Родионов Н.Н., Воробьев В.М., Габайдулин Ф.Х. Атомный лихтеровоз // Морской флот. 1982. № 8. С. 41–47.
5. Шурняк В.К. Полярный кодекс ИМО: предварительный анализ первой части (требования по безопасности) // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2015. № 38/39. С. 8–17.
6. Yamaji A. Utilization of Nuclear Power in Oceans and its Perspective // International workshop on utilization of nuclear power in oceans // N^oocean 2000. Proceedings Toranomon Pastoral. Tokyo, Japan, February 21–24, 2000. P. 1–6.
7. Takamasa T., Kondo K. Economic potential of nuclear-powered ice-breaking container ship via the North Sea route // International Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans. N^oocean 2000. Proceedings Toranomon Pastoral. Tokyo, Japan, February 21–24, 2000. P. 40–52.
8. Fujino M. Some concepts of future nuclear ship // International Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans. N^oocean 2000. Proceedings Toranomon Pastoral, Tokyo, Japan. February 21–24, 2000. P. 260–268.
9. Анашкин В.М. Международно-правовые проблемы атомного судоходства. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1987.
10. Каширин В.И., Чузунов Н.А., Янчук В.А. Положительный опыт создания и 36-летней эксплуатации АСММ – Библинской АТЭЦ // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: материалы межотраслевой межрегион. науч.-техн. конф. «Перспектива развития системы атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения». Москва, 11–12 ноября 2010. С. 227–246.
11. Петросьянц А.М. Атомная энергия в науке и промышленности. М.: Энергоатомиздат, 1984.
12. Ворожцов Н.В., Коваль Г.М. Плавающие атомные электростанции // Судостроение за рубежом. 1975. № 1. С. 38–51.
13. Планы строительства в США плавающих атомных станций небольшой мощности // Судостроение за рубежом. 1974. № 7. С. 80–81.
14. Мойсов В.В., Рыжков В.В. Создание морских атомных водопреснительных комплексов с использованием энергетических модулей с реакторными установками // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. Т. 2. М.: Академ-Принт, 2015. С. 139–148.
15. Коваленко В.К., Тарасов В.К. Плавающая атомная электростанция мощностью 70 МВт для Чаун-Библинского узла // Труды международной конференции по судостроению. Секция D «Судовая энергетика». СПб., 1994. С. 339–344.
16. Митенков Ф.М., Ардабьевский А.А., Васюков В.И. и др. Ядерная паропроизводящая установка повышенной безопасности типа КЛТ-40 // Энергетическое строительство. 1993. № 5. С. 16–21.
17. Veshnyakov K.B., Kiryushin A.I., Panov Yu.K., Polunichchev V.I. Floating nuclear heat and power station “Pevec” with KLT-40S type reactor plant for remote regions of Russia // International Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans. N^oocean 2000. Proceedings, Toranomon Pastoral. Tokyo, Japan, February 21–24, 2000. P. 104–112.
18. Макеев Г.А. Создание плавающих энергетических блоков: современное состояние и варианты будущих проектов // Атомные станции малой мощности:

- новое направление развития энергетики. Т. 2. М.: Академ-Принт, 2015. С. 130–138.
19. *Шурочков М.В., Созонюк В.А.* Плавучие атомные теплоэлектростанции: состояние и перспективы // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: материалы межотраслевой межрегион. науч.-техн. конф. «Перспектива развития системы атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения». Москва, 11–12 ноября 2010. С. 187–192.
 20. *Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тузузова Т.Ф., Франк М.И.* Роль атомных станций малой мощности в зонах децентрализованного энергоснабжения на Востоке России // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики: материалы межотраслевой межрегион. науч.-техн. конф. «Перспектива развития системы атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения». Москва, 11–12 ноября 2010. С. 88–100.
 21. *Воробьев В.М., Каилов Р.А.* Плавучая атомная теплоэлектростанция для отдаленных районов Севера и Дальнего Востока // Судостроение. 1995. № 7. С. 26–29.
 22. *Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Гуреева Л.В., Шмелев И.В., Лепехин А.Н., Удалищев С.В.* Перспективы развития атомных станций с реакторами малой и средней мощности // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. Т. 2. М.: Академ-Принт, 2015. С. 36–49.
 23. *Зверев Д.Л., Пахомов А.Н., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Кабин С.В.* Реакторная установка нового поколения РИТМ-200 для перспективного атомного ледокола // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 6. С. 323–328.
 24. *Фадеев Ю.П., Беляев В.М., Пахомов А.Н., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Турусов А.Ю., Воробьев В.М.* РУ повышенной мощности для ледоколов // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики. Сб. докл. IV Международной научно-технической конференции. Москва, 27–30 сентября 2016. Т.1. М.: АО «НИКИЭТ», 2018. С. 577–581.
 25. *Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н., Вешняков К.Б., Полуничев В.И., Кабин С.В.* Реакторные установки для перспективных атомных плавучих теплоэлектро-станций и судов // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. Т. 2. М.: Академ-Принт, 2015. С. 104–113.
 26. *Перевоицков С.Г., Князевский К.Ю.* Главное – минимизировать эксплуатационные расходы и строительную стоимость атомных ледоколов нового поколения // Судостроение. 2005. № 1. С. 47–48.
 27. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2012.
- ## References
1. Marine Doctrine of the Russian Federation till the year 2020. Approved by the President of the Russian Federation on July 27, 2001, No. 1387, 2015 revision (*in Russian*).
 2. *Ruksha V.* A new stage in Northern Sea Route development // XVIIIth Alexandrov Readings, National Research Center Kur-chatov Institute. February 13, 2012. P. 56–75 (*in Russian*).
 3. *Morskaya politika Rossii* (Marine policy of Russia). Special Issue. 2015. No. 14 (*in Russian*).
 4. *Rodionov N., Vorobyev V., Gabaidulin F.* Nuclear lighter-aborad ship // *Morskoy Flot* (Soviet Shipping Journal). 1982. No. 8. P. 41–47 (*in Russian*).
 5. *Shurpyak V.* IMO Polar Code: preliminary review of first part (safety requirements) // *RS Research Bulletin*. 2015. No. 38–39 (*in Russian*).
 6. *Yanaji A.* Utilization of Nuclear Power in Oceans and its Perspective // International workshop on utilization of nuclear power in oceans // N^oocean 2000. Proceedings Toranomon Pastoral. Tokyo, Japan, February 21–24, 2000. P. 1–6.
 7. *Takamasa T., Kondo K.* Economic potential of nuclear-powered ice-breaking container ship via the North Sea route // International Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans. N^oocean 2000. Proceedings Toranomon Pastoral. Tokyo, Japan, February 21–24, 2000. P. 40–52.
 8. *Fujino M.* Some concepts of future nuclear ship // International Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans. N^oocean 2000. Proceedings Toranomon Pastoral. Tokyo, Japan. February 21–24, 2000. P. 260–268.
 9. *Anashkin V.* International law issues in nuclear shipping. Publishing house of Leningrad University, 1987 (*in Russian*).
 10. *Kashirin V., Chugunov N., Yanchuk V.* Bilibino low-power NPP: development and 36 years of successful operation // Low-power nuclear power plants: a new line in the development of power systems. Materials of Inter-industrial Inter-regional Scientific & technical Conference Development prospects of low-power NPP network in the regions without centralized power supply. Moscow, November 11–12, 2010. P. 227–246 (*in Russian*).
 11. *Petrosyantz A.* Nuclear energy in science and industry. Moscow: Energoatomizdat, 1984 (*in Russian*).
 12. *Vorozhtsov N., Koval G.* Floating nuclear power plants // *Sudostroyeniye za rubezhom* (Naval Engineers Journal). 1975. No. 1. P. 38–51 (*in Russian*).
 13. US plans of low-power floating NPP constructions // *Sudostroyeniye za rubezhom* (Naval Engineers Journal). 1974. No. 7. P. 80–81 (*in Russian*).
 14. *Moysov V., Ryzhkov V.* Development of marine desalination stations based on nuclear power modules // Low-power nuclear power plants: a new line in the development of power systems. Vol. 2. Moscow: Akadem-Print, 2015. P. 139–148 (*in Russian*).

15. *Kovalenko V., Tarasov V.* 70 MW floating nuclear power plant for Chaun-Bilibino network // Transactions of international conference on shipbuilding. Section D. Marine power systems. St. Petersburg, 1994. P. 339–344 (in Russian).
16. *Mitenkov F., Ardabyevsky A., Vasyukov V.* et al. Ultra-safe nuclear steam-generating plant KLT-40 // Energeticheskoye stroitelstvo (Power Engineering). 1993. No. 5. P. 16–21 (in Russian).
17. *Veshnyakov K.B., Kiryushin A.I., Panov Yu.K., Polunichchev V.I.* Floating nuclear heat and power station “Pevec” with KLT-40S type reactor plant for remote regions of Russia // International Workshop on Utilization of Nuclear Power in Oceans. N’ocean 2000. Proceedings, Toranomon Pastoral. Tokyo, Japan, February 21–24, 2000. P. 104–112.
18. *Makeev G.* Development of floating power plants: state of the art and variants of future designs // Low-power nuclear power plants: a new line in the development of power systems. Vol. 2. Moscow: Akadem-Print, 2015. P. 130–138 (in Russian).
19. *Shurochkov M., Sozonyuk V.* Floating nuclear power plants: today and tomorrow // Low-power nuclear power plants: a new line in the development of power systems. Materials of Inter-industrial Inter-regional Scientific & technical Conference Development prospects of low-power NPP network in the regions without centralized power supply. Moscow, November 11–12, 2010. P. 187–192 (in Russian).
20. *Saneev B., Ivanova I., Tuguzova T., Frank M.* Role of low-power NPPs in decentralized power supply zone in the Russian East // Low-power nuclear power plants: a new line in the development of power systems. Materials of Inter-industrial Inter-regional Scientific & technical Conference Development prospects of low-power NPP network in the regions without centralized power supply. Moscow, November 11–12, 2010. P. 88–100 (in Russian).
21. *Vorobyev V., Kaipov R.* Floating nuclear power plant for remote areas in the Russian North and Far East // Sudostroenie (Shipbuilding). 1995. No. 7. P. 26–29 (in Russian).
22. *Petrinin V., Fadeev Yu., Gureeva L., Shmelev I., Lepelkhin A., Udalishev S.* Prospects of nuclear NPPs with low and medium-power reactors // Low-power nuclear power plants: a new line in the development of power systems. Vol. 2. Moscow: Akadem-Print, 2015. P. 36–49 (in Russian).
23. *Zverev D., Pakhomov A., Polunichchev V., Veshnyakov K., Kabin S.* RITM-200: new-generation reactor for a new nuclear icebreaker // Atomic Energy. 2012. Vol. 113. Issue 6. P. 323–328 (in Russian).
24. *Fadeev Yu., Belyaev V., Pakhomov A., Polunichchev V., Veshnyakov K., Turusov A., Vorobyev V.* Enhanced-power reactors for icebreakers // Innovative projects and technologies in nuclear power industry. Compendium of papers, IVth International Scientific & Technical Conference. Moscow, September 27–30, 2016. Vol. 1 (in Russian).
25. *Fadeev Yu., Pakhomov A., Veshnyakov K., Polunichchev V., Kabin S.* Reactors for advanced floating nuclear power stations and ships // Low-power nuclear power plants: a new line in the development of power systems. Vol. 2. Moscow: Akadem-Print, 2015. P. 104–113 (in Russian).
26. *Perevoschikov S., Knyazevsky K.* The main issue – to minimize operational expenditures and building cost of a new generation nuclear-powered icebreakers // Sudostroenie (Shipbuilding). 2005. No. 1. P. 47–48 (in Russian).
27. *RS Rules for the Classification and Construction of Nuclear Ships and Floating Facilities.* St. Petersburg, 2012.

Сведения об авторах

Кудинович Игорь Владиславович, д.т.н., доцент, заместитель начальника 4 отделения – начальник отдела 42 ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-48-06. E-mail: igor_kudinovich@mail.com.

Сутеева Аделина Жанатовна, ведущий инженер, ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-48-33. E-mail: adelina79.as@gmail.com.

Хорошев Виталий Геннадьевич, д.т.н., с.н.с., заместитель генерального директора – начальник 4 отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-48-06. E-mail: V_Horoshev@ksrc.ru.

About the authors

Igor V. Kudinovich, Dr. Sci. (Eng.), Associated Professor, Deputy Head of Division – Head of Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-48-06. E-mail: igor_kudinovich@mail.com.

Adelina Zh. Suteeva, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-48-33. E-mail: adelina79.as@gmail.com.

Vitaly G. Khoroshev, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Deputy Director General – Head of Division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-48-06. E-mail: V_Horoshev@ksrc.ru.