



ФЭИ
РОСАТОМ

ЧТО МОГУТ ДАТЬ БЫСТРЫЕ НАТРИЕВЫЕ РЕАКТОРЫ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ?

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

Нейтроника-2024

28–31 мая 2024 г.,
г. Обнинск

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



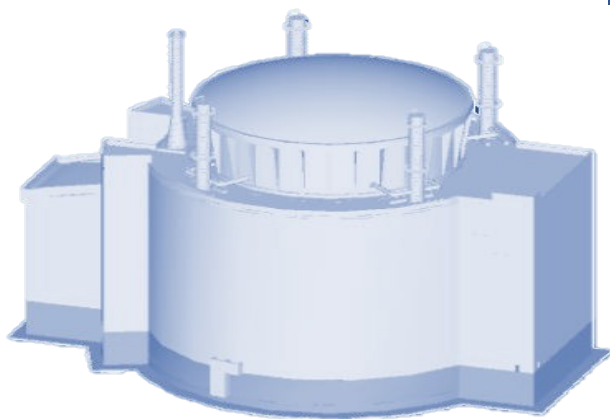
- Накопление ОЯТ, возвращаемого от зарубежных АЭС, построенных по российским проектам

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
- Реализация многократного рециклирования плутония в двухкомпонентной ЯЭС
- Балансировка запаса плутония и минорных актинидов в глобальной системе ЯЭ с тепловыми и быстрыми реакторами
- Предоставление услуг в заключительной стадии ЯТЦ – расширение экспортных возможностей Госкорпорации Росатом
- Нарботка медицинских, технологических и энергетических изотопов, включая ^{60}Co , ^{238}Pu
- 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

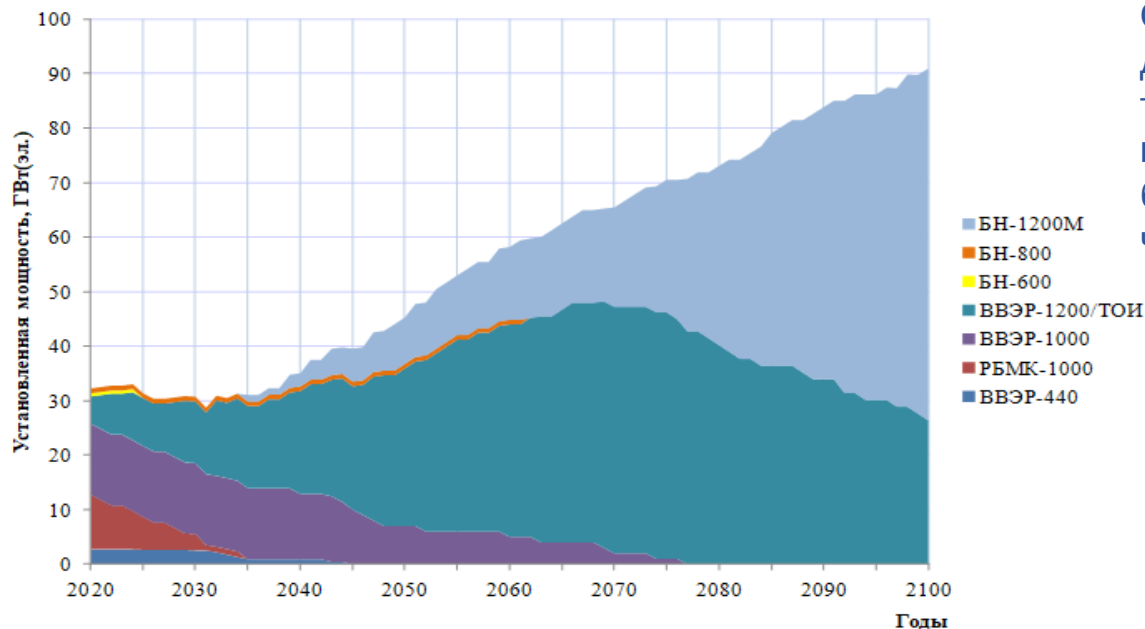
Физические свойства быстрых натриевых реакторов:

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

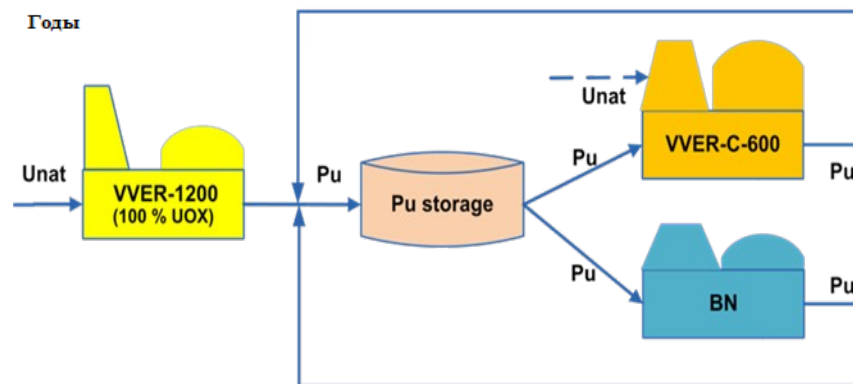
обеспечивают следующие фундаментальные возможности двухкомпонентной системе ядерной энергетики:

- расширенное воспроизводство ядерного горючего
- возможность 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



Пример организации ЯТЦ на основе мультирециклирования плутония в тепловых и быстрых реакторах

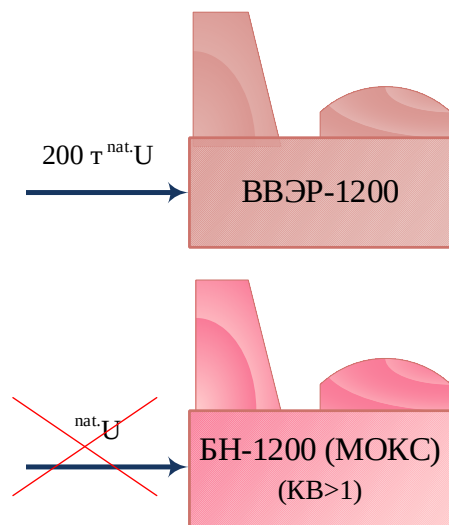


Синергичное взаимодействие двух компонент на основе тепловых и быстрых реакторов позволит системе развиваться более эффективно и динамично, чем современная ЯЭ

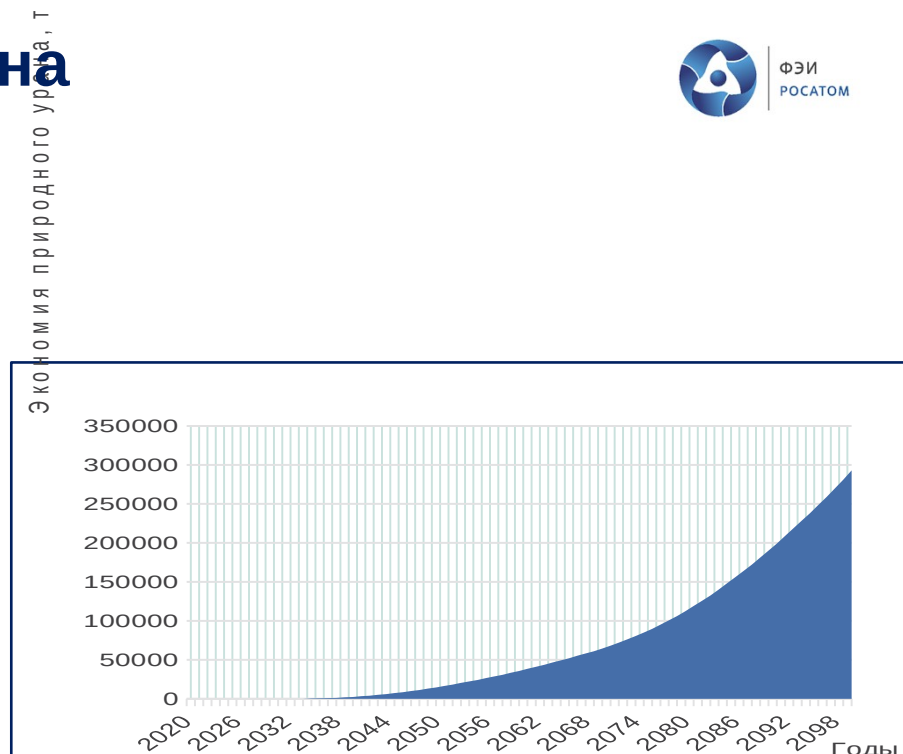
При обосновании сценариев развития сравнивать следует эффективность систем ЯЭ, а не LCOE отдельных энергоблоков!

Экономия природного урана

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



При вводе 1 реактора БН-1200М
исключается потребление
~200 т природного урана в год.



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

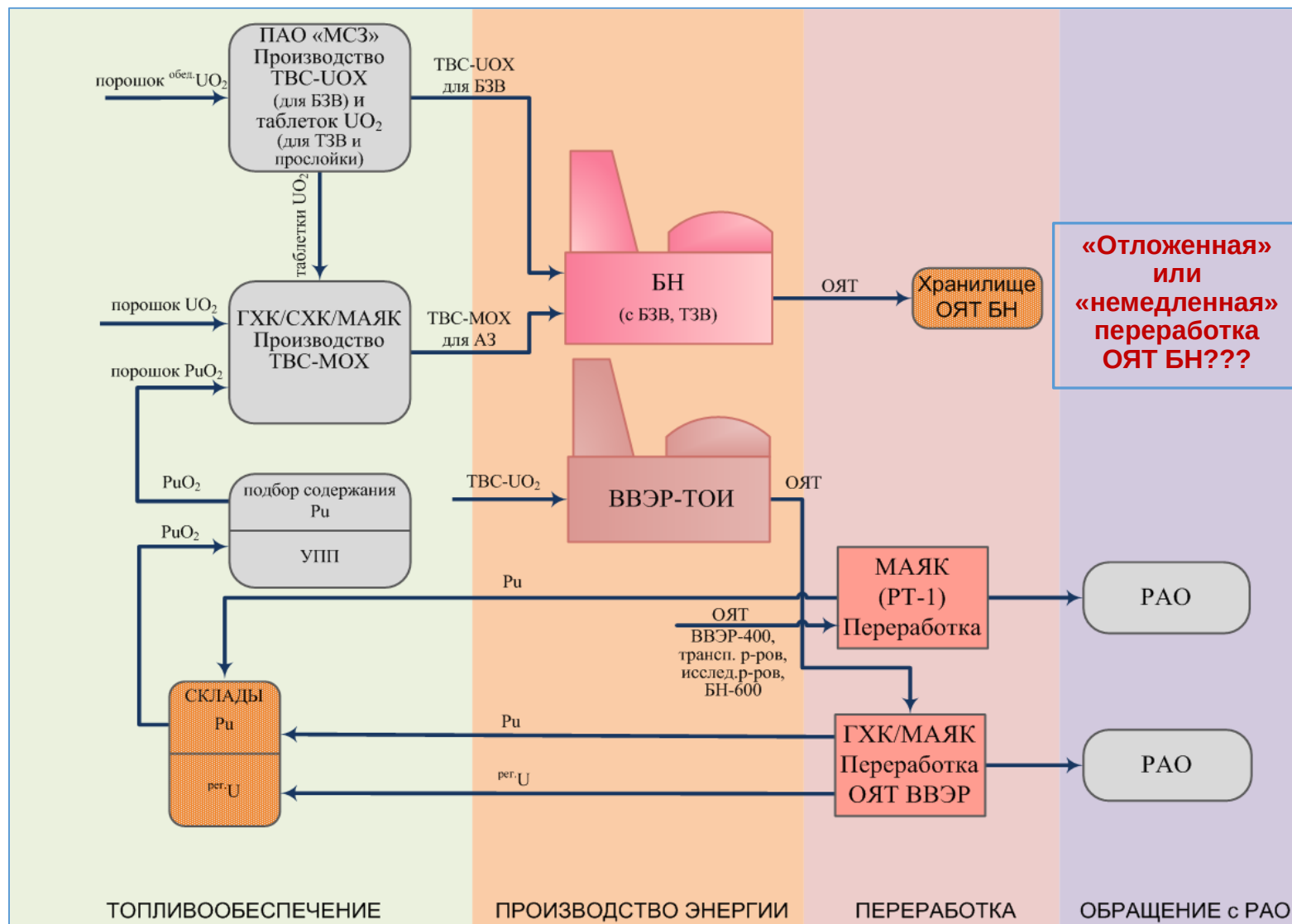
↑ Доход
30 млн долл./год

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

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

↓ LCOE
12%

Возможная структура ЗЯТЦ начального этапа замыкания ЯТЦ при переходе к двухкомпонентной ЯЭС



«Отложенная» переработка ОЯТ быстрых реакторов

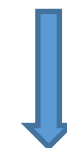


К моменту ввода в эксплуатацию головного энергоблока БН-1200М количества накопленного Рц хватит на эксплуатацию его и БН-800, и на пуск еще нескольких серийных быстрых реакторов.

Для этого потребуется:

- ускоренная переработка ОЯТ ВВЭР;
- отказ от создания малых производств по переработке ОЯТ БН;
- создание крупных перерабатывающих производств ОЯТ БН после 2055 года.

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



LCOE
~10%

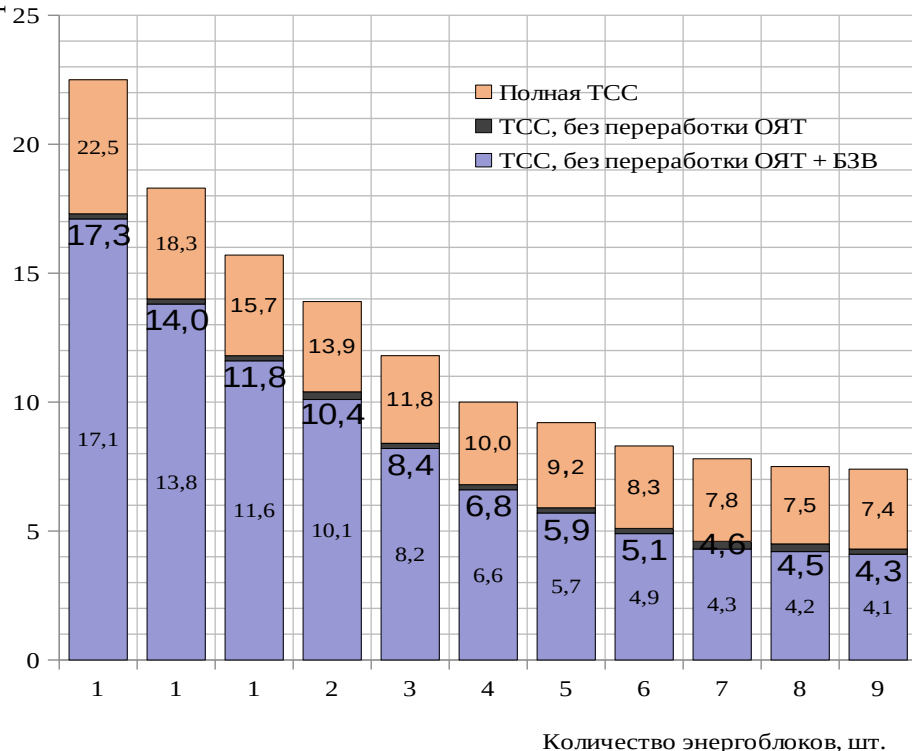
Использование, после надлежащей модернизации, освободившихся хранилищ ОЯТ тепловых реакторов под хранение ОЯТ быстрых реакторов. Экономия инвестиционных затрат на начальном этапе может составить около **280 млн.\$**



Экономия
280 млн.\$

Серийность БН. Ежегодные топливные затраты для серии БН большой мощности на начальном этапе замыкания ЯТЦ

TCC, mills/кВт·час



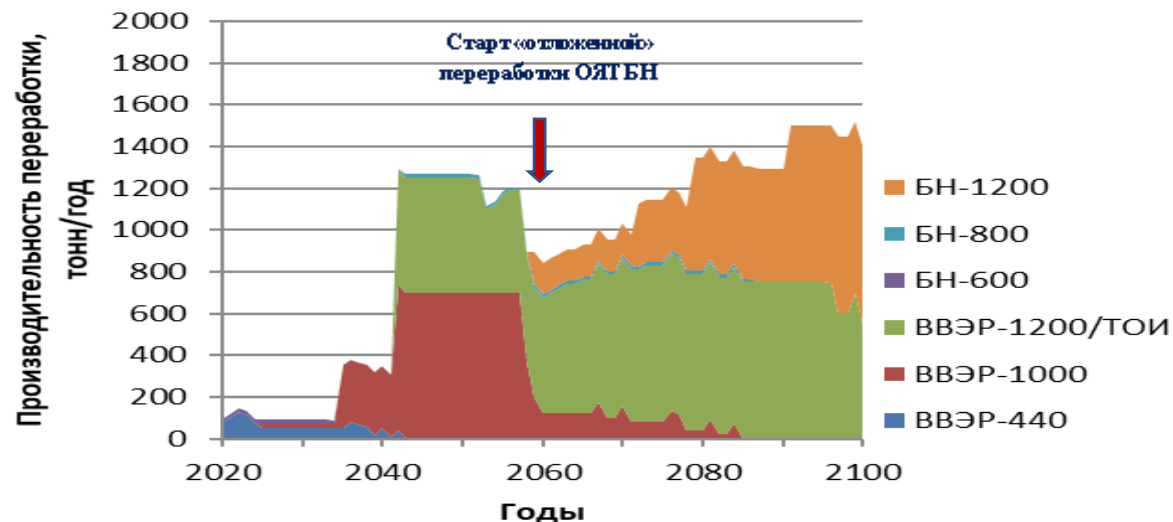
ТСС реакторов БН большой мощности в зависимости от выгорания и количества блоков в системе

Этапность замыкания ЯТЦ при переходе к двухкомпонентной ЯЭС:

- ✓ ввод головного БН, его работа при $B_{cp} = 90$ МВт·сут/кг тм + пр-во по изгот. МОКС-ТВС АЗ (~20 т тм/год);
- ✓ перевод головного БН в режим экспл. на $B_{cp} = 110$ и 130 МВт·сут/кг тм (мощности заводов прежние);
- ✓ ввод малой серии реакторов БН (8 шт.) + соответствующее увеличение мощностей по изготовлению топлива;
- ✓ эксплуатация серии из 9 БН без переработки ОЯТ до исчерпания плутония из ОЯТ ВВЭР;
- ✓ ввод специализированного завода (или линии) по переработке ОЯТ реакторов БН произв-стью ≥ 200 т тм/год. Совместная переработка ОЯТ АЗ и БЗВ.

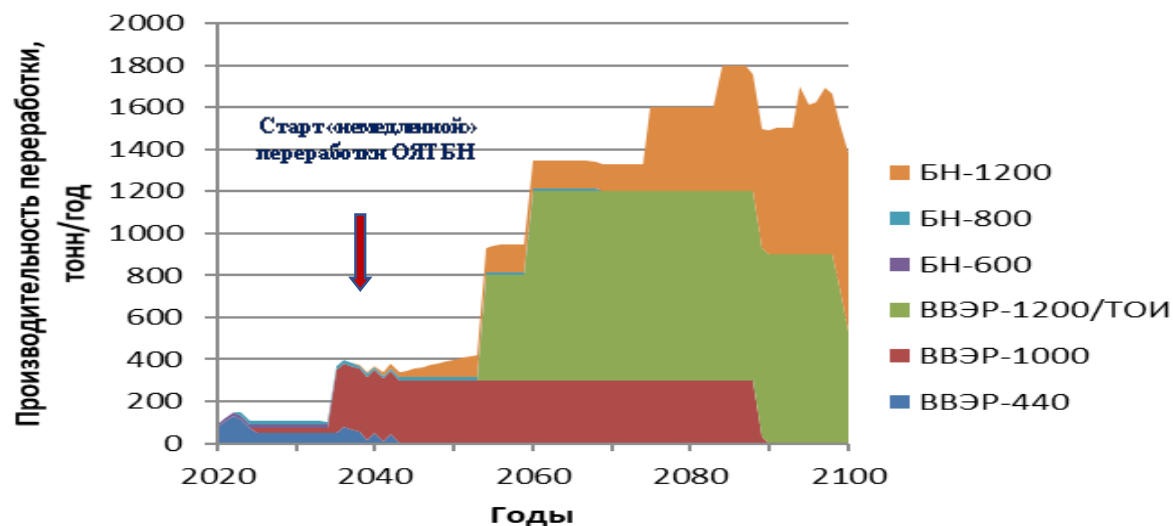
Переход от головного коммерческого быстрого реактора к серии из 9-ти энергоблоков снижает LCOE на ~25%!

Структура потребностей в переработке ОЯТ с целью обеспечения плутонием реакторов БН



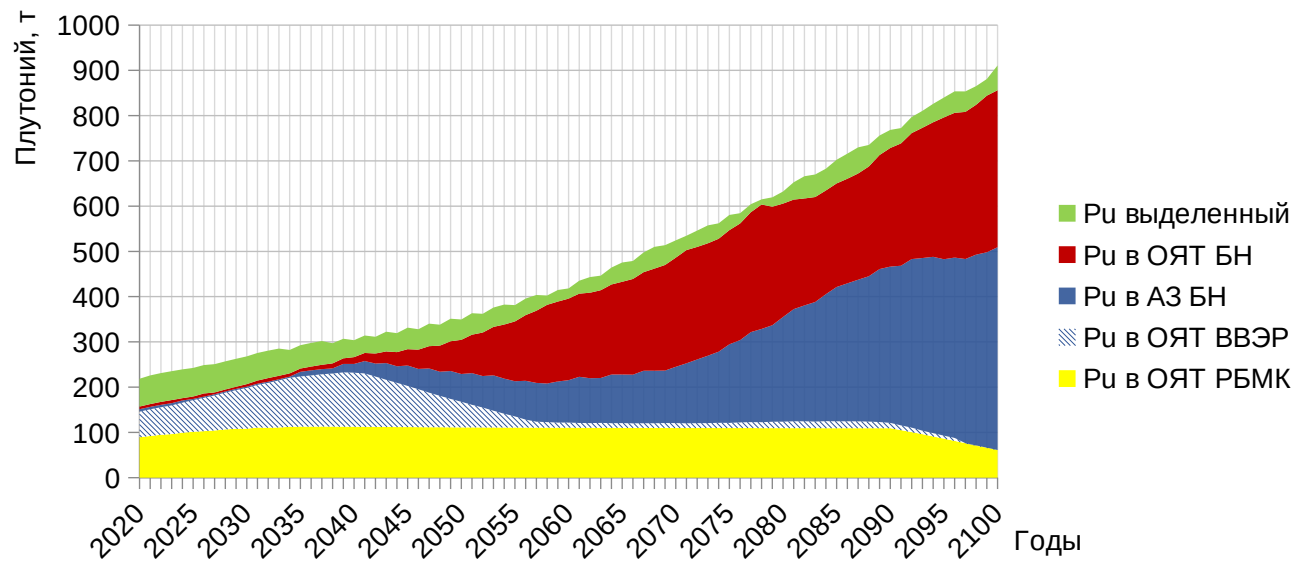
**Вариант с
«отложенной»
переработкой ОЯТ
БН и внешним ТЦ
6 лет**

**Потребность в
переработке ОЯТ БН
в рассматриваемом
сценарии возникает
после 2055 г.!**

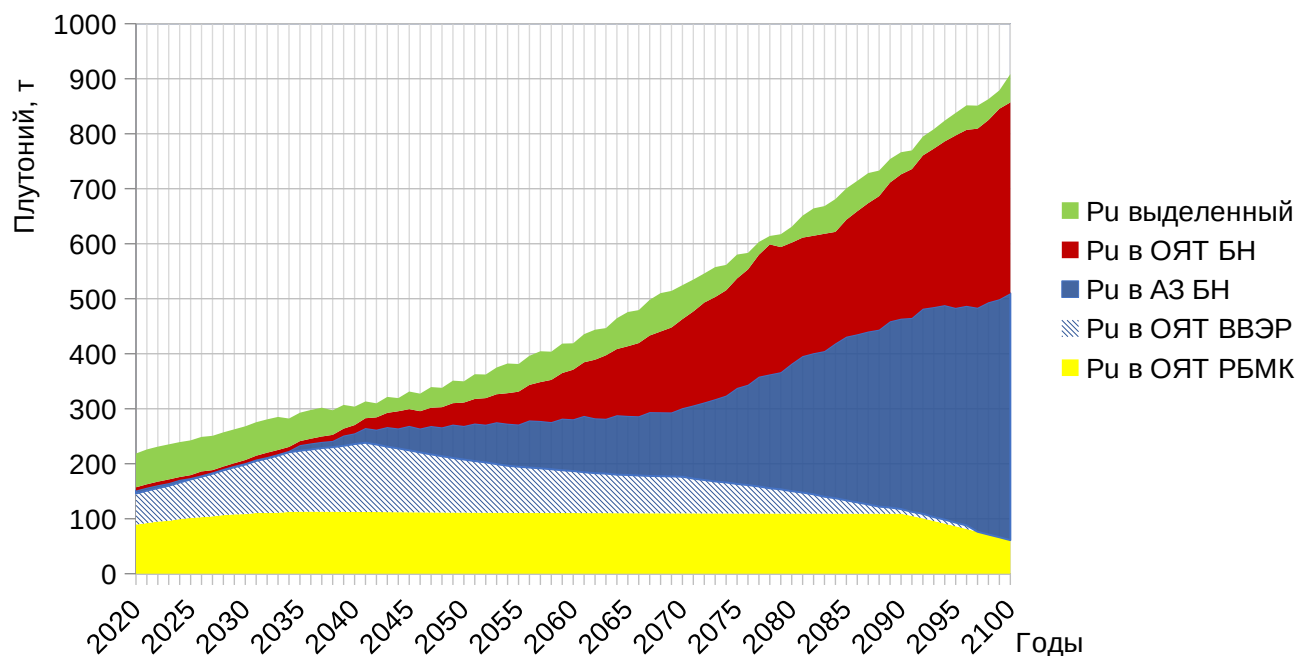


**Вариант с
«немедленной»
переработкой ОЯТ
БН и внешним ТЦ
6 лет**

Структура запасов плутония в двухкомпонентной системе

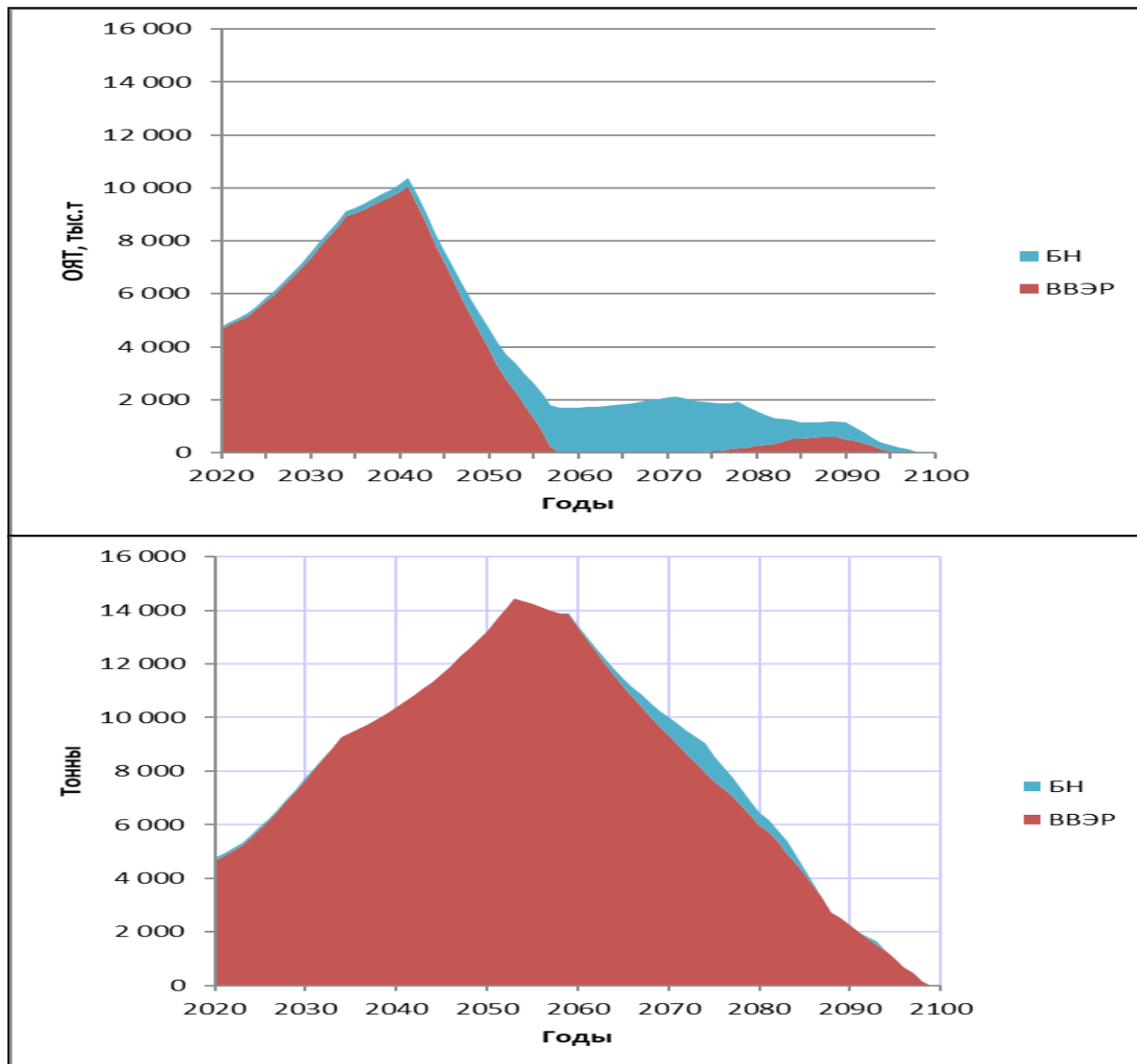


Вариант с
«отложенной»
переработкой до
2055 года и
внешним ТЦ 6 лет



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

Количество ОЯТ в хранилищах ВВЭР и БН



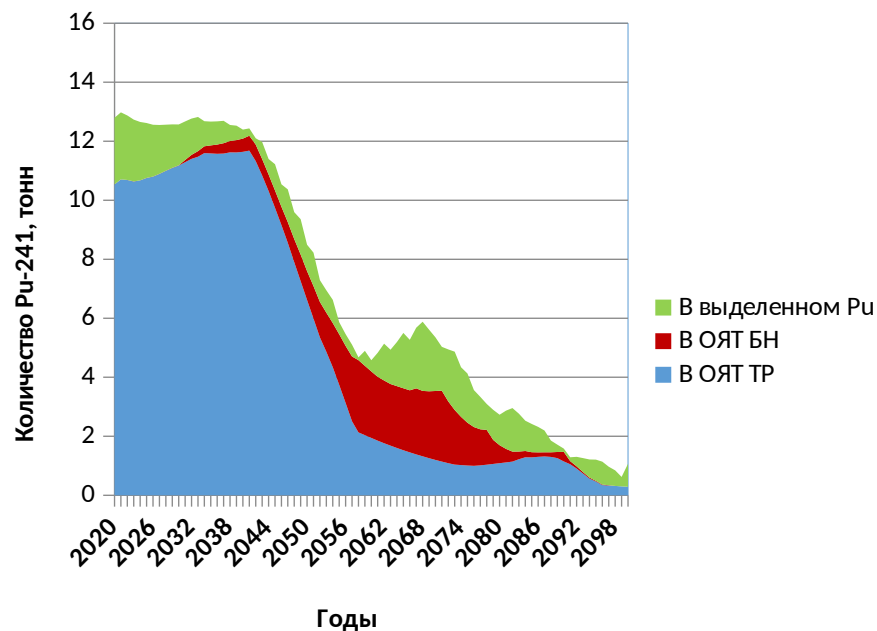
Вариант с
«отложенной»
переработкой до
2055 года и
внешним ТЦ 6 лет

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

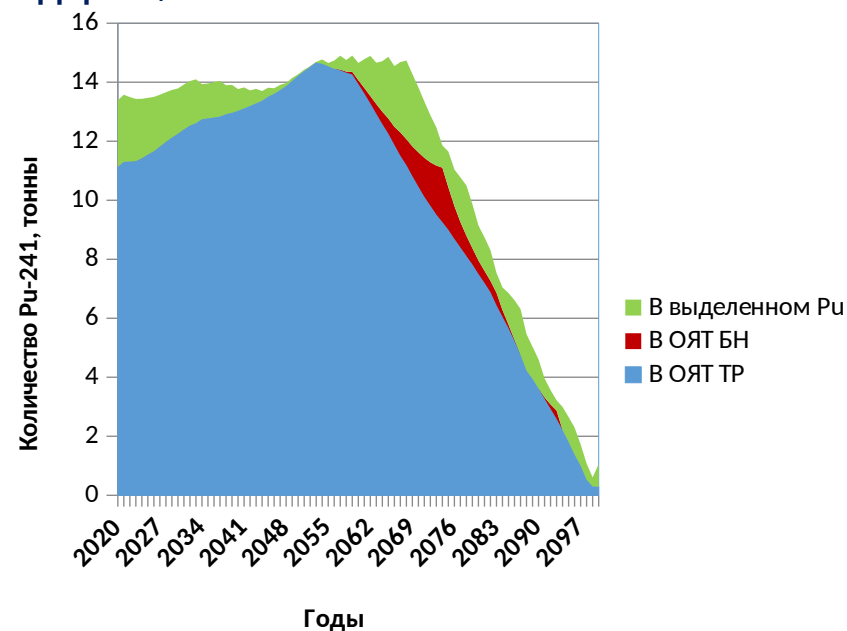
Стратегия обращения с америцием в ДАЭ

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

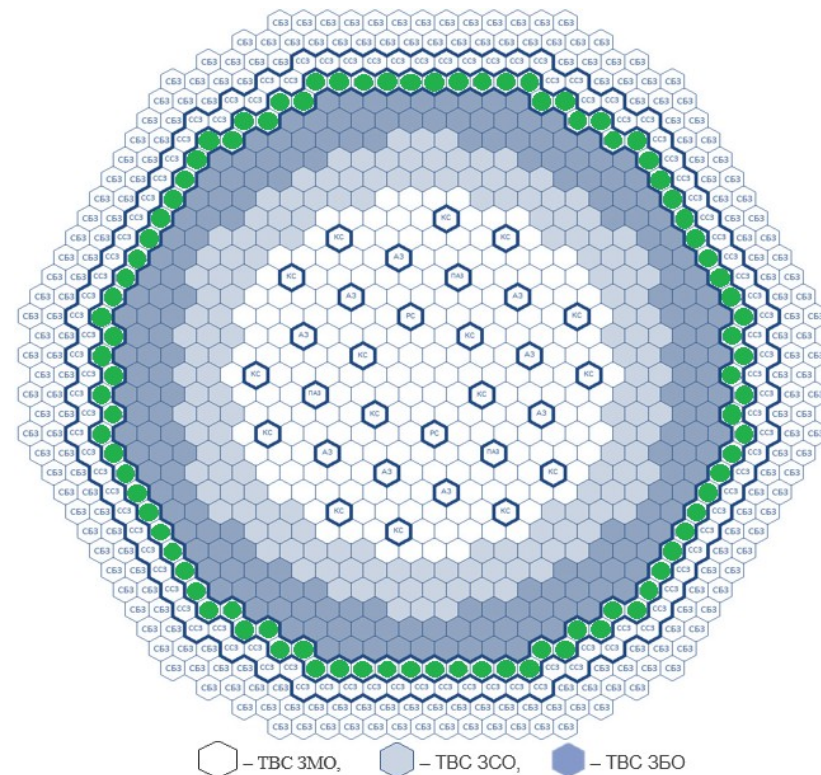
Использование бокового экрана

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.



Картграмма БН-800

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

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:

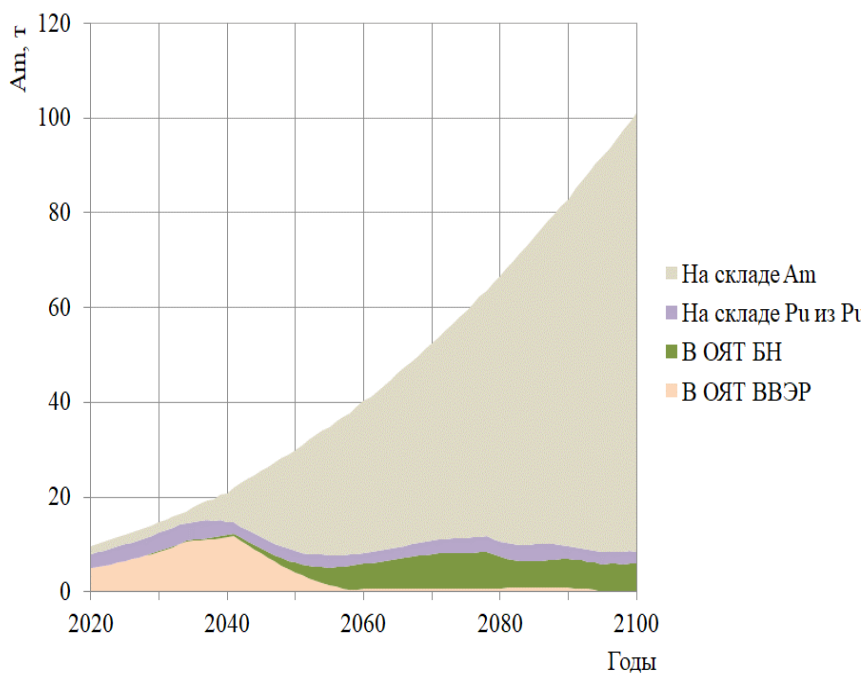
один проход плутония по топливному циклу быстрого реактора

 Доход
~200 тыс. долл./кг Pu

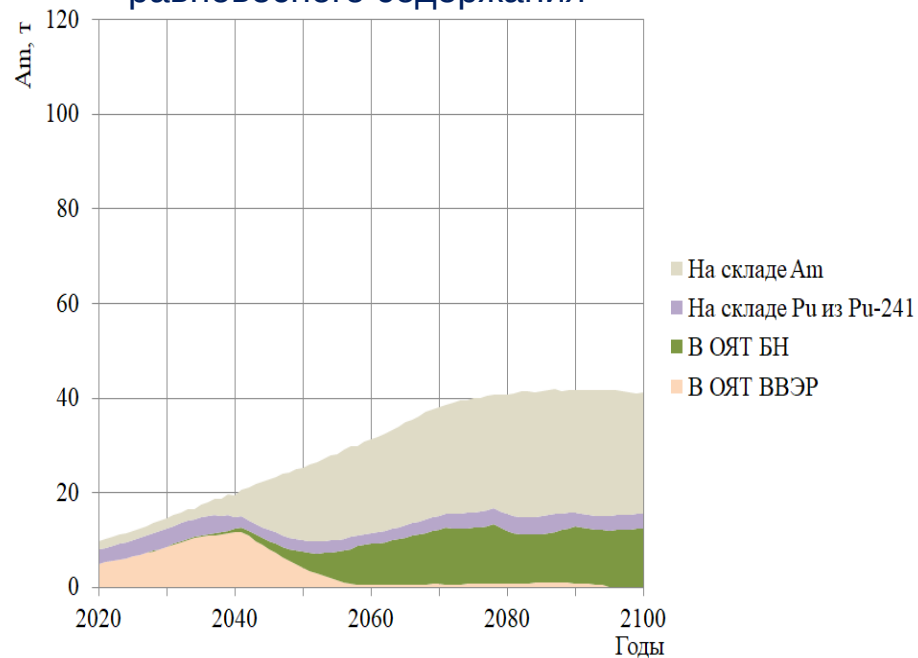
Наработка америция в топливном цикле ЯЭ

с учетом использования СВФДП и добавления в топливо БНов Am на уровне равновесного содержания

«Чистое» топливо БН-1200

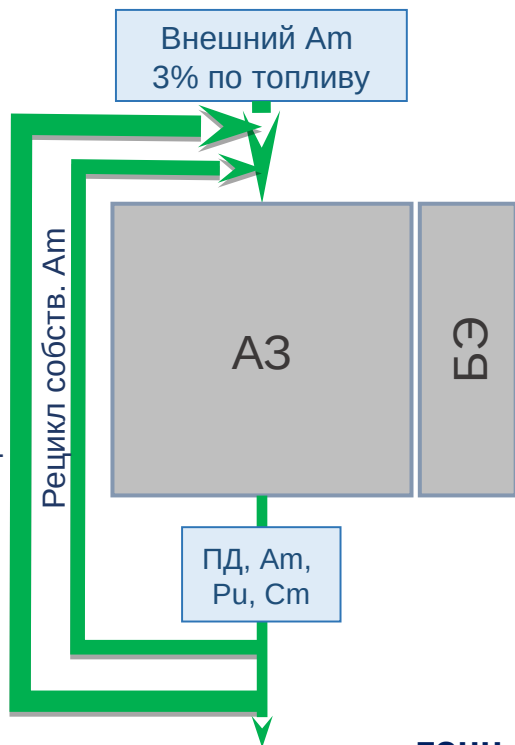


Am в топливе БН-1200 на уровне равновесного содержания



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

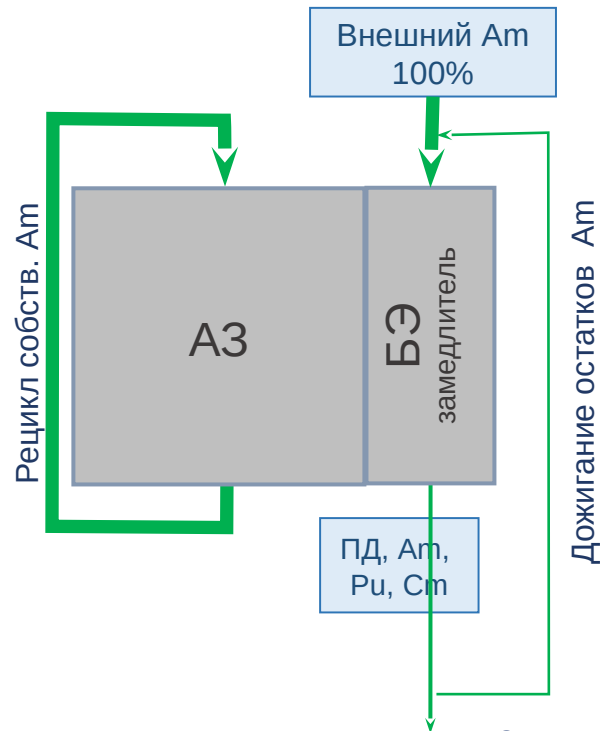
Гомогенная трансмутация



ТОНН

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

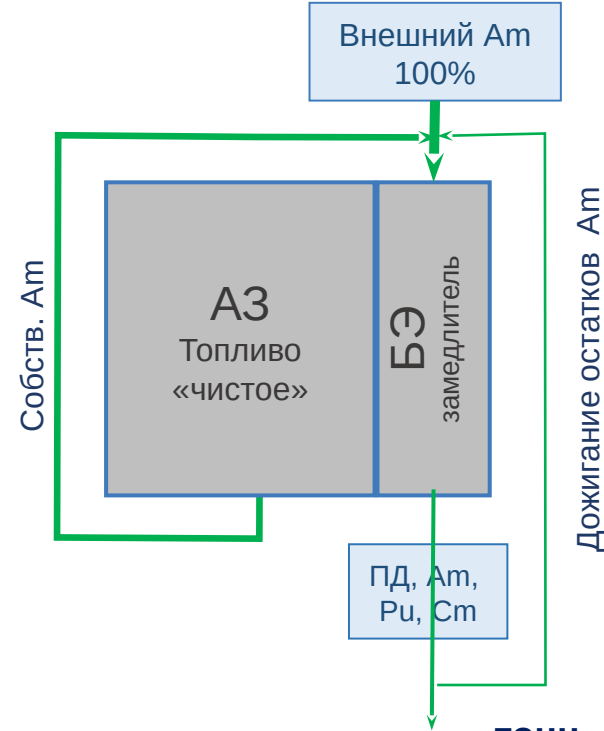
Комбинированная трансмутация



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	85%

Гетерогенная трансмутация в БЭ



ТОНН

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

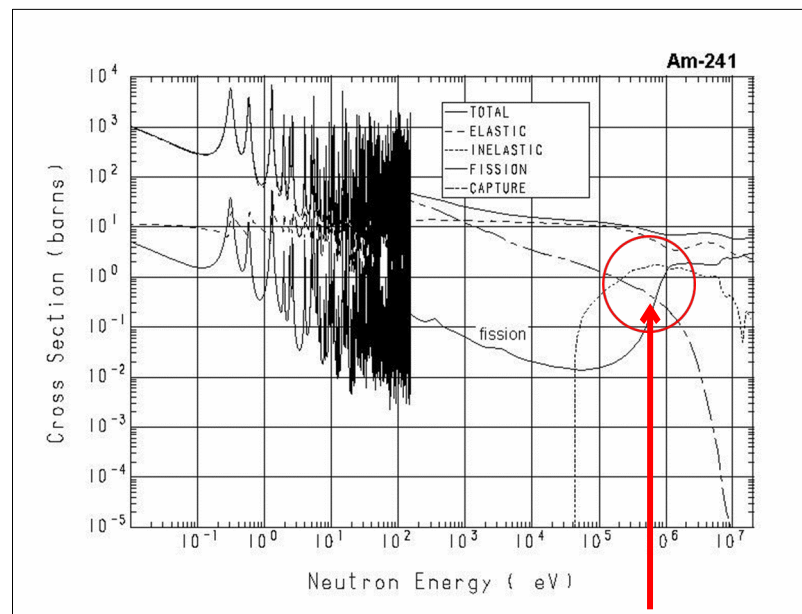
Чем отличается «трансмутация» америция от его «выжигания» в быстрых реакторах?

- В МОКС и нитридном топливе америций в основном трансмутирует в высокоактивные изотопы кюрия с очень большим тепловыделением (кюри-242 – 120 кВт/кг, кюри-244 – 2.8 кВт/кг).

Опасный америций превращается в еще более опасный кюрий, который требует длительного (70-100 лет) контролируемого хранения. Поэтому подходы утилизировать МА в больших энергетических реакторах недостаточно эффективны.

- В реакторе на металлическом топливе с более жестким спектром нейтронов америций преимущественно делится (т.е. превращается в более короткоживущие продукты деления), тем самым обеспечивается эффективное его выжигание.

Сечения деления, захвата и рассеяния Am



**Необходимая
область спектра**

Америций в таком реакторе будет не добавкой к топливу, а самим топливом, и будет не трансмутировать, а делиться, причем на порядок эффективнее (на единицу мощности), чем в реакторе на МОКС или нитридном топливе.

Нужен специализированный реактор на металлическом топливе !

Проблема: в реакторе с металлическим топливом на основе МА нарушаются Правила НП-082-07 (Суммарный коэффициент реактивности по температуре и плотности теплоносителя должен быть отрицателен)

МБИР – идеальный демонстратор возможностей эффективного «выжигания» америция

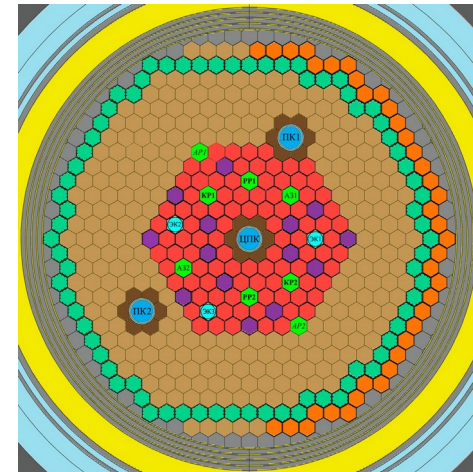
1. Идеальный демонстратор - многоцелевой быстрый реактор небольшой мощности – **МБИР с металлическим топливом**.

2. Для выполнения Правил ядерной безопасности предлагается **реактор со «связанными» (в нейтронно-физическом отношении) активными зонами**:

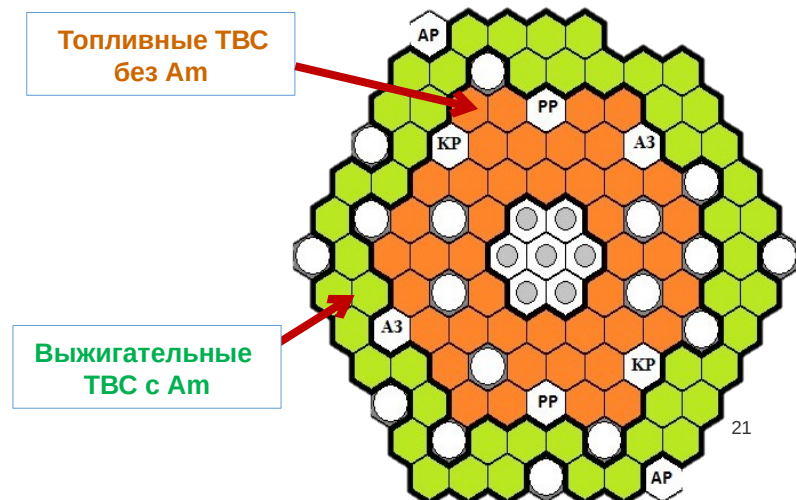
- центральная зона (с металлическим плутониевым топливом, не содержащим МА) – обеспечивает необходимые (по Правилам ЯРБ) коэффициенты реактивности,
- периферийная зона (с металлическим Am) обеспечивает выжигание америция с производительностью до 60-70 кг/год

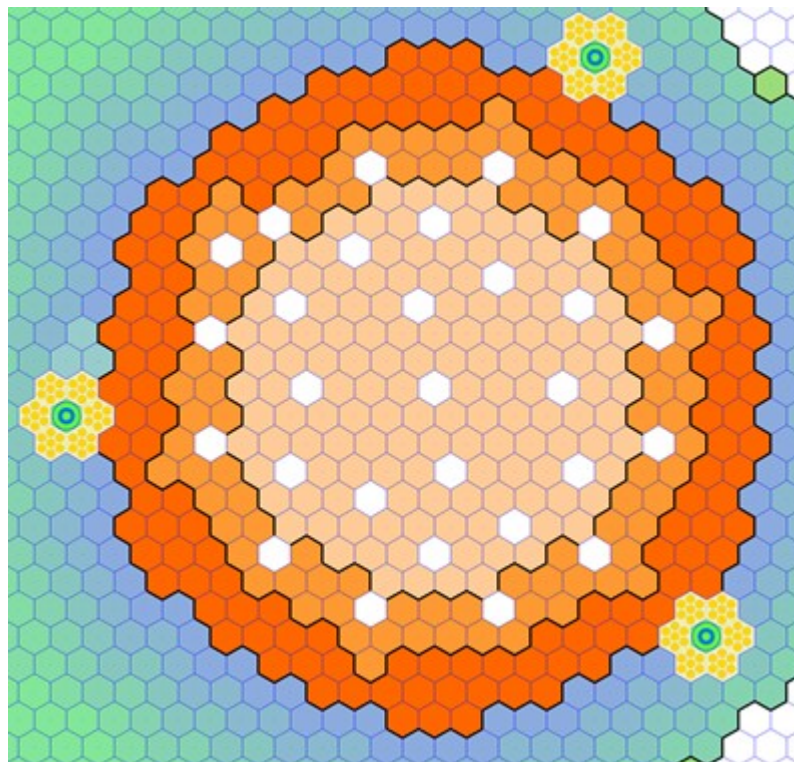
3. Перевод МБИР на металлическое топливо почти не скажется на его характеристиках – максимальный поток будет $5 \cdot 10^{15}$ н/см²с, скорость набора повреждающей дозы возрастет; объем трансмутации ~60 кг/год (или 15% от годовой загрузки Am).

Проектная активная зона МБИРа

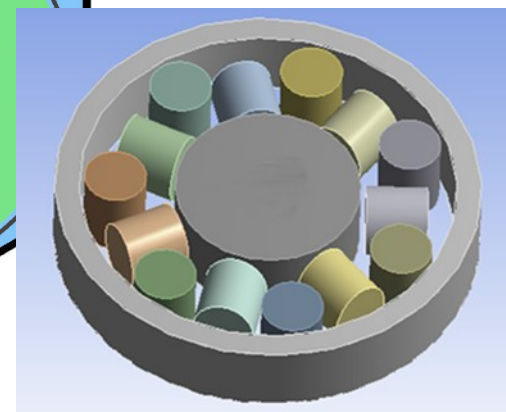
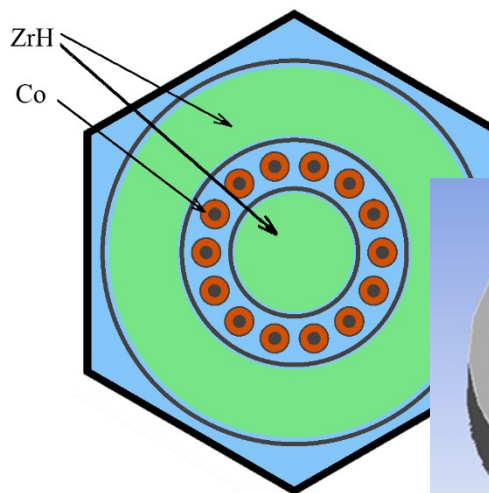


Активная зона МБИРа для выжигания Am





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.

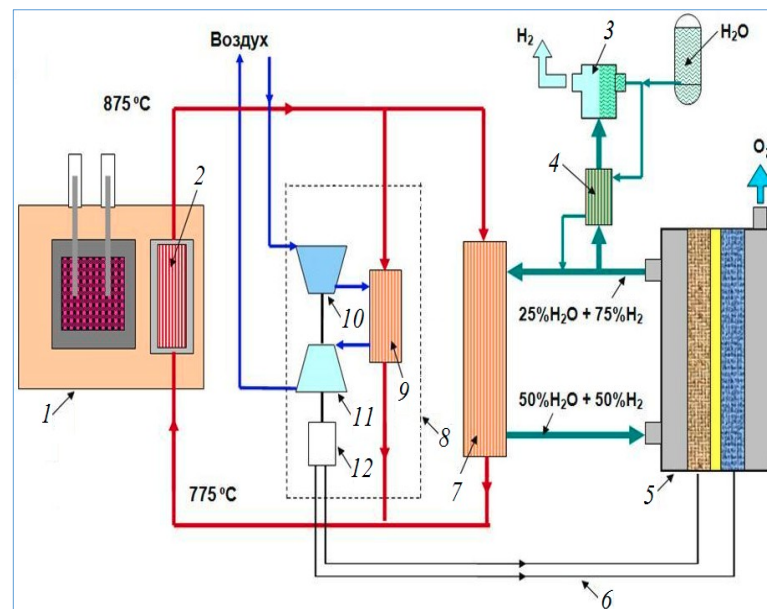


Схема реакторной установки для производства электроэнергии и водорода на основе технологии твердооксидного высокотемпературного электролиза воды: 1 — быстрый реактор; 2 — промежуточный теплообменник; 3 — сепаратор водорода; 4 — теплообменник; 5 — твердооксидный электролизер; 6 — электроэнергия на электролизер;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

- 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».

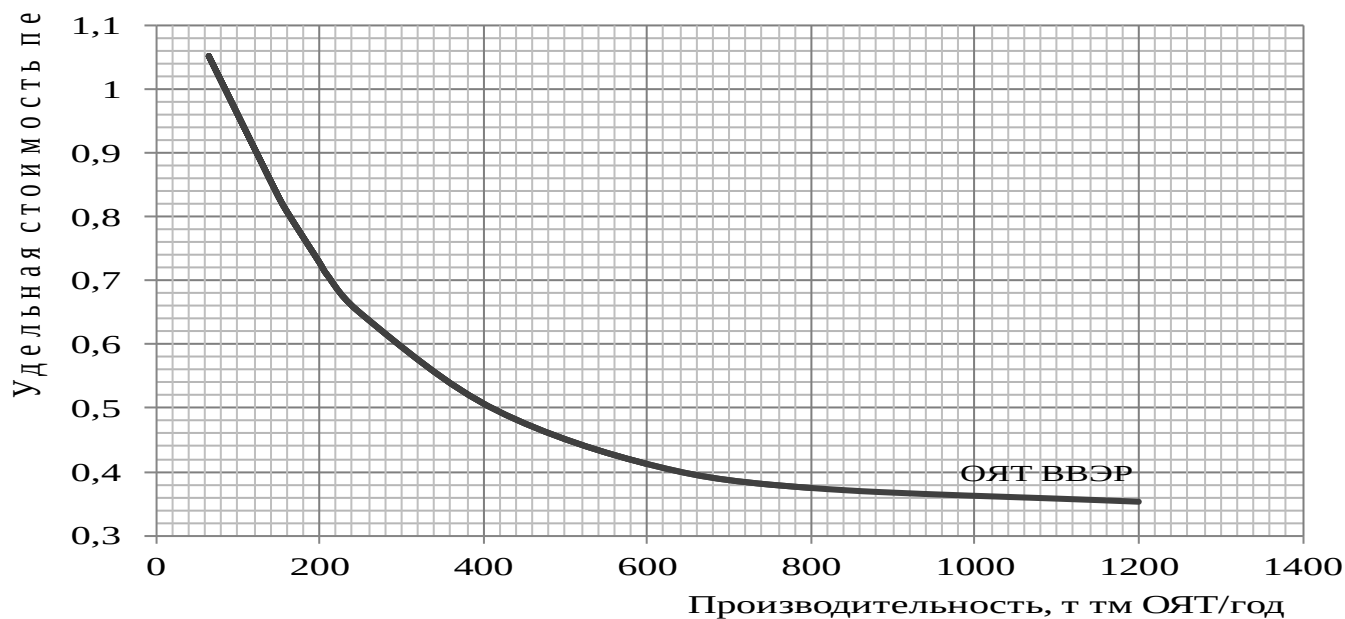
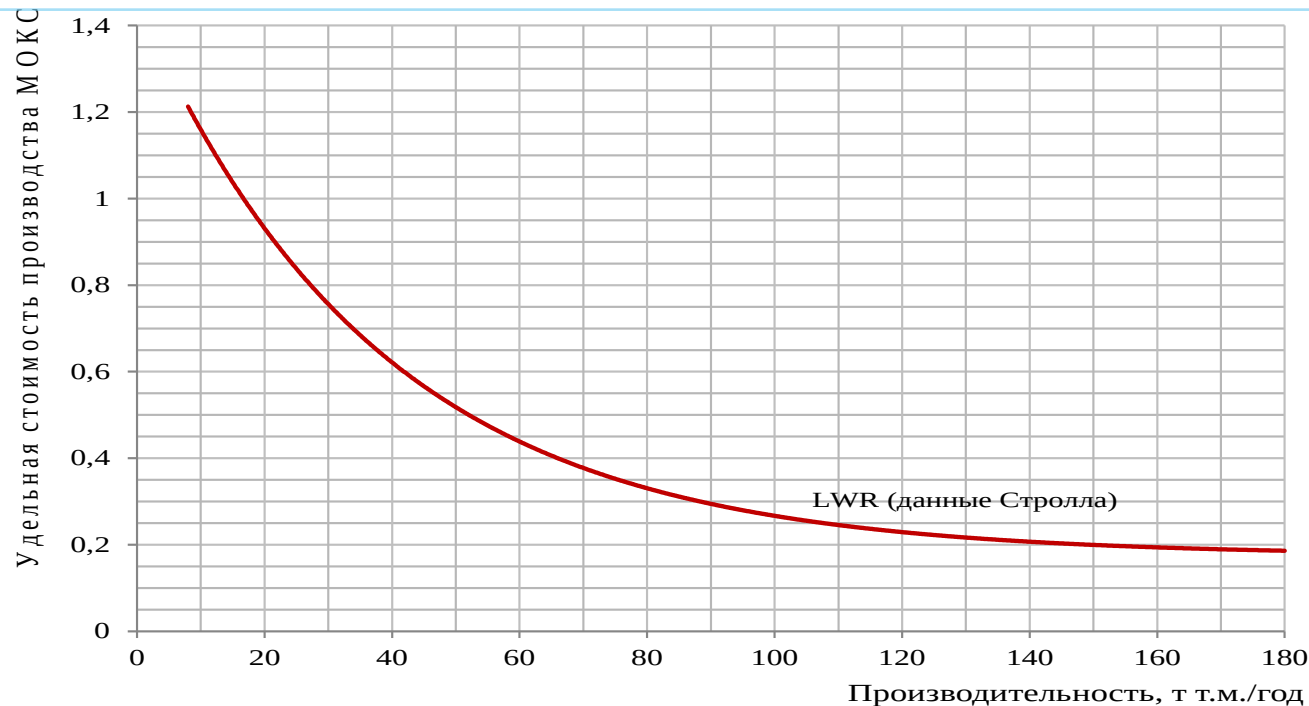
Спасибо за внимание!

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

28.05.2024

Изготовление МОКС топлива и переработка ОЯТ ВВЭР



Тузов А.А., Троянов В.М.,
Гулевич А.В. и др. К вопросу
о начальном этапе
замыкания ЯТЦ
двухкомпонентной ЯЭ
России. — Атомная энергия,
2022, т. 133, вып. 2, с. 71—76

Оценка эффективности трансмутации 1 т Am

Параметр	Гомогенная трансмутация в активной зоне			Комбинированная трансмутация в АЗ / БЭ	
	Содержание америция, %			«чистое» топливо в АЗ	«равновесное» по Am топливо
	0,9	2	3		
Загрузка, кг/год	79,4	175	265,8	62,3 6,7/55,6	135 79,4/55,6
Выгрузка, кг/год	79,4	140	202,5	43,5 37,4/6,1	85,5 79,4/6,1
Трансмутация, кг/год	0	35	63,3	18,8	49,5
Эффективность трансмутации, отн. ед.	0	0,2	0,24	0,3 “отрицат” в АЗ 0,89 в БЭ	0,37; 0 в АЗ 0,89 в БЭ
Рецикл Am за время миссии, кг:	Выжигание внешнего Am невозможно!	2300	1270	1980	1600
- «собственного»		2700	2980	1320	1100
- внешнего		5000	4250	3300	2700
- всего					
Длительность миссии по трансмутации Am, реакторo-лет		29	16	53	20