ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, 2021, том 91, № 6, с. 528–540

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

© 2021 г. В. В. Петрунин

Акционерное общество “Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова”, Нижний Новгород, Россия

E-mail: economica@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 18.12.2020 г.
После доработки 18.12.2020 г.
Принята к публикации 27.12.2020 г.

Научный, инженерный и производственный потенциал, созданный в нашей стране в области атомного судостроения, имеет исключительное значение. В атомных судовых технологиях сформировался особый облик реакторных установок, характерными чертами которых стали предельная компактность, повышенная надёжность и живучесть. На основе опыта создания и совершенствования судовых и корабельных реакторов в АО “ОКБМ Африкантов” разработан ряд проектов инновационных реакторных установок для атомных энергоисточников малой мощности. В докладе представлены основные научно-технические и экономические аспекты создания инновационных реакторных установок типа АБВ, КЛТ, РИТМ, ВБЭР.

Ключевые слова: атомные станции малой мощности, реакторные установки, атомные судовые технологии, технические и экономические аспекты.

DOI: 10.31857/S0869587321050182

Уникальный научный, конструкторский и производственно-технологический опыт, накопленный в атомной отрасли при создании нескольких поколений реакторных установок (далее – РУ) – корабельных (для атомных подводных лодок и надводных кораблей), судовых (для атомных ледоколов) – является фундаментальным базисом для развития приоритетного бизнес-направления Госкорпорации “Росатом” – атомных станций малой мощности (далее – АСММ), которые обеспечат эффективное решение назревших проблем энергообеспечения и жизнедеятельности удалённых районов как в России, так и за рубежом [1–3].

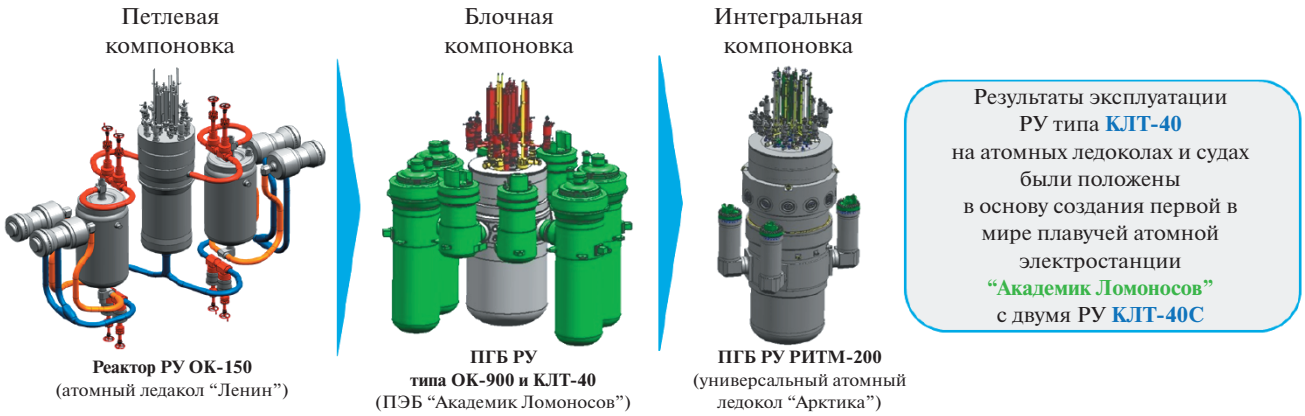
ПЕТРУНИН Виталий Владимирович – доктор технических наук, профессор, первый заместитель генерального директора – генерального конструктора АО “ОКБМ Африкантов”.

В атомных судовых технологиях сформировался российский облик РУ, характерными чертами которого стали предельная компактность, высокая надёжность оборудования и показатели безопасности на уровне современных требований для атомной энергетики. Поскольку уменьшение единичной мощности энергоблока приводит к росту удельных капитальных затрат, именно судовые реакторные технологии позволяют существенно снизить влияние фактора масштаба на экономические показатели и обеспечить конкурентоспособность АСММ в этом сегменте мощностей.

В докладе представлены результаты создания инновационных РУ типа АБВ, КЛТ, РИТМ, ВБЭР, созданных АО “ОКБМ Африкантов” при тесном сотрудничестве с отраслевой и академической наукой, на базе которых Госкорпорация “Росатом” приступила к реализации программы создания плавучих и наземных АСММ.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СУДОВЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

Под технологической эволюцией понимается непрерывный процесс совершенствования кон-



Наименование	ОК-150	ОК-900	КЛТ-40	КЛТ-40С	РИТМ-200	РИТМ-200Н	АВБ-6Э	РИТМ-200М	РИТМ-400
Мощность РУ, МВт	3 × 90	2×159	1×135	2×150	2×175	2×190	1×38	2×175	2×315
Ресурс (проектный), тыс. ч	12	25–60	100	320	320	500	480	480	320
Энергоресурс а.з., ТВт ч	0.4	2.1	2.1	2.1	4.5	8	2.3	11	6
Интервал между перегрузками а.з., лет	2.0 (КИУМ = 0.25)	5.6 (КИУМ = 0.25)	5.5 (КИУМ = 0.25)	2.5 (КИУМ = 0.64)	7.7 (КИУМ = 0.38)	7 (КИУМ = 0.8)	10 (КИУМ = 0.7)	10 (КИУМ = 0.72)	5.7 (КИУМ = 0.38)
Масса РУ в ЗО, т	3017 (3 РУ)	2432 (2 РУ)	1634 (1 РУ)	3740 (2 РУ)	2200 (2 РУ)	2200 (2 РУ)	900 (1 РУ)	2600 (2 РУ)	3890 (2 РУ)
Габаритные размеры, м	11.5×10.4×10.5	7.9×13.5×9.2	8.6×8.6×8.2	12×17.2×12	6×13.2×15.5	∅8.0×19.0	∅5.6×12.2	6.8×14.6×16	9×18.2×17.5
Удельная мощность, кВт/т	89.5	130.6	82.6	80.2	159.1	173.0	42.2	134.6	161.95
Удельная мощность, МВт/м^2	2.26	3	1.83	0.79	4.42	3.0	1.54	3.53	3.85

Рис. 1. Технологическая эволюция судовых реакторных установок

струкции, технологии изготовления, применяемых материалов и эксплуатационных характеристик РУ, основанный на сборе и тщательном анализе работы оборудования и систем на протяжении всего жизненного цикла. Сегодня этот опыт аккумулирован в создании и эксплуатации около 500 корабельных и судовых РУ, суммарная наработка которых составляет порядка 11 000 реакторо-лет, что сравнимо с наработкой всей мировой гражданской атомной энергетики – 12000 реакторо-лет.

Эволюцию судовых РУ можно продемонстрировать на примере выбора компоновочных решений установок для атомных ледоколов, поскольку компоновочная схема РУ имеет принципиальное значение для определения способов и средств обеспечения безопасности, строительных решений, условий эксплуатации и в конечном итоге экономических показателей (рис. 1) [4–6].

Известны три типа компоновочных схем установок: петлевая, блочная, интегральная. Эти схемы приемлемы для всех типов реакторов. Оптимальный выбор в каждом конкретном случае определяется различными факторами, в связи с чем невозможно говорить об универсальных рекомендациях.

Для петлевых РУ характерна значительная пространственная распределённость и большой объём первого контура, наличие трубопроводов большого диаметра, соединяющих основное оборудование: парогенераторы, насосы, теплообменники, компенсаторы объёма и др. Для этой схемы серьёзной проблемой является организация защиты при аварийном разрыве трубопроводов первого контура большого диаметра. Большая часть действующих АЭС используют установки ВВЭР и PWR с петлевой схемой. Такая же схема была применена в установке ОК-150 атомного ледокола “Ленин”.

Очевидное преимущество интегральной компоновки (АБВ-6Э, РИТМ-200Н, РИТМ-200М) – локализация теплоносителя первого контура в одном объёме (в корпусе), отсутствие патрубков и трубопроводов большого диаметра, что уменьшает вероятность аварии с большой течью теплоносителя. С другой стороны, в интегральной компоновке затруднён доступ к оборудованию, размещённому в реакторе, что ограничивает или усложняет ремонтное обслуживание. Поэтому интегральная компоновка предполагает использование высоконадёжного оборудования, созданного на основе решений, подтверждённых эксплуатацией, и прошедшего представительную ресурсную проверку в лабораторных условиях.

Блочная компоновка (КЛТ-40С, ВБЭР), по существу, занимает промежуточное положение между петлевой и интегральной компоновочны-

ПГБ РУ действующих атомных станций

Наименование параметра	Результат
Назначенный ресурс оборудования до заводского ремонта, тыс. ч	↑ в **1.6** раза *(увеличение со 100 тыс. ч до 160 тыс. ч)*
Срок службы заменяемого оборудования, лет	↑ в **1.6** раза *(увеличение с 12 лет до 20 лет)*
Энергоресурс активной зоны, ТВт ч	↑ до **2–4** раз *(увеличение с 2.1 ТВт ч до 4.5. ТВт ч для УАЛ, до 8 ТВт ч – для АСММ)*
Период непрерывной работы, лет	↑ в **3.2** раза *(увеличение с 8000 ч (действующие а/л до 26000 ч))*
Масса двух РУ в пределах ЗО, т	↓ в **1.7** раза *(уменьшение с 3740 т до 2200 т)*
Площадь в пределах ЗО, м^2	↓ в **2.6** раза *(уменьшение с 94.8 м^2 до 36 м^2)*

ПГБ РУ РИТМ-200

Рис. 2. Прогресс судовых реакторных технологий: от блочной РУ КЛТ-40С к интегральной РУ РИТМ-200

ми схемами. Вместо протяжённых трубопроводов первого контура в ней используются короткие патрубки большого диаметра, соединяющие основное оборудование установки (реактор, парогенератор, насосы). Блочная компоновка позволяет уменьшить высоту блока и обеспечивает доступность для ремонтного обслуживания. Отсутствие в интегральной и блочной компоновках трубопроводов большого диаметра исключает аварии со значительной течью теплоносителя и снижает вероятность тяжёлой аварии. Например, в блочной РУ ВБЭР отсутствуют осушение активной зоны, перегрев и разгерметизация оболочек твэлов в максимальной проектной аварии, что имеет место в установках ВВЭР.

Достигнутые показатели прогресса судовых реакторных технологий от блочной РУ КЛТ-40С к интегральной РУ РИТМ-200 приведены на рисунке 2: габариты РУ уменьшены в ~2 раза, а энергоресурс активной зоны увеличен в ~4 раза.

РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЛАВУЧИХ И НАЗЕМНЫХ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

Опыт создания и совершенствования судовых и корабельных реакторов в АО “ОКБМ Африкантов” позволил разработать ряд проектов РУ для автономных атомных энергоисточников малой мощности в диапазоне от 6 до 55 МВт$_э$: АБВ-6Э, КЛТ-40С, РИТМ-200, РИТМ-200Н, РИТМ-200М, РИТМ-400 [1]. Основные характеристики указанных РУ приведены на рисунке 1. Энергоисточники малой мощности предполагают размещение атомной энергетической установки на суше и на несамоходных плавучих средствах.

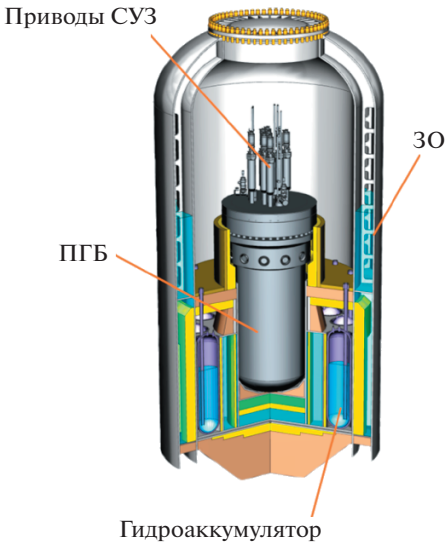
В проекте РУ малой мощности АБВ-6Э применён интегральный водо-водяной реактор тепловой мощностью 38 МВт с естественной циркуляцией теплоносителя и встроенной системой компенсации давления. Особенностью проекта являются работа без перегрузки в течение 10 лет, пассивные системы безопасности и модульная конструкция энергоблока, обеспечивающие минимальные сроки сооружения РУ [6, 7].

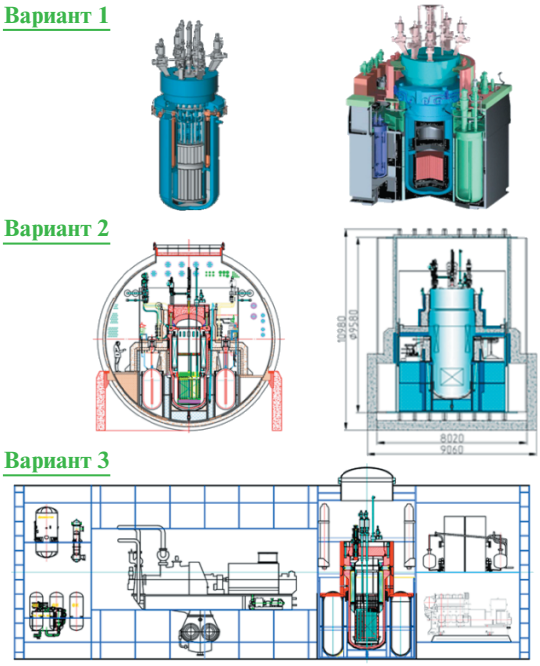
В 2014 г. разработан технический проект плавучего и блочно-транспортабельного энергоблока на базе РУ АБВ-6Э по контракту с Министерством промышленности и торговли РФ. Двухблочная атомная станция с РУ типа АБВ-6 обеспечивает мощность 2 × 8.5 МВт$_э$ при работе в конденсационном режиме и мощность до 2 × 6 МВт$_э$ с отпуском тепла до 2 × 12 Гкал/ч при работе в теплофикационном режиме. Варианты блочно-транспортабельных энергоблоков для АСММ приведены на рисунке 3.

В ноябре 2018 г. осуществлён физический пуск двух реакторов блочного типа КЛТ-40С в составе плавучего энергоблока “Академик Ломоносов” (далее – ПЭБ), а в декабре 2019 г. в городе Певек (Чукотский АО) начала выработку электроэнергии плавучая атомная теплоэлектростанция с ПЭБ “Академик Ломоносов” суммарной электрической мощностью 70 МВт$_э$ (рис. 4) [6–11].

11 февраля 2020 г. в Госкорпорации “Росатом” было подписано Распоряжение о начале реализации пилотного отраслевого проекта “Сооружение атомной станции малой мощности на базе РУ РИТМ-200Н на территории России”. Энергетический пуск пилотной АСММ с РУ РИТМ-200Н запланирован на конец 2027 г. Пилотная АСММ

Тепловая мощность РУ, МВт	38
Давление в первом контуру, МПа	15.7
Паропроизводительность, т/ч	55
Температура на входе/выходе из а.з., °С	247/325
Срок службы незаменяемого оборудования, лет	40
Период непрерывной работы, ч	26000
Энергоресурс активной зоны, ТВт ч	2.3
Максимальное обогащение топлива в активной зоне, %	15.7
Высота, м	12.2
Диаметр, м	5.6
Масса реакторной установки в защитной оболочке, т	900





Крупноблочная поставка парогенерирующего агрегата

Характеристика	Значение
Длина контаймента, м	13
Диаметр контаймента, м	8.5
Масса ПГА, т	до 200
Транспортировка	Автомобильный, водный и ж/д транспорт

Транспортабельный реакторный блок (ТРБ)

Характеристика	Значение
Длина, м	~8
Диаметр, м	~9.6
Масса без учёта съёмной БЗ, т	~820
Транспортировка	Водный транспорт

Транспортабельный моноблок (РУ + ПТУ)

Характеристика	Значение
Длина, м	~28
Диаметр, м	~9.6
Масса с учётом БЗ, т	~2500
Транспортировка	Водный транспорт

Рис. 3. Варианты блочно-транспортабельных энергоблоков для атомных станций малой мощности на базе реакторной установки АБВ-6Э

состоит из двух энергоблоков электрической мощностью 2 × 58 МВт$_э$ (общий вид станции приведён на рисунке 5). Ключевая особенность проекта АСММ – применение реактивных установок интегрального типа РИТМ-200Н, прототипом которой является РУ РИТМ-200 (рис. 6) для универсальных атомных ледоколов (далее – УАЛ, рис. 7), имеющая необходимое расчётно-экспериментальное обоснование и изготавливаемая серийно [8].

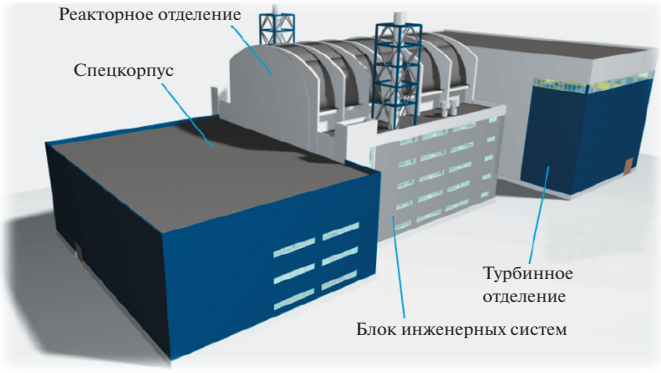
Разработан технический проект РУ РИТМ-400 для уникального атомного ледокола “Лидер” (рис. 8), обеспечивающий круглогодичную навигацию по Северному морскому пути. Согласно Указу Президента РФ от 26.10.2020 г. № 635 утверждена стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечение национальной безопасности на период до 2035 г., которой предписано строительство трёх атомных ледоколов проекта “Лидер” [10]. В перспективе на базе РИТМ-400 возможно создание энергоблоков плавучего и наземного исполнения.

Плавучие атомные станции – мощный фактор стабильности развития регионов, не охваченных

Рис. 4. Плавучий энергетический блок “Академик Ломоносов”

Электрическая мощность (брутто), МВт	2 × 58*
Тепловая мощность, МВт	2 × 1950
КПД АСММ (брутто), %	31
Топливная кампания, лет	до 7
Срок эксплуатации, лет	60
Устойчивая работа в диапазоне, %Nном	30–100
Площадь станции, Га (км^2)	6 (0.06)
Срок строительства АСММ (с начала СМР), лет	4

**Уточняется разработчиком турбоустановки*



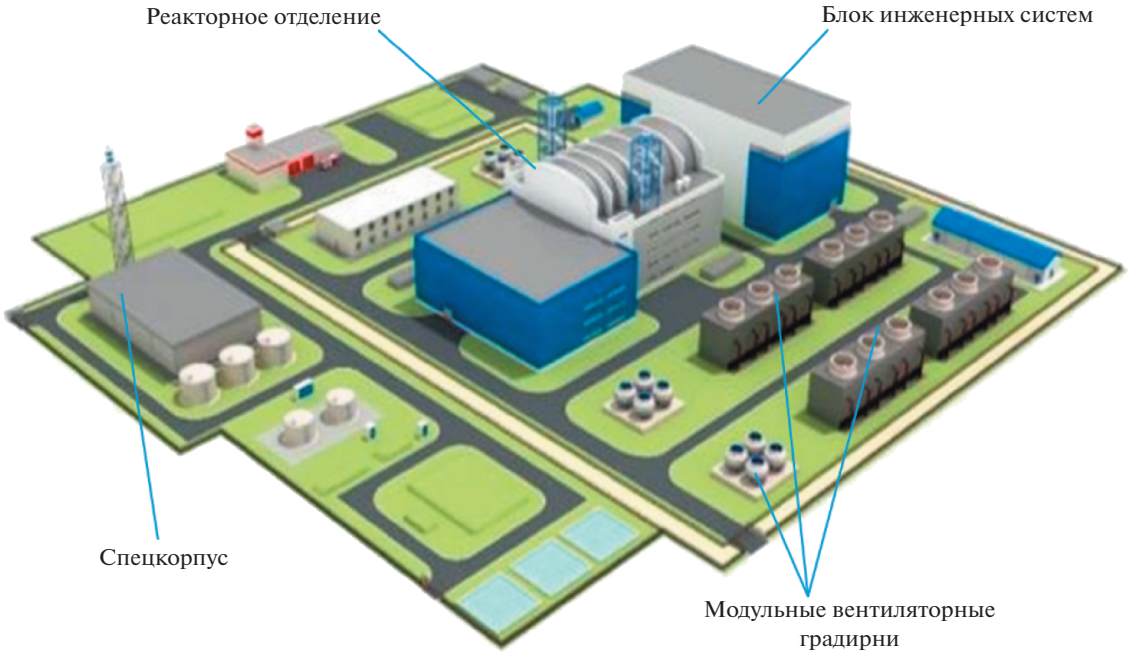


Рис. 5. Общий вид атомной станции малой мощности

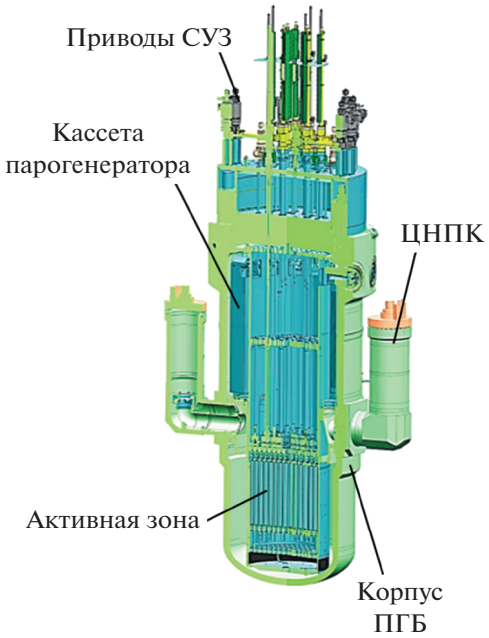


Рис. 6. Парогенерирующий блок реакторных установок РИТМ-200

единой энергетической системой [11]. Следующий шаг в разработке данного направления – проект оптимизированного плавучего энергоблока (далее – ОПЭБ) с РУ РИТМ-200М (прототип – РУ РИТМ-200 для УАЛ) с активной зоной, обладающей высоким энергоресурсом и соответствующей международным требованиям по нераспространению ядерных материалов. В 2020 г. завершается разработка материалов эскизного проекта ОПЭБ (рис. 9).

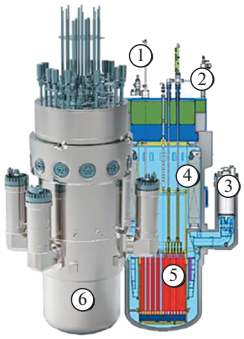
РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

К числу наиболее проработанных для реализации в ближайшей перспективе реакторов средней мощности относятся блочно-модульные реакторные установки типа ВБЭР, разрабатываемые АО “ОКБМ Африкантов” и НИЦ “Курчатовский институт”. Их концепция основана на сочетании технологий транспортных атомных паропроизводящих установок с отработанными в гражданской атомной энергетике решениями по активной зоне и топливному циклу [3, 9]. Особенность проекта – применение унифицированной петли теплообмена, являющейся технологической платформой для реализации мощностного ряда энергоблоков. На основе базового четырёхпетлевого варианта РУ ВБЭР-600 и применения унифицированной петли теплообмена обеспечивается мощностной ряд ВБЭР – 600-450-300 МВт$_э$ (рис. 10).

Процесс создания новых РУ для АСМСМ сопровождается разработкой и реализацией инновационных технических решений и подходов, направленных на повышение технико-экономических показателей и безопасности станции.

Рис. 7. Универсальный атомный ледокол “Арктика” на базе реакторной установки РИТМ-200

Рис. 8. Атомный ледокол “Лидер” на базе РУ РИТМ-400



Общий вид ПГБ
1 – привод АЗ; 2 – привод КГ; 3 – ЦНПК;
4 – парогенератор; 5 – активная зона; 6 – корпус ПГБ

Ключевые особенности проекта

- ✓ Межперегрузочный период – до 10 лет
- ✓ Жизненный цикл ОПЭБ – 60 лет
- ✓ Отсутствие перезагрузки топлива на площадке размещения, перегазрузка топлива происходит на специализированном судостроительном предприятии и совпадает с доковым (средним) ремонтом судна и ключевого оборудования

Наименование параметра	ПЭБ “Академик Ломоносов”	ОПЭБ (эскизный проэкт)
Длина, м	140	112
Ширина, м	30	30
Осадка, м	5.6	5
Водоизмещение (порожнем), т	21000	16580
Тепловая мощность РУ, МВт	2 × 150	2 × 175
Электрическая мощность (нетто), МВт	2 × 35	2 × 50
Паропроизводительность, т/ч	240	280
Энергоресурс активной зоны, ТВт ч	2.1	11
Перегрузка	раз в 2.5 ÷ 3 год на судне	раз в 100 лет на ФГУП “Атомфлот”
Целевой показатель LCOE, $/МВт ч	–	90

Рис. 9. ОПЭБ на базе реакторной установки РИТМ-200М

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОСТИЖЕНИЯ, РЕАЛИЗОВАННЫЕ В ПРОЕКТАХ РУ, И НОВЫЕ ЗАДАЧИ

Совершенствование топлива и активных зон. При создании активных зон РУ АСММ (АБВ-6Э, КЛТ-40С, РИТМ-200Н, РИТМ-200М, РИТМ-400) широко используется опыт и результаты эксплуатации активных зон действующих атомных ледоколов, для которых за последние 20 лет достигнут и подтверждён высокий уровень надёжности, радиационно-экологической безопасности и экономичности:

- не отмечено ни одного отказа активных зон в пределах назначенного ресурса;
- дозовые нагрузки персонала снижены на два порядка относительно предшествующего периода;
- состояние всех активных зон на момент завершения эксплуатации не выходит за уровень “газовой неплотности”;

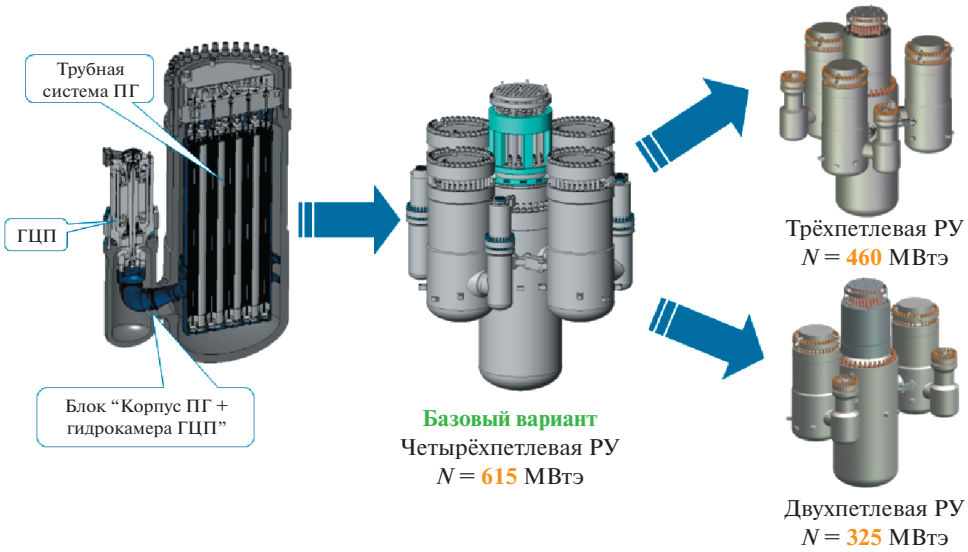
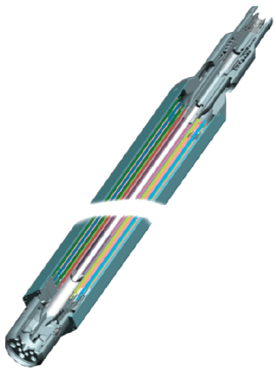


Рис. 10. Мощностной ряд ВБЭР



Наименование параметра	14-14 (ПЭБ)	14-15-1 (УАЛ)	АСММ	ОПЭБ
Количество ТВС, шт.	121	199	199	241
Высота активной зоны, мм	1200	1200	1650	1650
Энергоресурс, ТВт ч	**2.1**	**4.5**	**8**	**11**
Кампания, ч	14000 (*Nm* = 150 МВт)	25700 (*Nm* = 175 МВт)	48480 (*Nm* = 190 МВт)	57000 (*Nm* = 175 МВт)
Тип топлива	Металло-керамическое	Интерметал-лидное	Металлокерамическое	
Максимальное обогащение по U^{235}, %	15.7	–	19.6	19.6
Материал оболочки твэл	Сплав Э110	Сплав 42ХНМ	Сплав 42ХНМ	Сплав 42ХНМ
Доля циркониевых сплавов, %	**19.4**	**11.9**	**10.4**	**10**
Изготовлено активных зон, шт.	2	6	–	–

Проведены реакторные испытания экспериментальной сборки **ПТВС-31М** в реакторе МИР до глубины выгорания **109.5** МВт сут./кг U (**1.05** г/см^3) при требуемой величине **108.5** МВт сут./кг U (**1.04** г/см^3)

Рис. 11. Характеристики активных зон УАЛ, ПЭБ, ОПЭБ и АСММ

• на базе данных эксплуатации 20 активных зон (~25 тыс. твэлов) практически обеспечен нулевой уровень отказа.

Данные показатели достигнуты в условиях жёстких манёвренных режимов атомных ледоколов, существенно отличающихся от режимов эксплуатации топлива ВВЭР, что обусловливает особенности конструкции и технологии изготовления твэлов транспортных установок.

Работы по активным зонам ведутся с целью увеличения энергоресурса до 8–11 ТВт·ч, совершенствования топливной композиции и материалов оболочек твэлов, элементной базы активной зоны – твэлов, СВП, ПЭЛ и стержней АЗ – с проведением необходимого комплекса НИОКР и верификацией, аттестацией кодов нейтронно-физических расчётов и теплогидравлических кодов (рис. 11).

Конструкция ТВС активной зоны ВБЭР-600 разработана на базе конструкции ТВСА и её модификаций в активных зонах РУ ВВЭР-1000. В ТВС ВБЭР-600 применены технические решения и конструктивные элементы, апробированные опытом эксплуатации ТВСА, ТВСА-12, ТВСА-PLUS, ТВСА-АЛЬФА, ТВСА-5М. Данная конструкция обеспечивает геометрическую стабильность ТВС и, соответственно, стабильность теплофизических и нейтронно-физических характеристик активной зоны, а также исключает заклинивание ПЭЛ РО СУЗ в направляющих каналах, что в свою очередь позволяет обеспечить

Таблица 1. Основные параметры обеспечения безопасности РУ КЛТ-40С и РУ РИТМ-200Н

Характеристика	РУ КЛТ-40С ПЭБ	РУ РИТМ-200Н АСММ
Обеспечение расхолаживания при полном обесточивании (при герметичном первом контуре)	24 часа	Без ограничений
Резерв времени до начала осушения активной зоны при аварии типа LOCA с обесточиванием	2 часа	Без ограничений
Конструктивная особенность ПГБ – продолжительность подпитки при авариях типа LOCA	4 месяца	Менее 1 суток

надёжность и безопасность активной зоны в процессе эксплуатации.

Для обоснования работоспособности конструкции ТВС ВБЭР-600 и подтверждения её концепции использованы результаты комплекса дореакторных прочностных, вибрационных, теплофизических и гидравлических испытаний фрагментов и полномасштабных макетов ТВСА на стендах АО “ОКБМ Африкантов” и АО “МСЗ”. Работоспособность конструкции ТВСА, её устойчивость к формоизменению подтверждена опытом успешной эксплуатации на Калининской АЭС, АЭС Украины и Болгарии.

В РУ ВБЭР исключена опасность пароциркониевой реакции в сценарии максимальной проектной аварии и, соответственно, необходимость применения в активной зоне материалов, не склонных к пароводяной реакции (“толерантное” топливо). Данное качество установок ВБЭР существенно повышает их технико-экономическую привлекательность и с учётом прогнозируемой продолжительности НИОКР по толерантному топливу (10 лет) обусловливает возможность реализации в ближайшее время.

Инновационные пассивные системы безопасности. Концепция безопасности включает ряд мер.

Первое – предотвращение нарушений нормальной эксплуатации реакторных установок, что предполагает разработку проекта на основе консервативного подхода с применением апробированных технических решений, развитые свойства внутренней самозащищённости (отрицательные обратные связи по реактивности, интегральная компоновка, высокая теплоаккумулирующая способность, сужающие устройства, верхнее подключение трубопроводов).

Второе – предотвращение проектных аварий, то есть своевременное выявление отклонений от нормальной эксплуатации и их устранение, управление при эксплуатации с отклонениями (структура и алгоритмы систем управления, резервирование оборудования нормальной эксплуатации).

Третье – применение активных и пассивных систем безопасности. При работе активных систем в авариях с разгерметизацией первого контура в течение первых суток температура снижается ниже 100°С – истечение прекращается. При работе пассивных систем при герметичном первом контуре время работы систем не ограничено, в авариях с разгерметизацией первого контура – более 72 часов.

Четвёртое – управление запроектными авариями предполагает использование специальных технических средств (система аварийного охлаждения активной зоны с гидроаккумуляторами, пассивная система отвода остаточных тепловыделений, система заполнения кессона реактора водой) и самосрабатывающих устройств (ГУП, РЭД). Ограничение последствий запроектных аварий (удержание расплава активной зоны в корпусе реактора , исключение образования критических масс при плавлении, а также образования водорода, снижение аварийного давления в защитной оболочке).

Критерии и целевые ориентиры безопасности АСММ:

• санитарно-защитная зона в пределах площадки АСММ;

• дозовая нагрузка на население при нормальной эксплуатации – менее 0.01% естественного фона;

• суммарная вероятность тяжёлых аварий не превышает 10^{-6} на реактор в течение одного года (согласно НД – 10^{-5});

• суммарная вероятность большого аварийного выброса, при котором необходимо выполнение мер защиты населения, не превышает 10^{-7} на реактор в течение одного года (согласно НД – 10^{-7}).

Основные параметры обеспечения безопасности РУ КЛТ-40С и РУ РИТМ-200Н приведены в таблице 1.

Среди целей исследования инновационных пассивных систем безопасности следует выделить:

• обеспечение высокого уровня ядерной безопасности АСММ при авариях с полным обесточиванием, включая аварии LOCA и тяжёлую аварию;

• обеспечение функционирования без ограничений по длительности работы и без необходимости вмешательства персонала;

• исключение тяжёлой аварии при аварии LOCA с наложением полного обесточивания продолжительностью не менее 72 часов (фукусимский сценарий) без управляющих мероприятий и использования внешних источников энергии;

• выполнение функций как аварийной, так и нормальной эксплуатации, упрощение структуры и состава систем безопасности;

• обеспечение высокой отказоустойчивости пассивных систем за счёт независимости и резервирования работы оборудования.

В комплексе такими свойствами в настоящее время не обладает ни одна из существующих систем, используемых в ядерной энергетике. Создание такой системы придаст реакторным установкам свойства повышенной безопасности и обеспечит недопущение тяжёлых аварий.

Увеличение ресурса оборудования реакторных установок. В настоящее время проектный срок службы действующих РУ атомных ледоколов составляет 30 лет. Увеличение срока службы незаменяемого оборудования до 40 или до 60 лет с соответствующим увеличением срока службы заменяемого оборудования позволяет существенно улучшить экономические показатели АСМСМ.

В настоящее время, как свидетельствует опыт эксплуатации атомных ледоколов, для этого есть все основания:

• корпус реактора: достигнутый срок использования – 33 года, наработка 182000 ч при флюенсе 4.5×10^{20} нейтрон/см^2;

• парогенератор: 33 года, наработка 177000 ч;

• ЦНПК: 33 года, наработка 185470 ч;

• приводы СУЗ: 33 года, наработка 182000 ч.

В настоящее время в АО “ОКБМ Африкантов” выполняются НИОКР для обоснования повышения назначенных ресурсных характеристик основного оборудования АСММ с РУ РИТМ-200 при сроке службы РУ 60 лет. Для обоснования применяется технология численного эксперимента (взамен физического) на основе цифровых двойников оборудования. Ресурсные характеристики оборудования обосновываются таким образом, чтобы их применение в индивидуальных проектах различных АСММ не требовало изменений базовых концептуальных, конструктивных и компоновочных решений.

Технологии математического моделирования на суперЭВМ и создание цифровых двойников. Создание перспективных РУ малой и средней мощности требует нового подхода к расчётному обоснованию проектов, внедрения современных средств цифровизации, комплексных систем компьютерного проектирования, расчётного анализа и обоснования и подготовки производства.

С этой целью в АО “ОКБМ Африкантов” разработана технология суперкомпьютерного двойника ЯЭУ различного назначения. Суперкомпьютерный двойник ЯЭУ может быть использован на всех этапах жизненного цикла изделия и позволяет:

• повысить качество и безопасность вновь разрабатываемых проектов;

• сократить количество дорогостоящих испытаний;

• сократить сроки и стоимость проектирования новых объектов.

АНАЛИЗ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ И МАСШТАБЫ РЕАЛИЗАЦИИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Маркетинговые исследования, проведённые АО “РАОС”, показывают, что потенциальный объём доступного мирового рынка для АСММ (наземного исполнения) в базовом варианте оценивается от 20.3 ГВт до 83.0 ГВт в оптимистическом сценарии. Ёмкость доступного мирового рынка ОПЭБ в базовом варианте оценивается в 4.1 ГВт.

Ёмкость доступного рынка электроэнергии связана с показателем LCOE (полная удельная стоимость производства единицы электрической энергии) энергоисточника следующим образом:

целевой показатель LCOE, $/МВт·ч – 90 (сценарий 1) или 110 (сценарий 2);

доступный рынок, ГВт – 23 (сценарий 1) или 10 (сценарий 2);

объём рынка двухблочных АСММ на базе РУ РИТМ-200Н, шт. – ~230 (сценарий 1) или ~100 (сценарий 2).

Анализ конкурентоспособности АСММ с различными источниками генерации аналогичной мощности (углеводородное топливо, солнечная и ветровая энергетика, энергия приливов) показал, что для уверенного вхождения на рынок малых мощностей для АСММ должен быть обеспечен целевой LCOE не выше 90 $/МВт·ч (5400 руб./МВт·ч) при ставке дисконтирования 7%. На данный момент технико-экономические показатели АСММ на базе РУ РИТМ-200Н, РИТМ-400 и ОПЭБ на базе РУ РИТМ-200М оце-

Таблица 2. Экономические показатели АСММ на базе РУ РИТМ-200Н, РИТМ-400, ОПЭБ на базе РУ РИТМ-200М

Наименование параметра	РУ РИТМ-200Н АСММ	РУ РИТМ-200М ОПЭБ	РУ РИТМ-400 АСММ
Мощность тепловая/электрическая, МВт	190/58	175/55	350/110
Обогащение UO_2, %	19.7	19.7	–
Кампания топлива, эфф. сут.	2020	2620	795
Масса и габариты РУ	2020 т (на 2 РУ) ∅8.0 × 19.0	2600 т (на 2 РУ) 6.8 × 14.6 × 16	3890 т (на 2 РУ) 9 × 18.2 × 17.5
Удельные капитальные затраты без НДС, $/кВт$_э$ (в ценах на 01.01.2020 г. без учёта стоимости а.з.)	АСММ 6400* (для площадки Билибино)	ОПЭБ 4300** БГТС ~ 800*** Итого Σ = 5100	АСММ 5400÷5800
Срок создания головной РУ, лет	4 (серийная РУ – 3)	3÷3.5 (серийная РУ – 3)	5 (серийная РУ – 3)
Срок сооружения АСММ, ОПЭБ, лет	6.5÷7	7.5÷8	8
Срок службы, лет	60	60	60
LCOE, цент/кВт·ч (в ценах на 01.01.2020 г.при d = 7%, КИУМ = 0.8)	14.2÷12.6 (при КИУМ=0.9)	13.4	10.9÷11.8 (концептуальные оценки)

*Исходные данные (ИД) АО РАОС.
**ИД ПАО “ЦКБ “Айсберг”.
***ИД АО “Атомэнерго”.

ниваются от 10 до 14 цент/кВт·ч в зависимости от коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) (табл. 2), продолжается дальнейшая оптимизация проектов.

Следует отметить, что при сравнении АСММ с потенциальными конкурентами проект РУ РИТМ-200 обладает существенными преимуществами по референтности, топливу, манёвренным характеристикам (табл. 3) [3]. В ближайшей перспективе, согласно стратегии развития УАЛ, АСММ, ОПЭБ до 2030 г., предусмотрено изготовление ~ 20 РУ серии РИТМ:

• 4 РУ для 4-го и 5-го УАЛ (2024 и 2025 гг.);

• 6 РУ для трёх атомных ледоколов “Лидер” (2028 г., 2030 и 2035 гг.);

• 2 РУ для пилотной АСММ в Якутии (2027 г.);

• 16 РУ для ОПЭБ “Энергофлот” (два РУ к 2028 г., далее по две РУ каждый год) или 10 РУ для ОПЭБ “Баимский ГОК” (две РУ к 2026 г., далее по одной РУ каждый год).

* * *

В проектах инновационных реакторных установок для атомных энергоисточников малой и средней мощности типа АБВ, КЛТ, РИТМ, ВБЭР реализован уникальный научно-технический и производственный потенциал ядерных судовых технологий для решения актуальных задач атомной энергетики – создания наземных и плавучих энергоблоков с небольшими сроками реализации и конкурентоспособными технико-экономическими показателями. Разработанный мощностной ряд РУ позволяет на базе унифицированных проектов создавать атомные станции для широкого круга потребителей как внутри России, так и за рубежом, а маркетинговые исследования рынка показывают, что данный тип энергоисточников будет широко востребован.

Несмотря на большой опыт создания и эксплуатации судовых и корабельных РУ, можно выделить комплекс научно-технических задач, решение которых конструкторским и научным сообществом позволит достичь уникальных результатов с целью обеспечения потребительских качеств АСММ. К числу таких задач следует отнести:

• достижение срока службы всего оборудования РУ на уровне 60 лет и более за счёт создания и применения новых материалов, исследования влияния пульсаций температур на прочностные характеристики, создания виртуального математического моделирования работы оборудования в соответствии с моделью эксплуатации на всём жизненном цикле;

Таблица 3. Сравнение АСММ на базе РУ РИТМ-200Н с потенциальными конкурентами

Критерии	РИТМ-200	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, Nт/Nэ, МВт	190/58	385/125	200/50	330/100	160/50
Стадия разработки	РКД, серийное изготовление для УАЛ	Basic design (технический проект)	Preliminary design	Certified (одобренный типовой проект)	На рассмотрении национального регулятора
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 – парогенератор	60 лет – корпус реактора Парогенератор – данные отсутствуют	40 лет – корпус реактора Парогенератор – данные отсутствуют	60 лет – корпус реактора 15 лет – парогенератор	40 лет – корпус реактора Парогенератор – 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 ПГБ, В × Д, м	8.5 × 3.3	10 × 3.35	7.2 × 2.2 (реактор блока)	18.5 × 6.5	17.8 × 3
Манёвренность	Топливо обеспечивает манёвренные режимы 10÷100% со скоростью 6% Nном/мин.	Используемое топливо ограничивает возможности маневрирования (опыт PWR)			

• обеспечение показателей безопасности АСММ на уровне требований к РУ четвёртого поколения благодаря созданию уникальных пассивных систем безопасности, обеспечивающих расхолаживание в тяжёлых авариях неограниченное время; исключение плавления топлива в активной зоне и образования водорода;

• совершенствование конструкции активных зон и топлива с целью увеличения энергозапаса, обеспечивающего работу РУ 10 лет и более без перегрузки топлива; дальнейшее повышение выгорания топлива; применение материалов, исключающих пароциркониевую реакцию в тяжёлых авариях (“толерантное” топливо);

• применение технологий суперЭВМ и создание цифровых двойников; проведение комплекса уникальных экспериментов для верификации CFD-кодов; исследование аварийных режимов с учётом тонких эффектов по стратификации теплоносителя и конвективной диффузии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / Под ред. академика РАН А.А. Саркисова. М.: Наука, 2011.
2. *Саркисов А.А., Антипов С.В., Смоленцев Д.О. и др.* Малая атомная энергетика в контексте трансформации электроэнергетических систем // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2020. № 4. С. 5–14.
3. Атомные станции малой мощности: новое направление развития науки. Т. 2 / Под ред. академика РАН А.А. Саркисова. М.: Академ-Принт, 2015.
4. *Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Гуреева Л.В., Скородумов С.Е.* Проекты атомных станций малой и средней мощности, направления их технико-экономической оптимизации // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики / Под ред. академика РАН А.А. Саркисова. М.: Наука, 2011. С. 182–186.
5. *Петрунин В.В., Гуреева Л.В., Фадеев Ю.П. и др.* Перспективы развития атомных станций с реакторами малой и средней мощности // Атомные станции малой мощности: новое направление развития науки. Т. 2 / Под ред. академика РАН А.А. Саркисова. М.: Академ-Принт, 2015. С. 36–49.
6. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2018 Edition.
7. *Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н., Полуничев В.И., Турусов А.Ю.* АСММ в плавучем и блочно-транспортабельном исполнении для энергообеспечения регионов Арктической зоны // Сборник докладов Третьей Международной научно-технической конференции. Т. 2. М.: НИКИЭТ, 2014. С. 85–91.
8. *Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н. и др.* Обликовый проект АСММ с РУ РИТМ-200 // Атомная энергия. 2018. Т. 125. Вып. 6. С. 323–327.
9. *Арефьев А.Е., Кураченков А.В., Петрунин В.В., Фадеев Ю.П.* Реакторная установка ВБЭР-600 для энергоблоков средней мощности. Основные схемно-конструктивные решения и характеристики // Сборник пленарных и секционных докладов Десятой Международной научно-технической конференции “Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики”. М.: Росэнергоатом, 2016. С. 673–677.
10. *Зверев Д.Л., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н. и др.* Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние // Атомная энергия. 2020. Т. 129. Вып. 1. С. 29–37.
11. *Беляев В.М., Большухин М.А., Пахомов А.Н. и др.* Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направления дальнейшего развития // Атомная энергия. 2020. Т. 129. Вып. 1. С. 37–43.