



ФЭИ
РОСАТОМ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ, ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫЕ БЫСТРЫМИ НАТРИЕВЫМИ РЕАКТОРАМИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

**Троянов В.М., Гулевич А.В., Гурская О.С., Декусар В.М., Елисеев В.А.,
Коробейников В.В., Кузина Ю.А., Мосеев А.Л.**

Конференция «Atom Future»,
27 ноября 2023 г., г. Обнинск

Гулевич Андрей Владиславович
Начальник Департамента физики реакторов

Двухкомпонентная ЯЭС

Эффективное и безопасное производство электроэнергии



Замыкание топливного цикла тепловых и быстрых реакторов в единый топливный цикл позволит решить системные проблемы ядерной энергетики России

– Неэффективное использование сырьевой урановой базы

– Накопление ОЯТ тепловых реакторов

– Утилизация МА и других долгоживущих ВАО, накопленных от деятельности тепловых реакторов



– Накопление ОЯТ, возвращаемого от зарубежных АЭС, построенных по российским проектам

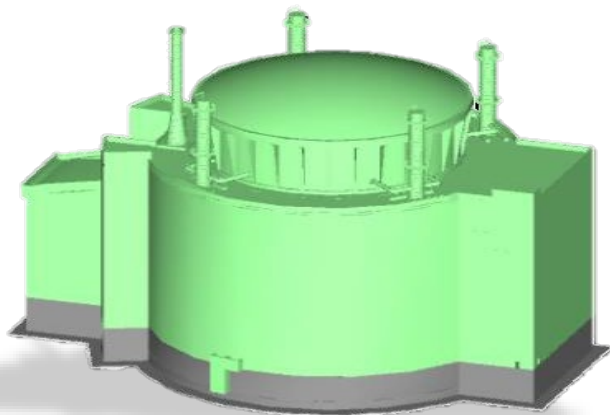
Переход к двухкомпонентной ЯЭ позволит реализовать крупные инновационные, технологические и коммерческие проекты



- **Переход от уранового к смешанному уран-плутониевому топливу – долгосрочное и надежное топливообеспечение ЯЭ**
- **Балансировка запаса плутония и минорных актинидов в глобальной системе ЯЭ с тепловыми и быстрыми реакторами**
- **Наработка медицинских, технологических и энергетических изотопов, включая ^{60}Co , ^{238}Pu**
- **Реализация многократного рециклирования плутония в двухкомпонентной ЯЭС**
- **Предоставление услуг в заключительной стадии ЯТЦ – расширение экспортных возможностей Госкорпорации Росатом**
- **Участие в коммерческом производстве водорода**

Виды быстрых реакторов в ДАЭ

Проекты реакторов могут отличаться с учетом специфики решаемых задач и соответствующих технических требований к топливу, активной зоне и топливной инфраструктуре



БН-1200М

- Производители электроэнергии
- Выжигатели МА* и долгоживущих РАО
- Нарботчики топлива для быстрых и тепловых реакторов
- Реакторы для улучшения («облагораживания») изотопного состава плутония от тепловых реакторов
- Реакторы для производства различных изотопов как в активной зоне, так и в зонах воспроизводства
- Высокотемпературные реакторы для производства водорода и других применений

*) Camarcat N., Garzenne C., Mer J. e.a. Industrial research for transmutation scenarios. — Comptes Rendus Mecanique 339, 2011, p. 209—218

БН большой мощности для замыкания ЯТЦ



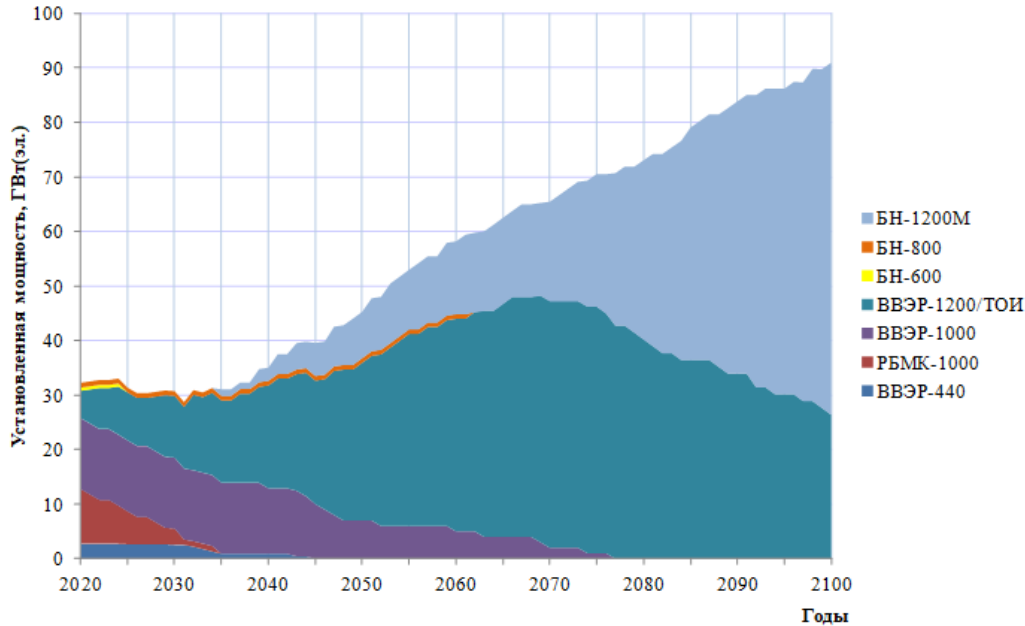
Физические свойства быстрых натриевых реакторов такие как:

- **избыток нейтронов**
- **высокий нейтронный поток $(4 \div 8) \cdot 10^{15}$ н/см²с**
- **высокая линейная энергонапряженность до 50 кВт/м**

обеспечивают следующие фундаментальные возможности двухкомпонентной системе ядерной энергетики:

- **расширенное воспроизводство ядерного горючего**
- **способность работать с плутонием любого изотопного состава, встречающегося в ЯЭ, при отсутствии избыточных ограничений на запас реактивности.**
- **эффективную ядерную трансмутацию и выжигание долгоживущих отходов**

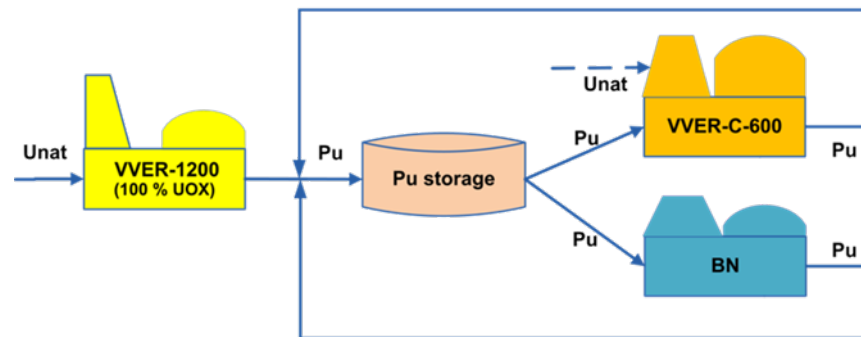
Структура мощностей в двухкомпонентном сценарии с тепловыми и быстрыми реакторами



Синергичное взаимодействие двух компонент на основе тепловых и быстрых реакторов позволит системе развиваться более эффективно и динамично, чем современная ЯЭ

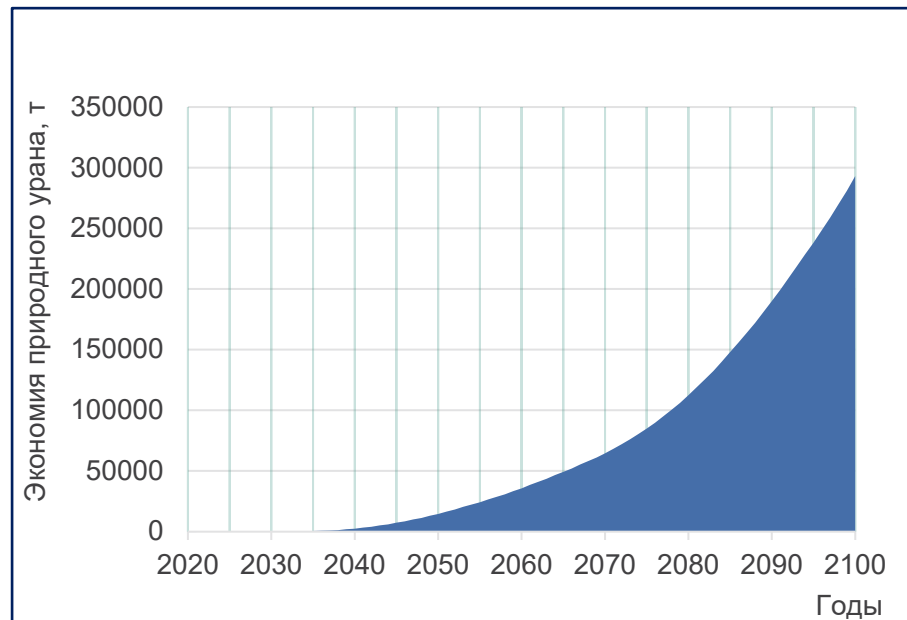
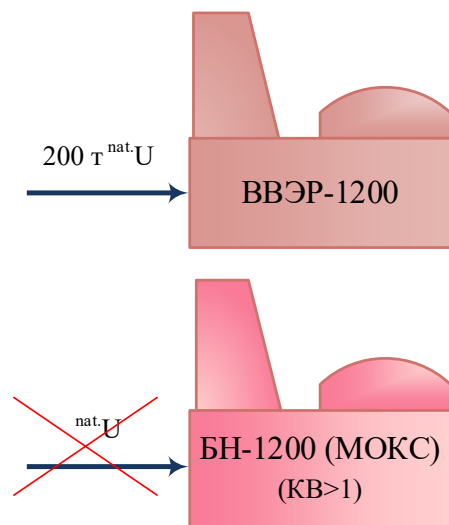
При обосновании сценариев развития сравнивать следует **эффективность систем, а не отдельных энергоблоков!**

Организация ЯТЦ на основе мультирециклирования плутония в тепловых и быстрых реакторах



Экономия природного урана

- Сокращение потребления природного урана парком отечественных реакторов при одновременном увеличении экспорта уранового топлива



Экономия природного урана за счет ввода в эксплуатацию после 2035 года реакторов БН-1200М

При замещении 1 реактора ВВЭР реактором БН-1200 исключается потребление ~200 т природного урана в год.

При цене на природный уран ~150 долл./кг ТМ годовой доход составит ~30 млн. долл.

Это равнозначно снижению показателя LCOE быстрого реактора на ~12 %.

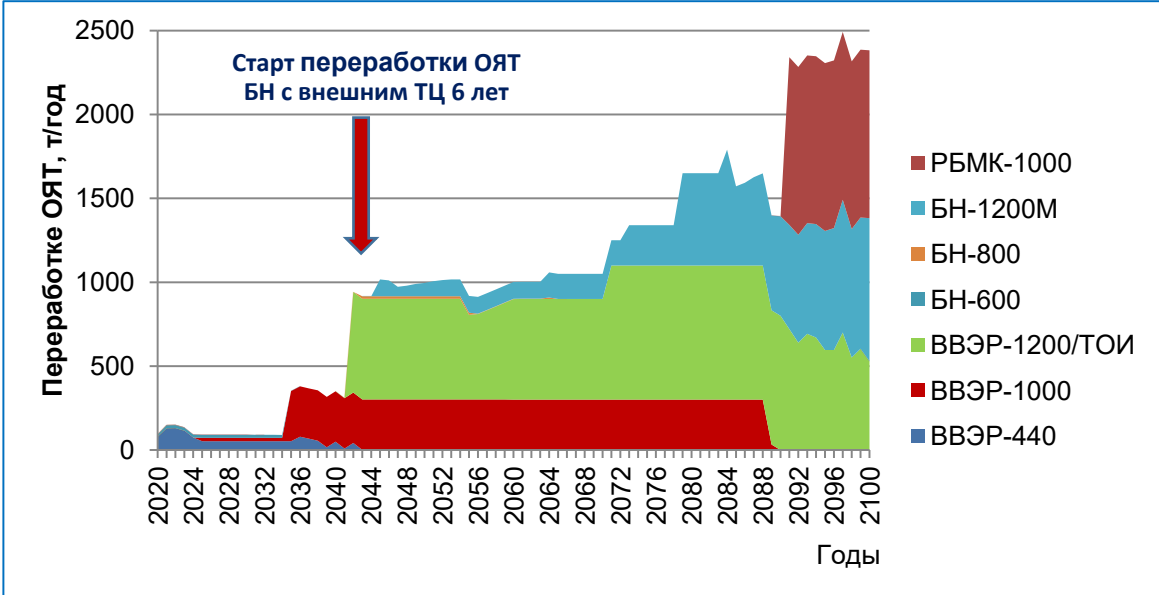
↑ Доход
30 млн долл./год

↓ LCOE
12%

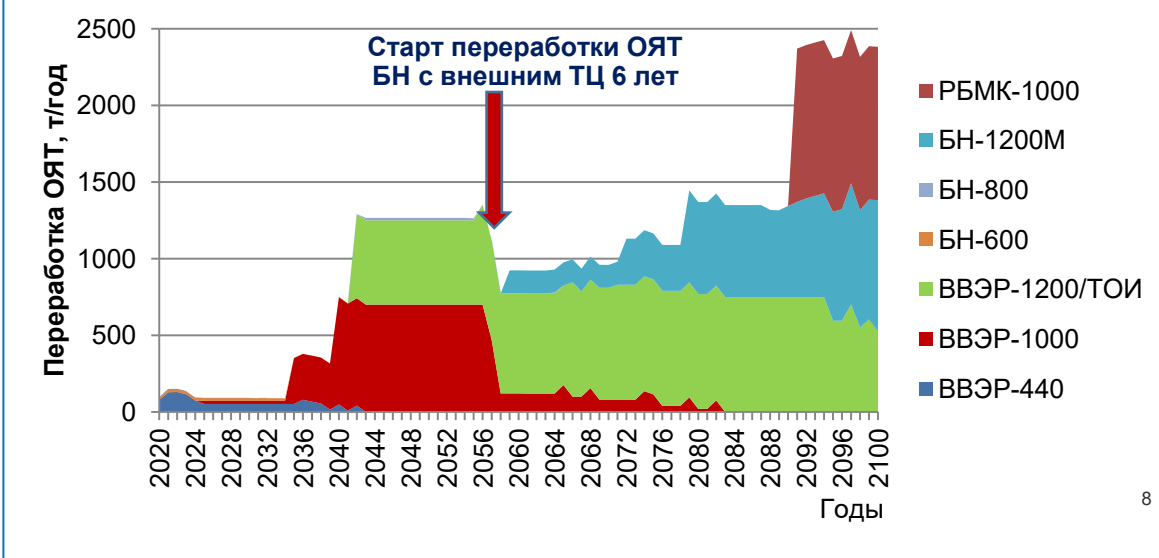
Переработка ОЯТ тепловых и быстрых реакторов



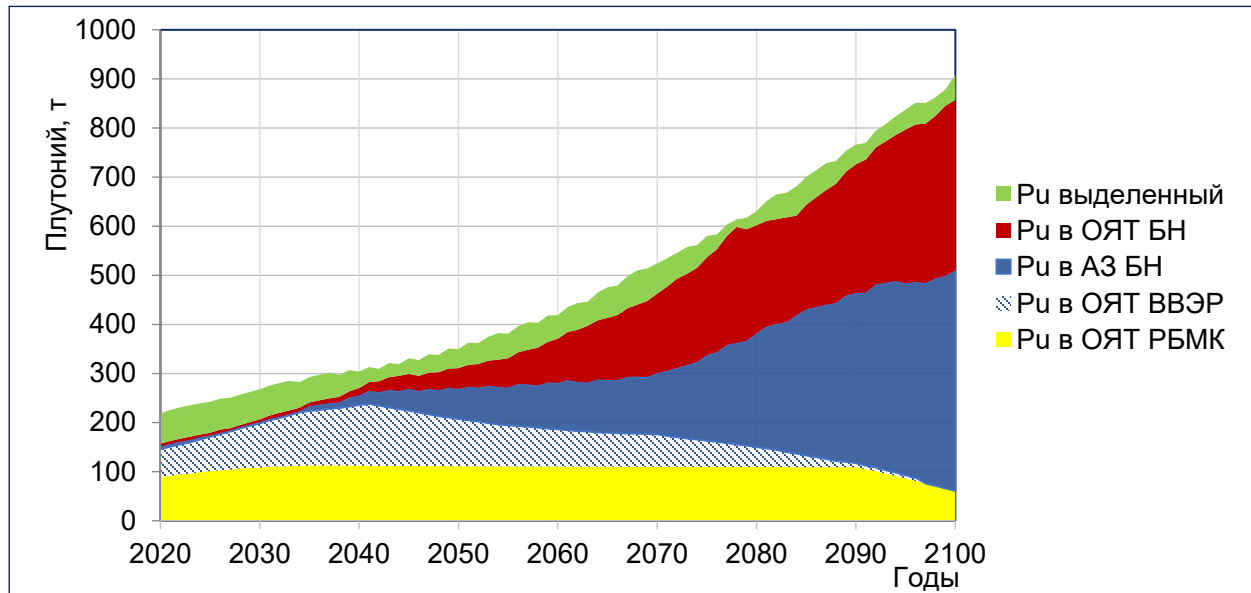
Структура потребностей в переработке отработавшего ядерного топлива с целью обеспечения плутонием быстрых реакторов, тонн ОЯТ/год.



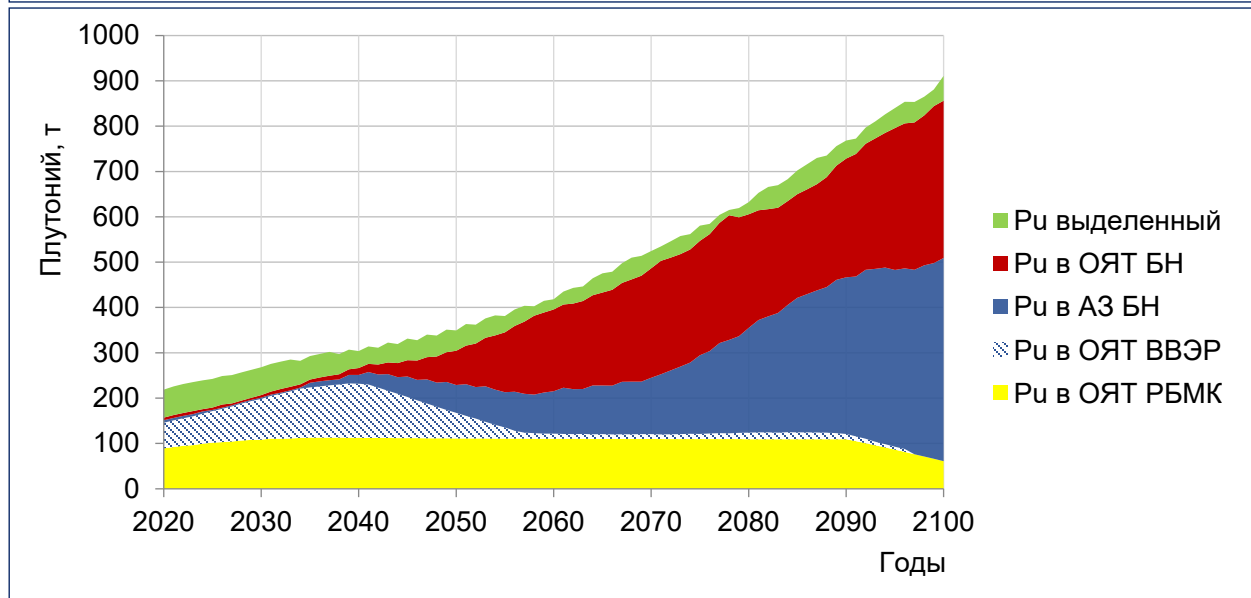
Потребность в переработке ОЯТ быстрых реакторов в рассматриваемом сценарии возникает после 2055 г.!



Структура запасов плутония в двухкомпонентной системе



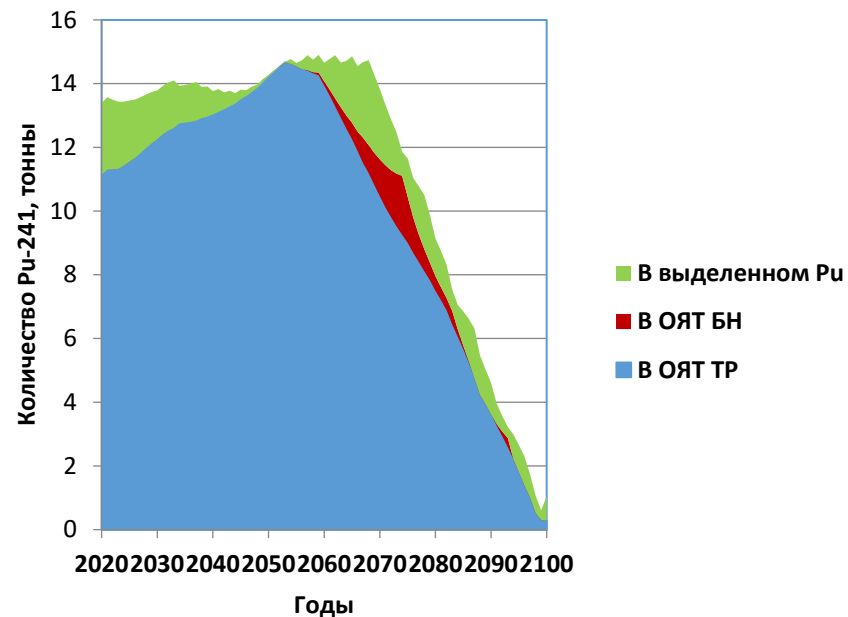
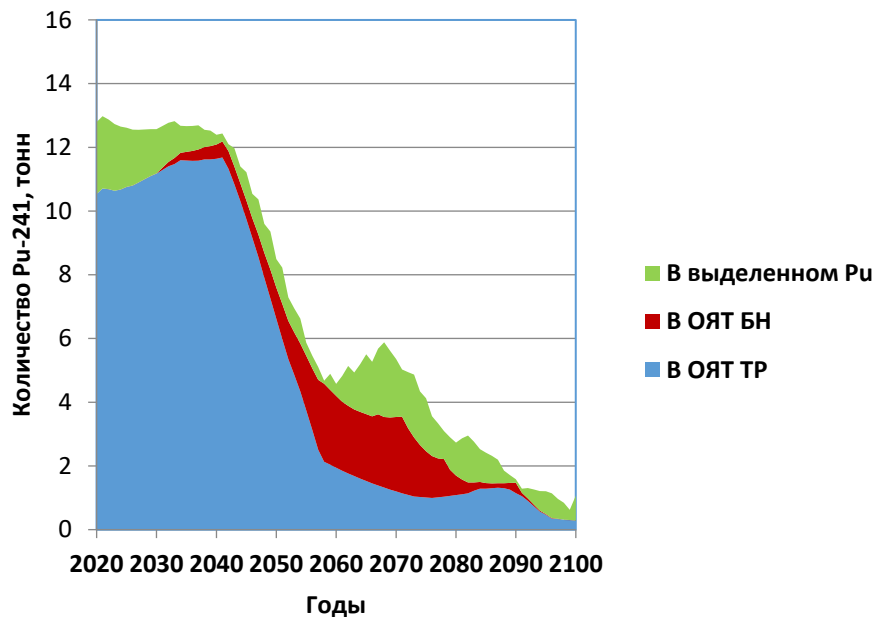
**Вариант с
«немедленной»
переработкой
ОЯБ БН и
внешним ТЦ 6 лет**



**Вариант с
«отложенной»
переработкой до
2055 года и
внешним ТЦ 6 лет**

Стратегия обращения с америцием в ДАЭ должна учитывать его источник в виде Pu-241 в ОЯТе тепловых и быстрых реакторов!

Pu-241 во внешнем ТЦ ДАЭ, тонн



Вариант с
«отложенной»
переработкой ОЯТ
БН до 2055 года и
внешним ТЦ 6 лет

Вариант с
«немедленной»
переработкой
ОЯТ БН и
внешним ТЦ 6 лет

«Отложенная» переработка ОЯТ быстрых реакторов



К моменту ввода в эксплуатацию головного энергоблока БН-1200М количества накопленного Pu хватит на эксплуатацию его и БН-800, и на пуск еще нескольких серийных быстрых реакторов. Для этого потребуется только переработка ОЯТ ВВЭР.

Отказ от создания малых производств по переработке ОЯТ БН. Создание крупных перерабатывающих производств после 2055 года.

Использование, после надлежащей модернизации, освободившихся хранилищ ОЯТ тепловых реакторов под хранение ОЯТ быстрых реакторов.

Это приведет к уменьшению топливной составляющей стоимости электроэнергии в ~2 раза, что даст снижение удельной приведенной стоимости производства электроэнергии (показателя LCOE) на ~ 10%.

↓ LCOE
~10%

Экономия инвестиционных затрат на начальном этапе может составить около **280 млн.\$**

↑ Экономия
280 млн.\$

Серийность энергоблоков с быстрым реактором БН-1200М


Переход от головного коммерческого быстрого реактора к серии из 9-ти энергоблоков снижает LCOE на ~25%.

↓ LCOE
~25%


Расширенное производство Pu

- Расширенное воспроизводство плутония, избыток которого может идти на топливообеспечение тепловых реакторов.

Ежегодный экономический эффект для единичного быстрого реактора от наработываемого в нем избыточного плутония при его использовании в тепловых реакторах (ВВЭР-С/ВВЭР-ТОИ) составляет **12-15 млн. долл.**

 Доход
12-15 млн долл./год

Это эквивалентно снижению удельной приведенной стоимости производства электроэнергии (LCOE) быстрого реактора на **0,8—1,2%**.

 LCOE
0,8-1,2%

Конкуренции на мировом рынке пока нет.

Облагораживание и утилизация Pu

- Улучшение (облагораживание*) изотопного состава плутония из зарубежного МОКС-ОЯТ PWR для его повторного использования в реакторах PWR.

Экономика услуги состоит в компенсации затрат, производимых российской стороной на прохождение плутония по топливному циклу быстрого реактора.

Требование:


2-х кратный рецикл исходного плутония по ЯТЦ быстрого реактора (с учетом наработки плутония в воспроизводящих экранах)

Цена услуги ~ 400 тыс. долл./кг Pu.

 Доход
~400 тыс. долл./кг Pu

При этом длительность миссии увеличивается в 2 раза.

Снижение удельной приведенной стоимости производства электроэнергии на быстром реакторе при этом составит ~5% при облагораживании годовой наработки плутония от одного PWR с частичной загрузкой МОКС-топливом.

 LCOE
5%

Конкуренции пока нет.

- Сжигание плутония из ОЯТ - МОКС PWR – коммерческая услуга для зарубежных АЭС

Требование:

один проход плутония по топливному циклу быстрого реактора

 Доход
~200 тыс. долл./кг Pu

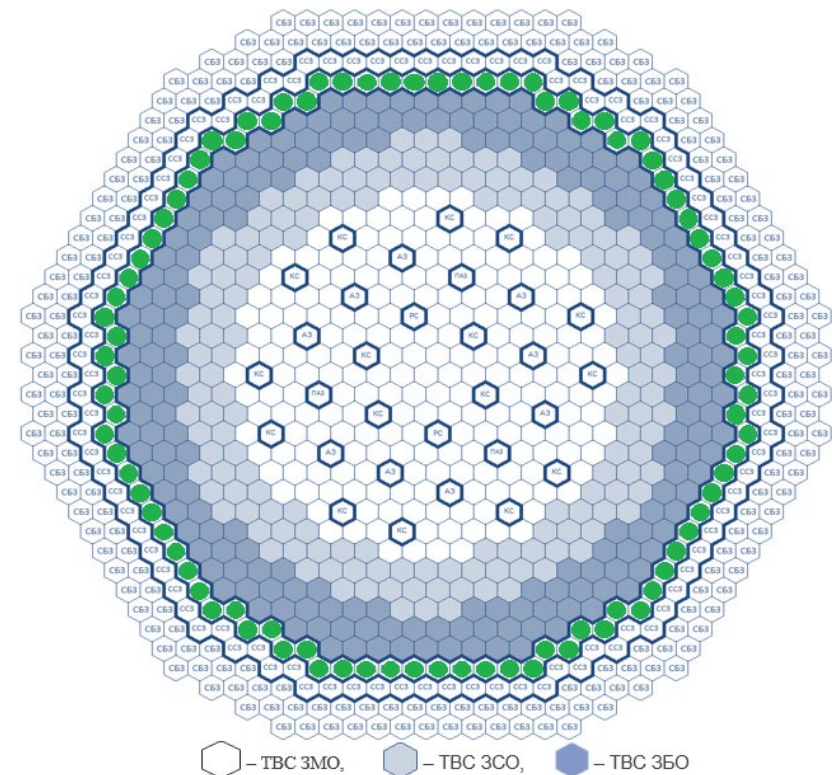
Использование бокового экрана

Воспроизводящий экран позволяет:

- получать плутоний с низким содержанием высших изотопов,
- улучшать изотопный состав плутония из ВВЭР (в том числе, из зарубежных PWR на смешанном уран-плутониевом топливе),

и тем самым

- организовать многократный рецикл плутония в системе быстрых и тепловых реакторов, что позволит последним работать в условиях дефицита дешевого природного урана.



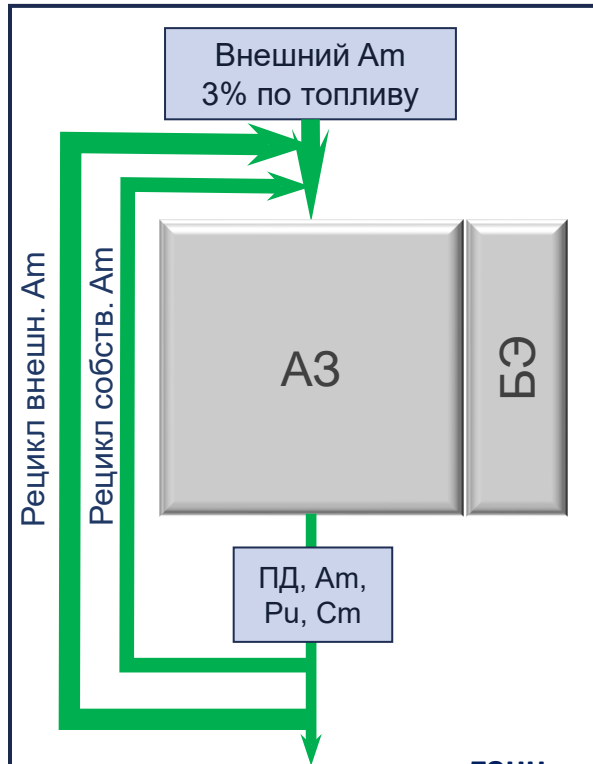
Картограмма БН-800

Кроме того, возможно использование бокового экрана для выполнения других функций, как, например, наработка изотопов или выжигание МА.

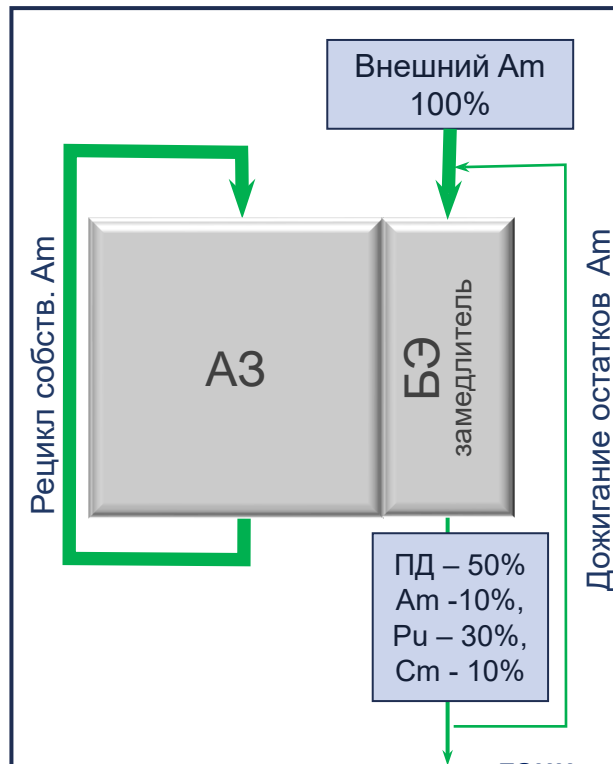
Рецикл Am в реакторе типа БН-1200 за 60 лет при различных способах трансмутации



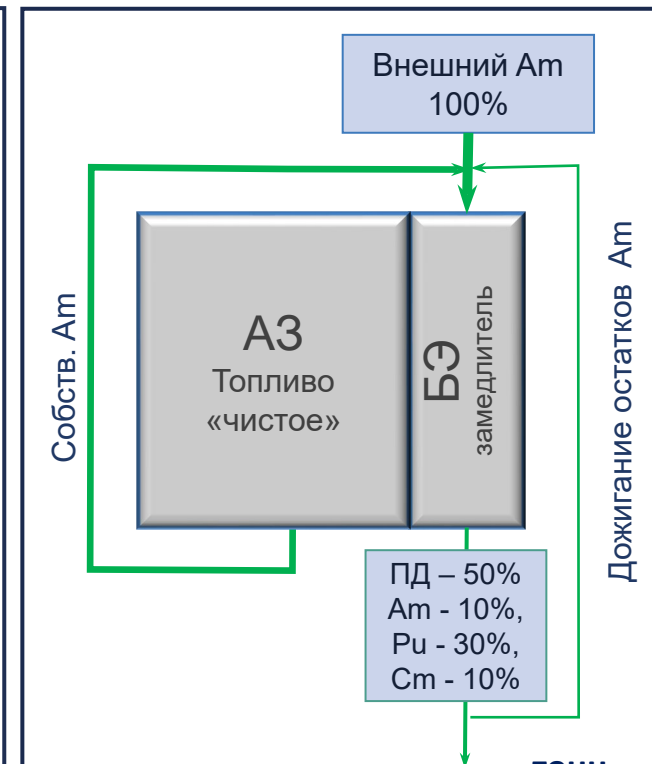
Гомогенная трансмутация



Комбинированная трансмутация



Гетерогенная трансмутация в БЭ



	ТОНН
Загрузка	16,0
Выгрузка	12,1
Трансмутация	3,8
Рецикл собств. Am	4,8
Рецикл внешн. Am	11,2
Эффективность	24%

	ТОНН
Загрузка	8,1
Выгрузка	5,1
Трансмутация	3,0
Рецикл собств. Am	4,8
Рецикл внешн. Am	3,7
Эффективность АЗ	0 %
Эффективность БЭ	90%

	ТОНН
Загрузка	3,7
Выгрузка	2,6
Трансмутация	1,2
Собств. Am	2,2
Рецикл внешн. Am	1,5
Эффективность АЗ+БЭ	30%

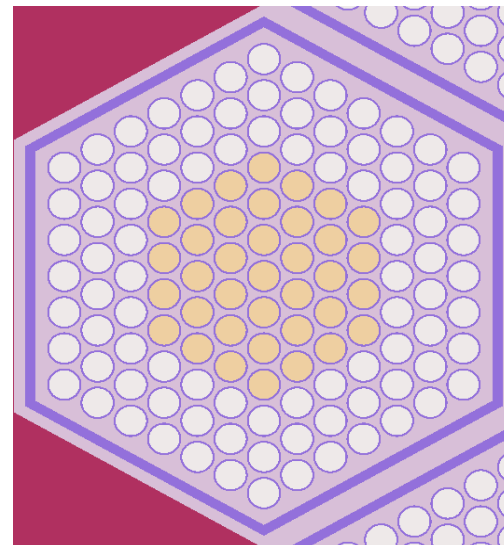
Выжигание америция из ОЯТ зарубежных тепловых реакторов

Экономика заключается в компенсации затрат, которые несет российская сторона на утилизацию 1 кг Am.

Затраты на выжигание 1 кг Am в быстром реакторе в зависимости от способа размещения в реакторе могут составить **70 - 400 тыс. долл.**

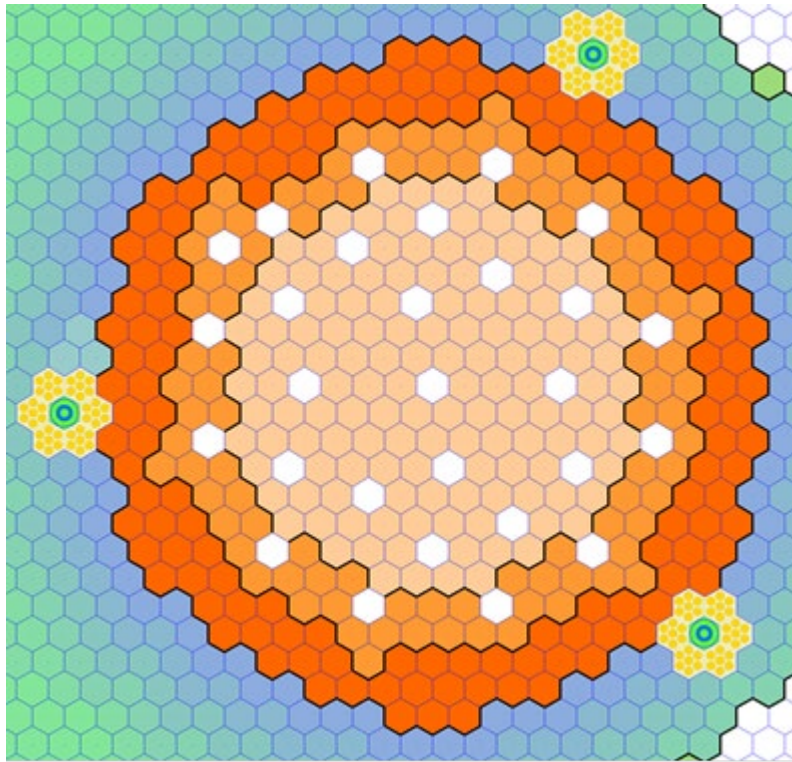
Выжигание 23 кг Am (из ежегодно выгружаемого ОЯТ теплового реактора после 20 лет выдержки) на коммерческой основе в реакторе типа БН-1200М приводит к снижению величины LCOE для быстрого реактора до 6%.

Конкуренция по выжиганию америция отсутствует.

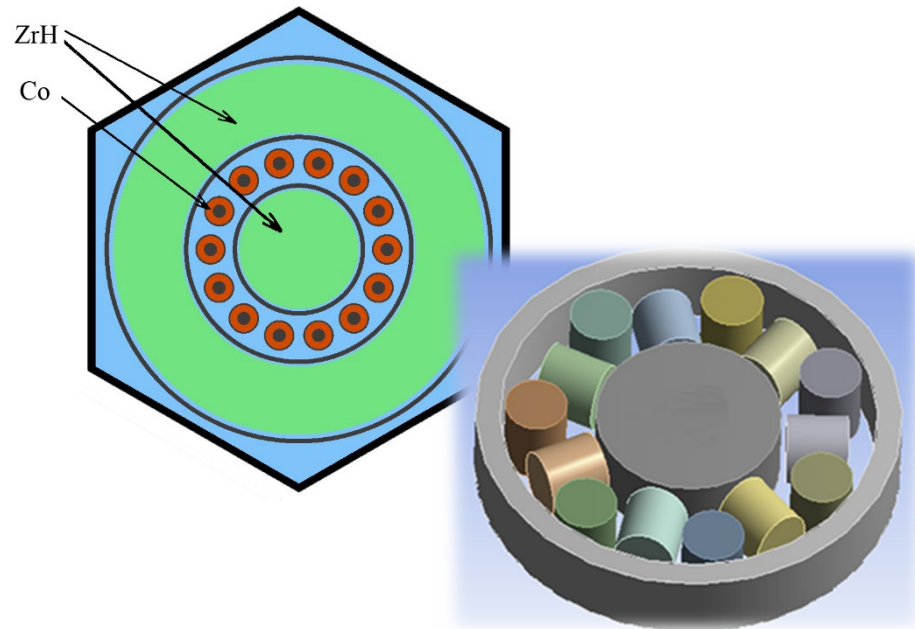


Картограмма облучательного устройства с 37 мавэлами и замедлителем

Изотопы



Наработка медицинских, технологических и энергетических изотопов (^{238}Pu , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{229}Th и др.) в облучательных устройствах с замедлителем, располагаемых в боковом экране, может стать коммерчески значимой задачей для реакторов БН большой мощности.



Годовой доход от производства ^{60}Co оценивается в 8 млн. долл., от производства ^{238}Pu – 75 млн. долл. (19 кг/год по 4000\$/г)

Но такое производство **имеет конкурентный характер**, поэтому экономическая эффективность проекта зависит от конъюнктуры на мировом рынке.



Доход от Co-60 ~ 8 млн.\$/год
от Pu-238 ~ 75 млн.\$/год

Атомно-водородная энергетика

Общий объем годового производства водорода в мире ~ 75 млн. т, при совокупном среднегодовом темпе роста около 2%

Пути развития атомно-водородной энергетики:

- использование теплового реактора ВТГР (метод Паровой Конверсии Метана);
- высокотемпературный электролиз воды

Проблемы ПКМ:

- В 2050 году при производстве с помощью ВТГР ~ 15 млн.т H₂/год расход природного урана составит до 3000 т/год, что может стать существенным ограничением для развития тепловых реакторов.
- Большой удельный расход природного газа.
- Утилизация углекислого газа (150 млн.т/год).

Решение:

- Ускоренное развитие реакторов БН с повышенным коэффициентом воспроизводства и температурой натрия до 600 - 700 °С.

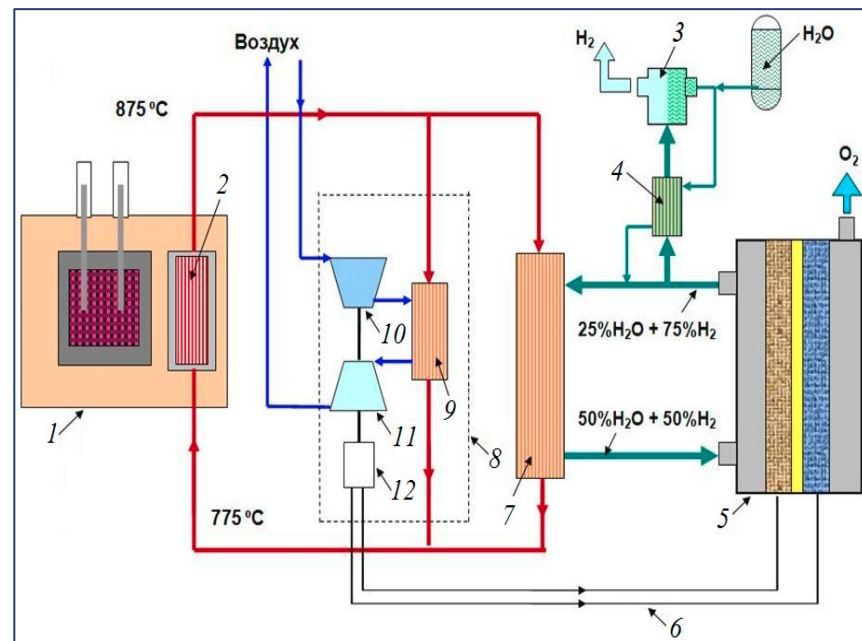


Схема реакторной установки для производства электроэнергии и водорода на основе технологии твердооксидного высокотемпературного электролиза воды: 1 — быстрый реактор; 2 — промежуточный теплообменник; 3 — сепаратор водорода; 4 — теплообменник; 5 — твердооксидный электролизер; 6 — электроэнергия на электролизер; 7 — парогенератор; 8 — газотурбинная установка; 9 — теплообменник; 10 — компрессор; 11 — турбина; 12 — электрогенератор.

Заключение

- Решение отложенных проблем современной ядерной энергетики России и ее развития лежит в поэтапном переводе в режим двухкомпонентной ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами и единым ЗЯТЦ.
- Быстрые натриевые реакторы на сегодняшний день являются реальной технологией нацеленной на синергетическое взаимодействие с тепловыми реакторами в едином ЗЯТЦ.
- Физические свойства быстрых натриевых реакторов (в частности, на МОКС-топливе) обеспечивают им ряд фундаментальных возможностей для двухкомпонентной ЯЭ, которые позволяют:
 - ✓ сбалансировать по изотопным потокам и временным характеристикам поэтапное замыкание ядерного топливного цикла ДЯЭ.
 - ✓ помимо производства электроэнергии создать и вывести на зарубежные рынки инновационные продукты, т.к. выжигание МА, наработка искусственных изотопов, утилизация и облагораживание плутония, производство «зеленого» водорода и др.
 - ✓ в ряде случаев существенно сократить необходимые инфраструктурные расходы и/или получить дополнительные доходы и, тем самым, снизить величину LCOE.

Все это существенно улучшит экономику двухкомпонентной ЯЭ России и откроет новые возможности для зарубежного бизнеса Госкорпорации «Росатом».

Спасибо за внимание!

Гулевич Андрей Владиславович
Начальник Департамента физики реакторов
Отделение ядерной энергетики АО ГНЦ РФ - ФЭИ

Тел.: +7 (484) 399 86 85
E-mail: avgulevich@ippe.ru

21.10.2023