



ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ

Научно-технические и экономические аспекты создания инновационных реакторных установок для атомных станций малой и средней мощности

(В.В. Петрунин, С.А. Фатеев, А.В. Кураченков, Д.В. Щекин)

Международная конференция «XVI Забабахинские научные чтения»

Докладчик: Петрунин Виталий Владимирович

Первый заместитель генерального директора – генерального конструктора АО «ОКБМ Африкантов», д.т.н., профессор заведующий базовой кафедрой «Конструирование атомных установок» ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»

г. Снежинск, 29 мая 2023 года

ЦЕЛЬ ДОКЛАДА

Представить информацию об истории развития, современных тенденциях и проектах атомных станций малой и средней мощности (АСММ и АССМ).

СТРУКТУРА ДОКЛАДА

1. Термины и определения.
2. Краткий обзор научно-производственного предприятия АО «ОКБМ Африкантов».
3. История создания АСММ, опыт ОКБМ и других предприятий в проектах АСММ.
4. Мощностной ряд реакторных установок.
5. Судовые реакторные установки. Реакторные установки типа РИТМ.
6. Эволюция транспортных судовых установок.
7. Проект ПЭБ «Академик Ломоносов». Проект МПЭБ с РУ РИТМ-200С.
8. Проект ОПЭБ с РУ РИТМ-200М. Проект ПЭБ с РУ РИТМ-400М.
9. Проект наземной АСММ с РУ РИТМ-200Н.
10. Характеристики активных зон УАЛ, ПЭБ, ОПЭБ и АСММ.
11. НИОКР по АСММ. Стенд инновационной САР. Стенд СПОТ ЗО.
12. Суперкомпьютерные технологии. Цифровой двойник ЯЭУ.
13. Научно-технические задачи.
14. Обеспечение проекта АСММ нормативной базой.
15. Реакторные установки ВБЭР блочного типа для АСММ.
16. Реакторные установки АБВ, АСТ, ВТГР и другие.
17. Техничко-экономические показатели АСММ.
18. Заключение

В соответствии с классификацией МАГАТЭ к реакторам малой мощности относятся установки мощностью до **300 МВт_э**, к средней мощности - от **300 МВт(э)** до **700 МВт(э)**, реакторы мощностью более **700 МВт_э** относятся к РУ большой мощности (*Innovative Small and Medium Sized Reactors: Design Features, Safety Approaches and R&D Trends, IAEA-TECDOC-1451, IAEA, Vienna .2005*).

Малые модульные реакторы - Small Modular Reactors (SMR) представляют собой реакторы нового поколения, предназначенные для выработки электроэнергии, как правило, мощностью до 300 МВт (э), компоненты и системы которых могут быть изготовлены на заводе, а затем транспортированы в виде модулей на площадки для установки (*Advances in Small Modular Reactor Technology Developments (2020). 2022 Edition. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*).

Транспортабельная атомная электростанция - Transportable nuclear power plants (TNPP) - атомная электростанция, состоящая из одного или нескольких ядерных реакторов с загруженным ядерным топливом, который(е) транспортируется в остановленном состоянии, а также другие системы и компоненты, транспортируемые совместно с ядерным реактором (*рабочая группа МАГАТЭ по транспортабельным реакторам - WG TNPP*).

Атомная станция теплоснабжения – атомная станция, предназначенная для производства тепловой энергии для целей отопления и горячего водоснабжения («*Общие положения обеспечения безопасности атомных станций*». НП-001-15).

Атомная электротехнологическая станция – атомная станция, предназначенная для производства электроэнергии и энергии для технологических целей («*Общие положения обеспечения безопасности атомных станций*».НП-001-15)

АО «ОКБМ Африкантов» – научно-производственный центр атомного машиностроения Госкорпорации «Росатом»



Крупный научно-производственный центр Госкорпорации «Росатом» входит в контур управления АО «Атомэнергомаш»

Дата образования:

27 декабря 1945 г.

Награды:

1960 г. – Орден Ленина.

1985 г. – Орден Октябрьской Революции.



АО «ОКБМ Африкантов» – разработчик, изготовитель, комплектный поставщик ядерных энергетических установок и высокотехнологической продукции для смежных отраслей экономики.

Располагает многопрофильным конструкторским коллективом, собственной исследовательской, экспериментальной и производственной базой.



МИССИЯ – служить национальным интересам, разрабатывать и поставлять на рынок качественные высокотехнологичные решения и продукцию

Персонал	4 281 человек*
• конструкторы и технологи	1 142 человек
• инженеры-испытатели	142 человека
• рабочие и мастера	1 617 человек
• вспомогательные службы	1 293 человек
• руководство	87 человека
Средний возраст	43 года
Доля сотрудников до 35 лет	26 %
Сотрудники, имеющие ученые степени и звания	1 академик РАН
	17 докторов наук
	82 кандидата наук
	5 профессоров
	9 доцентов
Премии Правительства в области науки и техники	49 премий 102 лауреат
Заслуженные деятели науки и техники	70 человек

*Фактическая среднесписочная численность работников предприятия на 31.12.2022 г.

Система подготовки кадров в АО «ОКБМ Африкантов»

2009 г. – ОКБМ Африкантов получена лицензия на осуществление образовательной деятельности в аспирантуре



В АО «ОКБМ Африкантов» более 14 лет успешно функционирует базовая кафедра **«Конструирование атомных установок»** ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»

Заведующий кафедрой –
Петрунин Виталий Владимирович,
д.т.н., профессор

Ежегодно проходят обучение
~ **25** студентов, зачисленных
на базовую кафедру
по результатам конкурсного отбора

Аспирантура по специальностям:

- «Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности»;
- «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

прошло обучение
127
аспирантов и соискателей

Объединенный Диссертационный Совет
АО «ОКБМ Африкантов» и ФГБОУ ВО
«НГТУ им. Р.Е. Алексеева» по защите
кандидатских и докторских диссертаций

27 специалистов защитили
диссертации на соискание
степени к.т.н.

Председатель совета Д.999.001.02 –
Дмитриев С.М., д.т.н., профессор

Председатель совета ДСО.999.003.02 –
Петрунин В.В., д.т.н., профессор

2 специалиста защитили
диссертации на соискание
степени доктора наук
(2011-2020 гг.)

- ✓ Обучение квалифицированных рабочих на базе Ресурсного центра Государственного образовательного учреждения среднего профессионального образования «Сормовский механический техникум».
- ✓ Подготовка персонала транспортных ЯЭУ и АС к квалифицированному обслуживанию и эксплуатации перегрузочного оборудования, соблюдению требований ЯРБ при выполнении работ по перезарядке активных зон и обращении с ЯТ.
- ✓ Соглашения о сотрудничестве с ВУЗами.

История создания АСММ в СССР

Систематическая работа в области использования для энергоснабжения в удаленных изолированных районах страны ядерных энергоисточников была начата в середине 50-х годов.

До 1965 г. были построены и пущены в эксплуатацию опытно-демонстрационные атомные станции малой мощности (АСММ).

- ✓ **27 июня 1954 года в посёлке Обнинское Калужской области была выведена на проектную мощность первая в мире атомная электростанция с реактором АМ-1 мощностью 5 МВт.**
- ✓ *В 1961 – 1965 гг. прошёл полевые испытания опытный образец «ТЭС-3». Её составляли четыре гусеничных самоходных транспортёра на усиленной базе тяжёлого танка Т-10 (с дополнительными катками и более широкими гусеницами).*
- ✓ *В 1963 г. в НИИАР введена в эксплуатацию экспериментальная установка АРБУС с органическим теплоносителем.*
- ✓ *26 апреля 1964 года пуск энергоблока на быстрых нейтронах АМБ-100 (Вторая атомная электростанция в СССР). 01.12.1969 года пуск энергоблока на быстрых нейтронах АМБ-200.*
- ✓ *В 1965 г. в НИИАР введен в эксплуатацию водяной кипящий реактор ВК-50.*
- ✓ *В январе 1974 года ввод первого энергоблока Билибинской АЭС, обеспечивающей жизнедеятельность горнорудных и золотодобывающих предприятий Чукотки.*
- ✓ *В середине 80-х годов в Белоруссии был практически готов колёсный вариант малой АЭС «Памир», базирующийся на шасси МАЗ-537 «Ураган».*
- ✓ *В 1982 – 2003 гг. введена в действие и прошла комплекс испытаний атомная термоэлектрическая установка «Гамма» электрической мощностью 6,6 кВт.*
- ✓ *В 1994 г. начато рабочее проектирование и строительство ПАЭС «Волнолом-3» с реакторной установкой АБВ-67-01.*

Характеристики первых АСММ

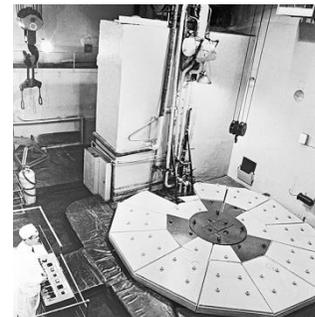


ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ

Наименование станции	Тип реактора	Тепловая мощность реактора, МВт	Мощность энергоблока, эл./тепл., МВт	Кол. Блоков	Место строительства, год пуска	Разра- ботчик РУ
АМ-1	Водо-графитовый канальный	30	5 / -	1	г. Обнинск, 1954 г.	ФЭИ
ТЭС-3	Водо-водяной под давлением	11	1,5 / -	1	г. Обнинск, 1961 г.	ФЭИ
АРБУС (АСТ-1)	Органо-органич. (газойль)	5	0,75 / -	1	г. Димитровград, 1963 г.	НИКИЭТ
АМБ-100, АМБ-200	Водо-графитовый кипящий	285 530	108 / - 160 / -	1 1	г. Заречный 26.04.1964 г. 01.12.1969 г.	НИКИЭТ
ВК-50	Водо-водяной кипящий	250	50 / -	1	г. Димитровград, 1965 г.	ОКБГП
Гамма	Водо-водяной под давлением	0,22	0,0066 / -	1	г. Москва, 1982 г.	РНЦ КИ
Билибинская АТЭЦ	Водо-графитовый канальный	62	12 / 17,5 - 29	4	г. Билибино, 1974-1976 гг.	НИКИЭТ
АЭС «Памир»	Газожидкостный (тетраоксид диазота)	5	0,63	1	Институт ЯЭ АН БССР 1985 г.	СКБ ИЯЭ АН БССР
ПАТЭС «ВОЛНОЛОМ» с РУ АБВ-67-01	Водо-водяной под давлением	38	9 - 6 / 0 - 12	2	Разработка РД и сооружение остановлены в 1994 г.	ОКБМ

Первая в мире атомная электростанция АМ-1 и первая атомная станция теплоснабжения АСТ-1

- Атомная электростанция **5** МВт на основе водо-графитового канального реактора (АМ-1) тепловой мощностью **30** МВт, пущена в г. Обнинск 27 июня 1954 г.
Разработчик РУ ФЭИ.
- Габариты реактора диаметр 3 м высота 4,5 м ($P = 100$ атм.).
- Для отвода выделяющегося в твэлах тепла на первой АЭС предусматривались два циркуляционных контура.
- Первый контур герметичный. В нем вода (теплоноситель) подается сверху в каждый топливный канал, где она нагревается, затем поступает в теплообменник - парогенератор, после охлаждения в котором насосы возвращают ее в реактор.
- Во втором контуре, в парогенераторе, образуется пар, приводящий в действие обычную турбину. Таким образом, энергетический реактор заменяет собой паровой котел тепловой электростанции. Поэтому его часто называют парогенерирующей ядерно-энергетической установкой.



Атомная электростанция АМ-1 (г. Обнинск)



- Атомная реакторная блочная установка (АРБУС) на основе реактора мощностью **5** МВт с органическим теплоносителем, пущена в НИИАР в сентябре 1963 г.
Разработчик РУ НИКИЭТ.
- Габариты реактора диаметр 1,34 м высота 4,37 м.
- Планировалось использование установки АРБУС в Антарктиде.
- С 1979 г. (после реконструкции) установка получила название АСТ-1, мощность реактора была повышена до 8,1 МВт АСТ-1 до останова в 1988 г. использовалась для теплоснабжения НИИАР.



Атомная станция теплоснабжения (НИАР)

Мощностной ряд РУ для АСММ разработки ОКБМ

0,05-1,5 МВт_э

1,0-5,0 МВт_э

8-25 МВт_э

20-50 МВт_э

ЯТЭС

$N_{\text{теп.}} 7,5 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 0,5 \text{ МВт}$

Ядерная термоэлектрическая установка для обеспечения автономного теплового и электрического снабжения объектов

Статус: Разработка конструктивного облика ЯТЭС (2016 г.)

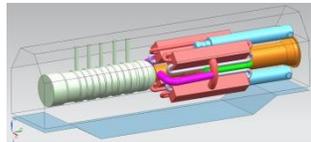


РУ для АТУ

$N_{\text{теп.}} 15 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 5 \text{ МВт}$

Проект реакторной энергетической установки для питания электроэнергией тяговых двигателей локомотивов

Статус: Поисковые НИР (2013 г.)

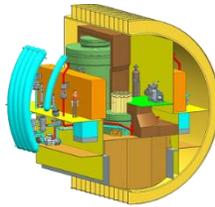


ПНАЭМ-Г

$N_{\text{теп.}} 20 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 8,4 \text{ МВт}$

Проект подводного обитаемого автономного энергетического модуля для энергоснабжения объектов освоения Арктического шельфа

Статус: Техническое предложение (2013 г.)

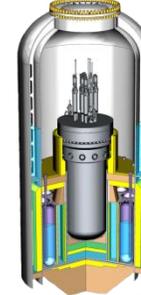


АБВ-6Э

$N_{\text{теп.}} 38 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 9,5 \text{ МВт}$

Унифицированные РУ с реакторами интегрального типа и 100 % естественной циркуляцией первого контура для наземных и плавучих АС

Статус: Разработан техпроект плавучего и блочно-транспортного энергоблока по контракту с Минпромторгом (2014 г.)

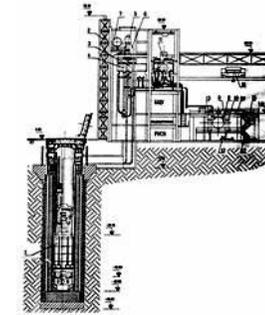


МБРУ-12

$N_{\text{теп.}} 48 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 12 \text{ МВт}$

Малогабаритная реакторная установка МБРУ-12

Статус: Предварительный концептуальный проект (2015 г.)

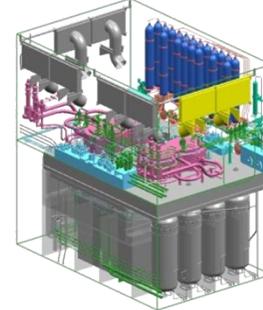


КЛТ-40С

$N_{\text{теп.}} 150 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 38,5 \text{ МВт}$

Серийные блочные реакторы атомных ледоколов и судов морского флота, для плавучих и наземных АС

Статус: Эксплуатация ПЭС с двумя РУ КЛТ-40С в г. Певек

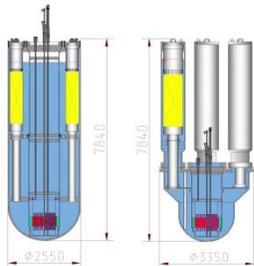


ТЯЭУ

$N_{\text{теп.}} 2 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 0,1 \text{ МВт}$

Термоэмиссионная ядерная энергетическая установка для обеспечения автономного электрического снабжения объектов

Статус: Разработка конструктивного облика ТЯЭУ (2016 г.)



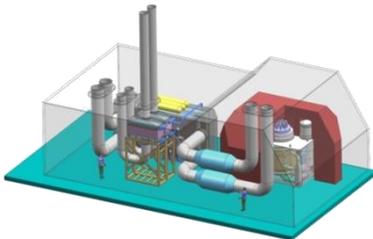
АСММ

$N_{\text{теп.}} 5 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 1 \text{ МВт}$

Энергоисточник для транспортабельной АС мегаваттного класса с ВТГР и системой преобразования энергии замкнутого газотурбинного цикла

для обеспечения автономного электрического снабжения объектов

Статус: Техническое предложение РУ и энергоблока (2015 г.)



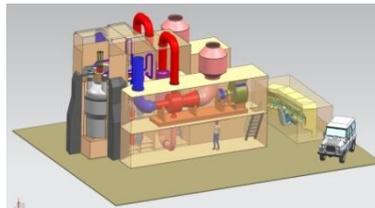
АСММ-ГТ-3/6

$N_{\text{теп.}} 15/30 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 3/6 \text{ МВт}$

Атомная станция малой мощности с открытым газотурбинным циклом для обеспечения автономного электрического снабжения объектов

освоения Арктического шельфа

Статус: Техническое предложение РУ и энергоблока (2015 г.)

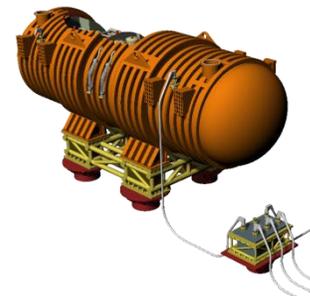


ПНАЭМ-8

$N_{\text{теп.}} 47 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 9 \text{ МВт}$

Проект подводного обитаемого автономного энергетического модуля для энергоснабжения объектов освоения Арктического шельфа

Статус: Проектные проработки (2015 г.)

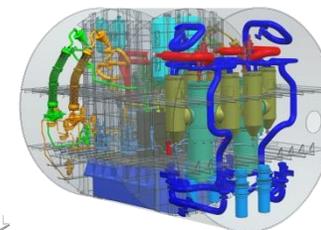


Айсберг-ОКБМ

$N_{\text{теп.}} 140 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} 24 \text{ МВт}$

Проект подводного обитаемого автономного энергетического модуля для энергоснабжения объектов освоения Арктического шельфа

Статус: Завершена разработка аван-проекта (2017 г.)



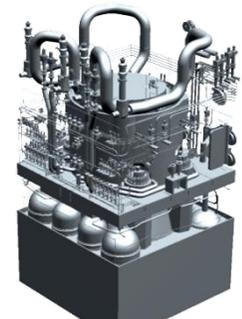
РИТМ-200

$N_{\text{теп.}} 175 \text{ МВт}; N_{\text{эл.}} \text{ до } 50 \text{ МВт}$

Реактор интегрального типа с принудительной циркуляцией для универсального атомного ледокола,

плавучих и наземных АС

Статус: Эксплуатация ГУАЛ и 2-х СУАЛ, строительство 4-х СУАЛ



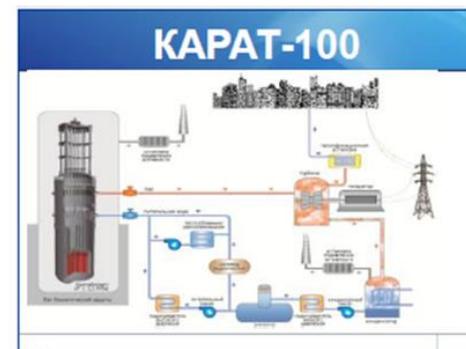
Мощной ряд РУ для АСММ разработки НИКИЭТ



1-10 МВт_т

10-50 МВт_т

> 100 МВт_т



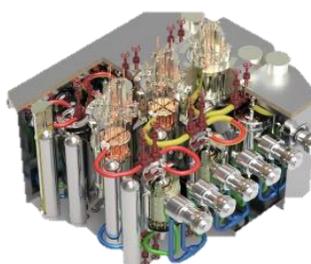
Судовые реакторные установки



ОК-150 – эксплуатировалась на ледоколе «Ленин»

ОК-900 – эксплуатировалась на 7 ледоколах

КЛТ-40 – эксплуатируется на 2 ледоколах, 1 лихтеровозе, ПЭБ «Академик Ломоносов»



ОК-900



КЛТ-40

Результаты эксплуатации РУ типа **КЛТ-40** на атомных ледоколах и судах были положены в основу создания **первой в мире плавучей атомной электростанции «Академик Ломоносов»** на базе двух РУ КЛТ-40С

Наименование	ОК-150	ОК-900	ОК-900А	КЛТ-40	КЛТ-40С	КЛТ-40М
Мощность РУ, МВт	3×90	2×159	2×171	1×135	2×150	1×171
Ресурс (проектный), тыс. ч	12	25-60	50-100	100	320	100
Энергоресурс а.з., ТВт·ч	0,4	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Интервал между перегрузками а.з., лет	2,0 (КИУМ=0,25)	6,0 (КИУМ=0,25)	4,7 (КИУМ=0,3)	7,1 (КИУМ=0,25)	2,5 (КИУМ=0,64)	4,0 (КИУМ=0,35)
Масса, т	3 017 (3 РУ)	2 434 (2 РУ)	2 434 (2 РУ)	1 634 (1 РУ)	3 740 (2 РУ)	1 300 (1 РУ)
Габаритные размеры, м	11,5×10,4×10,5	7,9×13,5×9,2	7,9×13,5×9,2	8,6×8,6×8,2	12×15,8×12	7,6×8,0×8,1
Удельная мощность, кВт/т	89,5	130,6	140,5	82,6	80,2	131,5
Удельная мощность, МВт/м ²	2,26	3,0	3,2	1,83	1,58	2,81

Реакторные установки типа РИТМ



2020 г. – сдан в эксплуатацию УАЛ «Арктика».

2021 г. – сдан в эксплуатацию УАЛ «Сибирь».

2022 г. – сдача в эксплуатацию УАЛ «Урал».

2024 г. – сдача в эксплуатацию УАЛ «Якутия».

2026 г. – сдача в эксплуатацию УАЛ «Чукотка».

2027 г. – сдача головного атомного ледокола «Лидер», обеспечивающего круглогодичную навигацию по Северному морскому пути, согласно Указу Президента РФ от 26.10.2020 г. № 635.

2028 г. – сдача в эксплуатацию 5-го серийного УАЛ.

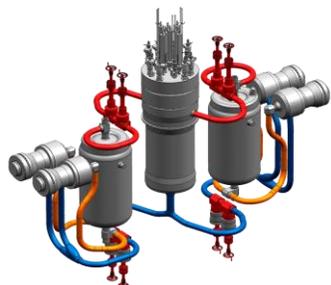
2030 г. – сдача в эксплуатацию 6-го серийного УАЛ.

Наименование	РИТМ-200	РИТМ-200С	РИТМ-200Н	РИТМ-200М	РИТМ-400	РИТМ-400М
Мощность РУ, МВт	2×175	2×198	1×190	2×198	2×315	2×340
Ресурс (проектный), тыс. ч	320	340	495	480	320	340
Энергоресурс а.з., ТВт·ч	4,5	8	8	11	6	13,5
Интервал между перегрузками а.з., лет	7,7 (КИУМ=0,38)	6,4 (КИУМ=0,72)	6,0 (КИУМ=0,8)	9,0 (КИУМ=0,7)	5,7 (КИУМ=0,38)	6,5 (КИУМ=0,7)
Масса, т	2 200 (2 РУ)	2 300 (2 РУ)	1 500 (1 РУ)	2 600 (2 РУ)	3 893 (2 РУ)	4 560 (2 РУ)
Габаритные размеры, м	6×13,2×15,5	6,0×13,2×15,36	Ø8,7×21	6,8×14,6×16	9×18,2×17,5	20,76×8,4×18,0
Удельная мощность, кВт/т	159,1	172,2	126,7	146,2	161,8	149,1
Удельная мощность, МВт/м ²	4,42	5,0	3,2	3,83	3,85	3,9

Эволюция транспортных судовых установок: от блочной РУ к интегральной РУ РИТМ-200



ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ



Реактор РУ ОК-150
(атомный ледокол «Ленин»)

Назначенный ресурс
оборудования до
заводского ремонта, тыс. ч

↑ в **1,6** раза

(увеличение с 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 (7) 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, м²

↓ в **2,6** раза

(уменьшение с 94,8 м² до 36 м²)



ПГБ РУ РИТМ-200
(УАЛ)



ПГБ РУ
типа ОК-900 и КЛТ-40С
(ПЭБ «Академик Ломоносов»)

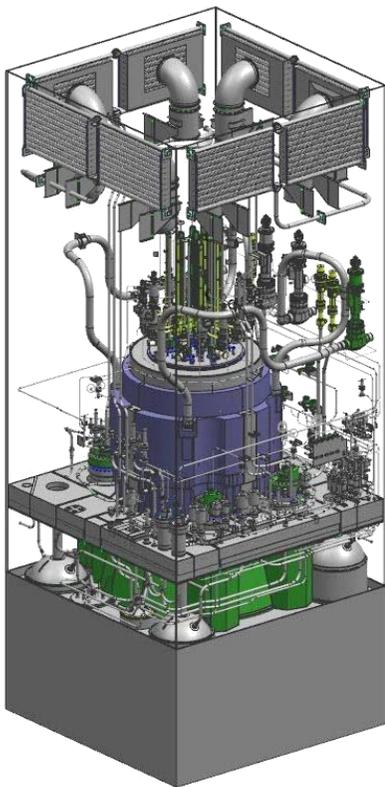
7 РУ в эксплуатации

6 РУ в эксплуатации
4 РУ изготавливаются
4 РУ договор на поставку

Более **60** лет работы трех поколений атомных ледоколов в Арктике

Суммарный опыт наработки более **400** реакторо-лет

Реакторная установка РИТМ-200 для УАЛ



✔ **Интегральная компоновка основного оборудования:** компактный парогенерирующий блок с принудительной циркуляцией теплоносителя во всех режимах работы.

✔ **Инновационная кассетная активная зона с увеличенным энергоресурсом и парогенератор на базе прямотрубных элементов.**

✔ **Инновационный комплекс систем безопасности с широким применением свойств самозащитенности установки, систем и средств управления запроектными авариями.**

✔ **Повышены показатели надежности РУ РИТМ-200 для УАЛ относительно действующих РУ на атомных ледоколах:**

– ресурс оборудования составляет **320** тыс. ч;

– период непрерывной работы ЯЭУ без обслуживания – **26** тыс. ч.

✔ **Существенно повышена экологическая безопасность** посредством применения безотходной технологии.

✔ **Расчетное обоснование и эксперименты по РУ** проведены с использованием **технологии трехмерного моделирования оборудования и процессов на супер-ЭВМ.**

✔ **Верифицированы и аттестованы новые расчетные программы и коды.**

Тепловая мощность РУ, МВт 2 × 175

Давление в 1-ом контуре, Мпа 14,2

Температура на входе/выходе в реактор, С° 277 / 313

Паропроизводительность, т/ч 248

Срок службы незаменимого оборудования, лет 40

Энергоресурс а.з., ТВт·ч 4,5



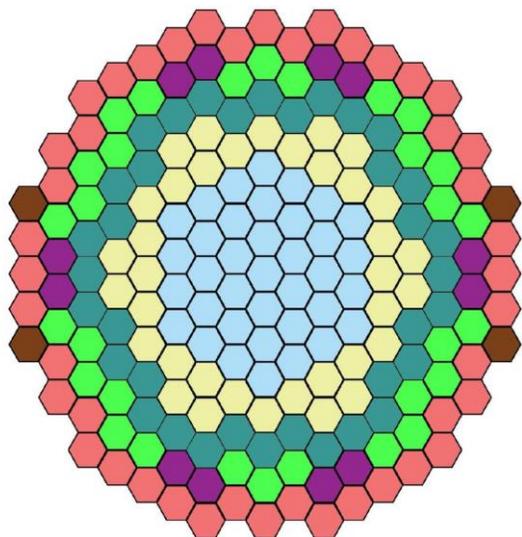
✓ **Интегральная компоновка основного оборудования:** активная зона с парогенератором объединены в едином корпусе. ЦНПК установлены в гидрокамеры, соединенные с центральным корпусом с помощью коротких силовых патрубков.

Первый контур выполнен герметичным, с применением сварных соединений, герметичных бессальниковых насосов и герметичной сильфонной арматуры. **Протяженность трубопроводов контура сокращена до минимума.**

Интегральная компоновка ПГБ обеспечивает практически **неограниченный радиационный ресурс корпуса**, значительно увеличенные резервы времени в запроектных авариях с течью теплоносителя 1 контура, в том числе при обесточивании.

Размеры интегрального ПГБ обеспечивают возможность транспортировки корпуса ПГБ в сборе (с приваренными гидрокамерами) железнодорожным транспортом.

За счет сборки ПГБ на машиностроительном заводе существенно сокращается время на проведение монтажных работ на заводе-строителе.



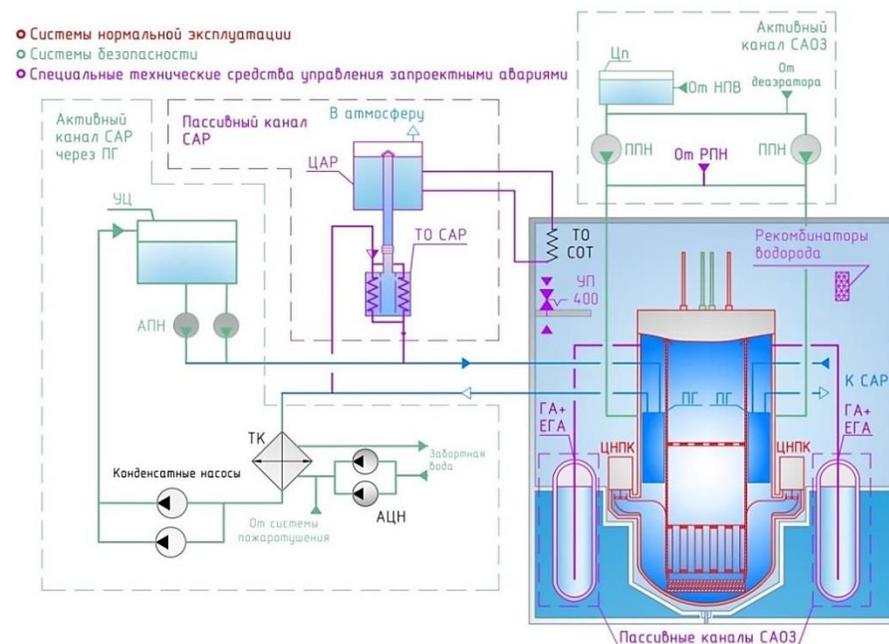
Тип активной зоны	Кассетная
Количество ТВС, шт.	199
Высота активной части, мм	1 200 (1 650*)
Энергоресурс, ТВт·ч	4,5 (7*)
Кампания, эфф. ч	25 700 (40 000*)
Тип топлива	Интерметаллидное (керметное*)
Мах обогащение по U^{235} , %	- (< 20*)
Материал оболочки твэл	42ХНМ

* - перспективная а.з. с повышенным энергоресурсом

- ✔ Создана **уникальная инновационная кассетная активная зона с повышенным энергоресурсом**, превосходящим показатели активных зон действующих атомных ледоколов (зоны типа 14-10-3М) и ПЭБ проекта 20870 (зона 14-14).
- ✔ Применена **новая элементная база** – гладкостержневые твэлы с оболочкой из хромоникелевого сплава ($\varnothing 6,9$ мм), обладающего уникальными ресурсными характеристиками, повышенной ураноемкости на основе гранул интерметаллида урана, диспергированных в силуминовой матрице.
- ✔ **Конструктивные решения по кассетной а.з. и результаты обоснования** использованы при создании активных зон повышенной энергоемкости для атомного ледокола «Лидер» (пр. 10510), нового поколения плавучих энергоблоков (пр. 20871, 23870 и 24870) и наземной АСММ (в Республике Саха (Якутия)).

Комплекс систем безопасности РУ РИТМ-200

- ✓ Применен **инновационный комплекс пассивных систем и элементов**, повышающих безопасность РУ в проектных и запроектных авариях.
- ✓ Внедрены **технические средства управления запроектными авариями**.
- ✓ Проведен **комплекс НИОКР по повышению безопасности РУ** в проектных и запроектных авариях.
- ✓ Обеспечен **запас времени на управление запроектными авариями**: применение интегрального ПГБ с большими запасами воды позволило существенно (до менее 1 суток) сократить продолжительность работы средств подачи воды в ПГБ в аварии с течью теплоносителя 1 контура.
- ✓ Обеспечено **удержание расплава активной зоны в корпусе реактора** в тяжелых авариях.
- ✓ Применены **пассивные каталитические рекомбинаторы водорода**, обеспечивающие водородную безопасность при авариях, в т.ч. с плавлением активной зоны.



Проекты плавучих АСММ реализуемые АО «ОКБМ Африкантов»

АО «ОКБМ Африкантов» главный конструктор РУ, изготовитель и комплектный поставщик РУ / ЯЭУ для наземных и плавучих АСММ



ПЭБ Академик Ломоносов с двумя РУ КЛТ-40С

Электрическая мощность	2 × 38,5 МВт
Тепловая мощность	2 × 150 МВт
Срок службы	40 лет
Период между перегрузками	2 - 3 года

- ✓ Первая в мире плавучая АС
- ✓ Традиционный ПГБ блочного исполнения
- ✓ Современный комплекс систем безопасности
- ✓ Первая для судовых РУ кассетная активная зона
- ✓ Собственное хранилище топлива, позволяет выполнять операции с НТВС и ОЯТ в пределах ПЭБ, отсутствие операций по обращению с отработанным топливом на площадке размещения вне энергоблока

22.05.2020 г. – введена в промышленную эксплуатацию в г. Певек (Чукотский АО)

2023 г. – планируется первая перегрузка а.з.



МПЭБ с двумя РУ РИТМ-200С

Электрическая мощность	2 × 58 МВт
Тепловая мощность	2 × 198 МВт
Срок службы	40 лет
Период между перегрузками	5 - 7 лет

- ✓ Максимальное использование технических решений ПЭБ академик Ломоносов и РУ РИТМ-200 для УАЛ с целью ускорения проектирования и строительства (исключено хранилище НТВС и ОЯТ, перегрузочный комплекс и теплофикационное оборудование)
- ✓ Нет обращения с ядерным топливом на площадке станции. Перегрузка осуществляется на специализированном предприятии.

2021 г. – опережающий запуск производства оборудования длительного цикла производства

2022 г. – завершен технический проект, проведен НТС ГК «Росатом», проект утвержден директором СМП

2023 г. – экспертиза экономических параметров проекта от ВНИИАЭС

2028 г. – ввод в эксплуатацию

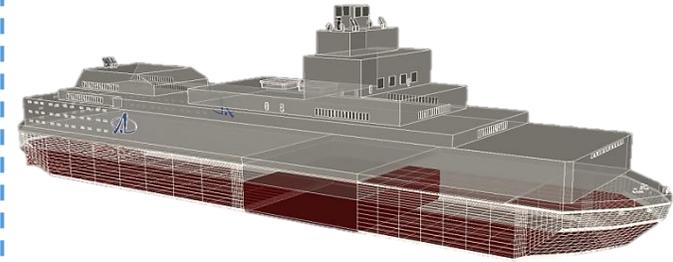
АСММ – новый перспективный продукт Госкорпорации «Росатом»



АСММ с РУ РИТМ-200Н



ОПЭБ и СОЭ с двумя РУ РИТМ-200М



ПЭБ с двумя РУ РИТМ-400М

Электрическая мощность	55 МВт	Электрическая мощность	2 × 55 МВт	Электрическая мощность	2 × 95 МВт
Тепловая мощность	190 МВт	Тепловая мощность	2 × 198 МВт	Тепловая мощность	2 × 340 МВт
Срок службы	60 лет	Срок службы	60 лет	Срок службы	40 лет
Период между перегрузками	6 лет	Период между перегрузками	до 10 лет	Период между перегрузками	5 лет

2020 г. – утверждена ДОН сооружения АСММ в Республике Саха (Якутия)

2022 г. – разработан технический проект РУ РИТМ-200Н

2022 г. – разработано ОБИН сооружения АСММ в Республике Саха (Якутия)

2023 г. – разработка проектной документации

2024 г. – получение лицензии на сооружение

2026 г. – получение лицензии на эксплуатацию

2028 г. – ввод в промышленную эксплуатацию

- ✓ Обеспечение безопасности пассивными системами без ограничения по времени
- ✓ Универсальная частота электричества – 50/60 Гц (в зависимости от площадки)
- ✓ **Нет обращения с топливом на площадке размещения**, перегрузка производится на судостроительном предприятии совместно с доковым (средним) ремонтом судна

2020 г. – разработан эскизный проект ОПЭБ

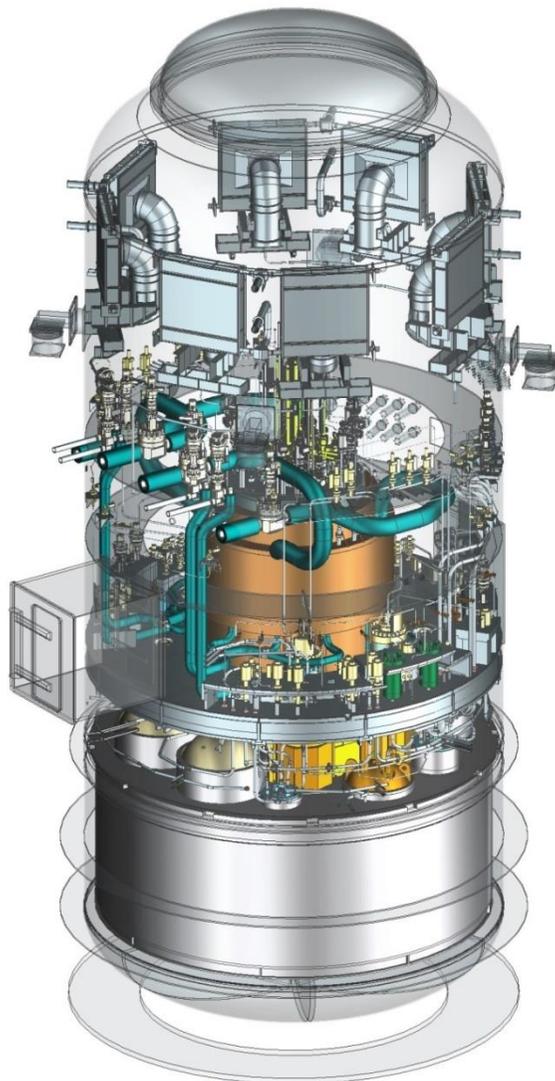
2023 г. – старт разработки технического проекта ОПЭБ

2024 г. – завершение разработки технического проекта ОПЭБ

- ✓ Для электроснабжения объектов в арктических регионах на основе РУ РИТМ-400 для ледокола Лидера **начата разработка ПЭБ с РУ РИТМ-400М**

2022 г. – старт разработки технического проекта ПЭБ

2025 г. – завершение разработки технического проекта ПЭБ



Габариты СЗО: **8,7 × 22 м**

Масса РУ: **1500 т**

Проект пилотной АСММ разрабатывается с РУ РИТМ-200Н. Технические решения заимствованы с РУ РИТМ-200 (УАЛ).

Основные технические решения РУ РИТМ-200Н

- ✓ интегральный водо-водяной реактор;
- ✓ активная зона с периодом между перегрузками до 7 лет на основе металлокерамического топлива;
- ✓ прямоточный ПГ из титанового сплава;
- ✓ герметичные ГЦН;
- ✓ компоновка РУ с применением бака металловодной защиты (МВЗ);
- ✓ размещение основного оборудования РУ внутри стальной защитной оболочки (СЗО);
- ✓ отсутствие борного регулирования;
- ✓ маневренность;
- ✓ «судовая» технология обращения с ЯТ (перегрузка топлива в контейнерах с использованием крана центрального зала).

Реактор интегральный РУ РИТМ-200Н



Реактор интегральный	Изготавливается серийно. 8 РУ РИТМ-200 изготовлены и смонтированы на УАЛ «Арктика», «Сибирь», «Урал» и «Якутия». 6 РУ РИТМ-200 изготавливаются для УАЛ «Чукотка», 5 и 6 СУАЛ.
Корпус реактора	Материал – 15Х2МФА-А . Назначенный срок службы – 60 лет. Назначенный ресурс – 495 000 ч. Класс безопасности – 1Н (НП-001-15), группа А (НП-089-15).
Кассета ПГ	Материал парогенерирующей поверхности – ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ . Назначенный срок службы – 20 лет. Назначенный ресурс – 165 000 ч. Класс безопасности – 2Н (НП-001-15), группа В (НП-089-15).
ГЦН	Назначенный срок службы – 20 лет, (достигнуто – более 33 лет). Назначенный ресурс – 165 000 ч (достигнуто – более 200 000 ч). Класс безопасности – 1Н (НП-001-15), группа А (НП-089-15).
Приводы КГ, АЗ	Назначенный срок службы – 20 лет (достигнуто – более 33 лет). Назначенный ресурс – 165 000 ч (достигнуто – более 200 000 ч). Класс безопасности – 2НЗ (НП-001-15), группа В (НП-089-15).

Габариты (L × B × H): **3,4 × 4,5 × 11,6 м**

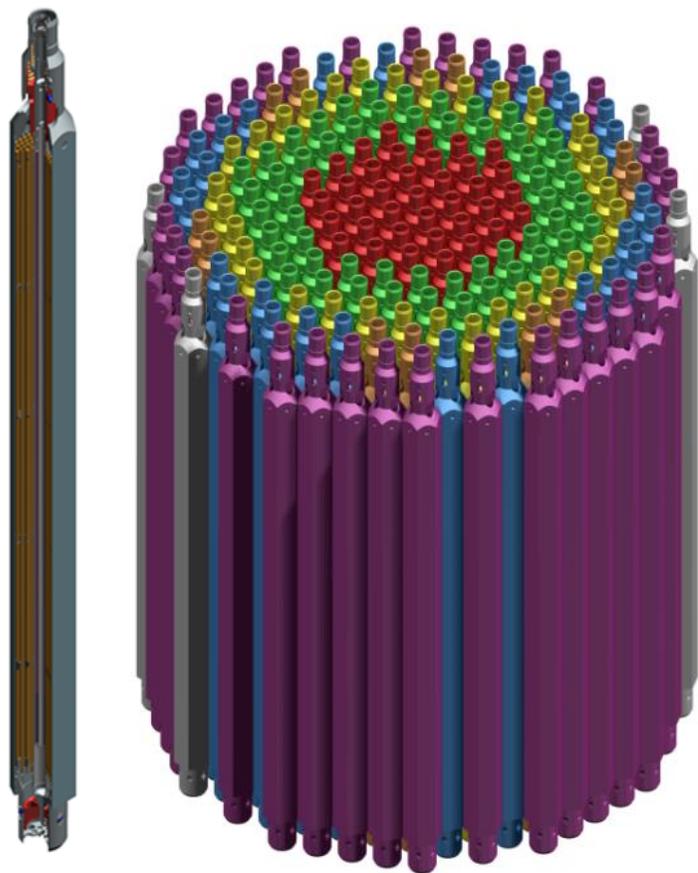
Масса: **250 т**

Активная зона АС-14-15 для АСММ

Аналоги – кассетные активные зоны:

- 14-17 для РУ РИТМ-200С (МПЭБ);
- 14-15-1 для РУ РИТМ-200 (УАЛ);
- 14-14 для РУ КЛТ-40С (ПЭБ «Академик Ломоносов»)

Высота а.з., мм	1650
Количество ТВС, шт.	199
Энергоресурс, ТВт·ч	8
Назначенный ресурс, ч	75000
Период между перегрузками, год	До 7
Тип топлива	Металлокерамическое
Обогащение топлива, %, не более	20
ТВС	Шестигранного профиля
Твэл	Ø 6,9 мм в оболочке из сплава 42ХНМ
Количество приводов РО КГ, шт.	12
Количество приводов РО АЗ, шт.	6

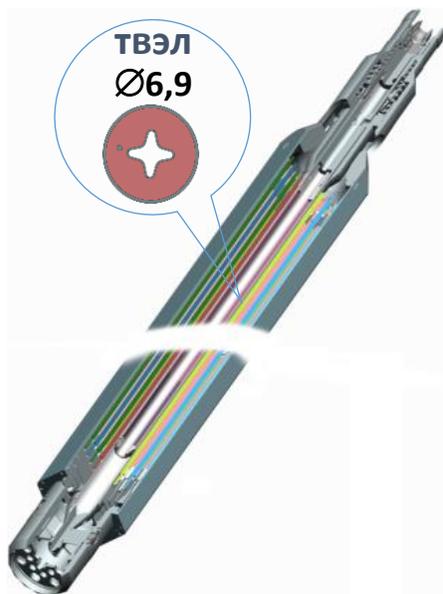


Активная зона АС-14-15



Разработка технического проекта активной зоны кассетного типа АС-14-15 для АСММ ведется с 2019 г. Технический проект завершен в IV кв. 2022 г.

Характеристики активных зон УАЛ, ПЭБ, МПЭБ, ОПЭБ и АСММ



Наименование параметра	РУ КЛТ-40С	РИТМ-200	РИТМ-200С	РИТМ-200Н	РИТМ-200М	РИТМ-400М
Количество ТВС, шт.	121	199	199	199	241	313
Высота активной зоны, мм	1200	1200	1650	1650		
Энергоресурс, ТВт·ч	2,1	4,5	8,0	8,0	11,0	13,5
Максимальное обогащение по U235, %	15,7	-	< 20	< 20	< 20	-
Тип топлива	Металло-керамика	Интерметаллид		Металло-керамика		Интерметаллид
Материал оболочки ТВЭЛ	Сплав Э110	Сплав 42ХНМ				
Доля циркониевых сплавов, %	19,4	11,9	10,4	~ 10	~ 10	~ 10
Изготовлено активных зон, шт.	4	8	-	-	-	-

Проведены реакторные испытания экспериментальной сборки ПТВС-31М
в реакторе МИР до глубины выгорания **109,5** МВт·сут./кг U (1,05 г/см³)
при требуемой величине **108,5** МВт·сут./кг U (1,04 г/см³)

<p>Предотвращение нарушений нормальной эксплуатации</p>	<p>Разработка проекта на основе консервативного подхода с применением апробированных технических решений, развитые свойства внутренней самозащищенности (отрицательные обратные связи по реактивности, интегральная компоновка, высокая теплоаккумулирующая способность, сужающие устройства, верхнее подключение трубопроводов).</p>
<p>Предотвращение проектных аварий</p>	<p>Своевременное выявление отклонений от нормальной эксплуатации и их устранение, управление при эксплуатации с отклонениями (структура и алгоритмы систем управления, резервирование оборудования нормальной эксплуатации).</p>
<p>Предотвращение запроектных аварий</p>	<p>Применение активных и пассивных систем безопасности При работе активных систем в авариях с разгерметизацией 1 контура в течение первых суток температура снижается ниже 100 °С – истечение прекращается. При работе пассивных систем при герметичном 1 контуре время работы систем не ограничено, в авариях с разгерметизацией 1 контура – более 72 часов.</p>
<p>Управление запроектными авариями</p>	<p>Использование специальных технических средств (система аварийного охлаждения активной зоны с гидроаккумуляторами, пассивная система отвода остаточных тепловыделений, система заполнения кессона реактора водой) для управления запроектными авариями и самосрабатывающих устройств (ГУП, РЭД). Ограничение последствий запроектных аварий (удержание расплава активной зоны в корпусе реактора, исключение образования критмасс при плавлении, исключение образования водорода, снижение аварийного давления в защитной оболочке).</p>

КРИТЕРИИ И ЦЕЛЕВЫЕ ОРИЕНТИРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

- ✓ санитарно-защитная зона в пределах площадки АСММ;
- ✓ дозовая нагрузка на население при нормальной эксплуатации – менее **0,01%** от естественного фона;
- ✓ суммарная вероятность тяжелых аварий не превышает **10⁻⁶** на реактор в 1 год (согласно НД – 10⁻⁵);
- ✓ суммарная вероятность большого аварийного выброса, при котором необходимо выполнение мер защиты населения, не превышает **10⁻⁷** на реактор в 1 год (согласно НД 10⁻⁷).

Характеристика	КЛТ-40С	АСММ (РУ РИТМ-200Н)
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 обязательной подпитки реактора при авариях типа LOCA	4 месяца	Менее 1 суток

НИОКР по АСММ. Стенд инновационной САР

Схема стенда инновационной САР (N ~ 800 кВт)

Цель проведения НИОКР

Создание новой инновационной системы аварийного расхолаживания, обеспечивающей эффективность и надежность в условиях проектных и запроектных аварий, отработка технических решений.

Задачи испытаний на стенде инновационной САР

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

Масштаб модели САР:

- по мощности 1:4
- по высоте 1:1

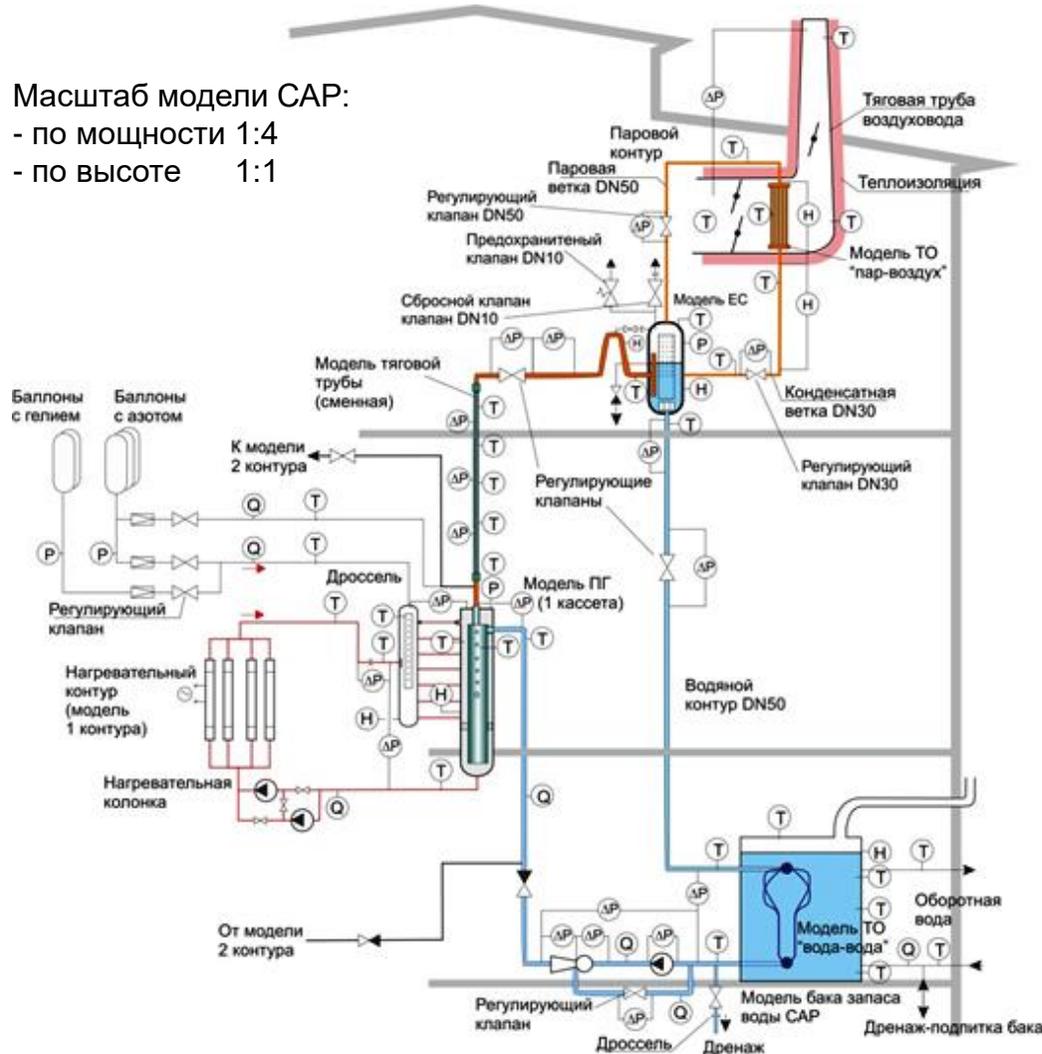
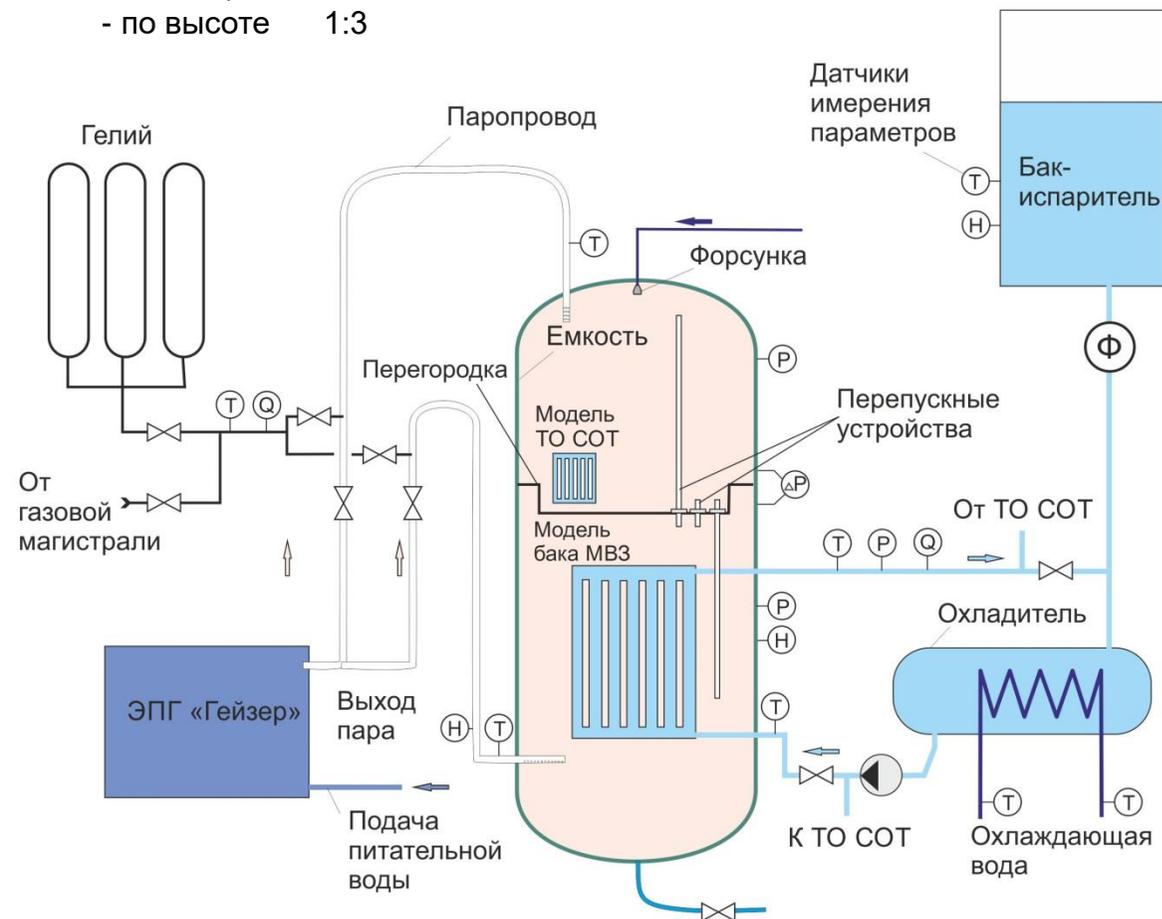


Схема стенда СПОТ 30 (N ~ 2 МВт)

Масштаб модели 30

- по мощности 1:5
- по высоте 1:3



Цель проведения НИОКР

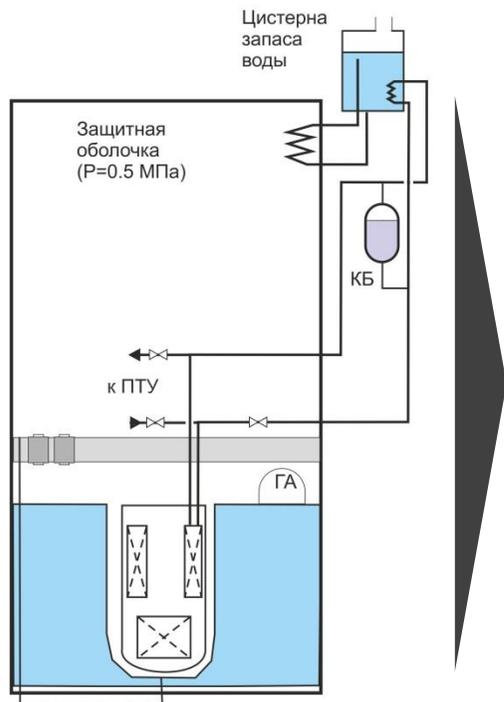
Создание инновационной системы отвода тепла из 30, обработка технических решений, обеспечение эффективного и безопасного отвода тепла из 30 в условиях проектных и запроектных аварий.

Задачи испытаний на стенде СПОТ 30

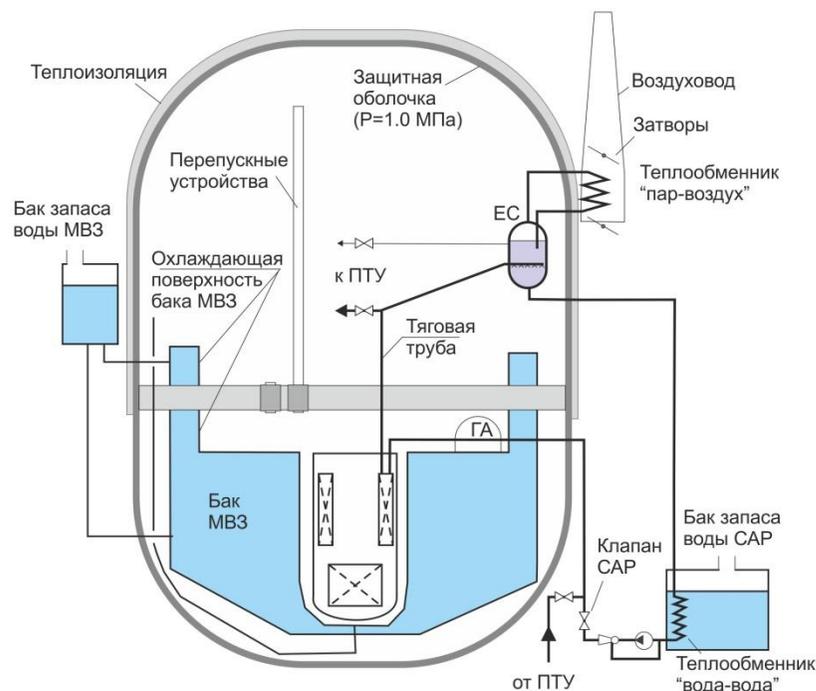
- отработка вариантов перепускных устройств;
- исследование условий отравления воздухом (азотом) низкорасположенных теплообменных поверхностей;
- проверка расчетной модели, описывающей конвективную диффузию (стефановский поток) пара к охлаждаемой стенке при различном газосодержании парогазовой смеси;
- исследование накопления (стратификации) легкого газа (гелия – имитатора водорода);
- исследование теплоотвода к баку МВЗ при частичном заливе его водой (работа бака МВЗ в условиях частичного залива);
- верификация программ для ЭВМ.

Конструктивные особенности пассивных систем АСММ

УАЛ РИТМ-200



АСММ



Конструктивные особенности пассивных систем:

- подключение к промконтуре САР через емкость-сепаратор (ЕС) дополнительного парового контура с теплообменником «пар-воздух». После завершения работы система не требует управляющих действий персонала. для перевода системы в исходное состояние и постоянно находится в состоянии готовности;
- теплоизолированная 3О, рассчитанная на высокое давление (до 1 МПа) обеспечивает эффективную работу САР в авариях LOCA;
- конструктивное исполнение бака МВЗ с охлаждающей поверхностью и баком запаса выпариваемой воды, организация перепускных устройств между реакторным и аппаратным помещениями обеспечат удержание расплава на днище реактора и целостность 3О в тяжелых авариях.

Апробированность и унификация технических решений РУ РИТМ-200 и РУ РИТМ-200Н



Кассета ПГ
(АО «ОКБМ Африкантов»)



Установка корпуса РУ РИТМ-200 в специальный
стапель в вертикальном положении
(АО «ЗиО-Подольск»)



Монтаж ПГБ РУ РИТМ-200



Сборка блоков труб и устройств
(АО «ОКБМ Африкантов»)



Транспортировка корпуса реактора
(АО «ЗиО-Подольск»)



3 УАЛ: «Арктика», «Сибирь», «Урал»



**Основное оборудование реакторной установки освоено в производстве
на отечественных машиностроительных предприятиях**

Сравнение АСММ на базе РУ РИТМ-200 с потенциальными конкурентами

Критерии	РИТМ-200Н	АСР-100* (КНР)	АСР50S* (КНР)	SMART* (Корея)	NuScale* (США)
Тип реактора	ВВР интегрального типа	PWR интегрального типа	PWR блочного типа	PWR интегрального типа	PWR интегрального типа
Мощность, Нт/Нэ, МВт	190 / 55	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)	Сертификация в NRC
Референтность	Опыт эксплуатации судовых РУ	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Безопасность	Активные и пассивные системы безопасности + самосрабатывающие устройства	Пассивные систем безопасности	Пассивные системы безопасности	Активные и пассивные системы безопасности	Пассивные системы безопасности
	Время функционирования пассивных систем безопасности не менее 72 часов				
Проектный срок службы, лет	60 лет – корпус реактора 20 лет – ПГ	60 лет – корпус реактора ПГ – данные отсутствуют	40 лет – корпус реактора ПГ – данные отсутствуют	60 лет – корпус реактора 15 лет – ПГ	40 лет – корпус реактора ПГ – данные отсутствуют
Топливо	UO ₂ в силуминовой матрице, 42ХНМ , обогащение < 20%; гексагональные ТВС 199 шт.; кампания а.з. 2000 эфф. сут. (6 лет)	UO ₂ , циркониевые сплавы, обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 57 шт.; кампания а.з. 730 эфф. сут. (2 года)	UO ₂ , циркониевые сплавы, обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 57 шт.; кампания а.з. 915 эфф. сут. (2,5 года)	UO ₂ , обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 57 шт.; кампания а.з. 990 эфф. сут. (3 года)	UO ₂ , обогащение < 4,95 %; квадратные ТВС 17×17, 37 шт.; кампания а.з. 730 эфф. сут. (2 года)
Габариты ПГБ, В x Д, м	8,5 × 3,3	10 × 3,35	7,2 × 2,2 (реактор блока)	18,5 × 6,5	17,8 × 3
Маневренность	Топливо обеспечивает маневренные режимы 15÷100% со скоростью 6% Нном/мин.	Используемое топливо ограничивает возможности маневрирования (опыт PWR)			

ПРЕИМУЩЕСТВА РИТМ-200:

-  МАНЕВРЕННОСТЬ
-  ЗНАЧИТЕЛЬНО МЕНЬШЕЕ КОЛИЧЕСТВО РАО
-  ОТСУТСТВИЕ ПАРО-ЦИРКОНИЕВОЙ РЕАКЦИИ В ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ

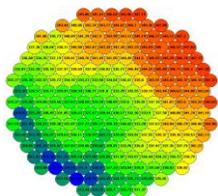
Суперкомпьютерные технологии как ключевой фактор развития научно-технического обоснования проектов

Направления использования технологии высокопроизводительных вычислений

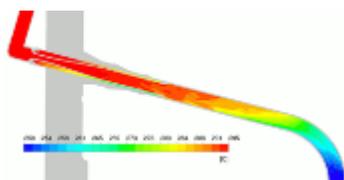
Виртуальная ЯЭУ



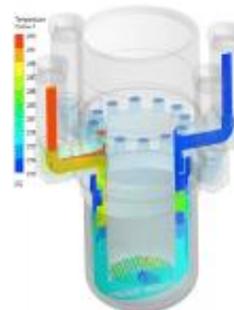
Распределение энерговыделений в активной зоне



Обоснование ресурса при термоциклических нагрузках



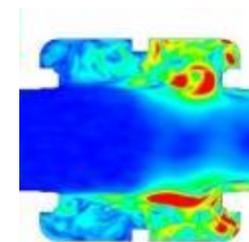
Неизотермические течения в реакторе



Защищенность от внешних воздействий

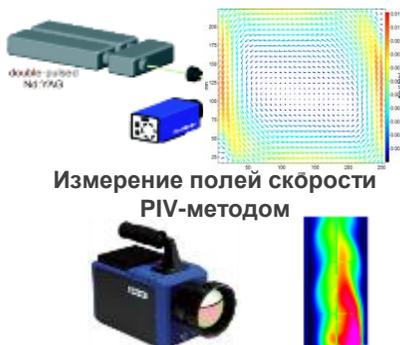


Анализ виброакустической характеристик



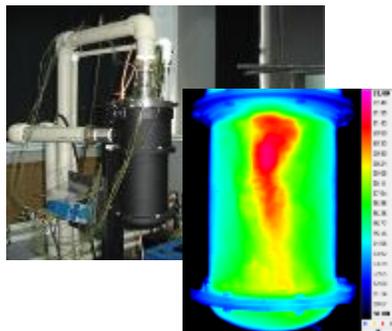
Экспериментальные исследования в гидродинамической лаборатории в поддержку технологии СуперЭВМ

Отработка технологии применения перспективных систем

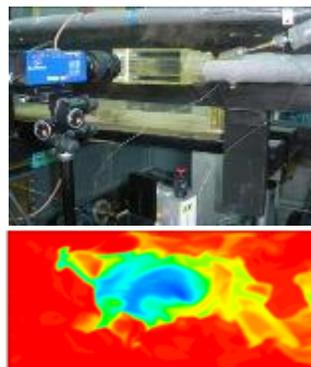


Измерение полей скорости PIV-методом

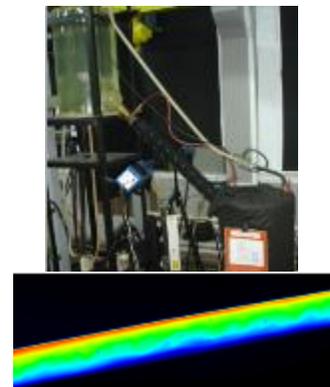
Неизотермические течения в модели реактора



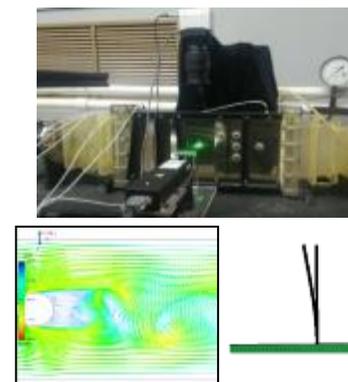
Случайные температурные пульсации



Термостратификация



Влияние гидродинамики потока на колебание конструкции



Цифровой двойник ЯЭУ на базе отечественных кодов



Аппаратная часть:

- инструментальный сервер
- виртуальный пульт управления
- высокопроизводительные расчетные мощности



Унифицированная система расчётных кодов, обеспечивающих связанное мультифизичное моделирование



Система верифицированных исходных данных

Выполняемые задачи

Обоснование эксплуатационных режимов работы ЯЭУ

Поддержка процесса проектирования и оптимизация конструкции РУ

Проверка состава и характеристик оборудования ЯЭУ

Проверка целостности, достаточности алгоритмов управления

Выбор и оптимизация законов регулирования

Обучение персонала

Основа цифрового двойника – единая трехуровневая математическая модель

I
уровень

Высокоточное высокопроизводительное 3-D моделирование

II
уровень

Инженерный расчет с высокой степенью детализации всех систем объекта

III
уровень

Расчёт всех систем установки в реальном масштабе времени

Опыт разработки математических моделей



Разработаны математические модели для всех типов РУ, проектируемых в АО «ОКБМ Африкантов»



Эксплуатация

Изготовление

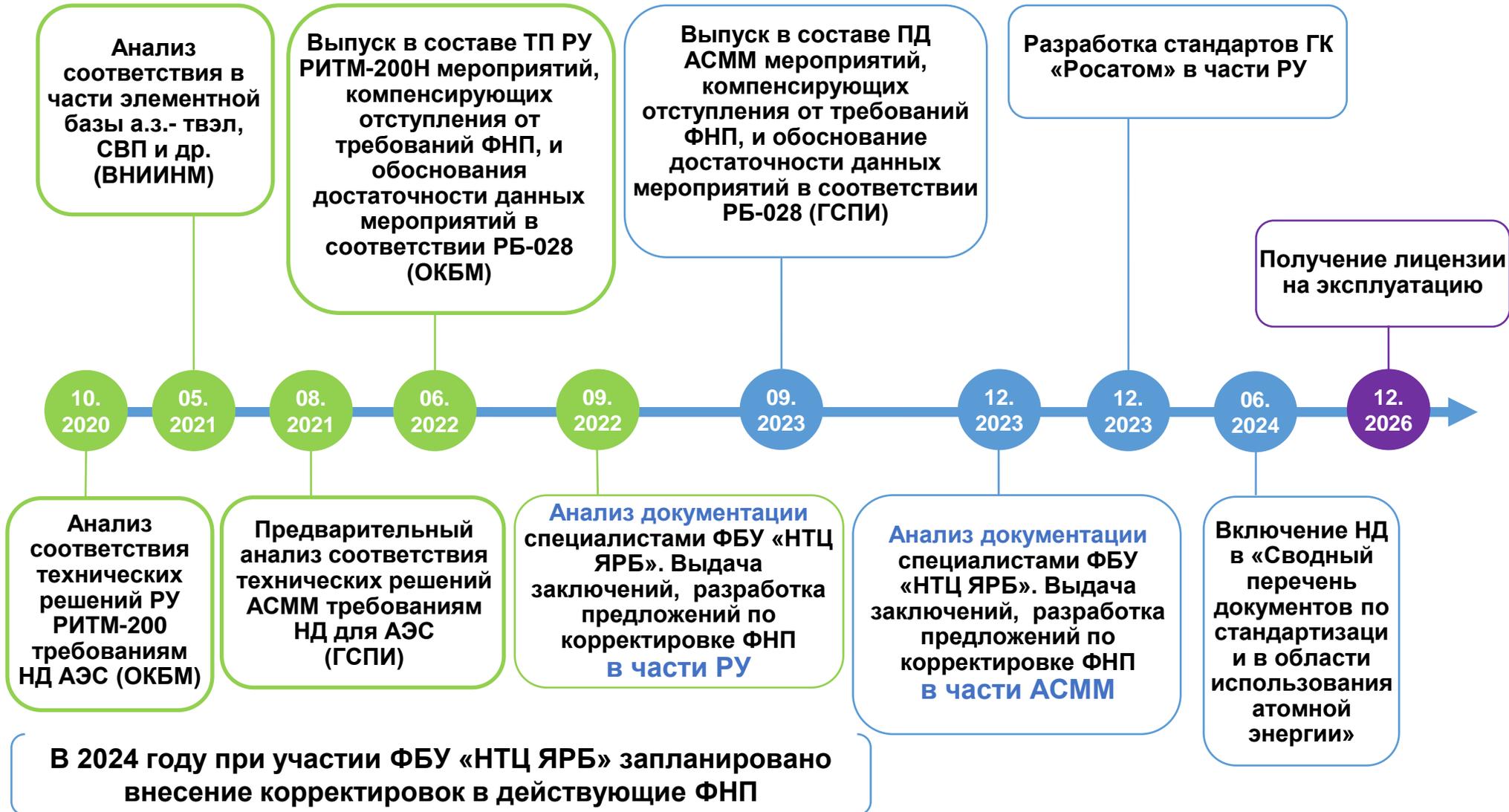
Проектирование

Обеспечение проекта АСММ нормативной базой



ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ

«Дорожная карта (план мероприятий) внесения изменений в ФНП и разработки документов по стандартизации по проекту АСММ с РУ РИТМ-200Н»



1

Увеличение срока службы оборудования РУ с 40 до 60 лет и более

- применение новых материалов;
- исследование влияния пульсаций температур на прочностные характеристики;
- виртуальное математическое моделирование работы оборудования в соответствии с моделью эксплуатации на супер-ЭВМ

2

Достижение показателей безопасности АСММ на уровне требований к установкам IV поколения

- создание уникальных пассивных систем безопасности, обеспечивающих расхолаживание реактора в тяжелых авариях неограниченное время;
- исключение плавления топлива;
- исключение образования водорода

3

Совершенствование конструкции активных зон и топлива для них

- увеличение энергозапаса, обеспечивающего работу реактора 10 лет и более без перегрузки топлива;
- повышение выгорания топлива;
- применение материалов, исключающих пароциркониевую реакцию в тяжелых авариях («толерантное» топливо)

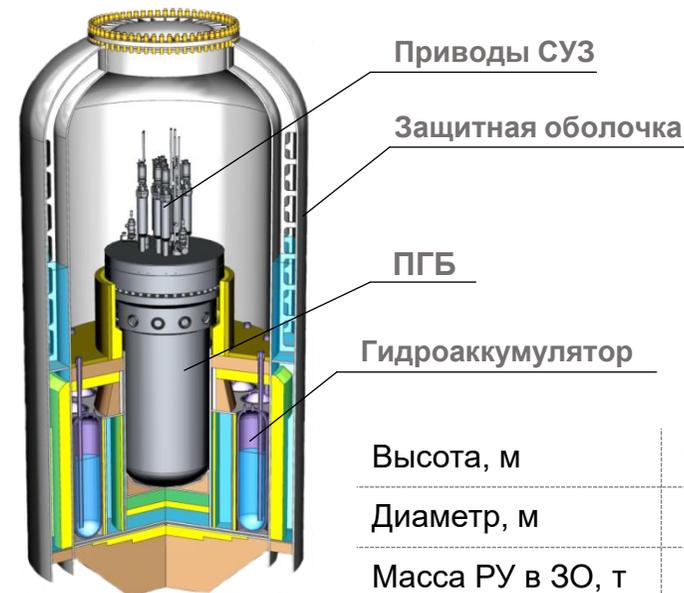
4

Применение CFD-кодов, технологий супер-ЭВМ и создание цифровых двойников

- выполнение уникальных экспериментов для верификации кодов;
- анализ аварийных режимов с учетом тонких эффектов по стратификации теплоносителя и конвективной диффузии;
- полное математическое моделирование всей РУ

Реакторная установка АБВ для АСММ

Тепловая мощность РУ, МВт	38
Давление в первом контуре, МПа	15,7
Паропроизводительность, т/ч	55
Температура на входе/выходе из а.з., °С	247/325
Срок службы незаменимого оборудования, лет	40
Период непрерывной работы, ч	26 000
Энергоресурс активной зоны, ТВт·ч	2,3
Максимальное обогащение топлива в активной зоне, %	15,7



Прототип РУ АБВ – наземные стенды **КВ-1** и **КВ-2**, на которых получена референтность основных технических решений и режимов работы на естественной циркуляции.

Основные технические решения

1990-х гг. – АО «ОКБМ Африкантов» выполнена разработка проекта **РУ АБВ-6М**.

1993 г. – утвержден технический проект двухблочной **ПАЭС «ВОЛНОЛОМ-3»** с **РУ АБВ-6М**.

1994 г. – начато рабочее проектирование и строительство **ПАЭС «ВОЛНОЛОМ-3»**. В этом же году работы были прекращены в связи с отсутствием финансирования.

- работа РУ без перегрузки в течение **10** лет;
- модульная конструкция энергоблока, обеспечивающая минимальные сроки сооружения.
- комплекс пассивных систем безопасности, обеспечивающий безопасность РУ во всех типах аварий в течение неограниченного времени.
- инновационная цилиндрическая ЗО с повышенными показателями безопасности при авариях LOCA, герметичности и прочности.

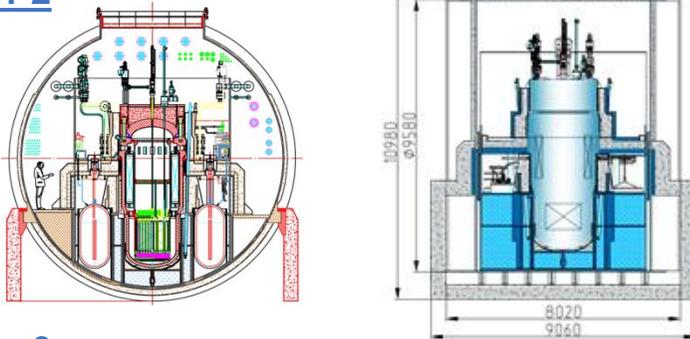
Варианты блочно-транспортбельных энергоблоков для АСММ на базе РУ АБВ-6Э

В 2014 г. разработан технический проект плавучего и блочно-транспортбельного энергоблока по контракту с Минпромторгом. В качестве реакторной установки выбрана **АБВ-6Э** интегрального типа и с 100% естественной циркуляцией первого контура.

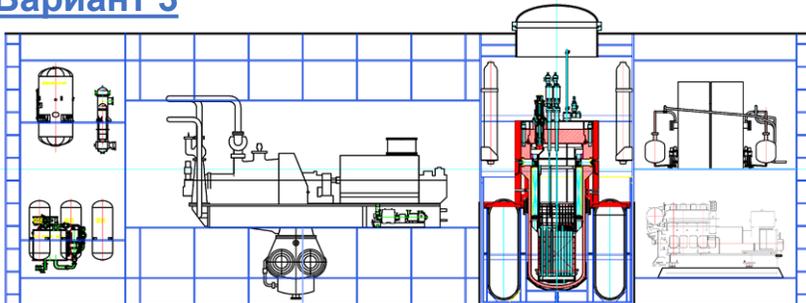
Вариант 1



Вариант 2



Вариант 3



2009 г.

Крупноблочная поставка парогенерирующего агрегата

Длина контейнера, м	13
Диаметр контейнера, м	8,5
Масса ПГА, т	до 200
Транспортировка	Автомобильный, водный и ж/д транспорт

2014 г.

Транспортбельный реакторный блок (ТРБ)

Длина, м	~ 8
Диаметр, м	~ 9,6
Масса без учета съемной БЗ, т	~ 820
Транспортировка	Водный транспорт

2014 г.

Транспортбельный моноблок (РУ + ПТУ)

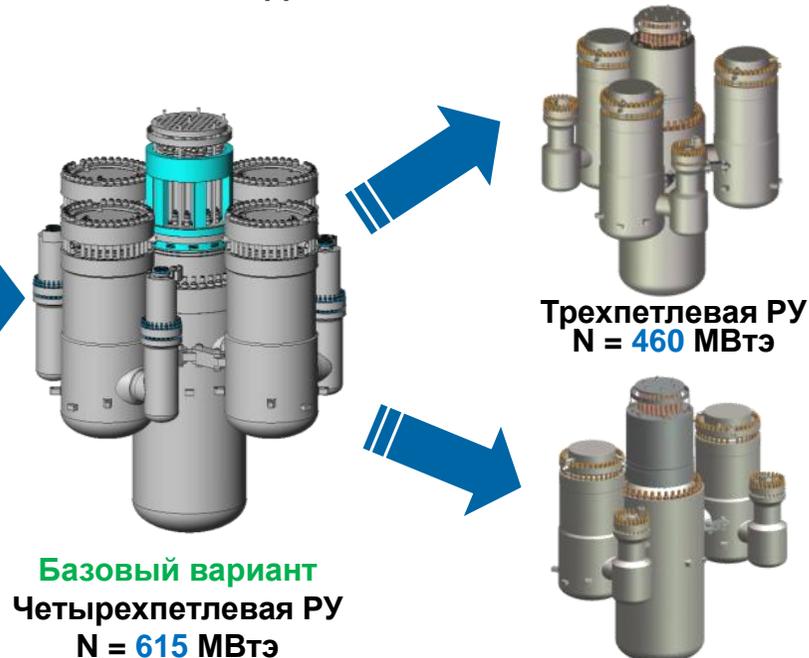
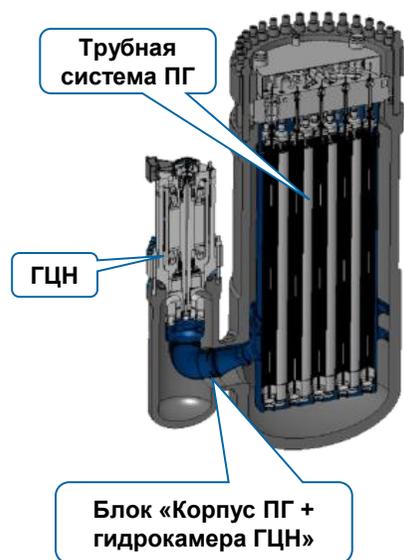
Длина, м	~ 28
Диаметр, м	~ 9,6
Масса с учетом БЗ, т	~ 2500
Транспортировка	Водный транспорт

Реакторные установки ВБЭР блочного типа для атомных станций средней мощности

Блоки средней мощности предназначены для энергоснабжения отдельных регионов России, развитых и развивающихся стран за рубежом, для которых не требуются блоки мощностью 1000-1500 МВт и сильна зависимость от стоимости закупки или транспортировки углеводородного топлива.

Особенностью проекта является применение унифицированной петли теплообмена, являющейся технологической платформой для реализации мощностного ряда энергоблоков.

Петля – модуль полного заводского изготовления

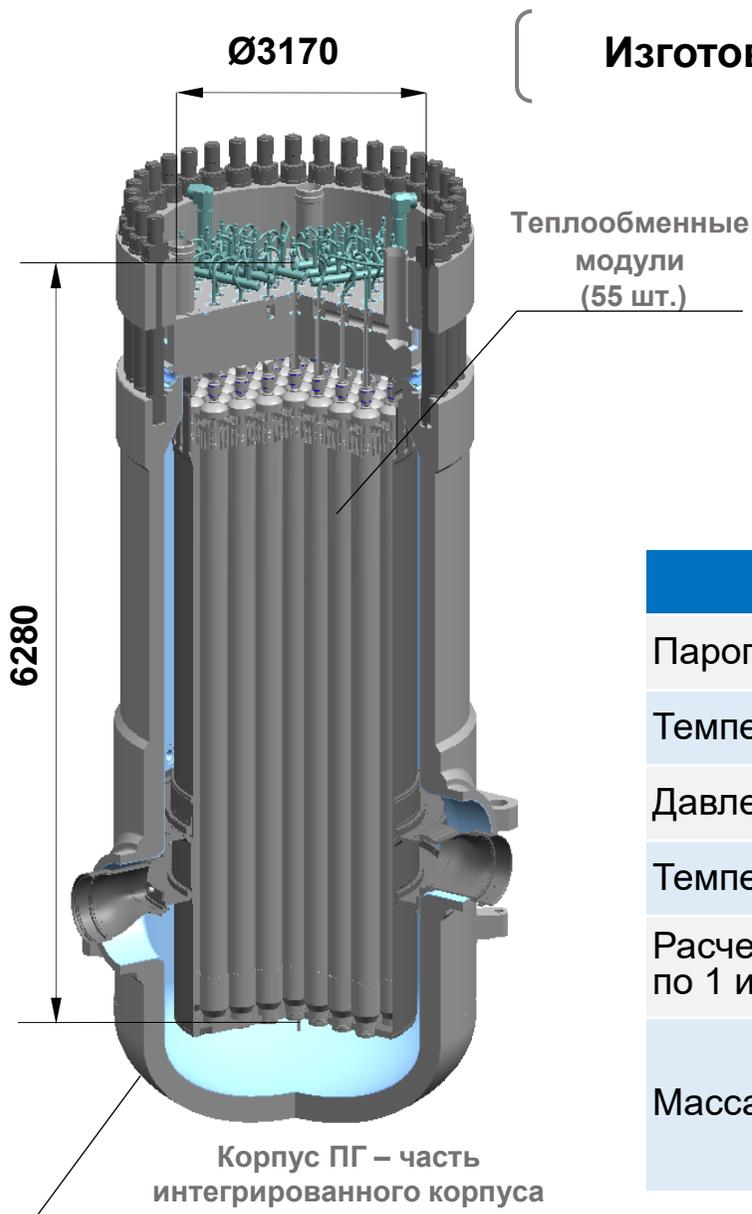


Реакторные установки ВБЭР блочного типа для АС средней мощности – это совмещение технических решений корабельных и судовых РУ:

- ✓ компактная блочная компоновка реакторного блока (для ГЦК: $D_{\text{опис.ВБЭР-600}} = 13,7 \text{ м}$, $D_{\text{опис.ВБЭР-ТОИ}} = 19,1 \text{ м}$);
- ✓ основное оборудование, не требующее работы вспомогательных систем (прямоточные модульные ПГ, моноблочные герметичные ГЦН с встроенными системами охлаждения и газоудаления);
- ✓ герметичный первый контур;
- ✓ возможность максимальной автоматизации управления реактором (саморегулирование, прямоточный парогенератор).

Мощность тепловая, МВт	415
Мощность электрическая, МВт	~ 150

Прямоточный модульный парогенератор



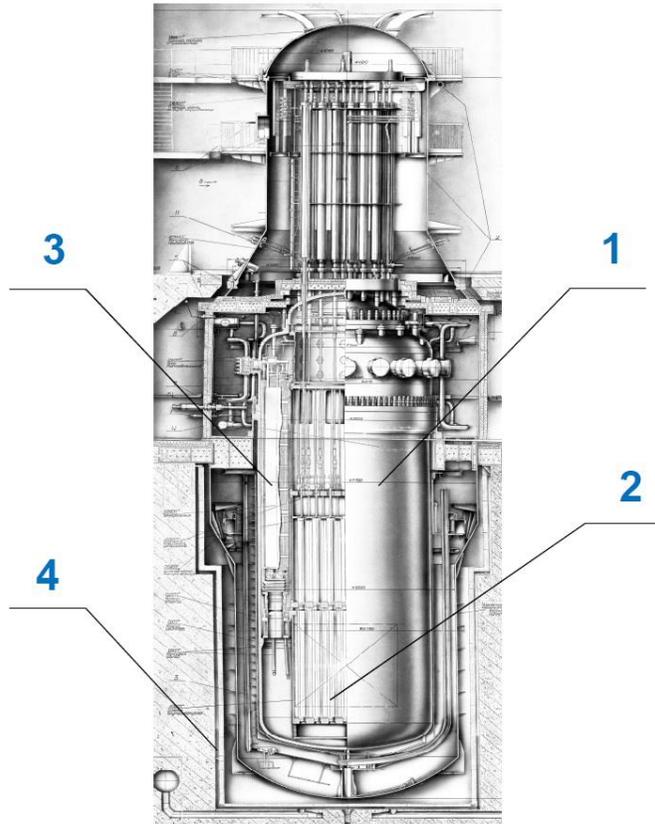
Изготовитель трубной системы ПГ – **АО «ОКБМ Африкантов»**

- Применены **проверенные** в эксплуатации конструктивные решения, узлы и элементы **судовых ПГ**.
- **Высокая коррозионная стойкость материала** теплообменной поверхности – **сплав 42ХНМ**.
- **Повышенная надежность** за счет оптимизации узлов подвода питательной воды, минимального количества сварных швов, применения электроннолучевой сварки.

Параметр	ВБЭР-600	ВВЭР-ТОИ
Паропроизводительность, т/ч	753	1 652
Температура питательной воды, °С	216	225
Давление пара за ПГ, МПа	6,2	7,00
Температура пара за ПГ, °С	310	258,8
Расчетное давление по 1 и 2 контурам, МПа	18,2	9,0 (по 2 контуру)
Масса в сухом состоянии, т	96,5 + 187 (трубная система и корпус ПГ)	330

Реакторные установки для работы в составе атомной станции теплоснабжения (АСТ)

- 1978 – 1983 гг.** – разработка ТП, РКД и выполнение НИОКР по РУ АСТ-500.
- 1982 – 1990 гг.** – сооружение двухблочной АСТ-500 в г. Горький (Нижний Новгород).
- 1989 г.** – положительное заключение международной экспертизы МАГАТЭ проекта и качества строительства Горьковской АСТ.
- 1983 – 1991 гг.** – сооружение двухблочной АСТ-500 в г. Воронеже
- 1988 г.** – проработка АСТ мощностью 200 МВт для г. Пльзень (Чехия).
- 1988 – 2001 гг.** – разработка технического проекта РУ АСТ-500М. Разработка проекта двухблочной АСТ-500 для г. Северска, прохождение отраслевой экспертизы, главгосэкспертизы и общественных слушаний.

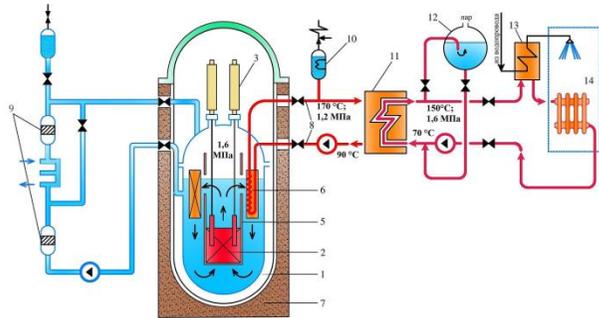


- 1** – реактор, **2** – активная зона,
- 3** – теплообменник 1-2 контуров,
- 4** – корпус страховочный.

Габариты реактора: **5 320 × 16 710 мм**

Тип реактора	Интегральный ВВР с встроенным парогазовым КД
Тип циркуляции в 1 контуре	ЕЦ
Тепловая мощность реактора, МВт	500
Давление 1 контура, МПа	1,6
Температура теплоносителя 1 контура, °С	208
Тип ядерного топлива	UO₂
Обогащение, %	1,0 - 2,0
Энергонапряженность активной зоны, кВт/л	27
Время работы реактора между частичными перегрузками, лет	2 (топливный цикл 3×2)
Режим работы	Базовый, маневренный
Схема передачи тепла потребителю	Трехконтурная
Давление 2 контура, МПа	1,2
Давление сетевого контура, МПа	1,9
Срок службы АСТ, лет	60
КПД, %	95
КИУМ	0,63

РУ типа АСТ и АТЭЦ для АСММ



Принципиальная схема АСТ

- 1 — корпус реактора
- 2 — активная зона
- 3 — приводы системы управления
- 5 — страховочный корпус
- 6 — теплообменники второго контура
- 7 — железобетонная шахта
- 8 — трубопроводы второго контура
- 9 — вспомогательные системы первого контура
- 10 — компенсатор объема теплоносителя второго контура
- 11 — сетевой теплообменник
- 12 — система аварийного расхолаживания РУ
- 13 — тепловой пункт
- 14 — потребитель тепла

Наименование	РУ АТЭЦ-80	РУ АТЭЦ-150	РУ АТЭЦ-200
Стадия разработки	Эскизные проекты РУ АТЭЦ-80, АТЭЦ-150, АТЭЦ-200. ТЭИ и PSAR двухблочной АТЭС с РУ АТЭЦ-80, РУ АТЭЦ-200 для условной площадки (2009-2013 гг.)		
Тепловая мощность, МВт	до 250	до 540	до 690
Электрическая мощность, МВт			
– в конденсационном режиме	до 85	до 180	до 250
– в теплофикационном режиме	до 70	до 150	до 180
Отпуск тепла, Гкал/ч	до 56	до 130	до 187,5
Давление в 1 контуре, МПа	15,7	15,7	15,7
Паропроизводительность, кг/с	117,1	270	390
Кампания топлива, лет	6	8	8
Число частичных перегрузок, шт.	3	4	4
Срок службы, лет	60	60	60

Наименование	РУ АСТ-30Б	РУ АСТ-50	РУ АСТ-25
Стадия и год разработки РУ	Техническое предложение, 1988	Эскизный проект, 1988	Технический проект, 1985
Тепловая мощность, МВт	30	50	35
Отпуск тепла, Гкал/ч	25,6	43,0	30,0
Циркуляция теплоносителя 1 контура	Естественная		
Давление в 1 контуре, МПа	0,54	2,45	4,4
Температура на входе/выходе из сетевого теплообменника, °С	50/95	64/144	60/130
Срок службы, лет	60	60	60

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы. Развитие направления ВТГР



ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ

Отечественные проекты различного назначения в кооперации с зарубежными партнерами

Период, г.	Проект	Мощность, МВт	T _{гелия} , °C	Назначение	Этап	Заказчик
1974 - 1987	ВГ-400	1 060	950	электроэнергия и тепло для производства аммиака	ТП	Министерство среднего машиностроения
1986 - 1991	ВГМ	200	750 / 950			
1990 - 1996	ВГМ-П	215	750	тепло для НПЗ	ПТ	Министерство атомной энергетики и промышленности
1993 - 2013	ГТ-МГР	600	850	электроэнергия с КПД 50%	ЭП	Минатом России, General Atomics (США)
2003 - 2004	МГР-Т	600	950	тепло, электроэнергия, водород	ПТ	АО «Концерн «Росэнергоатом»
2016 - 2018	RDE	10	700	экспериментальный реактор	ТП	АО РАОС (для Республики Индонезии)
с 2021 по н.в.	АЭС	4×200	850	водород, аммиак, метанол, карбамид	Разработка ТП	АО «Концерн «Росэнергоатом»

Экспериментальная база

(ОКБМ, НПО ЛУЧ, НИИАР и др.)



СТ-131 (мощность 15 МВт)

Цель проектов ВТГР – расширение использования атомной энергии в неэлектрической сфере энергетики и промышленности (производство водорода, высокотемпературное теплоснабжение)

1. Распоряжение правительства РФ от 05.08.2021 № 2162-Р об утверждении Концепции развития водородной энергетики РФ. 2. НИОКР по перспективному проекту станции с ВТГР для производства водорода включен в инвестиционную программу АО «Концерн Росэнергоатом» (ПРИКАЗ Минэнерго России и Госкорпорации «Росатом» №7 @/1/1392-П от 27.11.2020г.). 3. Распоряжение правительства РФ от 16.01.2023 № 40-р о намерениях между Правительством Российской Федерации и заинтересованными организациями в целях развития высокотехнологичного направления «Развитие водородной энергетики»

Топливо

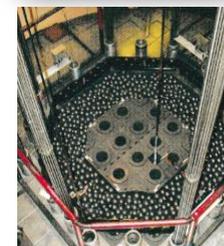
Разработано на основе микротвэлов с керамическим покрытием. Проведены стендовые и реакторные испытания (АО «ГНЦ НИИАР»). Изготовлены образцы топливных компактов (ТВЭЛ) на лабораторной установке АО «НПО «Луч».

Высокотемпературные материалы

Разработан радиационно стойкий графит с требуемыми физико-механическими свойствами. Созданы высокотемпературные (до 950°C) металлические материалы. Проведены испытания на базе ~10 тыс. часов.

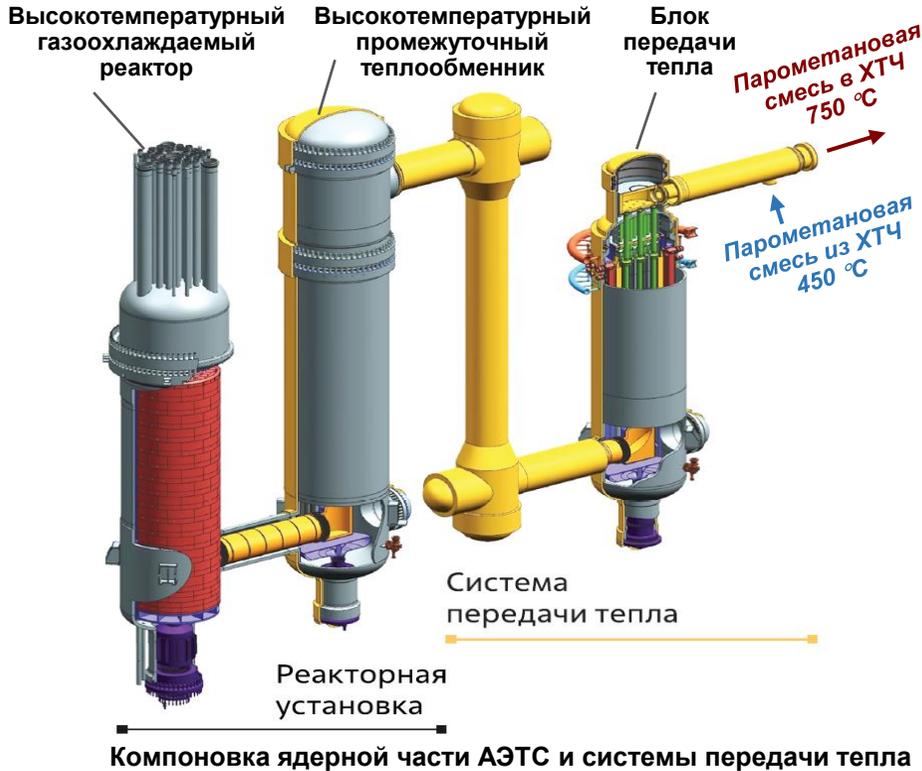
Системы и оборудование

Испытаны опытный образец ГЦК, экспериментальная модель теплообменника, гелиевые газодувки, модель парогенератора, приводы СУЗ и пр. оборудование



Критические стелды «Грог», «Астра»

Реакторная установка ВТГР-200В для проекта АЭТС



Технические требования к АЭТС (ТТ ВУ)	1 блок	4 блока
Производительность по водороду (с учетом КИУМ 0,9), тыс. тонн/год	110	440
Чистота производимого водорода (величина может быть снижена по требованию Заказчика), %	99,99	
Тепловая мощность ВТГР, МВт	200	800
Потребление природного газа, тыс. тонн/год	376	1 504
Потребление кислорода, тыс. тонн/год	300	1200
Потребление воды на химическую реакцию производства H ₂ , тыс. тонн/год	470	1 880
CO ₂ на утилизацию, тыс. тонн/год	972	3 900
Обеспечение электроэнергией/мощность потребителей электроэнергии с РУ и ХТЧ (из внешней сети), МВт _э	50	200
Обогащение топлива по U ²³⁵ , %	Не более 20	
Проектный срок службы, лет	60	

Основные технические решения

- ✓ Корпус для реактора мощностью 200 МВт возможно изготовить на российских предприятиях
- ✓ Теплоноситель (**гелий**) – инертный газ, не активируется, не имеет фазовых переходов
- ✓ Материал активной зоны (**графит**) обеспечивает её конструкционную стабильность во всех аварийных ситуациях с повышением температуры
- ✓ Топливо (**микрочастицы с керамическими покрытиями**) термо- и радиационно стойкое
- ✓ Конструкция и компоновка реактора обеспечивают необходимый отвод остаточного тепла от а.з. в аварийных режимах пассивным образом через корпус реактора к системе охлаждения шахты реактора



Дорожная карта создания АЭТС с ВТГР и ХТЧ

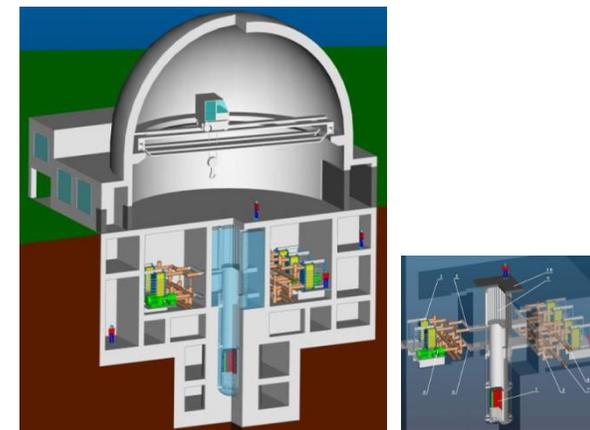
АСТ РУТА-70 ФЭИ, НИКИЭТ



ОКБМ
АФРИКАНТОВ
РОСАТОМ

- РУТА-70 – легководный реактор бассейнового типа с естественной циркуляцией тепловой мощностью **70 МВт**.
- 1990 г. – концептуальный проект.
- 1992-1994 гг. – оценка проекта подземной АСТ 4×55 МВт в г. Апатиты (Мурманская обл.).
- 2003 г. – ТЭО проекта РУТА-70 для применения в региональных сетях теплоснабжения.

Максимальная тепловая мощность реактора, МВт	70
Размеры активной зоны (экв. диаметр/высота), м	1,42/1,40
Топливо	Кермет (0,6 UO₂+0,4 сплав Al)
Обогащение топлива ураном-235, %	4,2
Загрузка урана в активную зону, кг	4165
Количество тепловыделяющих сборок (ТВС), шт.	91
Кампания ядерного топлива, эфф. сут.	2332
Время работы между перегрузками при КИУМ=0,7, лет	3
Доля перегружаемого топлива	1/3
Объем воды в баке реактора, м ³	250
Температура в активной зоне (вход/выход), °С	75/101



1 – активная зона, 2 – теплообменник первичный, 3 – затвор обратный, 4 – насос, 5 – раздающий коллектор 1-го контура, 6 – сборный коллектор 1-го контура, 7 – подводящий трубопровод 2-го контура, 8 – отводящий трубопровод 2-го контура, 9 – привод СУЗ, 10 – верхнее перекрытие

Преимущества легководного реактора бассейнового типа:

- ✓ отсутствие избыточного давления теплоносителя в первом контуре (бассейне реактора);
- ✓ наличие большой тепловой аккумулирующей емкости воды в бассейне;
- ✓ низкая энергонапряженность активной зоны;
- ✓ обеспечение охлаждения активной зоны в диапазоне мощностей от минимального уровня до 30% номинальной мощности, а также в режимах расхолаживания за счет естественной циркуляции теплоносителя в реакторе;
- ✓ трехконтурная система передачи тепла потребителю, при этом минимальное давление воды - в первом контуре.

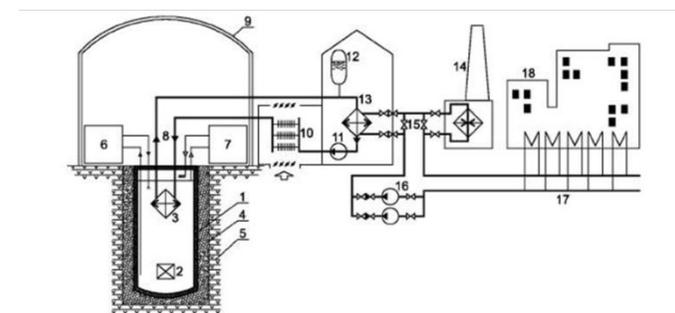
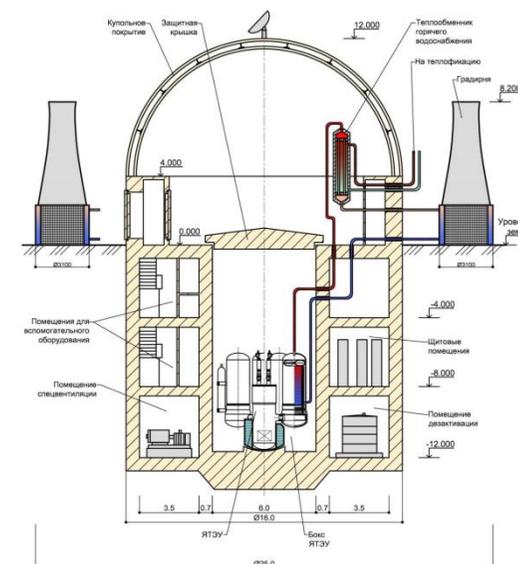


Рис. 2. Принципиальная схема включения установки РУТА в систему централизованного теплоснабжения:
1 – бассейновый реактор; 2 – активная зона; 3 – первичный теплообменник; 4 – бетонный корпус; 5 – грунт; 6 – система очистки; 7 – система вентиляции; 8 – второй контур; 9 – защитная оболочка; 10 – воздушная система расхолаживания; 11 – циркуляционный насос 2 контура; 12 – потребители теплоты; 13 – сетевой теплообменник; 14 – резервно-гликолевые водоподогреватели; 15 – узел регулирования; 16 – сетевые насосы; 17 – теплотель; 18 – потребители.

Атомная термоэлектрическая станция теплоснабжения «Елена-АМ» НИЦ КИ

АСММ на базе РУ «Елена-АМ» – концептуальный проект атомной станции, проект разрабатывается на основе опыта, накопленного при разработке, сооружении и многолетней эксплуатации установки «Гамма», а также проекта атомной станции «Елена» с термоэлектрическими преобразователями

- Предназначена для выработки тепловой энергии на теплофикацию с дополнительной выработкой электроэнергии для собственных нужд и децентрализованного энергообеспечения отдаленных и труднодоступных регионов с привозным органическим топливом. **Разработчик – НИЦ «Курчатовский институт».**
- Используется прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.
- Работа станции в энергетическом режиме не требует присутствия персонала. Регламентные работы выполняются специализированной выездной бригадой один раз в год.
- Продолжительность работы станции на первоначальной загрузке топлива составляет **20** лет.
- Тепловая мощность – до 14 МВт (**12** Гкал/ч).
- Электрическая мощность – до **400** кВт.



Проект АСММ на базе РУ «Елена-АМ» включен в федеральный проект «Новая атомная энергетика, в том числе малые атомные реакторы для удаленных территорий» комплексной программы КП РТТН, по завершению которого (до конца 2024 г.) планируется разработать материалы технического проекта и нормативные документы, провести технико-экономические исследования.



Энергоблок АСММ на базе реакторной установки «Шельф-М» АО НИКИЭТ

АСММ на базе РУ ШЕЛЬФ-М предназначена для энергообеспечения объектов в удаленных и труднодоступных районах с децентрализованным энергоснабжением. АСММ в одноблочном исполнении обеспечивает электрогенерацию на уровне до 10 МВт. Возможна работа в режиме когенерации. **Разработчик – АО «НИКИЭТ».**



Тепловая мощность РУ	35,2 МВт
Электрическая мощность в конденсационном режиме	до 10 МВт
Отпускаемая тепловая мощность в теплофикационном режиме	до 25 Гкал/час
Периодичность перегрузки топлива	8-10 лет
КИУМ	более 90%
Срок службы незаменимого оборудования	60 лет
Маневренность	20% - 100% Нном. Скорость изменения паропроизводительности - до 1 %/с
Масса энергокапсулы	до 375 т

- Согласно стратегии развития направления «Атомные станции малой мощности» ГК «Росатом» АСММ на базе РУ типа «Шельф» была определена в качестве базового варианта в сегменте до 10 МВт;
- Проект АСММ на базе РУ «Шельф-М» включен в федеральный проект «Новая атомная энергетика, в том числе малые атомные реакторы для удаленных территорий» комплексной программы КП РТТН, в рамках которого к 2024 г. планируется разработать материалы технических проектов РУ и основного технологического оборудования АСММ, и нормативные документы;
- В рамках портфеля «научные проекты» ЕОТП ГК «Росатом» по направлению «Атомные станции малой мощности» выполняется серия НИОКР (в обеспечение создания РУ «Шельф-М»).

Технико-экономические показатели АСМСМ

	РУ АБВ-6Э ПЭБ	РУ РИТМ-200Н АСММ	РУ ВБЭР-600 АССМ
Мощность тепловая/ электрическая, МВт	38 / 9,5	190 / 55	1 662 / 615
Срок службы, лет	60	60	60
Обогащение топлива, %	19,6	19,6	4,4 (max 4,95)
Интервал между перегрузками топлива, лет	10 (при КИУМ = 0,7)	6 (при КИУМ = 0,8)	2 (при КИУМ = 0,8)
Удельные капитальные затраты без НДС, \$/кВт _э (серийный объект в ценах на 01.01.2022 г. без учета стоимости а.з.)	20 200* (ПЭБ без БГТС)	15 000 (значение для площадки Усть- Куйга, исходные данные АО РАОС)	3 000
LCOE, цент/кВт·ч (в ценах на 01.01.2022 г. при d = 7%, КИУМ = 0,8)	45,2**	21 ÷ 24 (при КИУМ = 0,8÷0,9)	5,2

* - для головного ПЭБ на базе РУ АБВ-6Э удельные капитальные затраты возрастают на **50%** (CAPEX 30 600 \$/кВт·ч); для АССМ не более **5%**.

** - для головного ПЭБ на базе РУ АБВ-6Э LCOE возрастает на **25%** (LCOE 56 \$/кВт·ч); для АССМ не более **3÷5%** в зависимости от мощности.

Оценка **LCOE** для ДЭС Крайнего Севера ~ **55** цент/кВт·ч при стоимости дизельного топлива **80** руб./литр (удельные капитальные затраты ДЭС **460** \$/кВт_э; хранилища дизельного топлива (годовой запас) **4460** \$/кВт_э; полный **CAPEX 4920** \$/кВт·ч). Справочно: **тариф** Энергоцентра в г. Билибино (ДГУ) на 2023 год **90** цент/кВт·ч (данные семинара №3 а рамках подготовки Президиума НТС ГК «Росатом» по теме АСММ от 30.03.2023 г.).

Курс 1 \$ = 75 руб.

Заключение

- Атомная энергетика доказала эффективность и перспективность ее использования в судовой энергетике и внесла существенный вклад в развитие Северного Морского Пути и освоение Арктики
- Высокое качество и референтность принятых в проектах РУ технических решений подтверждены многолетней успешной эксплуатацией судовых реакторных установок предыдущих поколений
- На базе опыта создания плавучего энергоблока "Академик Ломоносов" разработаны ряд проектов ПЭБ нового поколения с РУ типа РИТМ для различных площадок размещения
- Наличие опыта проектирования, изготовления и эксплуатации РУ типа РИТМ позволяет обеспечить надежность и сжатые сроки поставки
- Энергофлот на базе плавучих энергоблоков позволяет обеспечить бесперебойное энергоснабжение за счет циклической замены на время ремонтов и перегрузок
- В настоящее время в России разрабатываются инновационные проекты РУ малой и средней мощности различного назначения и исполнения, которые соответствуют современным мировым требованиям и тенденциям в области безопасности объектов атомной энергетике. Проекты РУ обеспечивают высокие технико-экономические показатели и конкурентоспособность АСМСМ

Спасибо за внимание!

Петрунин Виталий Владимирович

Первый заместитель генерального директора –
генерального конструктора АО «ОКБМ Африкантов», д.т.н., профессор
заведующий базовой кафедрой «Конструирование атомных установок»
ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»

Тел.:(831) 246-94-21

E-mail: okbm@okbm.nnov.ru

www.okbm.nnov.ru

г. Снежинск, 29 мая 2023 года