ПРОРЫВ
РОСАТОМ

НИЯУ МИФИ

Реализация Стратегии развития ЯЭ до 2050 г. в части объектов новой технологической платформы

Круглый стол «Ресурсное обеспечение новых продуктов атомной энергетики» в рамках форума Ядерного общества «Атомная эпоха: от становления к передовым технологиям будущего. История, опыт, перспективы»

Евгений Олегович Адамов
Научный руководитель проектного направления «Прорыв»

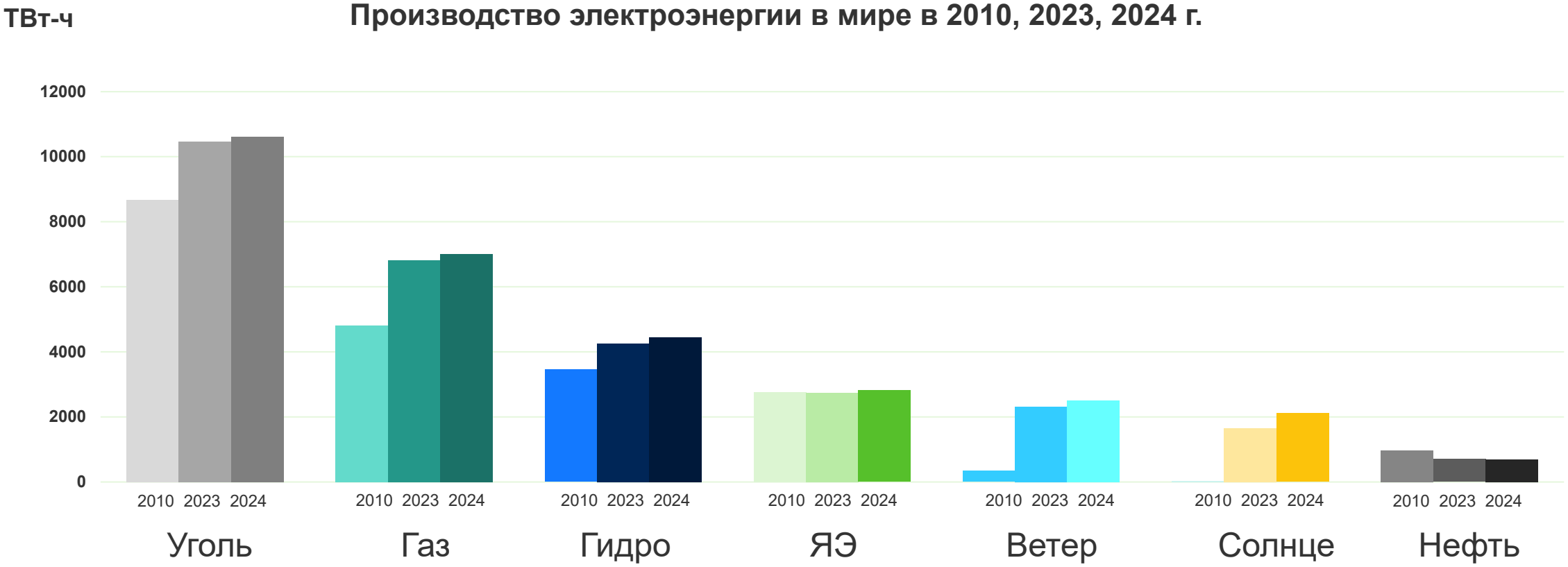
Каширский Андрей Александрович
Начальник аналитического отдела АО «Прорыв»

Каталевич Антон Михайлович
Заместитель начальника отдела главного инженера АО «Прорыв»

11.09.2025

Текущее производство электроэнергии в мире по технологиям генерации

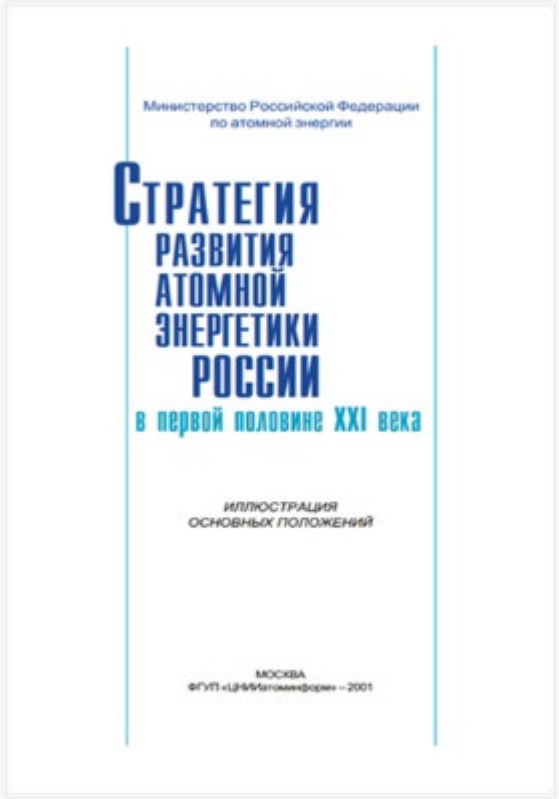
ПРОРЫВ
РОСАТОМ



- С 2010 года наблюдается устойчивый общемировой рост спроса на электроэнергию (2,7 % в год), превышающий темпы роста общего энергопотребления (1,4% в год).
- Для сохранения или увеличения доли производства электроэнергии в XXI веке ЯЭ **необходима новая технологическая платформа**.

Statistical Review of World Energy 2025, IEA Energy Outlook 2024

Первая долгосрочная Стратегия развития ЯЭ в мире



В 2000 г. Министерством Российской Федерации по атомной энергии, совместно с РАН, была разработана и одобрена Правительством РФ «Стратегия развития ЯЭ в РФ в первой половине XXI века»

Основные принципы «Стратегии безопасного роста»:

- **Воспроизводство ядерного топлива (ЯТ)**
  - задачи атомной энергетики большого масштаба решаются быстрыми реакторами *с коэффициентом воспроизводства равным или более единицы*.

- **Принцип «естественной безопасности»**
  - принцип включает *исключение тяжелых реакторных аварий* и аварий на предприятиях ядерного топливного цикла, малоотходную переработку ЯТ с *радиационно-эквивалентным захоронением РАО* и *технологическую поддержку режима нераспространения*

- **Конкурентоспособность**
  - формирование технологий, обеспечивающих крупномасштабное развитие в соответствии с принципами естественной безопасности, *должно сопровождаться повышением конкурентоспособности атомной энергетики*

Актуализация стратегии в контексте развития ЯЭ России

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Производство электроэнергии в РФ, ТВт-ч

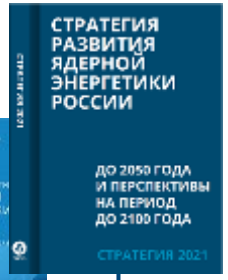
Новая ядерная технология для крупномасштабной ядерной энергетики следующего этапа

Стратегия безопасного роста

18 лет

Стратегия-2018

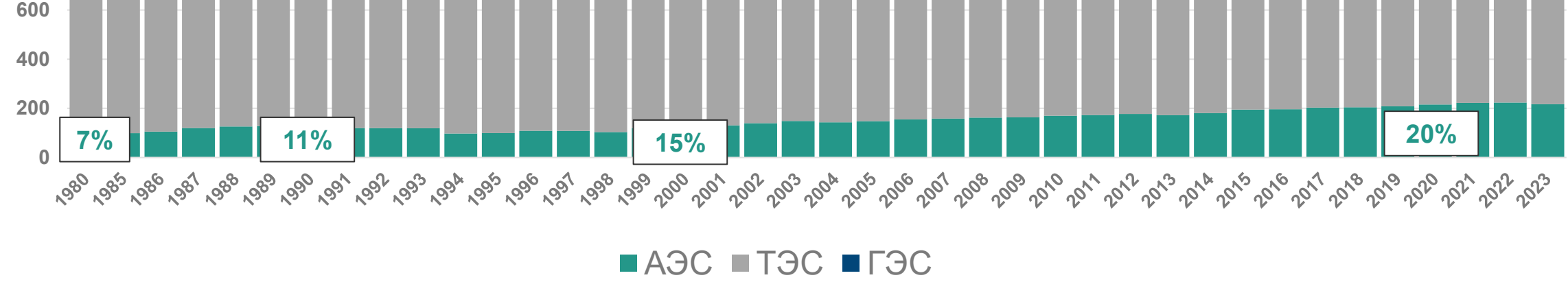
Стратегия-2021



Начало бума «зеленых технологий»

Авария на АЭС Фукусима-1

20 лет



Развитие радиохимических технологий – ключевой элемент замыкания ядерного топливного цикла

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Стратегическая программа «Развитие радиохимического направления»

Цели стратегической программы:

- Решение проблемы накопления ОЯТ в Российской Федерации;
- Обеспечение потребностей двухкомпонентной ядерной энергетики в плутонии и регенерированном уране с учетом развития РБН и перспективных ВВЭР;
- Расширение присутствия Госкорпорации «Росатом» на мировых рынках ЯТЦ;
- Создание промышленной инфраструктуры по переработке накопленного и вновь образующегося ОЯТ российских и зарубежных АЭС при переходе к двухкомпонентной ядерной энергетике с замкнутым ЯТЦ

Задачи стратегической программы (в части инфраструктуры)

- Техническое перевооружение ФГУП «ПО «Маяк»;
- Вывод на проектную производительность ОДЦ ФГУП «ГХК»;
- Создание новых радиохимических мощностей.

Опытно-демонстрационный энергокомплекс (ОДЭК) с пристанционным замкнутым ЯТЦ (г. Северск, АО «СХК»)

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

2024 Начало опытной эксплуатации МФР

2028 Выдача электроэнергии в сеть

2030 Опытная демонстрация замыкания ЯТЦ

Объекты новой технологической платформы

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Приоритет на безопасности без ущерба экономике

АЭС с РБН

- **Детерминистическое исключение тяжелых реактивностных и теплоотводных аварий**;
- Конкурентоспособная генерация э/э;
- Трансмутация минорных актинидов;
- КВ ~ 1,05

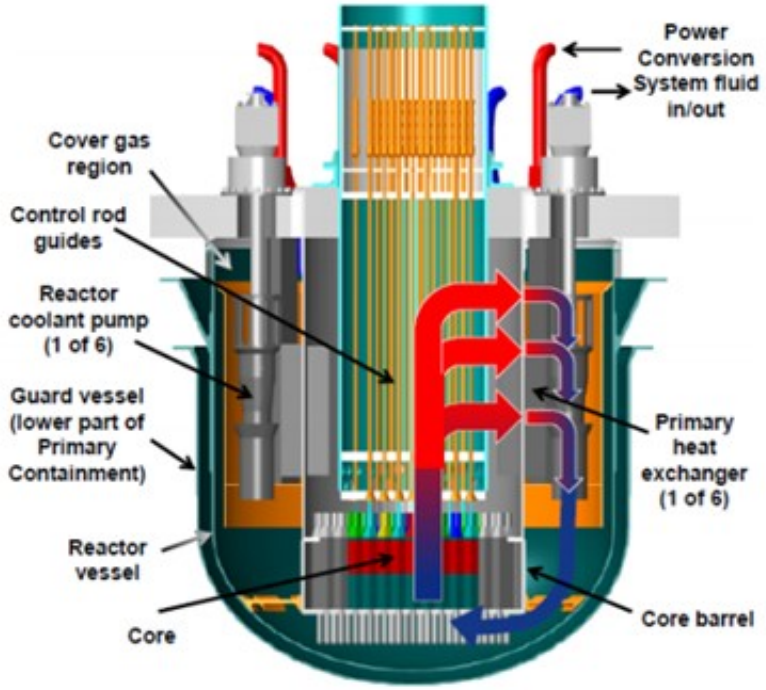
Модуль фабрикации/ рефабрикации топлива

- Фабрикация U-Pu-MA топлива **без использования U-235**;
- Стартовое топливо и первые перегрузки до выхода в режим ЗЯТЦ на базе Pu из ОЯТ РТН;
- **Внедрение роботизации**;
- Запасов U-238 хватит для РБН на тысячи лет.

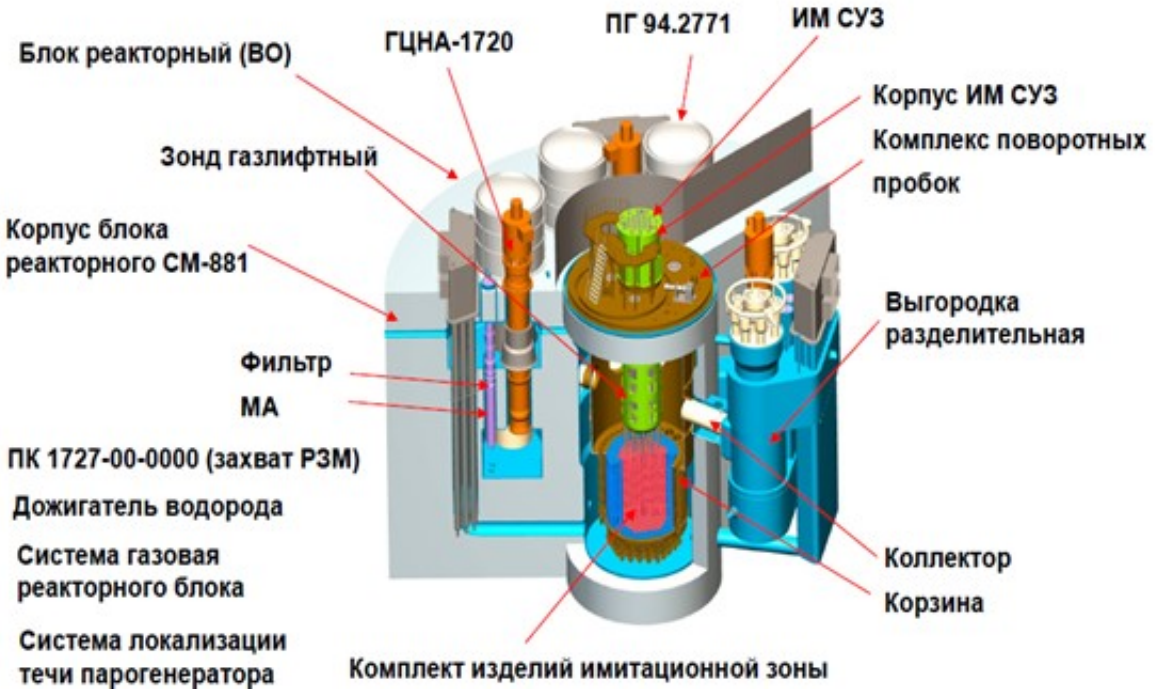
Модуль переработки облученного ядерного топлива

- Прием «горячего» ОЯТ после короткого времени выдержки;
- **Внедрение роботизации**;
- Поддержка режима нераспространения ЯО;
- **Кардинальное снижение радиотоксичности РАО**.

Смена мирового лидера: WESTINGHOUSE на НИКИЭТ

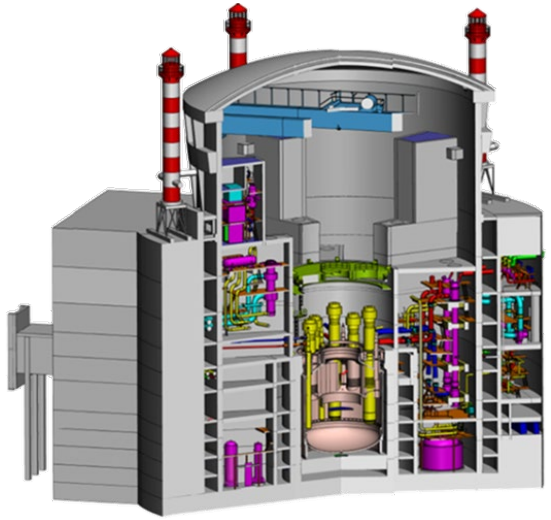


Westinghouse PLFR-300



БРЕСТ-ОД-300

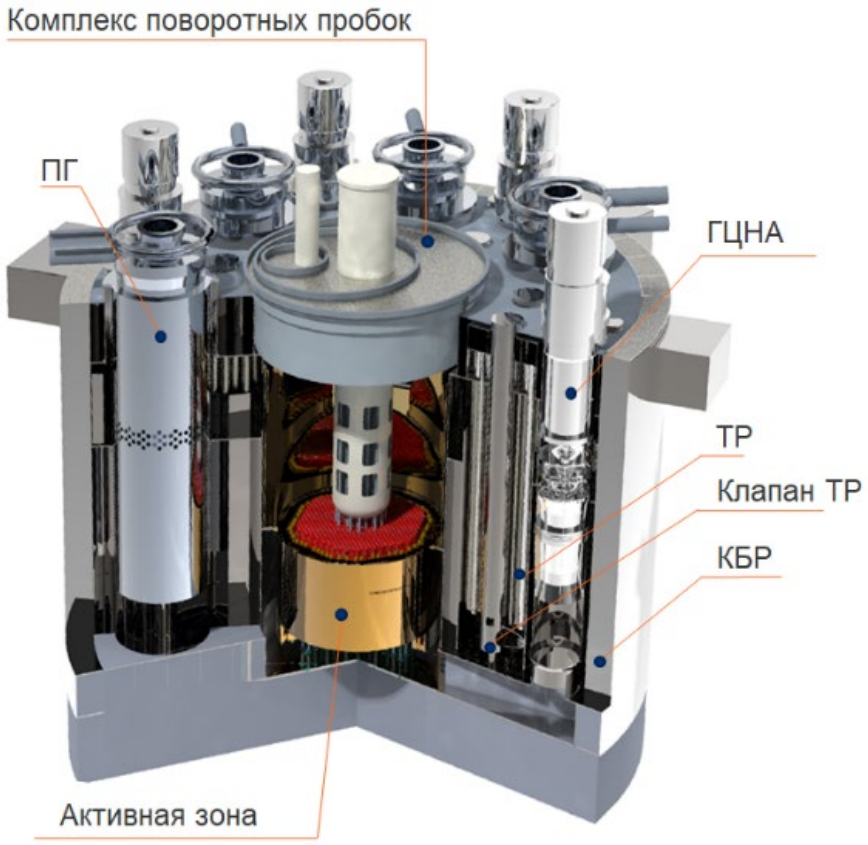
Сооружение энергоблока № 5 Белоярской АЭС с РУ БН-1200М



Характеристика	Значение
Номинальная тепловая (электрическая) мощность, брутто, МВт	2800 (1220)
К.П.Д. АЭС (брутто/нетто)	43,6 / 40,5
КИУМ	0,9
Срок службы, лет	60
Продолжительность непрерывной работы реактора между перегрузками, эфф. сут.	330
Выгорание топлива, МВт·сут/кг	90
Пассивная аварийная защита	ПАЗ-Г, ПАЗ-Т
Система аварийного отвода тепла	Подключена к баку реактора
Вероятность тяжелого повреждения активной зоны, 1/год	$0{,}5 \times 10^{-6}$

- Распоряжением Госкорпорации «Росатома» от 28 апреля 2022 г. № 1-8/282Р утверждена дорожная карта разработки предпроектной и проектной документации и сооружения энергоблока № 5 Белоярской АЭС с РУ БН-1200М.
- **2023-2024 гг.** - разработка и утверждение ОБИН с учетом результатов работ по обоснованию и подтверждению конкурентоспособности проекта
- **2025 г.** - разработка проектной документации, ООБ (сооружение), ВАБ-1, ВАБ-2
- **2027 г.** - получена лицензия на сооружение. Первый бетон
- **2029 г.** – начало монтажа корпуса реактора и оборудования совмещенного монтажа
- **2032 г.** - изготовление и поставка оборудования ДЦИ
- **2034 г.** - физический и энергетический пуск

Конструкция и параметры РУ БР-1200



Параметр	Значение
Мощность тепл. / эл., МВт, не менее	2930 / 1250
Срок службы, лет, не менее	60
$К_{гот}$, не менее	0,9
Длительность работы между перегрузками, эфф. сут	220 (нач. этап) / 330
Паропроизводительность, т/ч, не менее	6120
Стойкость к ВДВ	ПЗ – 7 баллов МРЗ – 8 баллов
ЗР при работе на 100% мощности, $\beta_{эф}$	~ $\beta_{эф}$
Средний КВА	1,05
Среднее выгорание топлива, % т.а.	6,5 / 9,0 / 12,0
Количество ТВС, шт.	397
Количество ПГ, шт.	6
Количество ГЦНА, шт.	6
Вероятность тяжелого повреждения активной зоны, 1/год	~10^{-6}

Основные новые (относительно РУ БРЕСТ-ОД-300) технические решения:

- безуровневая схема циркуляции теплоносителя,
- исключена газовая СПОС.

Исключаются аварии с разгоном на мгновенных нейтронах и необходимость эвакуации и отселения населения за границей площадки АЭС

Смешанное нитридное уранплутониевое топливо (СНУП)

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

С точки зрения влияния на базовые характеристики активных зон и безопасность, три свойства **топлива** играют существенную роль: **плотность, теплопроводность и удельное количество рассеивающих легких элементов (кислород, углерод и азот).**

По сравнению с оксидным топливом у СНУП:

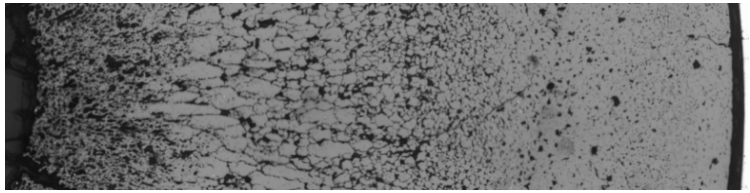
- ✓ Более высокая плотность;
- ✓ Более высокая теплопроводность;
- ✓ Меньший выход ГПД, быстрый теплоотвод;
- ✓ Лучшая совместимость со свинцовым и натриевым теплоносителями.

По сравнению с металлическим топливом у СНУП:

- ✓ Пористость больше (влияет на распухание и ползучесть);
- ✓ Отсутствуют жесткие температурные ограничения;
- ✓ Лучшая совместимость с оболочкой, особенно в аварийных условиях.

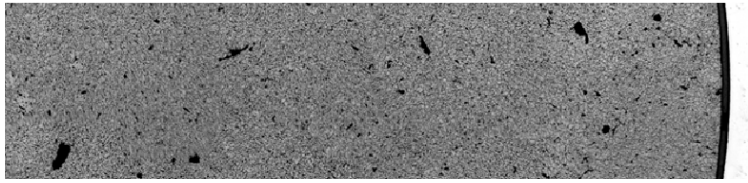
Оксидное топливо

T_{max}=2150 °C



Нитридное топливо

T_{max}=1550 °C



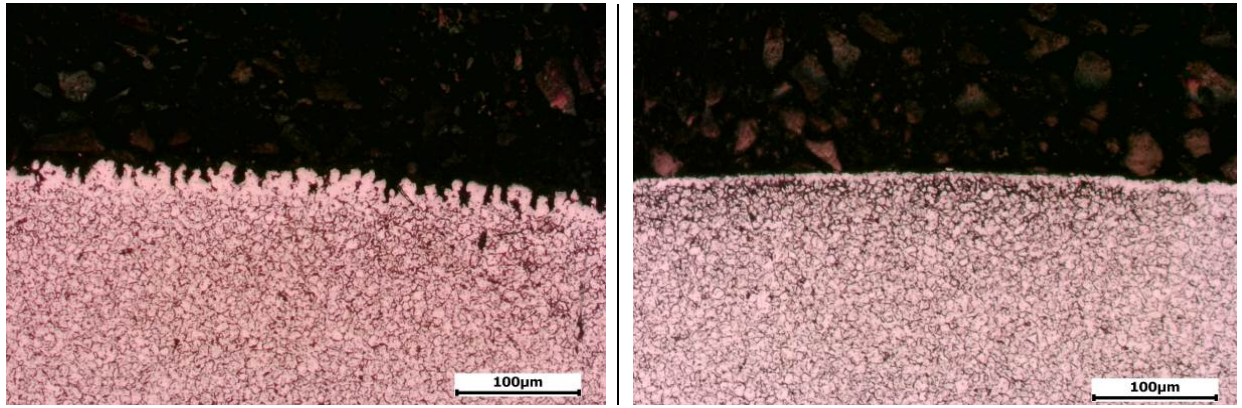
Совместное облучение в КЭТВС-6 в БН-600 до ~40 МВт·сут/кг

Температура таблеточного СНУП топлива на ~600 °C ниже, чем температура оксидного топлива при прочих равных условиях при эксплуатации в а.з.

- Устойчивость нитридного топлива к масштабному развитию дефектов оболочек твэлов (в случае их возникновения) обусловлена практически полным отсутствием взаимодействия топлива с теплоносителем (как со свинцом, так и с натрием);
- **Подтверждена работоспособность твэлов типа БРЕСТ до макс выгорания 9% т.а. и дозы более 110 сна по результатам реакторных испытаний ~1000 твэлов в БН-600, завершены ПРИ более 100 твэлов.**
- Твэлы типа БРЕСТ с гелиевым подслоем достигли **выгорания 9,5% т.а. при рекордной дозе 147 сна; с ЖМП - выгорания 8,8% т.а. при дозе 134 сна** в составе разборного облучательного устройства в реакторе БОР-60. Облучение продолжается.

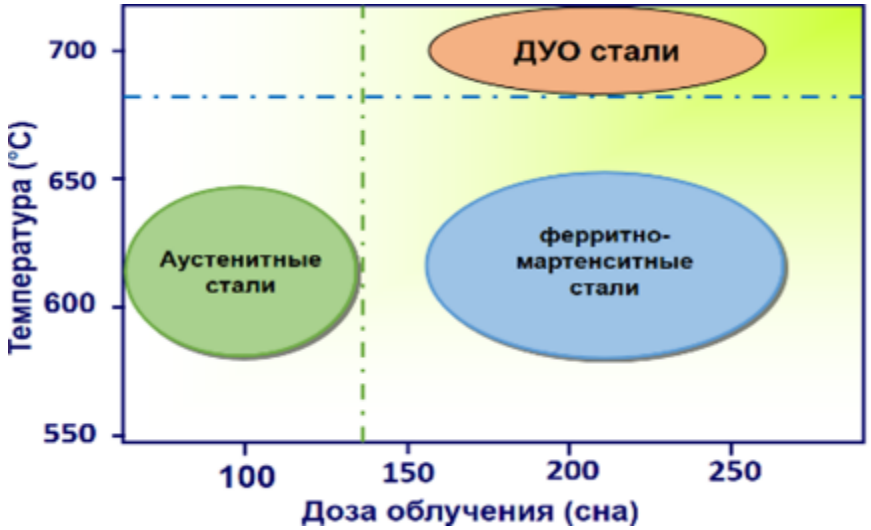
Повышение работоспособности СНУП

Повышение средней глубины выгорания топлива до ~12% т.а. – применение жидко-металлического подслоя (ЖМП) для увеличения проводимости зазора «топливо-оболочка», снижения температуры и распухания топлива.



Pb | Pb+Na+ингибитор

Результаты внереакторных исследований коррозионного взаимодействия оболочки и ЖМП (для легированного подслоя Pb+Na+ингибитор нет коррозии оболочки)



Для обеспечения необходимой жаропрочности оболочки твэла при температуре до **750° – разработка ДУО сталей** - ферритно-мартенситных сталей, упрочненных наночастицами (3-5 нм) оксидов

Модуль фабрикации и рефабрикации смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива

Инновации:

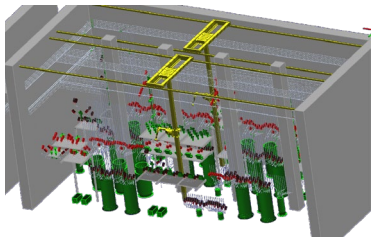
- **плотное нитридное топливо**;
- **уникальное оборудование** (ВЭИК, печи КТС, установка вихревого смешения, установка сборки твэл, установка сборки бесчехловых ТВС);
- полностью **автоматизированные процессы**;
- **рефабрикация топлива с минорными актинидами (МА)**

Текущий статус:

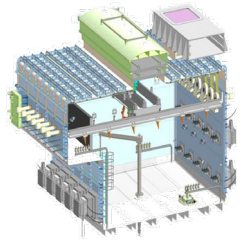
- **завершены СМР и инженерная обвязка оборудования технологических линий** и вспомогательных участков;
- **завершены индивидуальные испытания** оборудования и комплексное опробование основных технологических линий МФР **с использованием имитаторов** (Al_2O_3, тальк, ZrO_2, C, Pb, WC);
- **выполняется комплексное опробование** основных технологических линий МФР **на обедненном уране.**

Сравнение различных технологий переработки ОЯТ РБН

	Гидрометаллургия	Пирохимия	Плазмохимия
Возможность самостоятельного применения для переработки ОЯТ РБН с глубиной выгорания более 10%	Да (с выдержкой для снижения тепловыделения и распада короткоживущих изотопов)	Нет (отсутствует возможность фракционирования МА)	Нет (отсутствует возможность фракционирования МА)
Возможность переработки ОЯТ совместно с КМ	Нет (необходима волоксидация)	Нет (необходима ВТО)	Да
Количество камер для размещения технологического оборудования*	25	10 (для КОМБИ) ~16 (чистая ПИРО)	4
Необходимость в камерах с инертной атмосферой сверхвысокой чистоты	Нет	Да	Нет
Основные преимущества	Отработанная технология	Возможность работы с «горячим» ОЯТ	Минимальное количество технологических операций



Камера Гидро с сервисно-технологическим РТК



Камера Пиро с внутрикамерным манипулятором

Источник плазмы сепарируемой смеси

Пирохимическая переработка СНУП ОЯТ

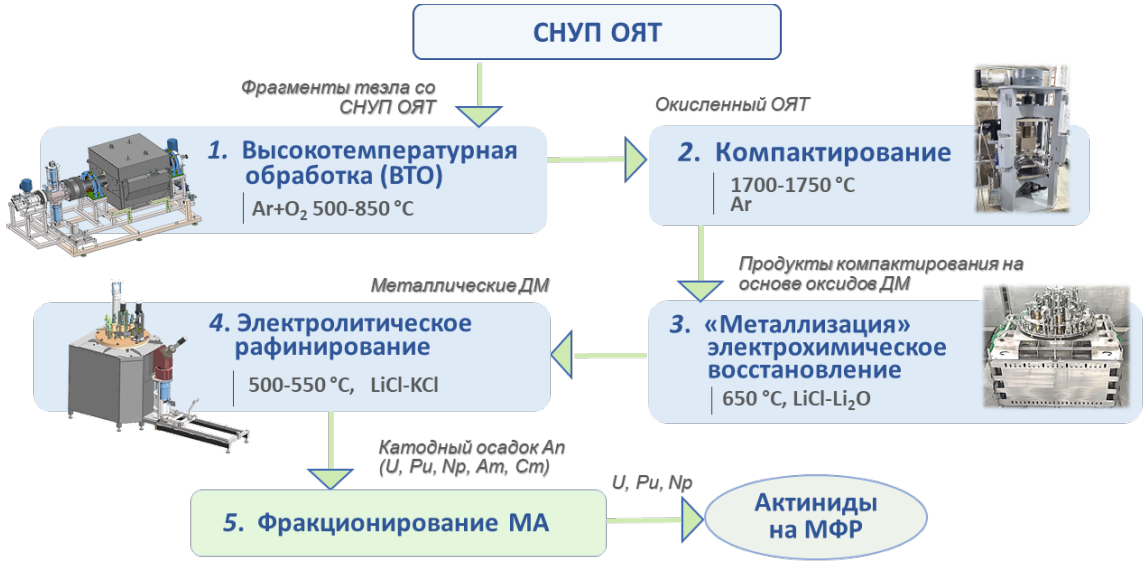
ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Полная схема

$К_{оч} = 10^4 - 10^5$

Короткая схема

$К_{оч} = 10^2$



ВОЗМОЖНОСТЬ СОКРАЩЕНИЯ ПОЛНОЙ СХЕМЫ ЗА СЧЁТ ИСКЛЮЧЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ:

1. **Очистки "металлизированных" шашек от Li_2O и LiCl**
2. **Переплава и изготовления металлических анодов путём электрорафинирования «металлизированных» шашек**

Общепринятые ключевые свойства ЯЭС IV поколения

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Ресурсная устойчивость

Отсутствие ограничений по использованию природных ресурсов (земли, топлива, критических материалов)

Ядерная безопасность

Исключение аварий, требующих эвакуации и отселения населения (тяжелые реактивностные аварии, аварии с потерей теплоносителя)

Радиоэкололологическая безопасность

Минимизация опасности образуемых отходов и снижение радиоэкологического обременения для следующих поколений

! Экономическая конкурентоспособность

Конкурентоспособность в сравнении с альтернативными энерготехнологиями при учёте всех затрат на топливный цикл, отчислений за выбросы и обращение с отходами производства

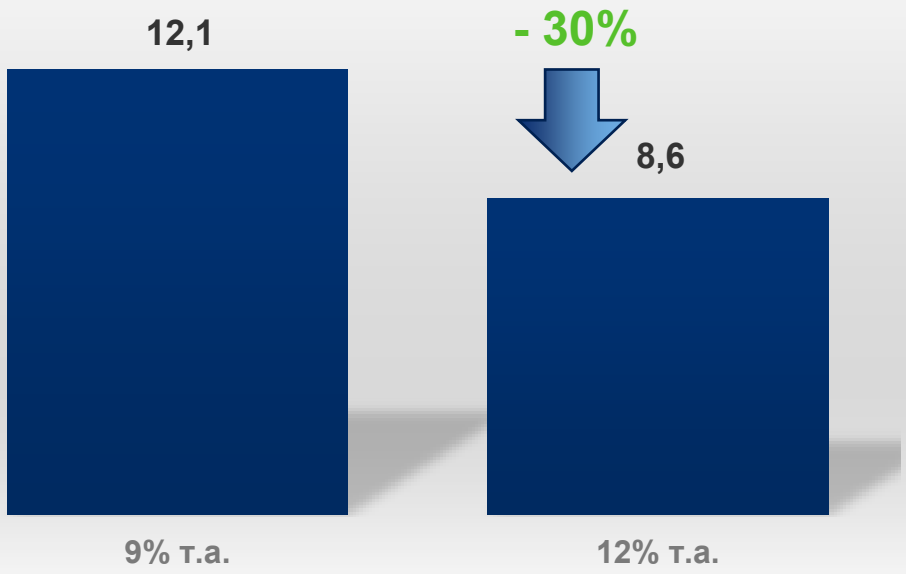
Нераспространение

Технологическая поддержка режима нераспространения ядерного оружия

Эффект от достижения целевых ТЭП РБН

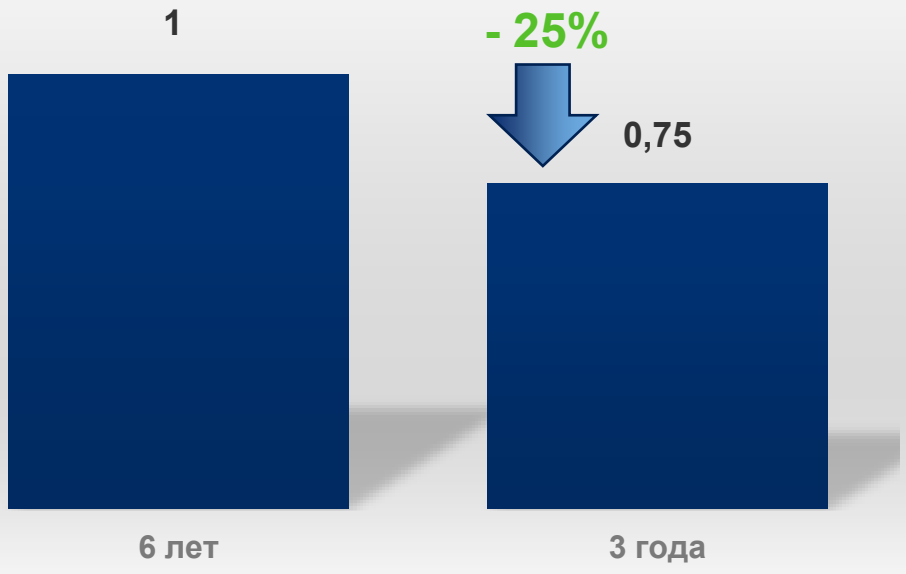
ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Снижение массы ежегодно рециклируемого топлива на 1 ЭБ благодаря повышению глубины выгорания топлива, т ТМ/год



Средняя глубина выгорания топлива РБН

Снижение потребности в Pu для запуска 1 ЭБ РБН благодаря реализации короткого ЯТЦ, отн. ед.

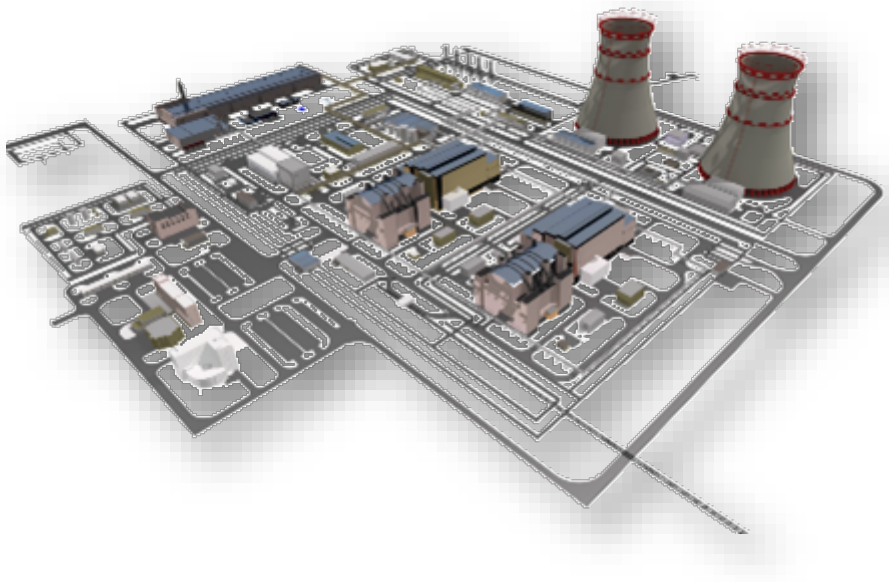


Длительность ЯТЦ РБН

Достижение требований конкурентоспособности РБН и ЗЯТЦ – необходимое условие успешного развития двухкомпонентной ЯЭ

Промышленный энергокомплекс (ПЭК) в составе двухблочной АЭС с РУ БР-1200 и пристанционным ЗЯТЦ

ПРОРЫВ
РОСАТОМ



РФ

1ый ПЭК (район г. Северск)
в составе 2х ЭБ и ПЯТЦ
(1ый ЭБ – 2037г)

Мощность 1-го блока: 1255 МВт

Теплоноситель РУ: свинец

Тип топлива: СНУП

Производительность изг-я
ЯТ на 2РУ : 30 т /год

Мощность 1-го блока: 1200 МВт

Теплоноситель РУ: натрий

Тип топлива: металлическое

Производительность изг-я
ЯТ на 1РУ : 20 т /год

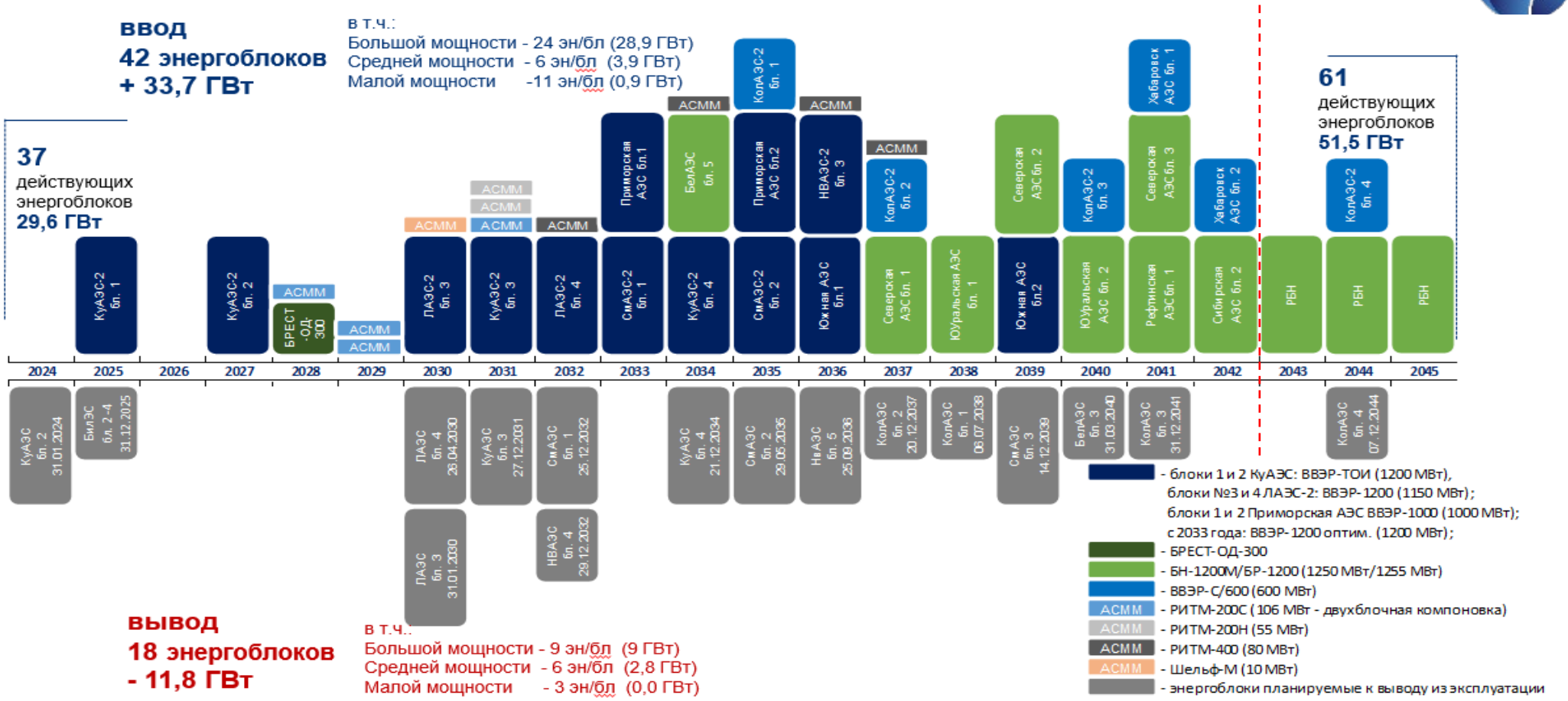
КНР

Аналог ПЭК
в составе 6ти ЭБ и ПЯТЦ
(2035г)*

* Конференция МНТК, 09.2024

Сооружение АЭС в РФ до 2045 года

Генсхема-2042



В соответствии с отраслевой Стратегией развития ядерной энергетики до 2050 и перспективы до 2100 года установлены следующие задачи:

- ✓ **повышение эффективности атомной энергетики (повышение доли до 25% в энергобалансе страны);**
- ✓ **разработка и внедрение новых энергетических технологий в области атомной энергетики, предполагающей параллельную эксплуатацию реакторов на тепловых и быстрых нейтронах в целях обеспечения замкнутого ядерного топливного цикла.**

Сооружение РБН в России и за рубежом

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

РФ

БН-800 (Na)

БРЕСТ-ОД-300 (Pb)

ОДЭК

БН-1200М (Na)

БР-1200 (Pb) (с пристанционным ЗЯТЦ)

7 лет

5 лет

2015 **2020** **2025** **2030** **2035** **2040**

4 года

3 года

NRP

ARC-100

МИР

(Na)

Блок 1

CFR-600

Блок 2

CFR-1000*

CIFR-1000* (с пристанционным ЗЯТЦ)

PFBR-500

FBR-600

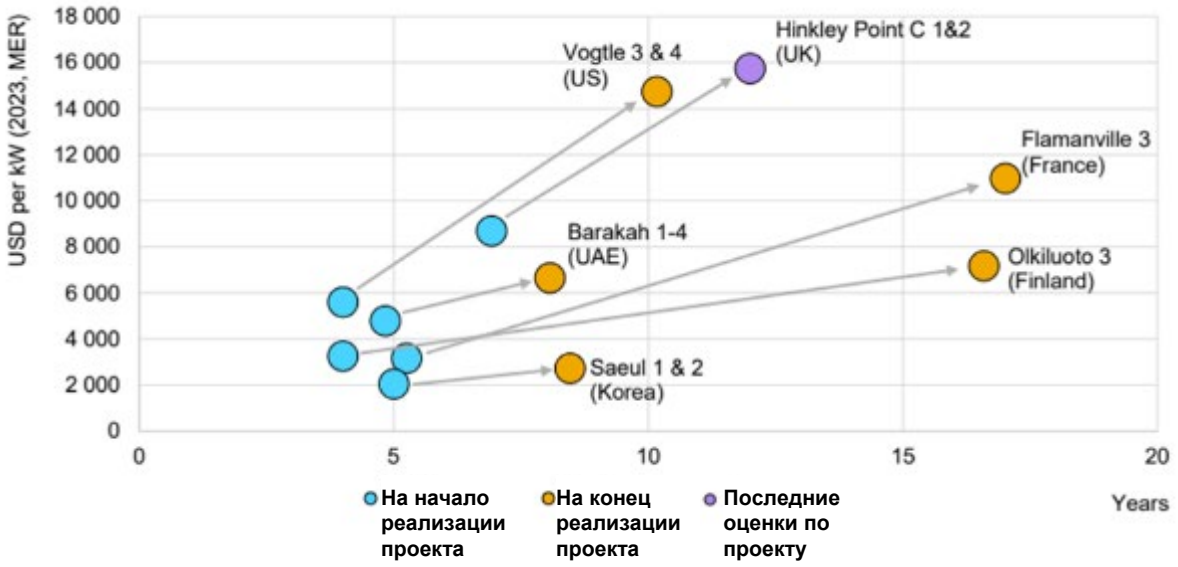
⟷ задел; ⟷ отставание

*** доклад CIAE, конференция МНТК-2024, Москва, 18-20.09.2024; ICONE-32 China June 2025**

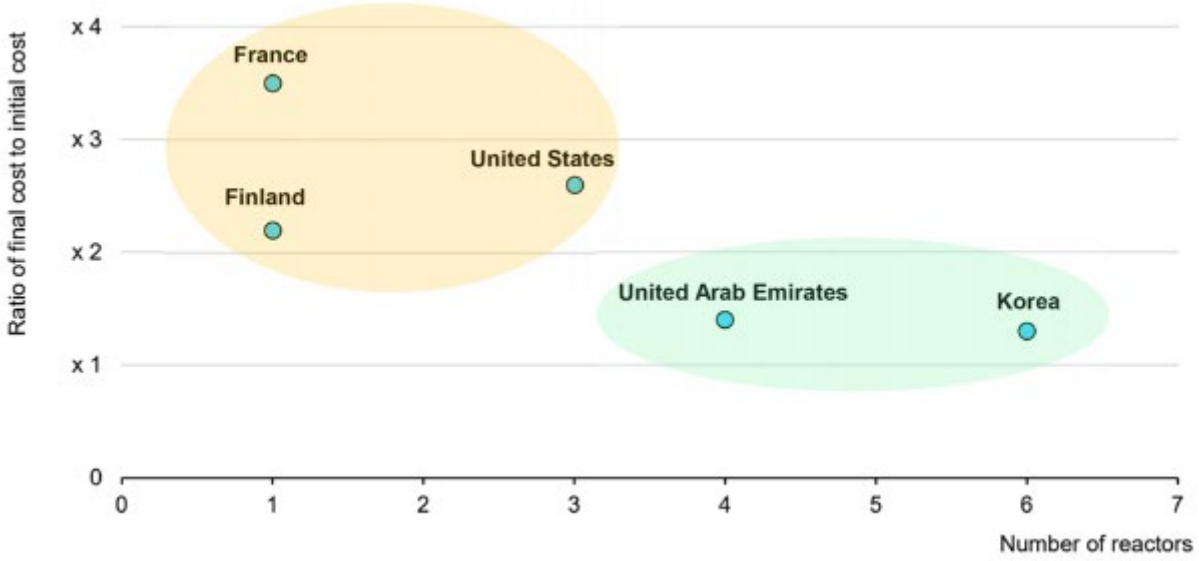
Сроки и стоимость сооружения АЭС в странах мира

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Первоначальные оценки и фактические КВЛ, сроки реализации отдельных проектов сооружения АЭС



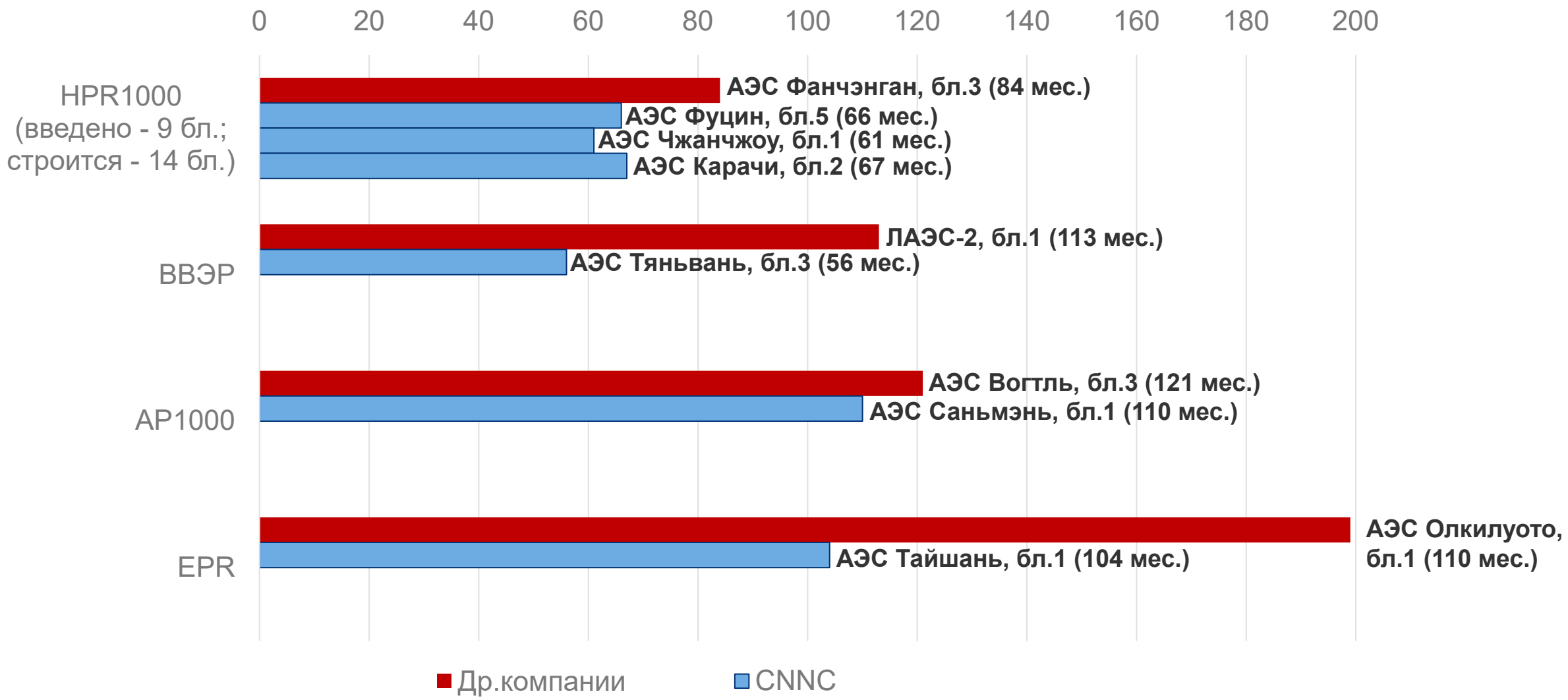
Соотношение фактических КВЛ к первоначальным оценкам и количество инициированных проектов сооружения АЭС в последние 15 лет



- **Ядерная энергетика является «зеленым», но капиталоемким источником генерации электроэнергии**
- **Проекты сооружения энергоблоков АЭС большой мощности в развитых странах в последние годы сопровождались увеличением затрат и сроков сооружения**
- **Переход к серийному сооружению энергоблоков АЭС может способствовать сокращению сроков и стоимости**

Источник: «The Path to a New Era for Nuclear Energy», International Energy Agency 2025

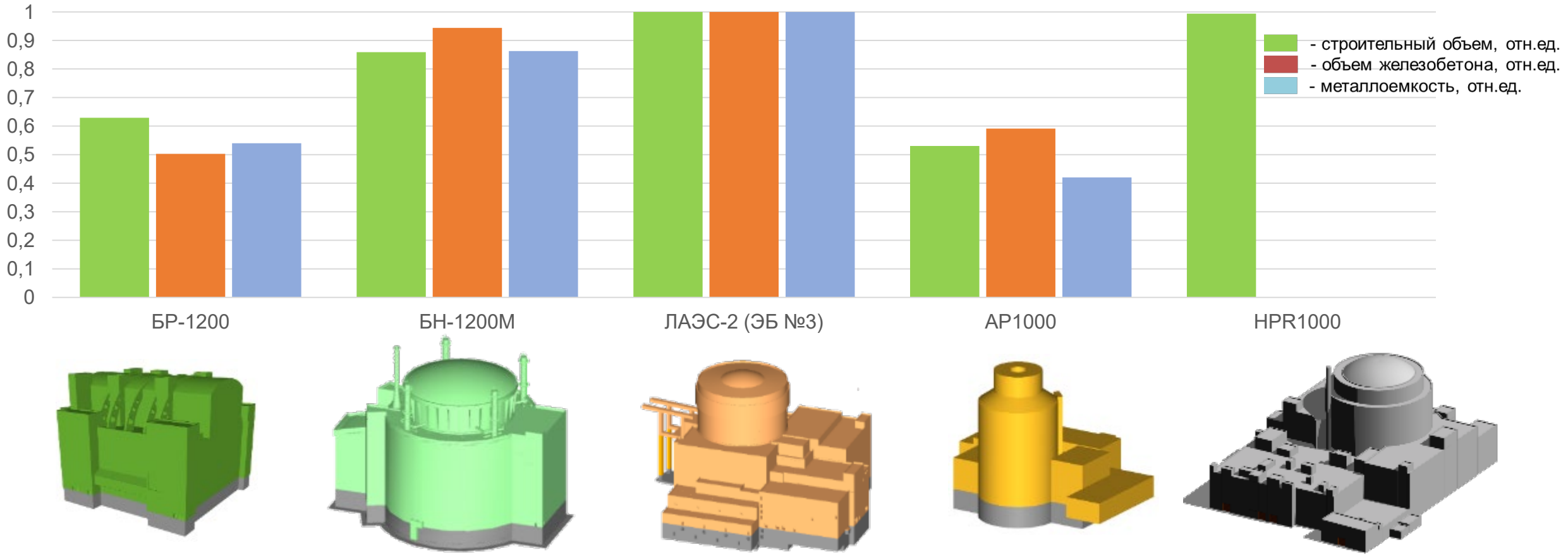
Сравнение продолжительности строительства проектов



Данные с конференции ICONE-32 China June 2025

Сравнение ресурсных показателей проектов функционально-сопоставимых зданий реактора проектов большой мощности

ПРОРЫВ
РОСАТОМ



Для АР1000 (5 зданий: здание реактора, вспомогательный корпус, пристройка, здание перегрузки РАО, бак запаса воды для системы охлаждения**):**
- строительный объем определен на основании стереосъемки объекта АЭС Sanmen с учетом данных из 3D-модели по материалам базового проекта (открытые источники);
- объем железобетона определен из 3D-модели по материалам базового проекта;
- металлоемкость посчитана по данным из 3D-модели и материалам из раздела по выводу из эксплуатации базового проекта

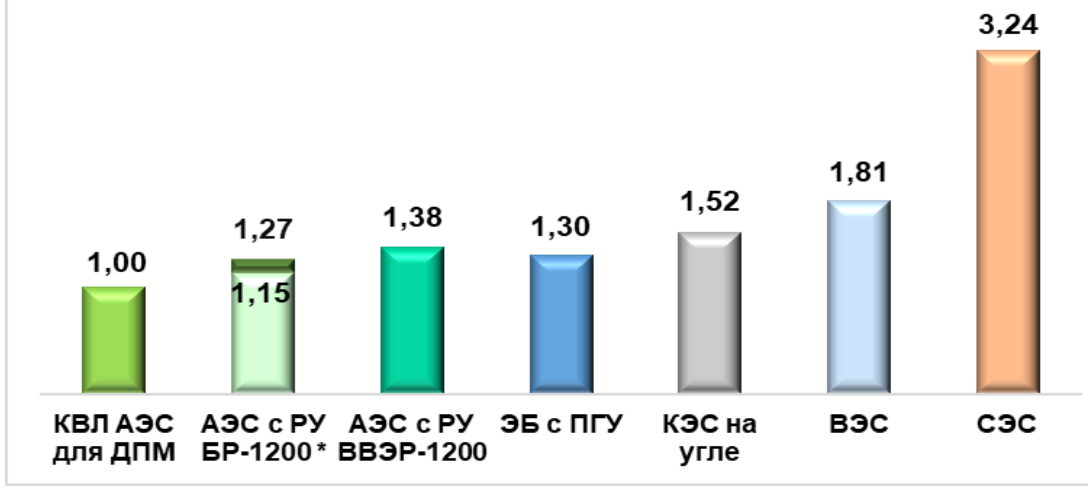
Для HPR100 (6 зданий: здание реактора, вспомогательный корпус, пристройка, здание перегрузки ЯТ и РАО, здание безопасности каналов А и Б, электротехнический корпус**):**
- строительный объем надземной части зданий определен на основании космической стереосъемки объекта АЭС Fuqing

Оценка конкурентоспособности энерготехнологий по LCOE в России по состоянию на начало 2025 г.

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

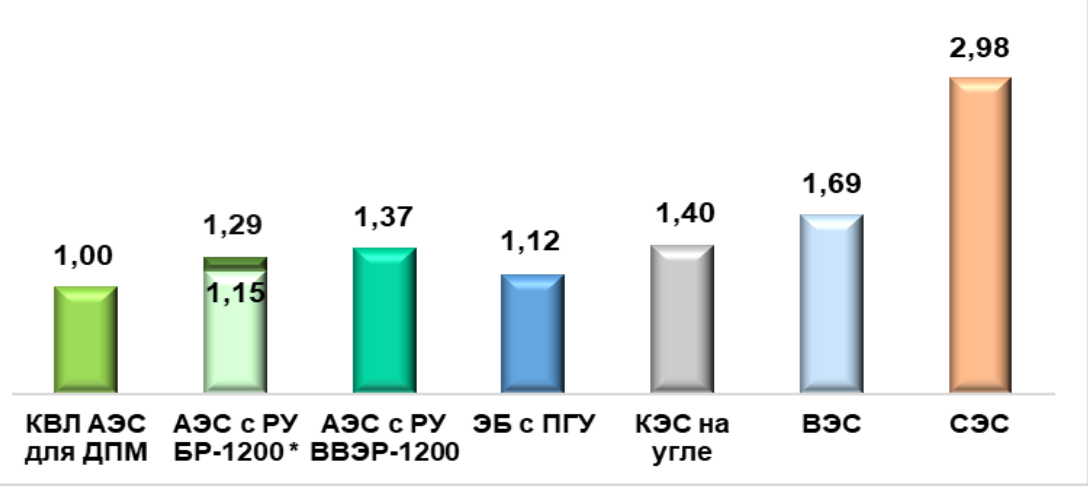
LCOE, отн. ед.

Ставка дисконтирования 5%



КИУМ, %	90%	90%	90%	60%	60%	25%	14%

Ставка дисконтирования 8%



КИУМ, %	90%	90%	90%	60%	60%	25%	14%

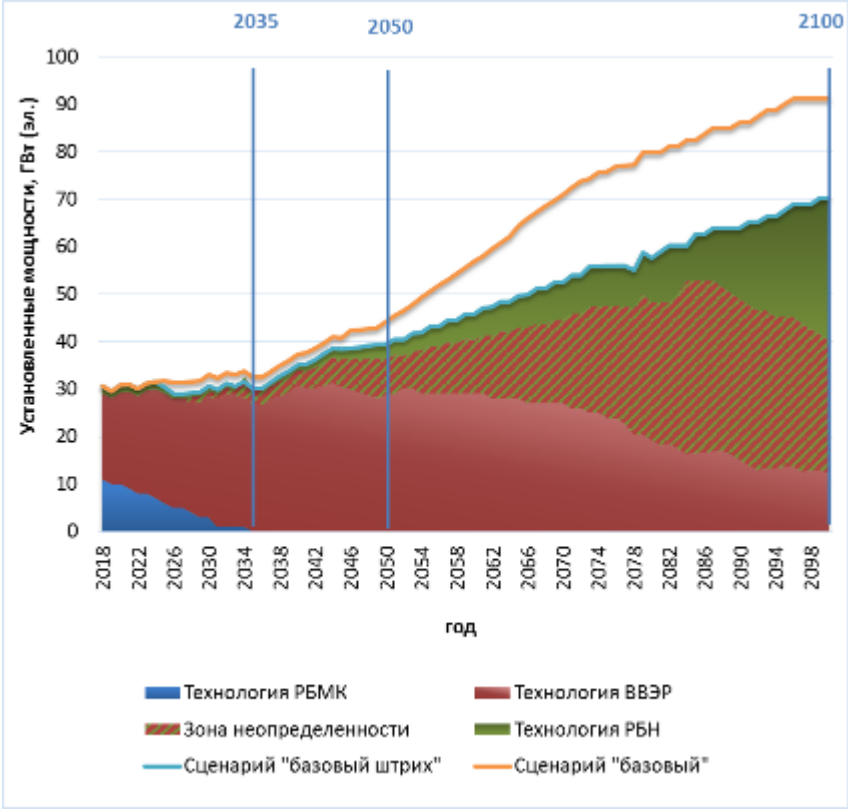
- **АЭС конкурентоспособны в сравнении с альтернативной генерацией при достижении предельных КВЛ и ставках дисконтирования не более 8%, АЭС с РУ БР-1200 обладают существенным потенциалом повышения конкурентоспособности при серийном сооружении**
- **Необходимым условием реализации стратегии перехода к двухкомпонентной ЯЭ является формирование оптимальной конфигурации и динамики ввода объектов ЯТЦ АЭС с РТН/РБН**

Расчет LCOE проведен по актуальным методическим указаниям Госкорпорации «Росатом» (приказ от 14.04.2017 №1/320-П) при реальных ставках дисконтирования.
ТЭП ПГУ, КЭС и ВИЭ приняты по актуальным данным ИНЭИ РАН (КИУМ ПГУ и КЭС принят по данным Управления ЖЦ АЭС Госкорпорации «Росатом»).
** По актуальным результатам разработки ТЭО ПЭК (головное / серийное исполнение), будет уточнено по результатам разработки ОБИН*

Ключевые выводы

ПРОРЫВ
РОСАТОМ

- Переход на ЯЭС IV поколения - ключевое условие для кардинального изменения доли ЯЭ в мировом энергобалансе и повышения ее конкурентоспособности относительно альтернативных источников энергии, включая органику и ВИЭ;
- В России переход на ЯЭС IV поколения обусловлен инфраструктурными, экологическими, ресурсными и экономическими факторами;
- Успех реализации Стратегии развития двухкомпонентной ЯЭ России зависит от степени освоения технологий РБН и замкнутого ЯТЦ:
    1. Создания ОДЭК в г. Северске на площадке АО «СХК»;
    2. Модернизации и ввода новых мощностей по переработке ОЯТ РТН для запуска РБН;
    3. Ввода первых ЭБ с РБН большой мощности, включая ЭБ в составе ПЭК;
    4. Достижения целевых ТЭП РБН и ЗЯТЦ.



Динамика изменения мощностей АЭС двухкомпонентной ядерной энергетики России в Стратегии-2018

Спасибо за внимание!

Евгений Олегович Адамов
Научный руководитель проектного направления «Прорыв»

11.09.2025