



ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Актуальные результаты системного моделирования замкнутого ЯТЦ России

Всероссийская школа молодых ученых - 2025
«Системные исследования энергетических технологий»

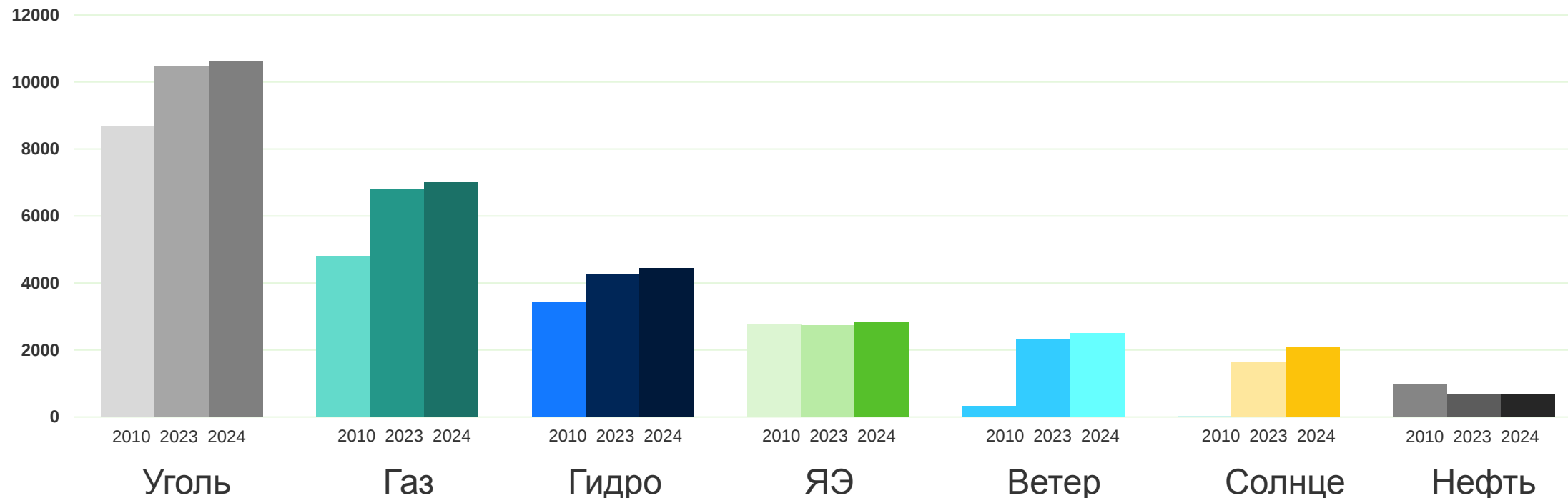
Андрей Александрович Каширский
Начальник аналитического отдела АО «Прорыв»

26.11.25

Текущее производство электроэнергии в мире по технологиям генерации

ТВт-ч

Производство электроэнергии в мире в 2010, 2023, 2024 г.



- 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.**

Почему переход к ЯЭС IV поколения важен для ЯЭ

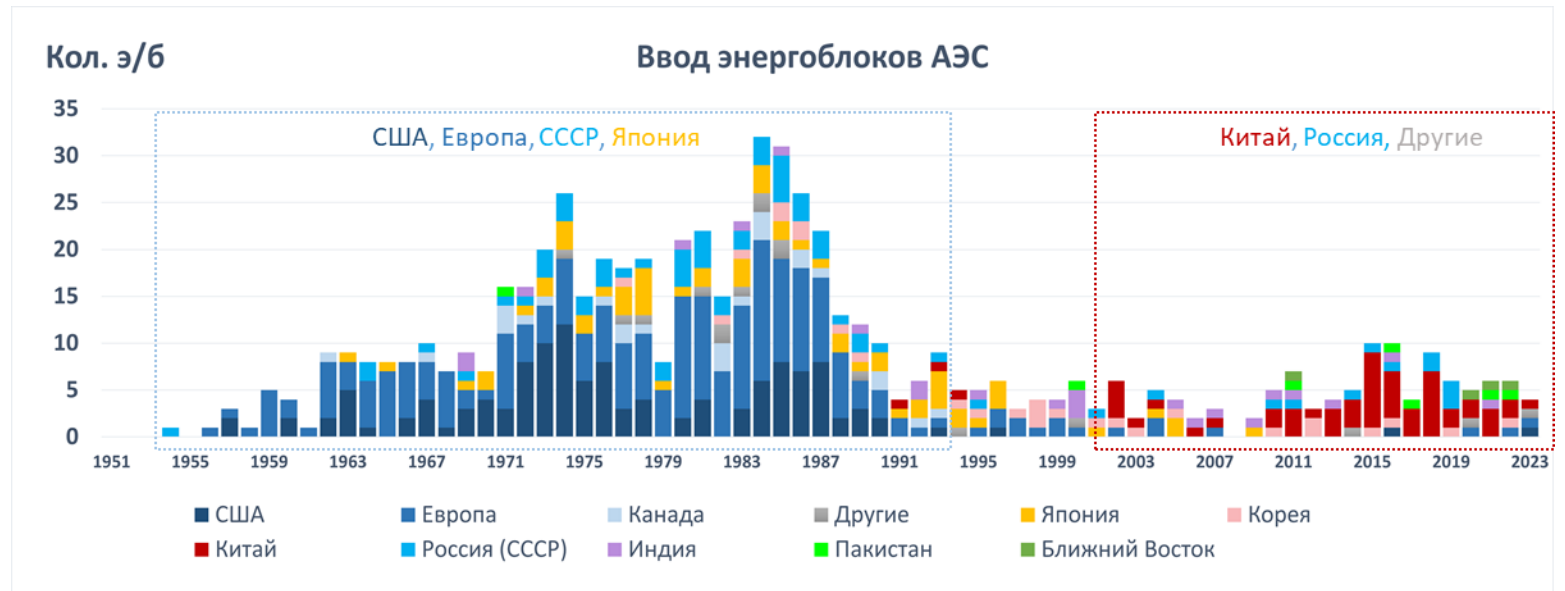
- Тяжелые аварии существенно снизили желание многих стран развивать новые проекты АЭС;
- Основным барьером на пути развития современной ЯЭ является проблема конкурентоспособности, которая упирается в проблему безопасности;
- Необходимость долговременного хранения потенциально опасных отходов нивелирует преимущества безуглеродного производства электроэнергии в общественном сознании.



Перспектива развития

Глобальные подходы по увеличению доли ЯЭ:

- Остановиться на одном проекте и продолжить серийное строительство;
- АСММ – новая парадигма;
- Инновационное развитие.



Что может предложить ЯЭ XXI веку?

Современная ЯЭ:

- не зависит от погодных условий;
- не привязана территориально к какому-то природному источнику энергии;
- масштабируема в пределах существующих ресурсов;
- позволяет генерировать электроэнергию 60-80 лет по запросу с высоким КИУМ.
- обладает самой низкой ресурсоемкостью среди альтернативных технологий генерации

- ежегодно нарабатывает ОЯТ;
- ограничена национальной ресурсной базой;
- в ряде стран:
 1. имеет негативное общественное восприятие из-за крупных аварий в прошлом и риска распространения ЯО;
 2. неконкурентоспособна ввиду неэффективной организации строительства капитальных объектов

Имеет колоссальный потенциал для инноваций и совершенствования собственной технологической базы

Совершенствование технологической базы



ПРОРЫВ
РОСАТОМ



РУ большой и средней мощности для двухкомпонентной ЯЭ



ВВЭР-С

- ЭБ 600 МВт(э);
- Спектральное регулирование;
- УОХ/РЕМИКС/МОХ топливо;
- Реализация в рамках АЭС;
- Открытый цикл;
- Опция 100% загрузки МОКС;
- Экономия 30% Упр в сравнении с ВВЭР-1000/1200.
- Поколение 3+.



ВВЭР БМ

- ЭБ 1250 МВт(э);
- Теплоноситель – вода под давлением;
- УОХ/РЕМИКС топливо;
- Реализация в рамках АЭС;
- Открытый цикл;
- Поколение 3+.



БН-1200М

- ЭБ 1250 МВт(э);
- Натриевый теплоноситель;
- МОКС/СНУП топливо;
- Реализация в рамках АЭС;
- Гетерогенная/гомогенная а.з.;
- Для МОКС а.з. для КВ>1 требуется торцевая зона воспроизводства;
- Возможны опции с КВ>>1;
- Часть ЯЭС IV поколения.



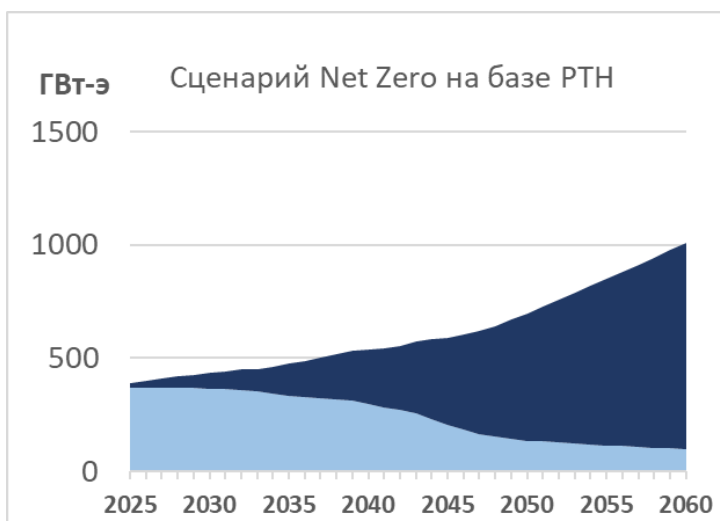
БР-1200

- ЭБ 1255 МВт(э);
- Свинцовый теплоноситель;
- СНУП топливо;
- Реализация в рамках ПЭК;
- Гомогенная а.з.;
- КВ~1,05;
- Лучшие ресурсные показатели (строительный объем, железобетон, металлоемкость в сравнении с РТН БМ)*;
- Часть ЯЭС IV поколения.⁷

* С учетом стадии проектирования

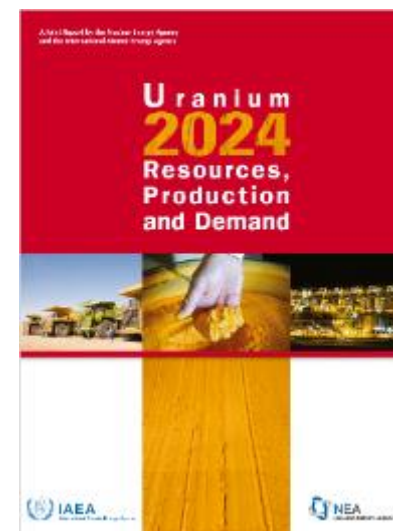
Уран

- Всего выявленных* (identified in situ) ресурсов по стоимости извлечения <260 \$/кг - ~7,9 млн т.
- Из них «разумно оцененные извлекаемые ресурсы» (RAR) - 6,5 млн;
- Текущий уровень потребления в мире – 67 000 т в год;
- Соотношение «запасы (выявленные) / потребление (текущий уровень)» ~120 лет. По RAR - ~100 лет.



■ Новые РТН
■ Действующие РТН

Потребности в Упр на ЖЦ для
блоков, введенных до 2060 г.:
8,3 млн т**

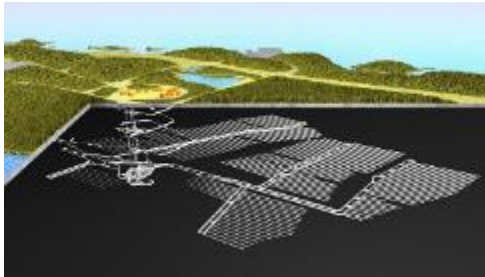


По данным Uranium 2024:
высокий спрос на ЯЭ к 2050 г.
потребуется примерно 50% от
текущей выявленной базы
ресурсов при затратах <\$130
США за кгU и около 35% при
затратах <\$260 США за кгU.
Даже если ЯЭ останется на
уровне 2050 года, совокупные
потребности превысят 100%
от выявленной базы ресурсов
к 2080-м годам при высоком
спросе или к 2110-м годам при
низком спросе.

*С учетом технологии подземного выщелачивания и коэффициента извлечения 74,1%

**расчет аналитического отдела АО «Прорыв»

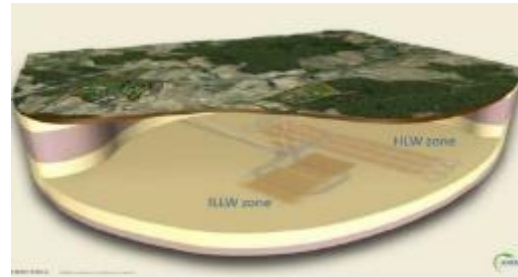
Подходы к обращению с ОЯТ и РАО



Проект Onkalo, Финляндия

Прямое захоронение ОЯТ

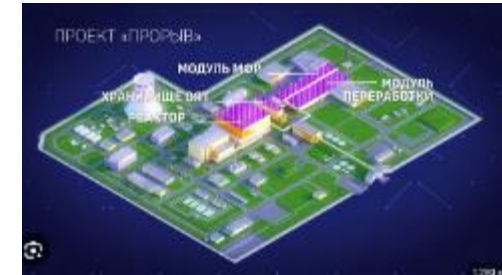
- Захоронение Рц, МА и ПД
- Выравнивание потенциальной биологической опасности и исходного уранового сырья через сотни тысяч лет
- Представляет проблему с точки зрения распространения ЯО (Рц, МА)
- Самый дорогостоящий тип захоронения



Проект Cigeo, Франция

Захоронение РАО с МА

- Захоронение МА и ПД
- Выравнивание потенциальной биологической опасности и исходного уранового сырья через тысячи лет
- Представляет проблему с точки зрения соблюдения режима нераспространения ЯО (МА)
- Экономит топливо для АЭС



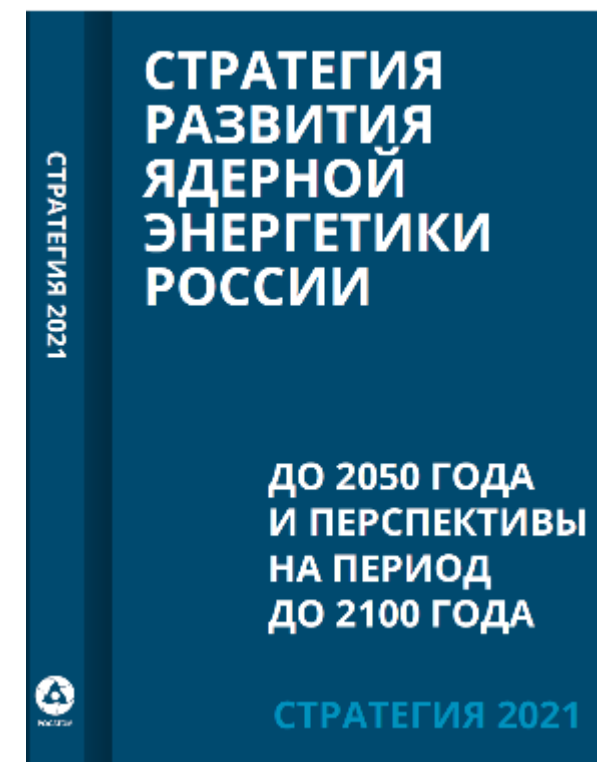
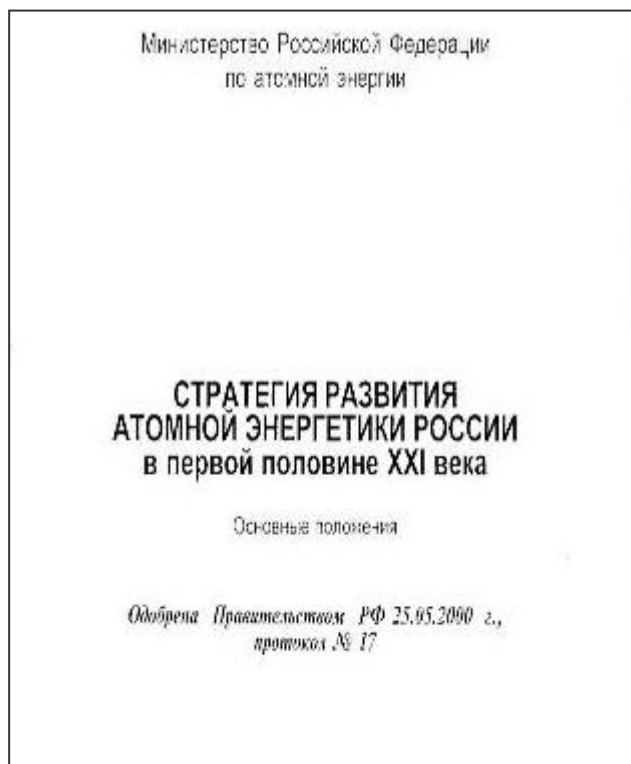
Проект «Прорыв», Россия

Захоронение РАО без МА

- Захоронение ПД
- Выравнивание потенциальной биологической опасности и исходного уранового сырья через сотни лет
- РАО не представляет проблему с точки зрения распространения ЯО
- Экономит топливо для АЭС
- Снижает требования для пункта захоронения РАО

Снижает привлекательность ЯЭ для населения

Стратегия развития ЯЭ и её последовательная реализация



«При обеспечении баланса между радиационной и биологической опасностью захораниваемых радиоактивных отходов и уранового сырья, извлекаемого из недр, можно избежать существенных нарушений природного уровня радиационной и биологической опасности и сделать убедительными доказательства безопасности обращения с РАО»

«Будущее ядерной отрасли России, ее устойчивое развитие связано с формированием двухкомпонентной ядерной энергетики и переходом к замкнутому топливному циклу»

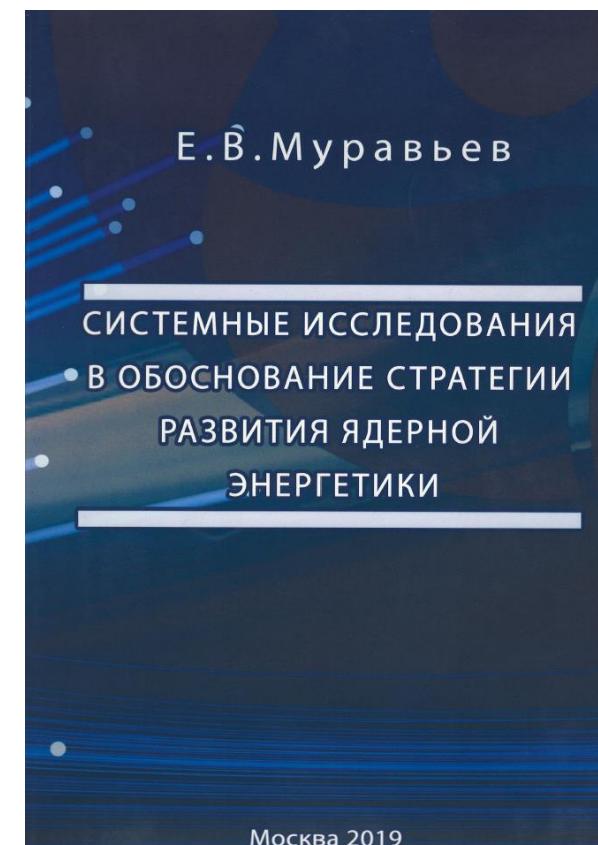
«Стратегическими целями Госкорпорации «Росатом» в части обращения с ОЯТ является сокращение объемов ОЯТ за счет экономически и экологически оправданной переработки и реализация возможности возвращения продуктов переработки в ядерный топливный цикл.»

Системное моделирование в рамках ПН «Прорыв»

Генератор системных моделей «Универсальная Системная Модель-1» (УСМ-1)

Исследуемые аспекты :

- развитие производственных мощностей, материальные балансы и ресурсы;
- инфраструктура создания и вывода из эксплуатации производственных мощностей (подготовка кадров, НИОКР и проектирование, машиностроение, строительно-монтажные услуги и т.д.);
- транспортировка используемых и вырабатываемых продуктов;
- структура затрат, механизмы финансирования, доходность;
- внеэкономические критерии: безопасность, экологическая приемлемость, нераспространение.



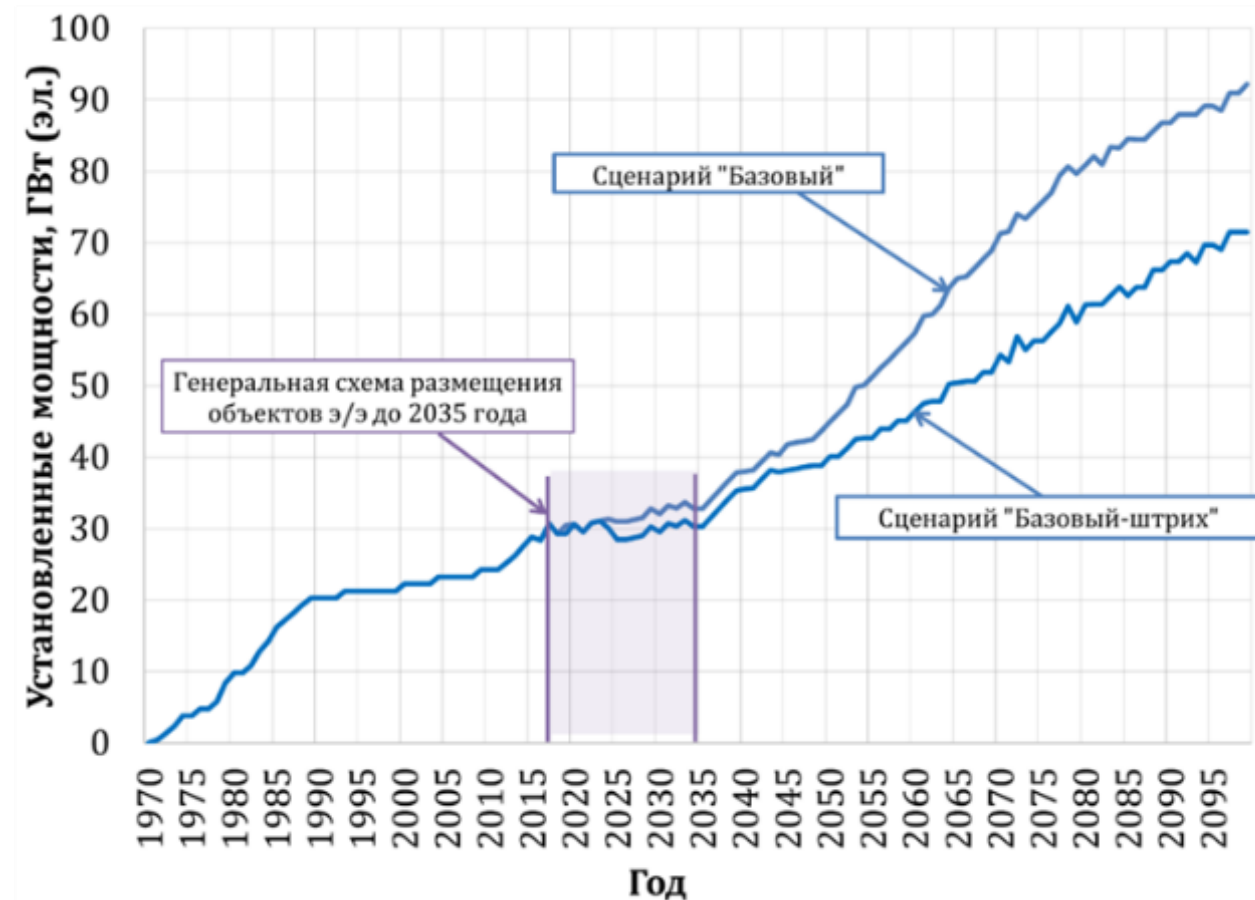
Стратегия-2018 – сценарии развития ЯЭ России



ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Исходные данные по прогнозу спроса на генерацию электроэнергии на внутреннем рынке для ЯЭ опираются на генеральную схему размещения объектов электроэнергетики до 2035 г. и прогнозные исследования, проведенные в ИНЭИ РАН.

	2035	2050	2100
Базовый, ГВт(э)	33	44	91
Базовый-штрих, ГВт(э)	30	39	71



Стратегия-2018 – варианты развития ЯТЦ



ПРОРЫВ
РОСАТОМ

Вариант 0 ОЯТЦ

Основа – существующие технологии: ВВЭР-ТОИ; парк РУ ограничен запасами урана; ОЯТ – переработка частично, Rep U – рецикл, Pu – хранение и в БН-800

Вариант 1 ОЯТЦ

Основа – эволюционное развитие ВВЭР без полного ЗЯТЦ: Вариант 0 + ВВЭР-С с уменьшенным CAPEX

Вариант 2 ОЯТЦ

Частичное замыкание ЯТЦ: переработка ОЯТ увеличивается, используется U-Pu топливо в ВВЭР-С, вопросы сырья и трансмутации МА не решены

Вариант 3 ЗЯТЦ 2-х комп.

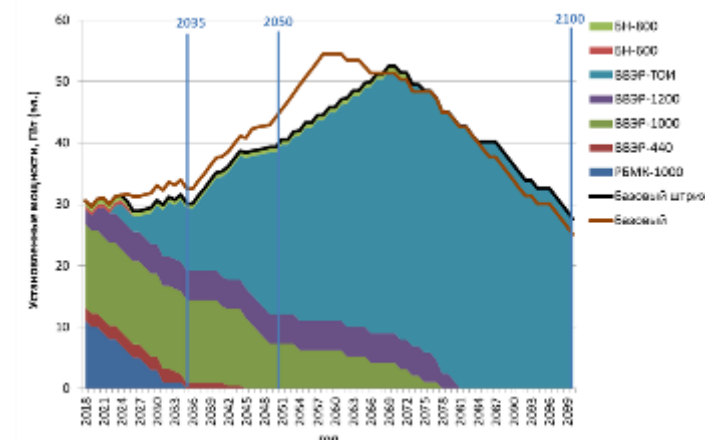
Основа – БН-1200 с МОКС (КВ>1) и ВВЭР, переработка всего ОЯТ с вовлечением RepU (РТН) и Pu (РБН)

Вариант 4 ЗЯТЦ 2-х комп.

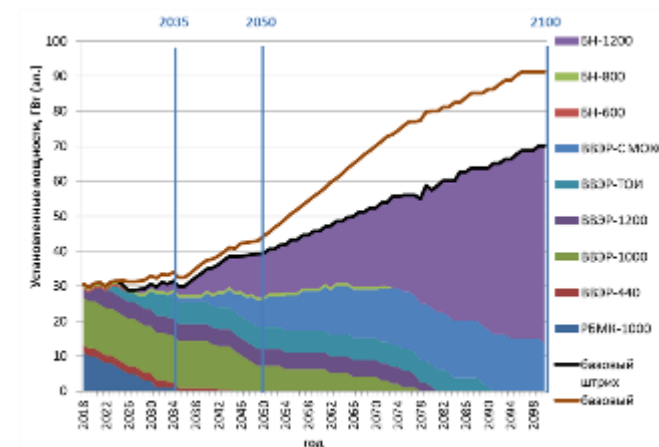
Основа – БН-1200 на СНУП топливе (КВ~1,5), доля ВВЭР-С с МОКС выше варианта 3

Вариант 5 Моно ЗЯТЦ

Основа – БР на СНУП (КВ~1), переход на однокомпонентную системы с РБН, переработка всего ОЯТ с вовлечением продуктов переработки



Установленная мощность в варианте 0



Установленная мощность в варианте 4

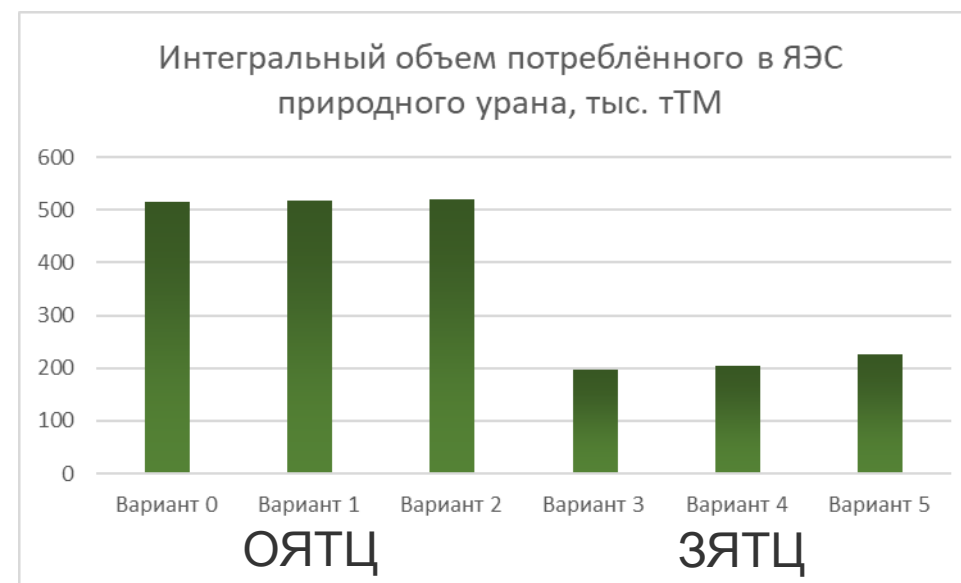
Открытый цикл или замкнутый?



ПРОРЫВ
РОСАТОМ

По критерию максимальной интегральной мощности **только сценарии с замыканием ЯТЦ и генерацией на быстрых нейтронах отвечают необходимым темпам роста ядерной энергетики России до 2100 г. с учетом ограничений по ресурсной базе природного урана в РФ**

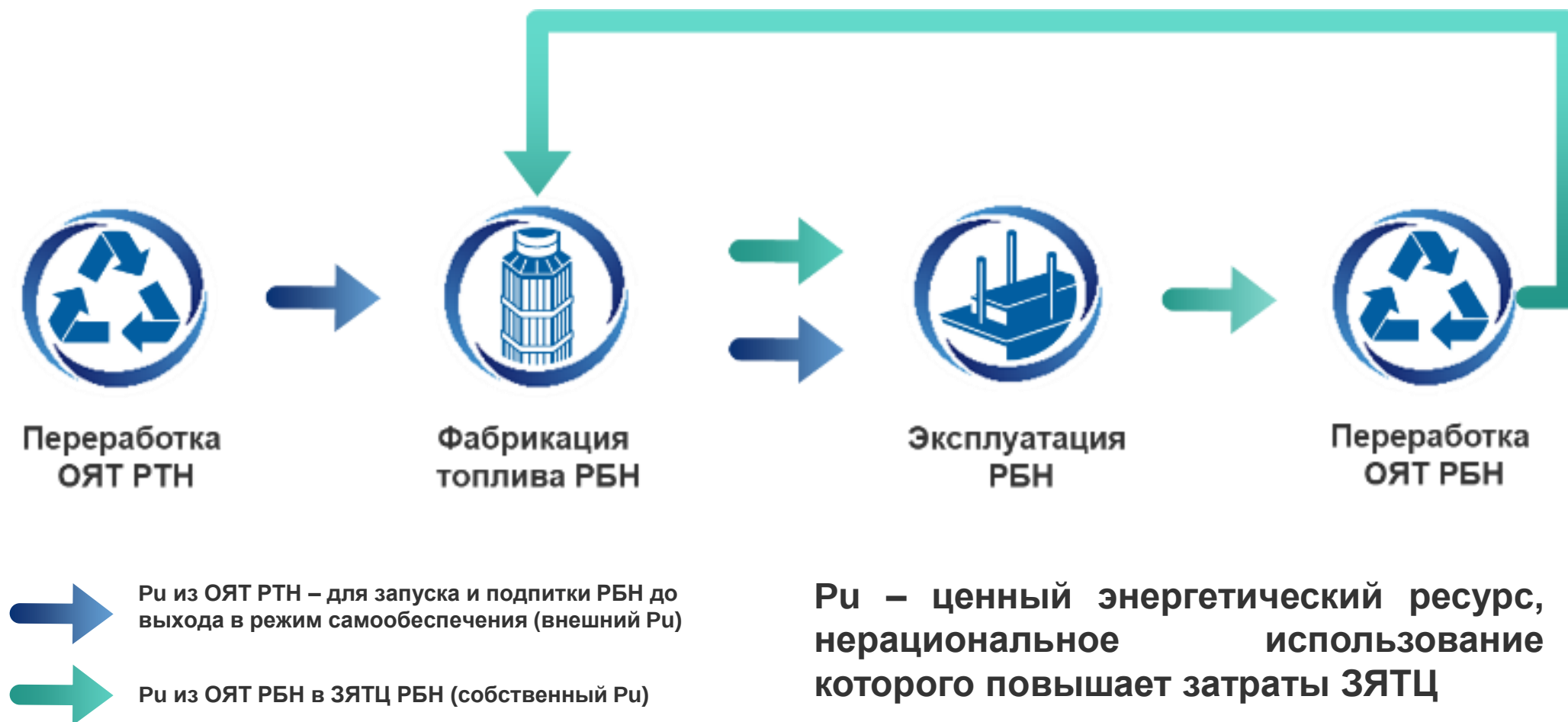
В части решения проблем с ОЯТ приемлемые результаты достигаются только в сценариях с замыканием ЯТЦ и генерацией на быстрых нейтронах



Запуск и эксплуатация РБН в ЗЯТЦ



ПРОРЫВ
РОСАТОМ



Подход к замыканию ЯТЦ РФ с КВ РБН~1

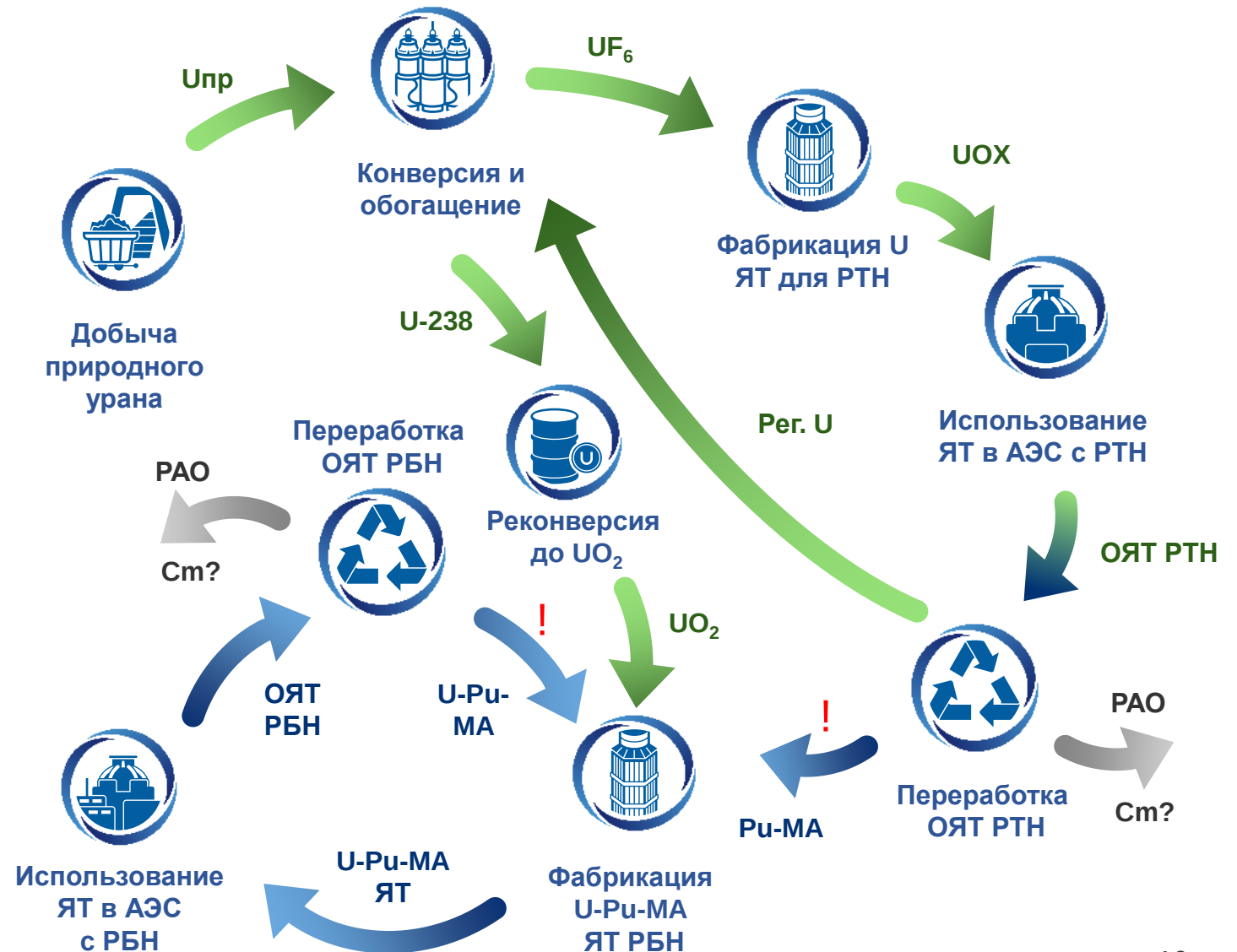


- Весь Pu от ЯТЦ АЭС РФ используется в РБН;
- КВ РБН на уровне 1,05. ОЯТ РТН используется рационально для максимизации ввода ЭБ РБН;
- При необходимости ЯЭС КВ РБН можно поднять в случае дефицита Pu;
- Все РБН запускаются на U-Pu-MA от ОЯТ РТН;
- РТН используют регенерированный уран от переработки собственного ОЯТ;

ЯЭС функционирует в условиях конкурентоспособных АЭС с РБН



Чем больше РБН, тем лучше для ЯЭС



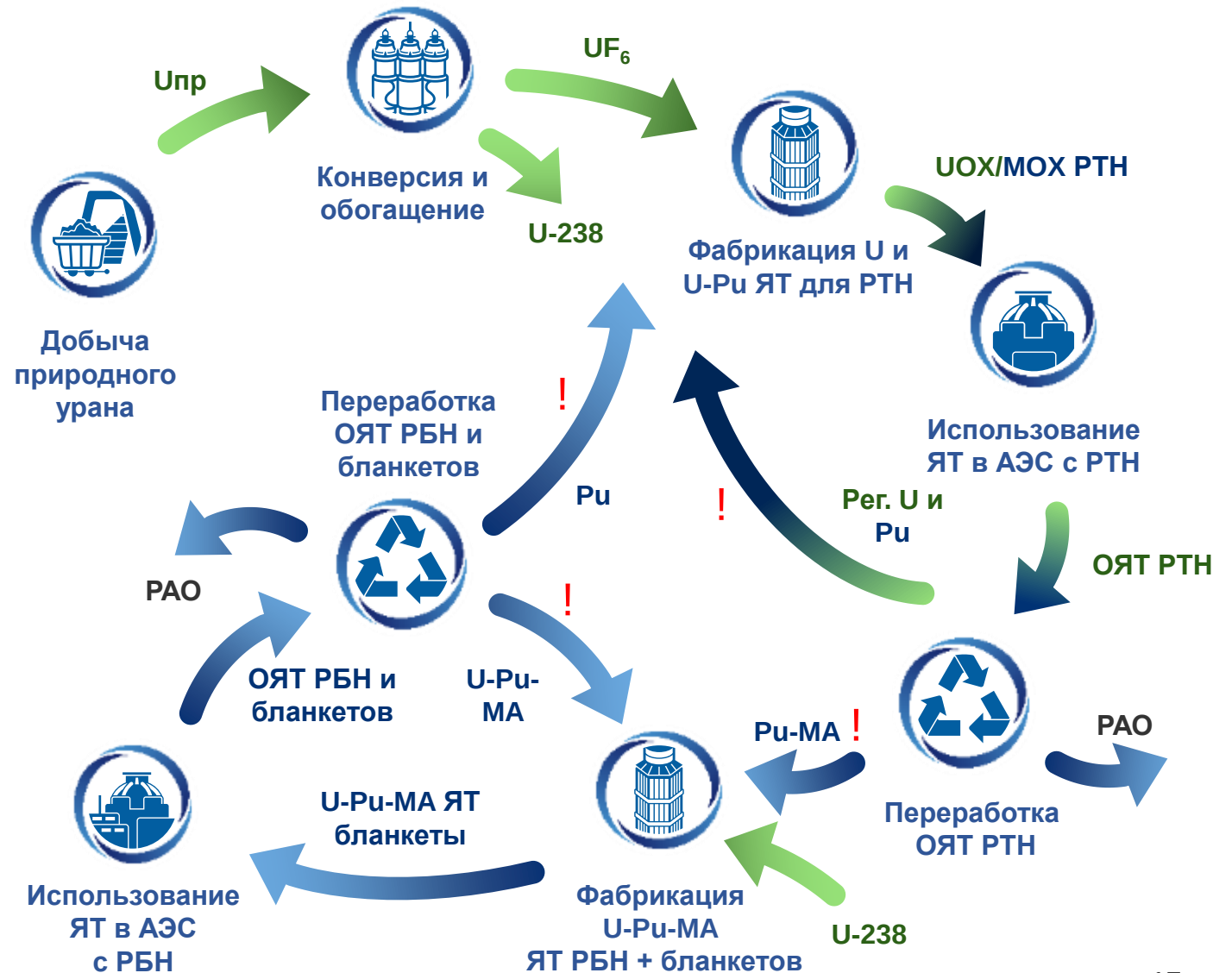
Подход к замыканию ЯТЦ РФ с КВ РБН>>1

- Pu от ЯТЦ АЭС РФ используется как в РБН, так и в РТН;
- КВ РБН максимально высокий в пределах разумных допущений;
- При необходимости ЯЭС возможность поднимать КВ РБН отсутствует;
- Все РБН запускаются на U-Pu-MA от ОЯТ РТН или Pu от бланкетов;
- РТН используют регенерированный уран от переработки собственного ОЯТ, а также Pu, полученный от расширенного производства в РБН;

ЯЭС функционирует в условиях
неконкурентоспособных АЭС с РБН



Конкурентоспособность ЯЭС зависит от
эффективности экономии урана в РТН, их
способности компенсировать затраты РБН

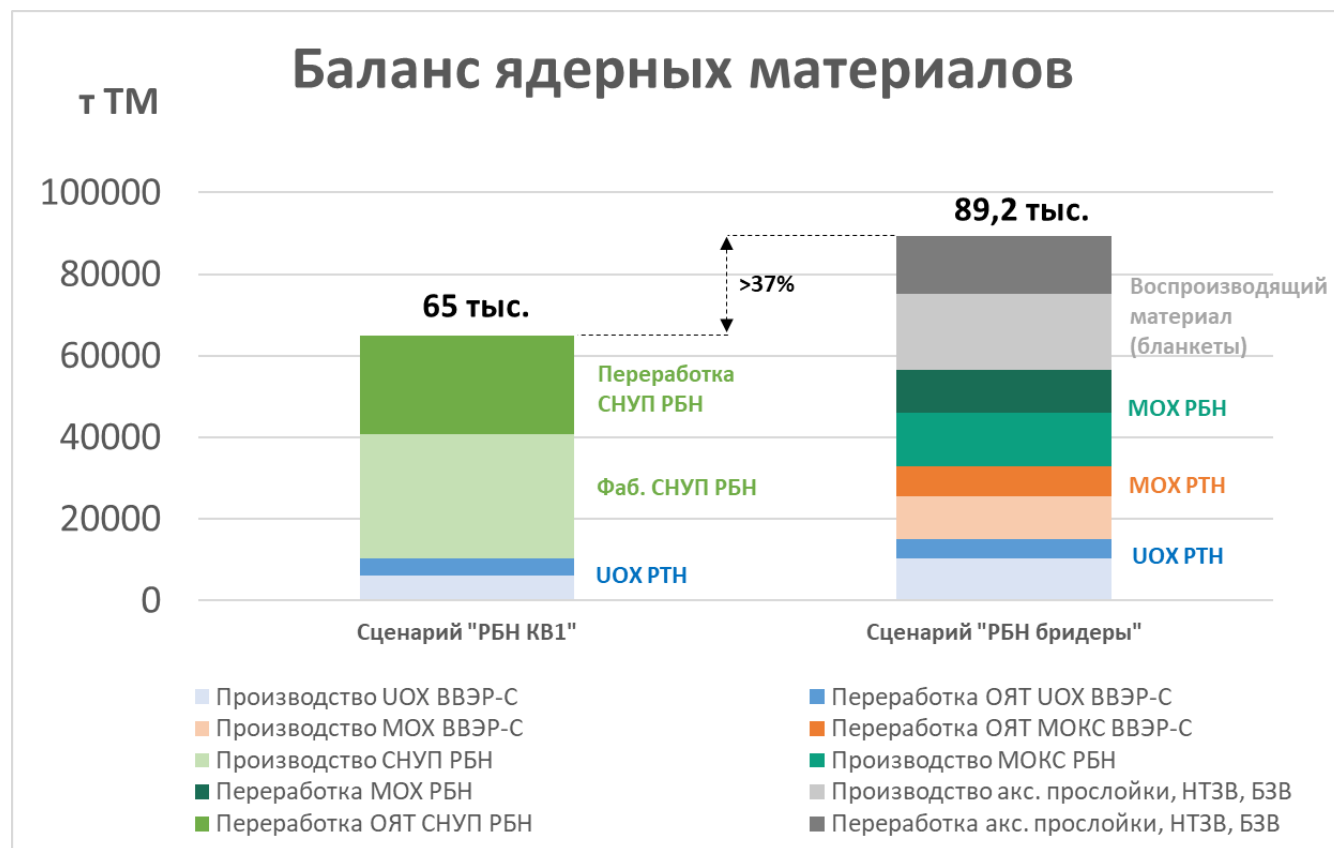


Баланс ядерных материалов и оценка затрат ЯТЦ до 2100 года



ПРОРЫВ
РОСАТОМ

- Сценарий, предполагающий использование РБН в качестве бридеров Pu, обладает более разнообразной структурой топливообеспечения;
- Производство и переработка воспроизводящего материала (бланкетов) в сценарии «РБН бридеры» составляет 37% от общего потока топливных материалов;
- Ключевой вопрос экономики ЯТЦ сценария «РБН бридеры» - стоимость переработки бланкетов.



Преимущества от ввода РБН для всего ЯТЦ



Экономия природного урана

Увеличение РБН в энергобалансе снижает удельную потребность ЯЭС в природном уране на выработанную единицу энергии

↓ τ Упр/кВт-ч



Решение проблемы ОЯТ

На базе РБН можно полностью утилизировать накопленные и накапливаемые запасы ОЯТ в России

↓ τ ТМ ОЯТ/год



Самый эффективный рецикл продуктов переработки

Наиболее эффективно Pu используется в ЯТЦ РБН – без потери качества и количества делящихся материалов.

Регенерированный уран целесообразно использовать в РТН для еще большей экономии природного ресурса.

Pu → РБН
Uрег → РТН



Снижение потенциальной биологической опасности РАО

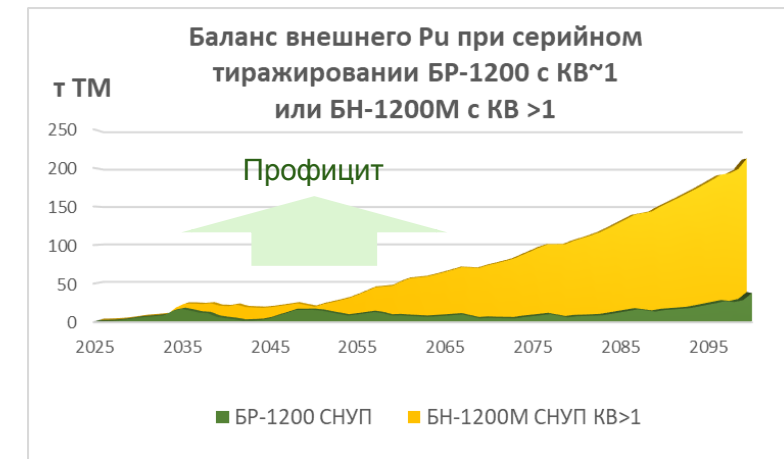
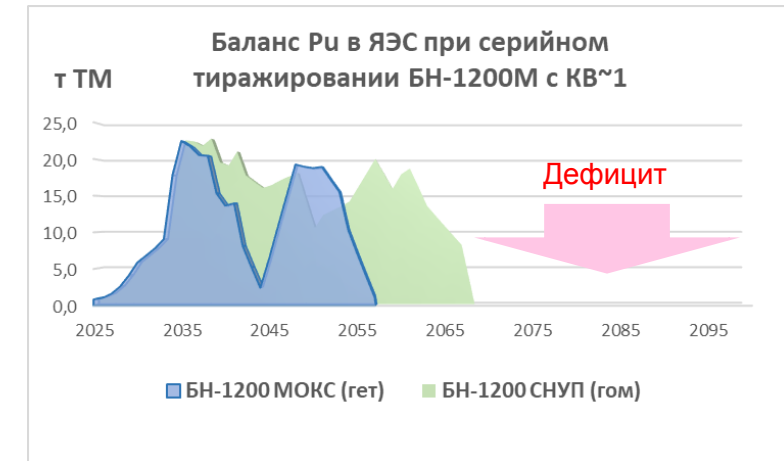
Рецикл долгоживущих радионуклидов (Pu, МА) в ЯТЦ РБН.

Потенциал для снижения требований, предъявляемых к пункту окончательной изоляции РАО.

↓ ПБО РАО

Перспектива потребления ДМ до 2100 г. для РБН (для сценария с вводом ~ 1 ЭБ РБН в год до 2100 г.)

- Суммарное количество Р_и, необходимое для запуска РБН до выхода в ЗЯТЦ, зависит от типа РУ, топлива, компоновки, выгорания и длительности ЯТЦ;
- Выбор тиражируемых решений будет зависеть от экономических перспектив РБН и ЗЯТЦ;
- Целевые характеристики ПЭК на базе АЭС с БР-1200 позволяют запускать ЭБ с темпом ~1 ЭБ в год без использования бланкетов, обогащенного U или импорта зарубежного ОЯТ;
- Аналогичный парк ЭБ с БН-1200М может быть развит посредством использования НТЗВ или N-15;
- После исчерпания запасов внешнего Р_и от ОЯТ РТН увеличение мощности ЯЭ возможно путем увеличения КВ РБН;
- Интегральное потребление Упр к 2100 г. оценено на уровне 280 000 т;
- Для ввода РБН 1 ЭБ в год (в составе ПЭК) в XXI веке достаточно предусмотреть ввод двух модулей на новом радиохимическом заводе (по 400 т ТМ/год).

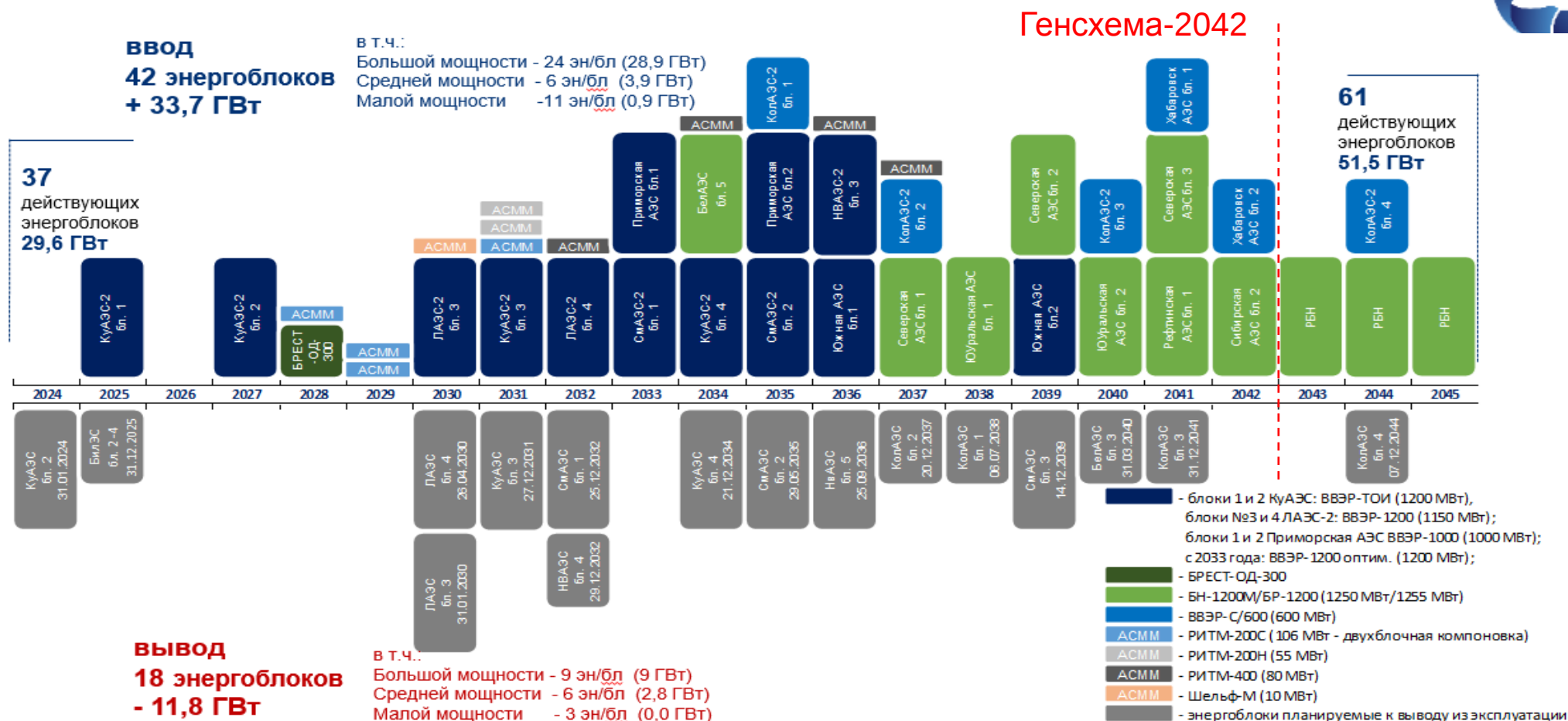


Для сценария с вводом 72 ЭБ РБН БМ
(90 ГВт к 2100 г.)

Сооружение АЭС в РФ до 2045 года



ПРОРЫВ
РОСАТОМ



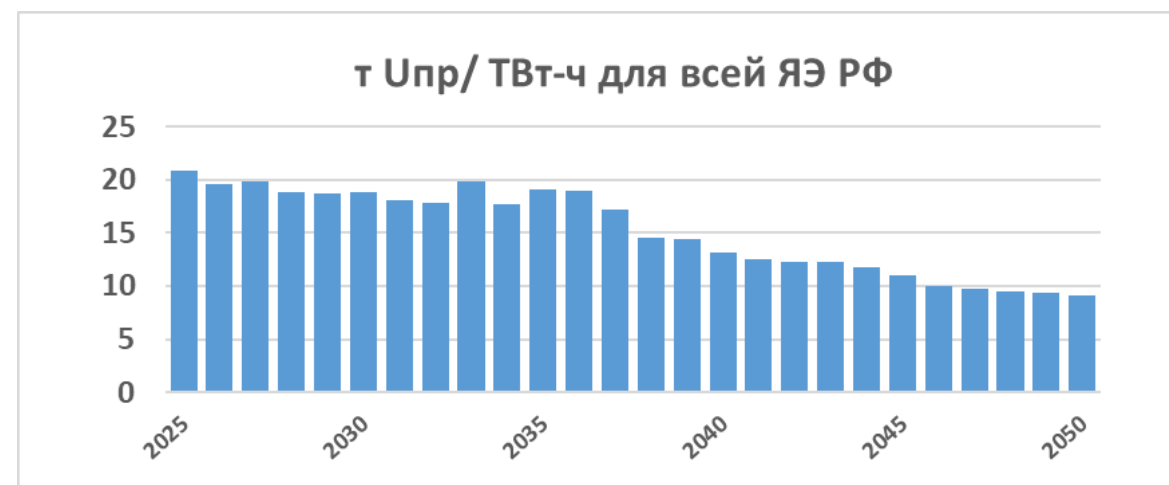
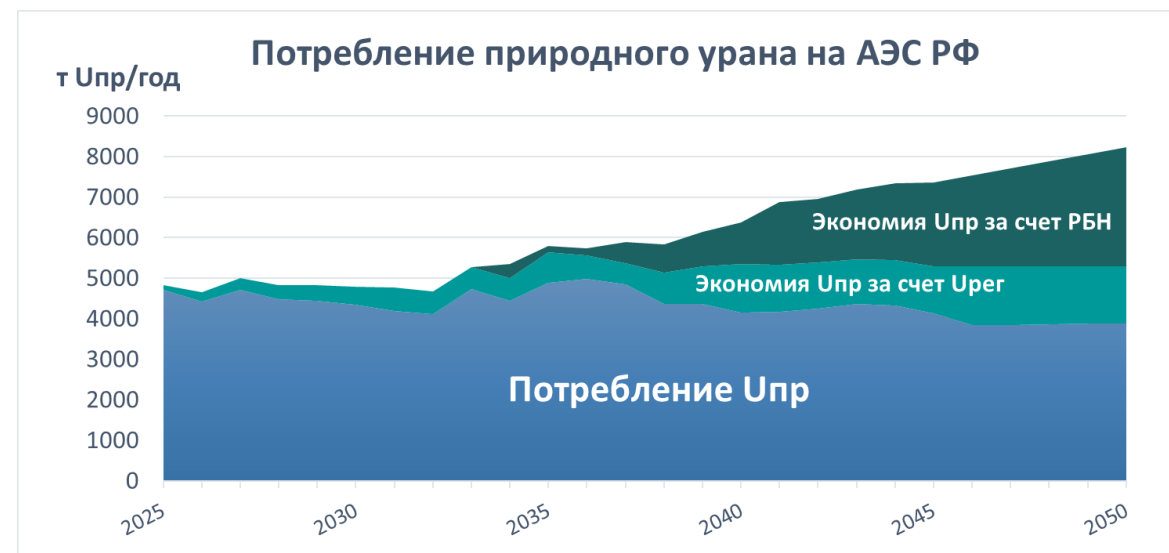
- повышение эффективности атомной энергетики (повышение доли до 25% в энергобалансе страны)
- разработка и внедрение новых энергетических технологий в области атомной энергетики, предполагающей параллельную эксплуатацию реакторов на тепловых и быстрых нейтронах в целях обеспечения замкнутого ядерного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

Потребление природного урана до 2050 г.



ПРОРЫВ
РОСАТОМ

- Потребление природного урана с 2025 г. по 2050 для АЭС РФ оценено на уровне ~100 000 т ТМ;
- Средний уровень потребления - ~4300 т ТМ/год;
- Использование регенерированного урана от переработки ОЯТ в РТН и Рн для запуска и эксплуатации РБН позволяет сэкономить ~ 50000 т ТМ Упр;
- Двукратное снижение удельного потребления природного урана на выработанную единицу электроэнергии.

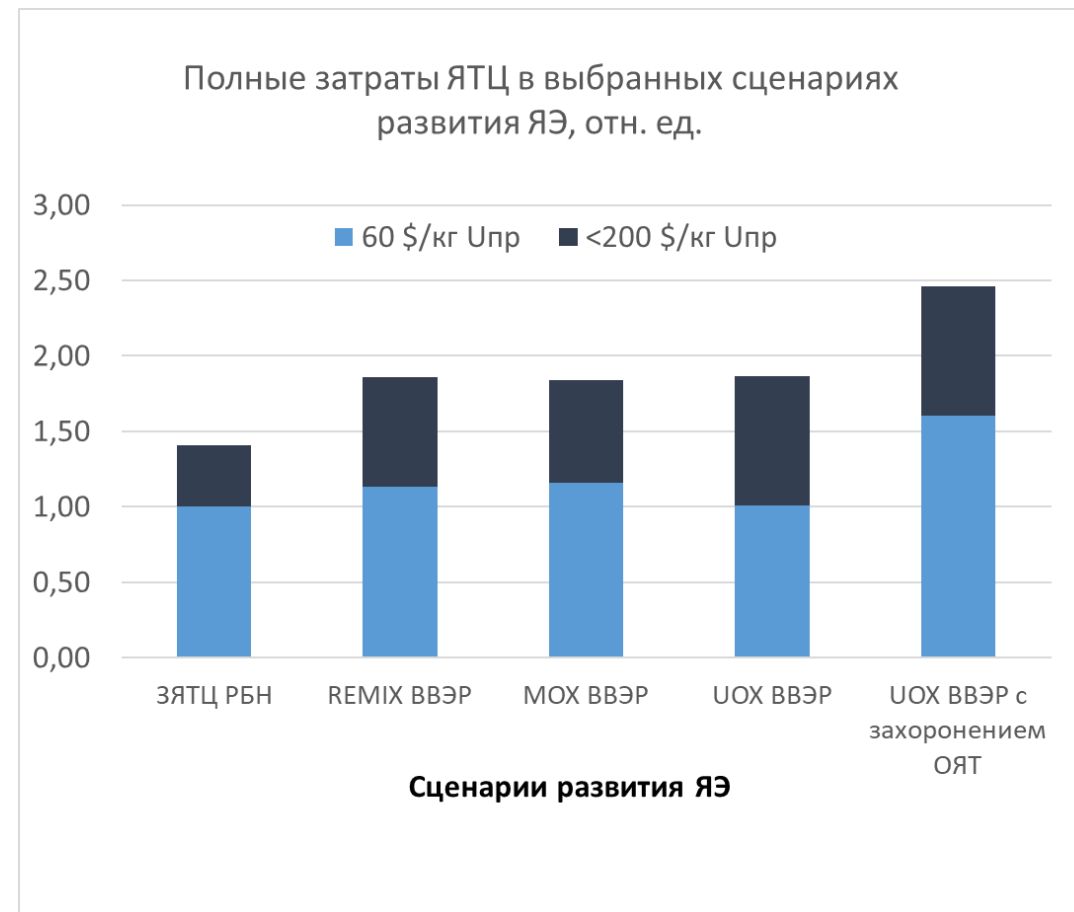


Сравнение топливных циклов

- ЗЯТЦ РБН – максимальная скорость перехода на технологии РБН и ЗЯТЦ;
- REMIX ВВЭР – переход на REMIX топливо для ВВЭР;
- МОХ ВВЭР – ограниченный ввод ВВЭР-С на МОКС топливе на базе доступного запаса ОЯТ ВВЭР;
- УОХ ВВЭР – открытый цикл на базе ВВЭР без захоронения ОЯТ (бессрочное хранение);
- УОХ ВВЭР с захоронением ОЯТ – открытый цикл на базе ВВЭР с захоронением ОЯТ.

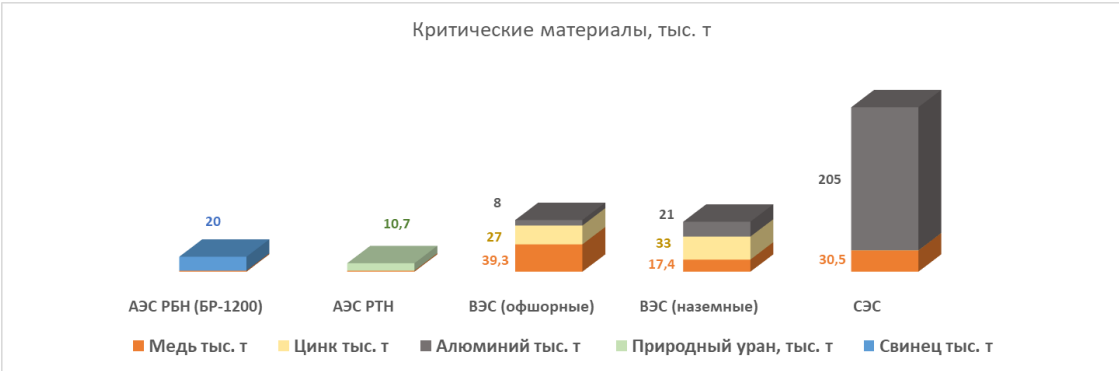
При высоких ценах на природный уран сценарий с переходом на РБН и ЗЯТЦ дает существенную экономию затрат по сравнению с альтернативными вариантами.

В отсутствие РБН и ЗЯТЦ экспорт АЭС как направление бизнеса может встретить ресурсное ограничение.

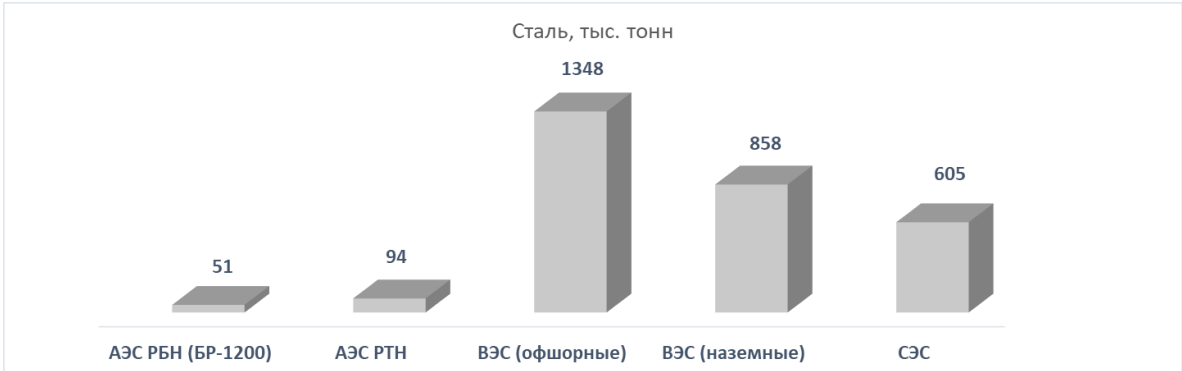


Результаты получены на базе выполнения Технико-экономического обоснования начального этапа развития двухкомпонентной ЯЭ при замыкании ЯТЦ и промышленном внедрении РБН в 2021 г. (ТЭО ПЭК)

Материалоемкость низкоуглеродной генерации



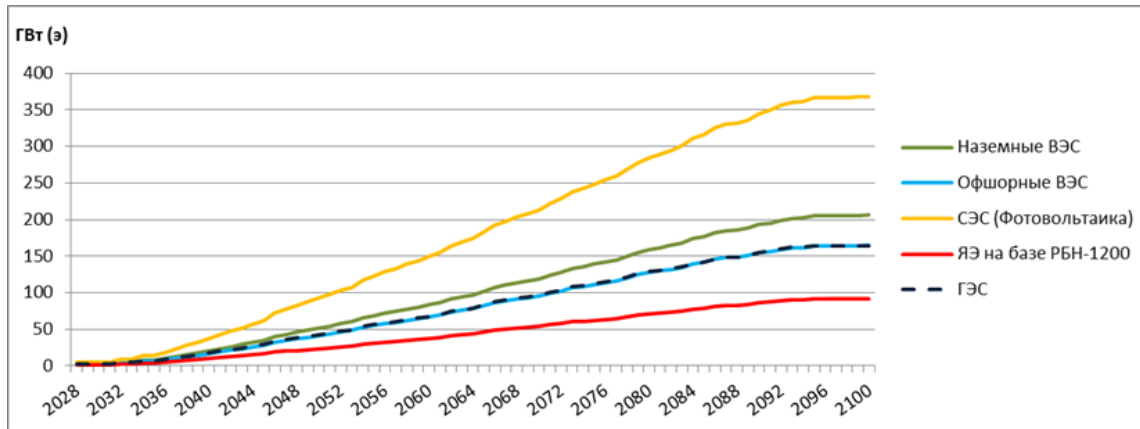
Потребность в критических материалах для выбранных технологий генерации в эквиваленте 1 ГВт(э) АЭС за ЖЦ с учетом КИУМ и срока службы



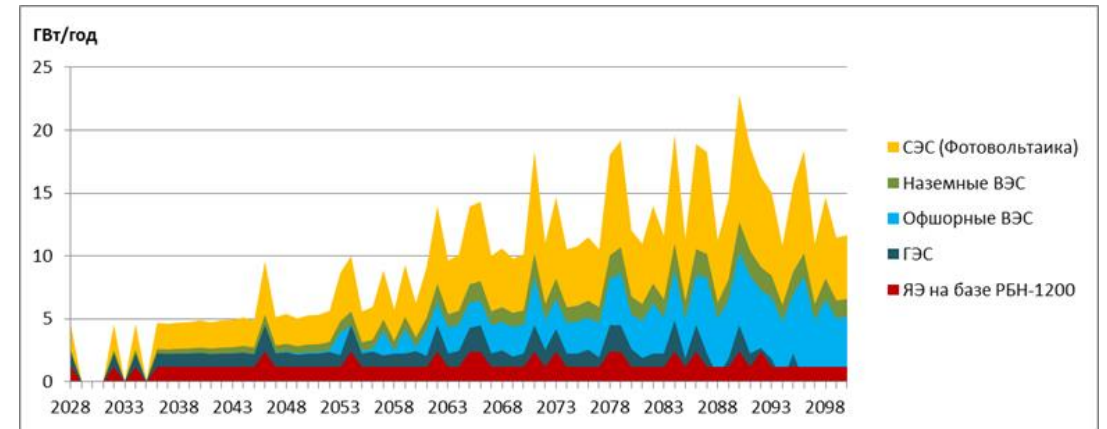
Металлоемкость выбранных технологий генерации в эквиваленте 1 ГВт(э) АЭС за ЖЦ с учетом КИУМ и срока службы

РБН с ЗЯТЦ в наименьшей степени зависят от стоимости приобретения критических материалов и природных ресурсов

Динамика роста установленной мощности при условии обеспечения одинакового уровня производства электроэнергии



Профиль изменения установленной мощности энерготехнологий при одинаковом росте выработки э/э

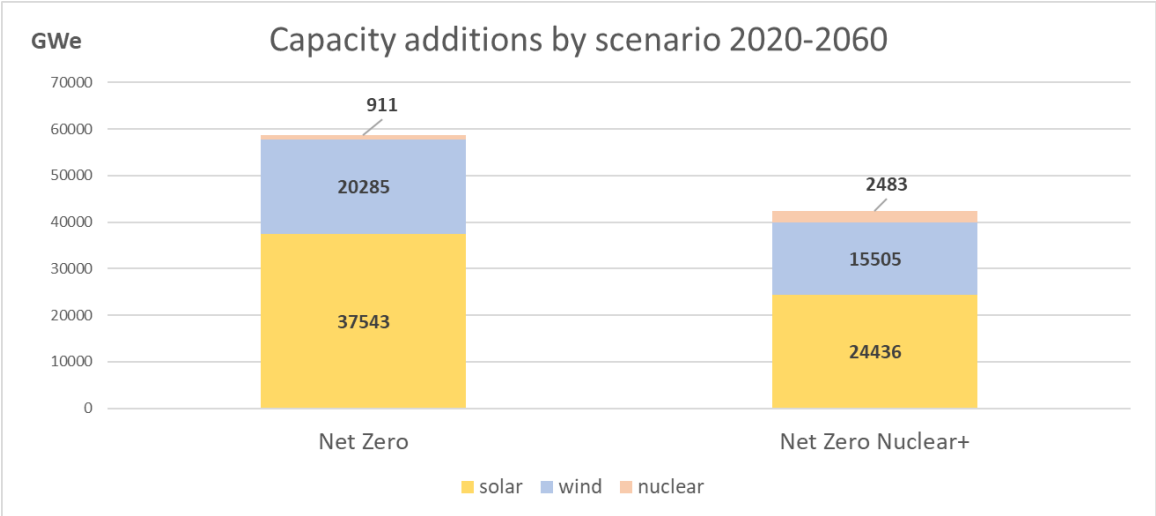


Сравнение уровней ежегодного ввода установленной мощности по технологиям генерации при одинаковой энергосгенерации

Для системного анализа и прогнозирования важны параметры КИУМ и срок службы генерации.

Исходные предпосылки анализа

- По сравнению с атомной энергией, солнечная и ветровая генерация имеют низкие коэффициенты использования установленной мощности и срок службы.
- Чтобы выработать одинаковое количество энергии на протяжении длительного времени, возобновляемые источники энергии должны обеспечивать гораздо большую установленную мощность, чем атомная энергия.
- Морские ВЭС составляют 20% от общего прироста установленной мощности ветровых установок.
- Сценарий с быстрым расширением парка быстрых реакторов использует плутоний из отработанного ядерного топлива для топлива запуска быстрых реакторов и регенерированный уран для топлива тепловых реакторов.



			
КИУМ, %	80-90%	34%	20%
Срок службы, лет	60-80 лет	25 лет	25 лет

Ключевые выводы системного моделирования замкнутого ЯТЦ России



- Переход к двухкомпонентной структуре ЯЭ в России обоснован ресурсными, радиоэкологическими и экономическими факторами;
- Наиболее эффективный способ экономии природного урана в ЯЭ — развитие реакторов на быстрых нейтронах (РБН) и замкнутого ядерного топливного цикла (ЯТЦ);
- Доступность критически важных материалов может стать ограничивающим фактором развития ВИЭ. Если спрос на эти материалы значительно возрастет из-за расширения генерации на базе ветровых и солнечных установок, это может еще больше повысить их капитальные затраты;
- Переход к двухкомпонентной структуре ЯЭ должен сопровождаться расчетно-аналитическим обоснованием принимаемых решений по всему спектру технологической цепочки замкнутого ЯТЦ.

**Спасибо за
внимание!**

