



ТВЭЛ  
РОСАТОМ

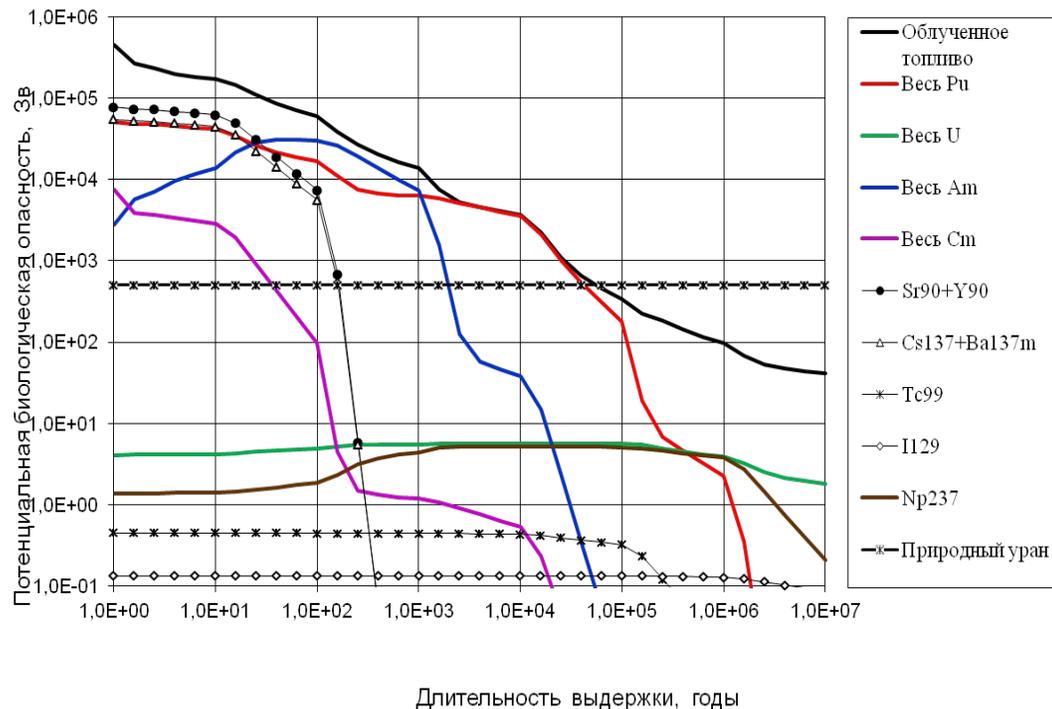
# Эффективность трансмутации минорных актинидов в реакторах на быстрых нейтронах при различных критериях

Всероссийская научно-техническая конференция  
«Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики»

Хомяков Андрей Юрьевич  
Главный специалист

г. Обнинск, 28-31 мая 2024 г.

## Радиационная опасность ОЯТ (РАО)



## Проблема РАО и цель трансмутации МА

- ✓ **Проблема РАО:** обоснование безопасности захоронения РАО на временах до  $10^5$  и более лет:
  - слишком большой срок экстраполяции для доказательства надежной изоляции РАО в стеклоподобных матрицах
  - большие затраты на создание глубинных хранилищ (отказ от них – актуальная задача)
- ✓ **Цель трансмутации РАО:**
  - снижение опасности долгоживущих РАО до минимально-возможного уровня (~100 раз)
  - уменьшение объема остеклованных РАО и затрат на их (глубинное) захоронение

# Постановка проблемы по критериям эффективности

Наиболее распространенные критерии эффективности выжигания МА: по общей массе «выжженных МА» (в кг), относительное изменение массы МА при выжигании ( в относительных единицах или %)

## Недостатки такого подхода:

- ✓ Неучет радиационных свойств МА
- ✓ Неучет образования и опасности дочерних продуктов трансмутации
- ✓ «Собственные» МА несмотря на выжигание рассматриваются как снижение эффективности выжигания МА (т.к. внимание сосредоточено на снижении массы «внешних» МА)
- ✓ Неучет вклада (доли, относительного «веса») МА в общем накоплении РАО с учетом других нуклидов (FP,  $^{14}\text{C}$ , Т и т.п.)
- ✓ Отсутствие учета вклада технологических потерь в РАО
- ✓ Неучет вклада трансмутации МА в воспроизводство Pu

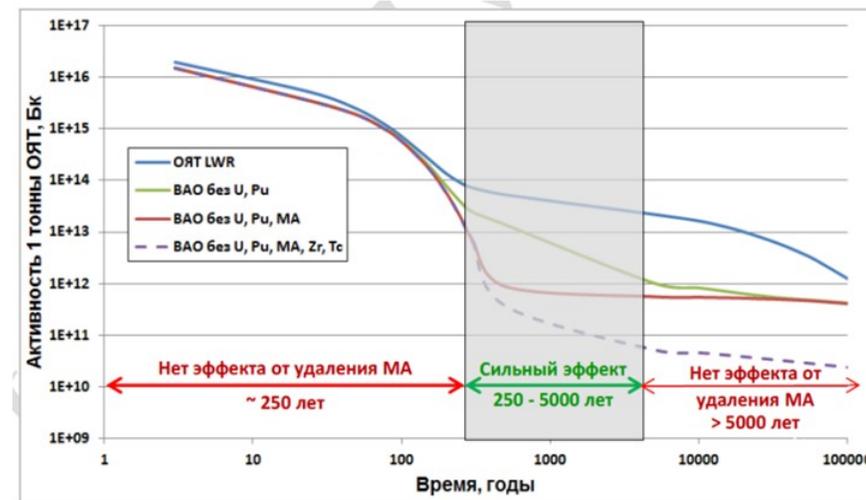
## Рассматриваемые подходы в данной работе:

- ✓ Критерии по активности, тепловыделению, потенциальной биологической опасности (ПБО)
- ✓ Учет в балансе всех актинидов (с учетом дочерних: изотопы Cm, Pu-238, U-234 и т.п.)
- ✓ Критерии эффективности по отношению ко всему количеству МА (с учетом «собственных» МА РБН ) и по отношению к внешним МА от других источников (от реакторов ВВЭР)
- ✓ Критерий с учетом осколков деления и другим радиоактивным нуклидам в РАО
- ✓ Учет технологических потерь (в т.ч. от U, Pu)
- ✓ Учет возможности вовлечения дочерних в ЗЯТЦ



# Трансмутация МА не эффективна на длительном периоде?

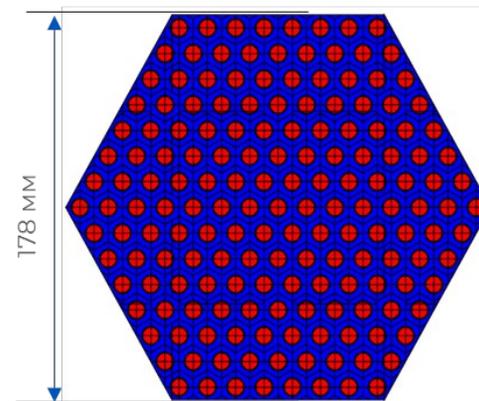
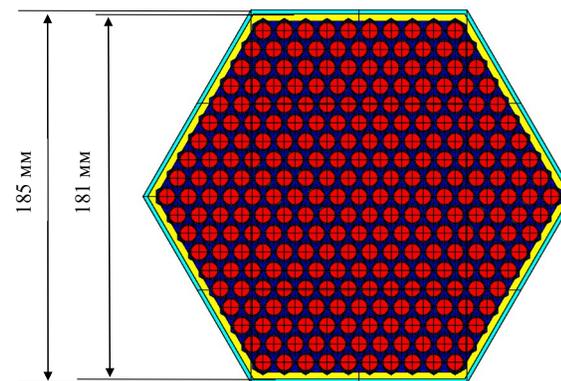
- ✓ Одним из аргументов целесообразности трансмутации МА – сложность обоснования надежности и безопасности захоронения РАО на длительную перспективу (длительные радиоэкологические последствия – десятки и сотни тыс. лет)
- ✓ Отчет Центра Аналитических исследований ЧУ «Наука и инновации» показал, что даже при полном теоретическом уничтожении МА учет долгоживущих осколков деления приводит к практическому отсутствию эффекта от трансмутации МА на такую перспективу
- ✓ Эта работа дала стимул систематическим исследованиям, направленным на корректный учет балансов радиоактивных продуктов РАО при анализе эффективности трансмутации МА в двухкомпонентной ЯЭ РФ



«... после ~ 5 тыс. лет МА перестают вносить значимый вклад в суммарную активность... удаление МА не столь критично (гораздо больший эффект ... даёт удаление изотопов циркония и технеция)...»

Перспективные технологии утилизации минорных актинидов (МА): Аналитический отчёт. – М.: ЦАИР ЧУ «НиИ», 2020. – 104 с.

## Комплекс SCALE-6.2.4 (TRITON, T-DepI)



## Расчетные модели ТВС

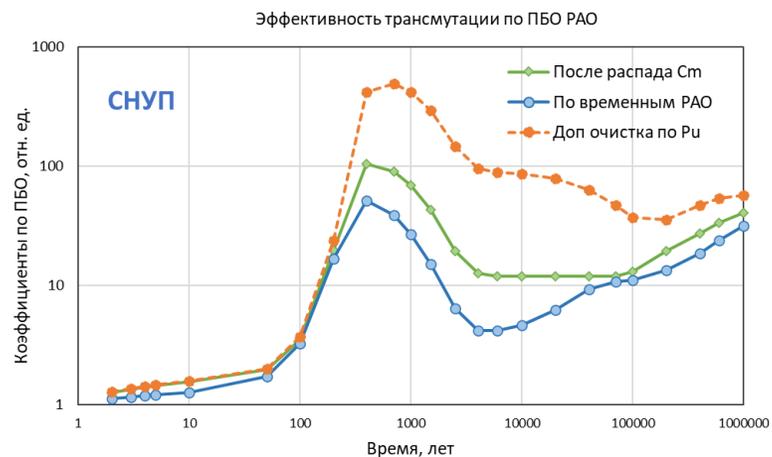
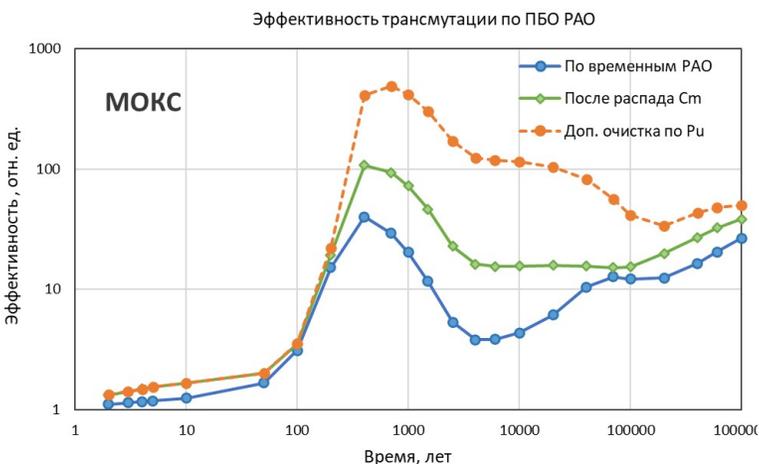
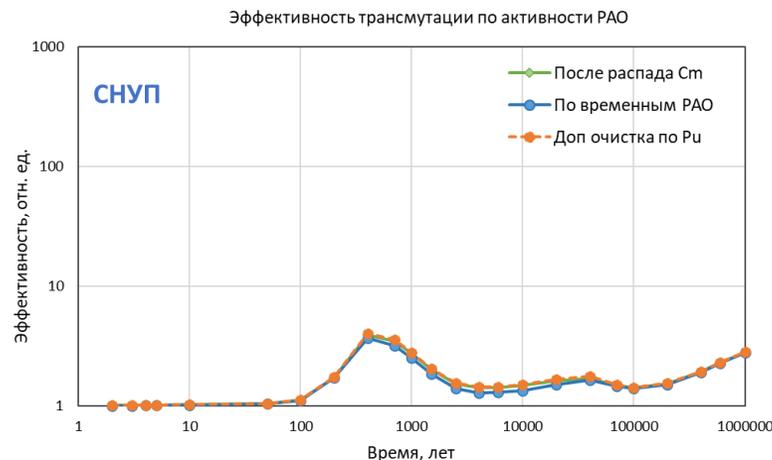
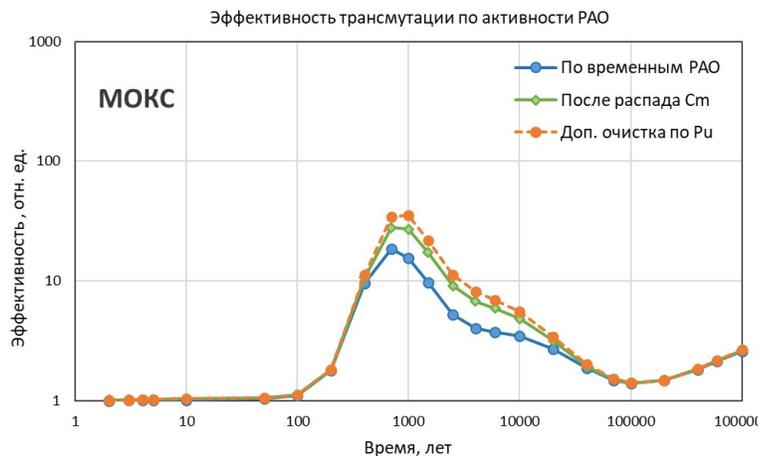
БН-1200	
Топливо	СНУП, МОКС
Плотность топлива	11,5 / 9,2 г/см <sup>3</sup>
Размер твэл	9,2×0,55 мм
Количество твэл	271
Тепловая нагрузка на топливо, МВт/т	51,4 / 71,5

БР-1200	
Топливо	СНУП
Плотность топлива	11,5 г/см <sup>3</sup>
Размер твэл	8,3×0,5 мм
Количество твэл	160
Тепловая нагрузка на топливо, МВт/т	58,6

# Анализ теоретической эффективности трансмутации МА для РБН



«Теоретическая эффективность» – мгновенное исчезновение МА в результате воображаемого «теоретического рецикла» без образования дополнительных РАО (в результате рецикла МА) для оценки предельного эффекта трансмутации МА



Критерий эффективности:

Единицы измерения: активность (Ки), тепловыделение (Вт), ПБО (м<sup>3</sup>)

Состав РАО:

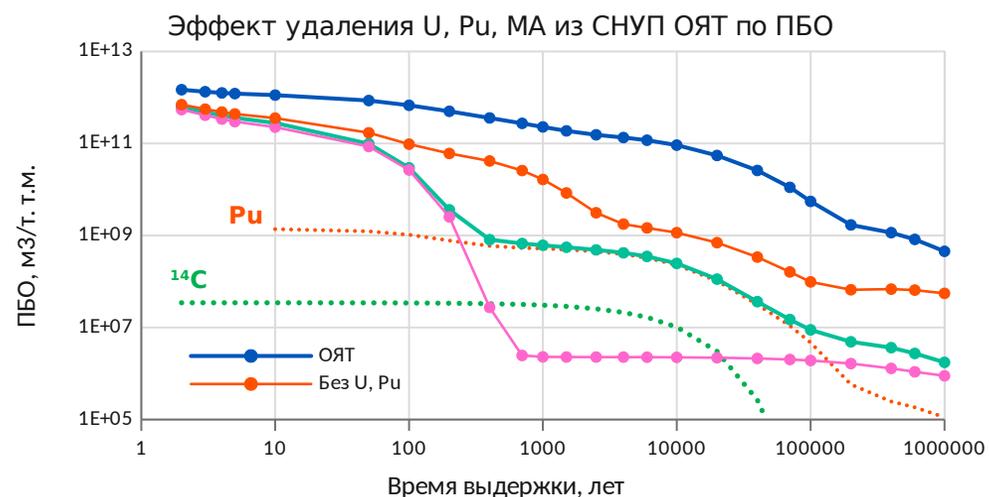
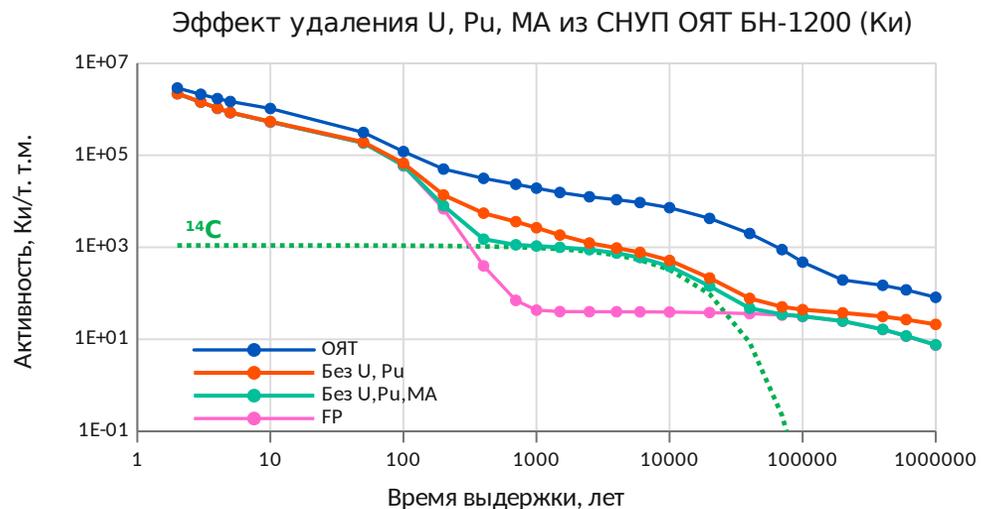
FP, <sup>14</sup>C, <sup>3</sup>T – 100%

U, Pu – не являются РАО, но учитываются технологические потери (0,1% - стандарт, 0,01% - опция дополнительной очистки) при каждом рецикле

Am, Np – 100% в отсутствие рецикла, 0,1% при каждом рецикле МА

Cm – 100%, 0,1% - опция учета рецикла путем радиоактивного распада в Pu

# Анализ теоретической эффективности трансмутации МА для РБН



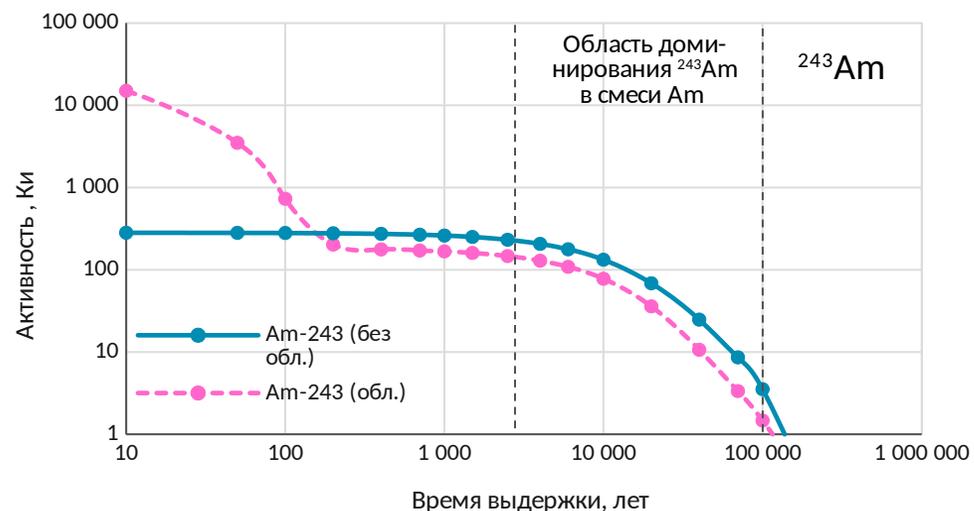
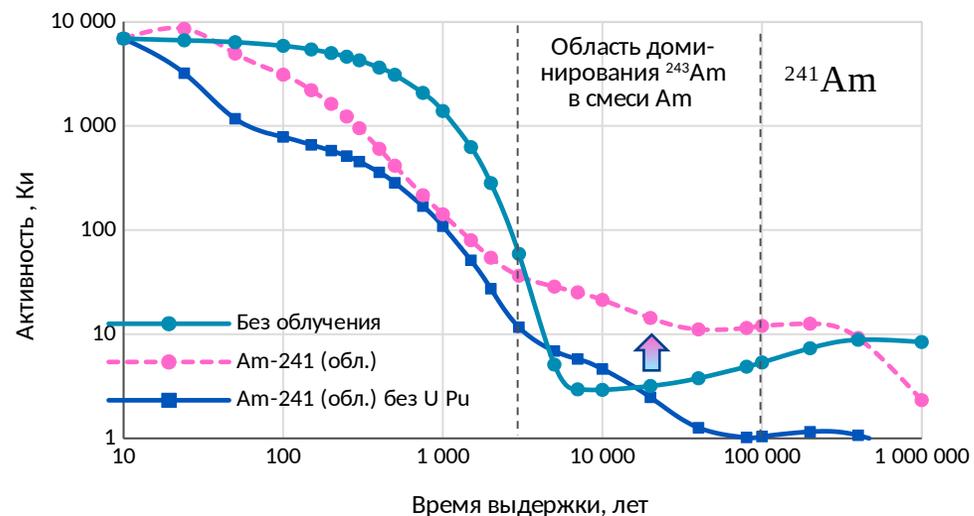
- ✓ Удаление МА из РАО практически не способно снизить долгоживущую активность образующихся РАО (при учете всех нуклидов кроме Pu и U), т.к. основной вклад дают  $^{14}\text{C}$  (СЧУП) и осколки деления
- ✓ Потенциальная биологическая опасность (ПБО) и тепловыделение (W) образующихся РАО РБН:
  - медленнее снижаются со временем: 16 раз (ПБО) и 300 (по Ки) при  $10^4$  лет, т.е. опасность РАО по их активности недооценивается
  - практически не зависит от  $^{14}\text{C}$  и осколков деления ( $10^3$  лет и далее)
- ✓ По критериям ПБО и W эффект трансмутации МА существенно выше, но **ограничивается технологическими потерями Pu в РАО (0,1%)**

## Выводы:

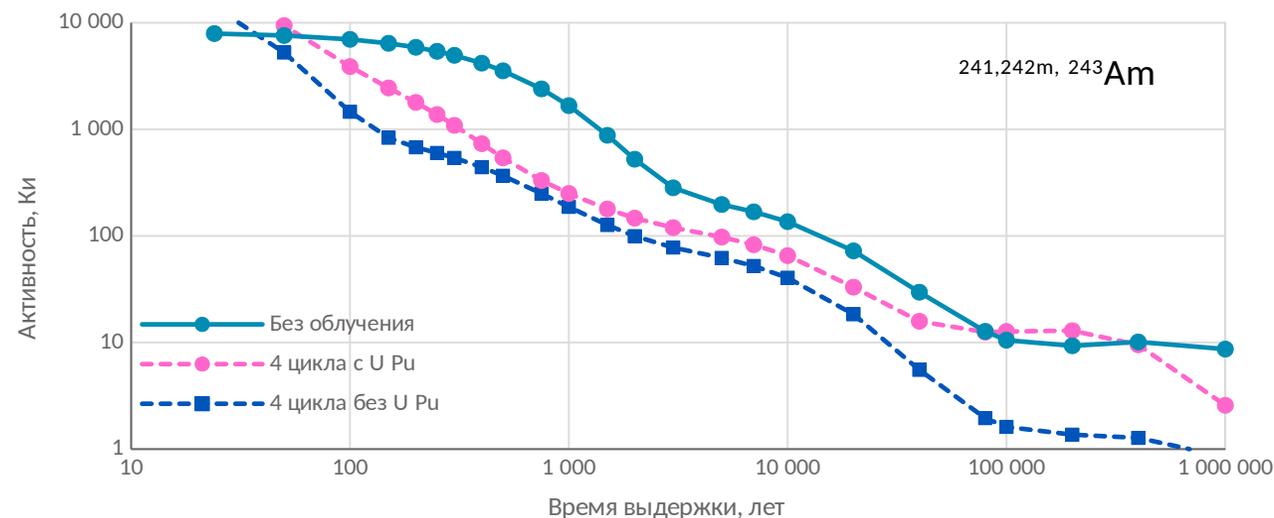
- по критериям ПБО и W эффект удаления МА из РАО есть
- эффективность трансмутации МА определяется не только ее физикой, но и технологией (уровнем очистки РАО)
- технологическая рекомендация: повысить  $K_{\text{оч}}$  РАО от Pu до  $10^4$



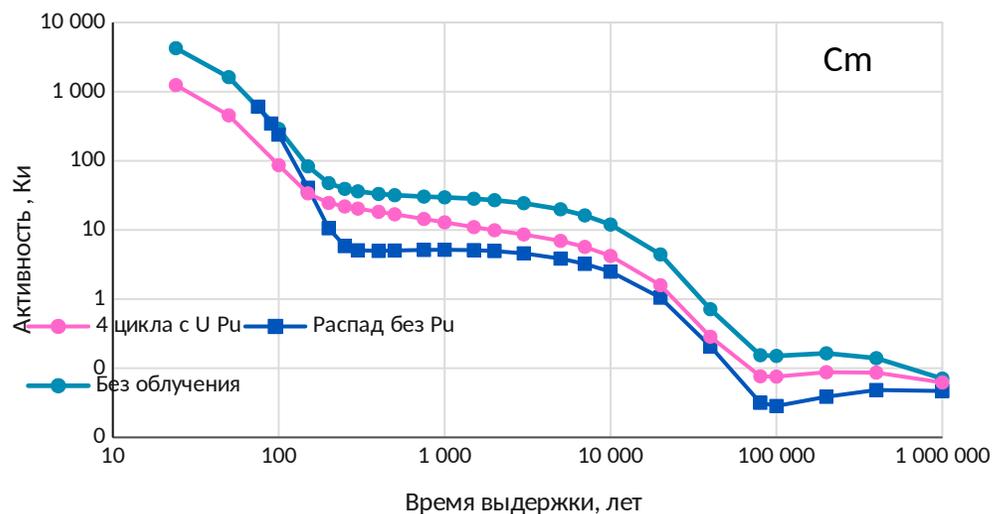
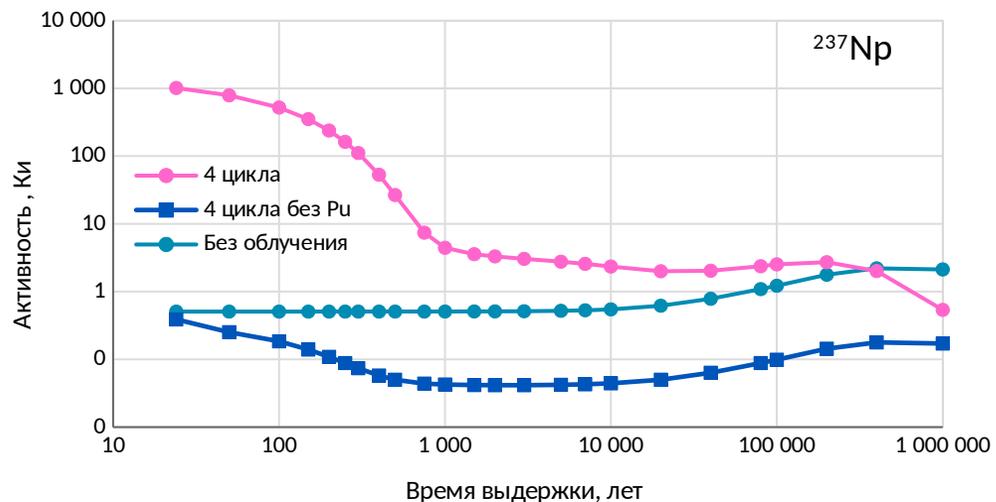
# Особенности трансмутации Am



- ✓ **Снижение массы  $^{241}\text{Am}$  может давать увеличение общей активности** при больших временах за счет образования  $^{234}\text{U}$  ( $T_{1/2} \sim 246$  тыс. лет) и накопления продуктов его распада
- ✓  $^{243}\text{Am}$  выжигается и дает общий положительный эффект трансмутации Am при больших временах хранения
- ✓ **ЗЯТЦ РБН подразумевает рецикл образующего из МА Pu (исключает из состава РАО) и тем самым существенно повышает эффективность трансмутации Am**



# Особенности трансмутации $Np$ и $Cm$



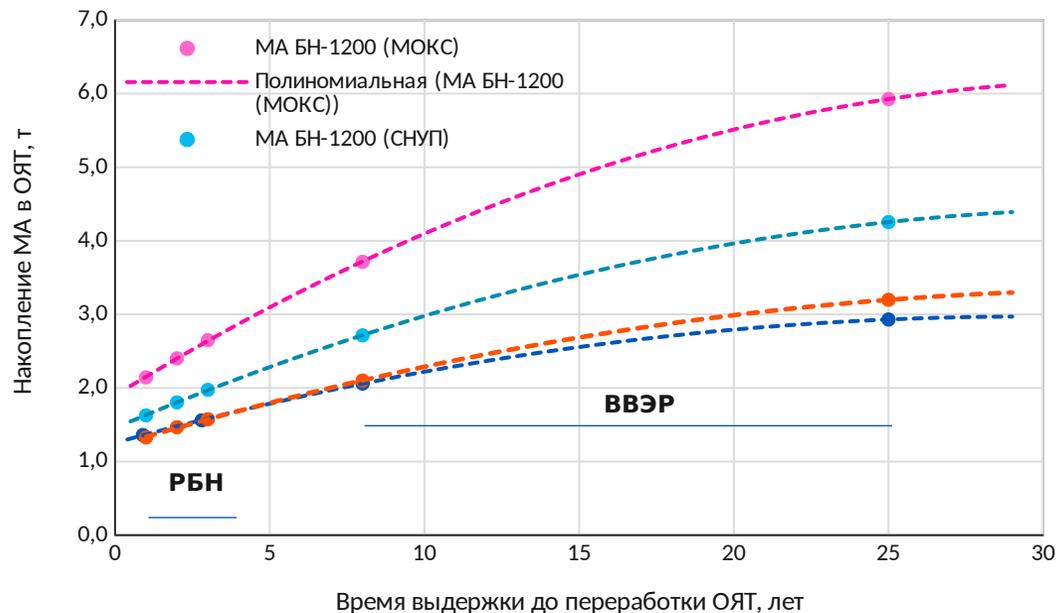
- ✓ Критерий оценки по массе не всегда адекватен оценке реальной опасности РАО после облучения: активность  $^{237}Np$  (с дочерними) увеличивается и только отбор Pu после очередного рецикла приводит к эффективной трансмутации
- ✓ Для  $Cm$  облучение не столь эффективно - эффективен распад в изотопы Pu
- ✓ В ЗЯТЦ РБН МА дают вклад в воспроизводство Pu (целевой продукт для РБН) и реакции захвата нейтронов повышают эффективность трансмутации

№	Параметр	1 цикл облучения	4 цикла облучения
1	Снижение массы $^{237}Np$ , %	-47	-90
2	Изменение активности ( 300 / $10^4$ лет), %	+3200/+240	+2190 / +325
3	Изменение активности РАО при условии извлечения Pu ( 300 / $10^4$ лет) , %	-13 / -47	-85 / -90

# Накопление МА в РБН при многократном рецикле только Pu



Накопление МА в ОЯТ за 60 лет



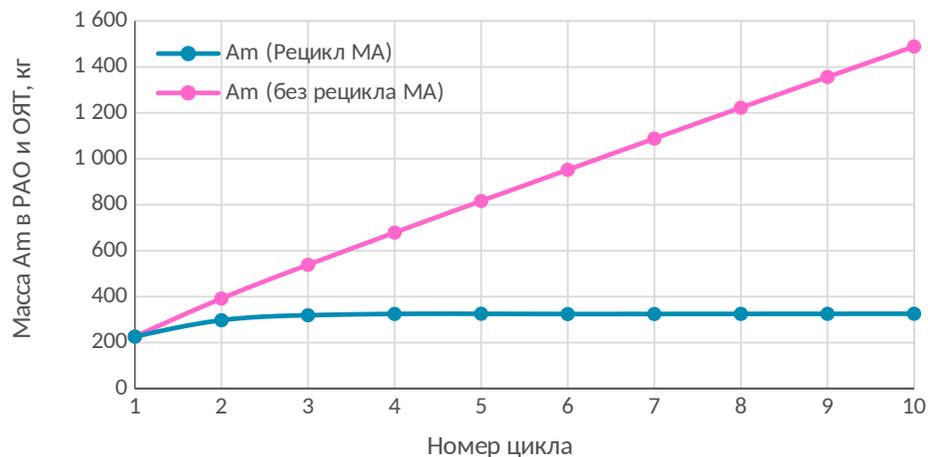
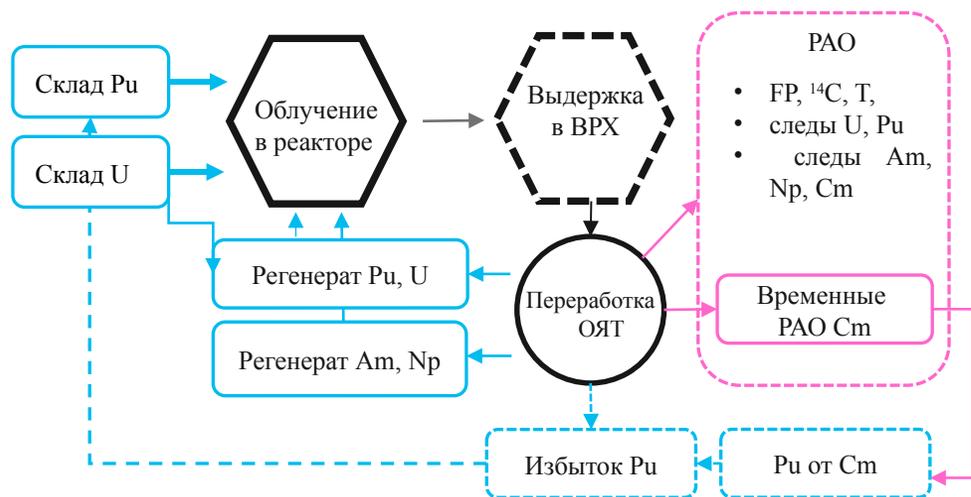
## Основные результаты моделирования 10 циклов

- ✓ Использование U-Pu топлива в РБН (вместо U в РТН) приводит к росту накопления Am и уменьшению накопления Np
- ✓ Учитывая особенности ЗЯТЦ РБН (малое время выдержки ОЯТ РБН, меньшее потребление топлива из-за более высокого выгорания) РБН производят примерно то же самое количество МА, что и ВВЭР: от 2 до 3 тонн за 60 лет
- ✓ При использовании МОКС топлива накопление МА в БН-1200 несколько выше из-за большего содержания Pu в топливе
- ✓ Меньшее накопление МА в реакторе со Pb теплоносителем связано с меньшей массой топлива в реакторе
- ✓ В 2-х компонентной ЯЭ РБН учет в критериях эффективности трансмутации МА принципиально важно учитывать не только объем утилизируемых МА от ВВЭР (общепринятый подход), но и «собственных»

МА	БН-1200 СНУП	БН-1200 МОКС	БР-1200 СНУП	ВВЭР- 1200
Np	310	197	182	910
Am	1490	2210	1266	1150

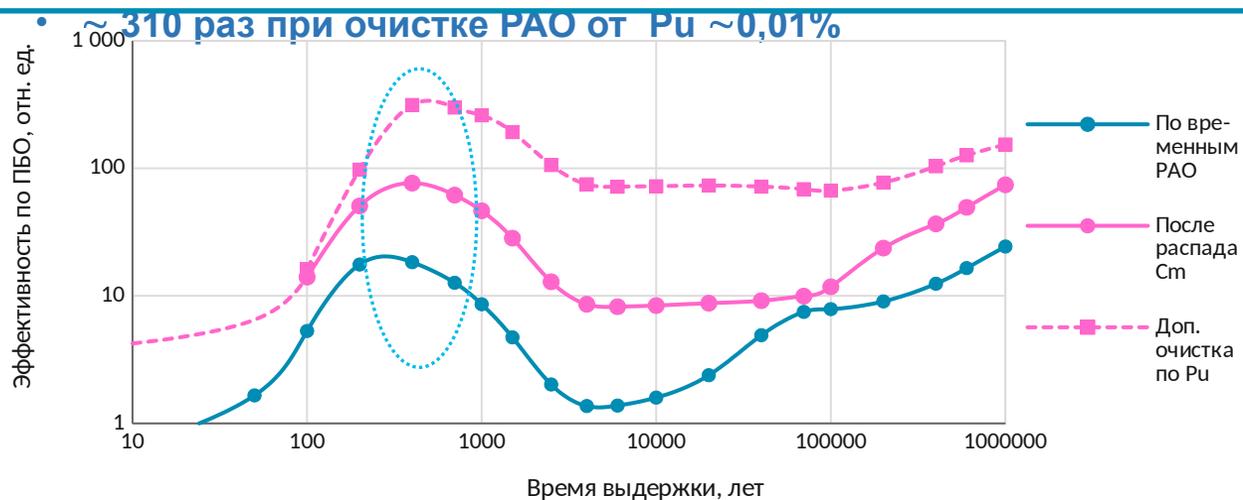


## Модель рецикла топлива и МА

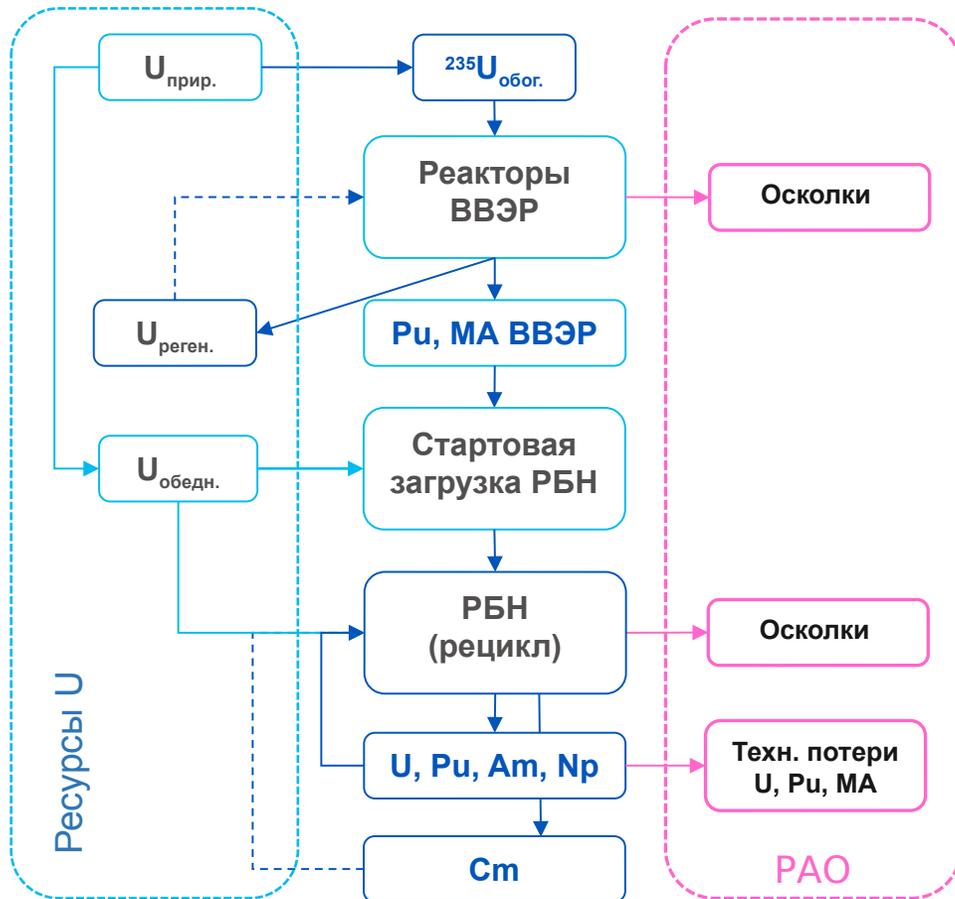


## Основные результаты моделирования рецикла МА

- ✓ Многократный рецикл МА предотвращает их накопление в РАО (для окончательной изоляции)
- ✓ Количество осколков деления не увеличилось (деление МА заместило деление Pu и дало вклад в тепловую энергию)
- ✓ **Эффективность трансмутации по ПБО РАО:**
  - ~ 20 раз до распада Cm и рецикла дочернего Pu
  - ~ 75 раз после распада Cm (и утилизации продуктов распада)



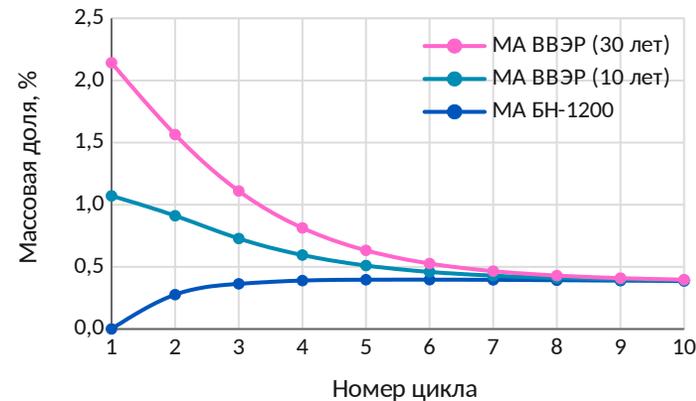
## Модель ЗЯТЦ двухкомпонентной ЯЭ



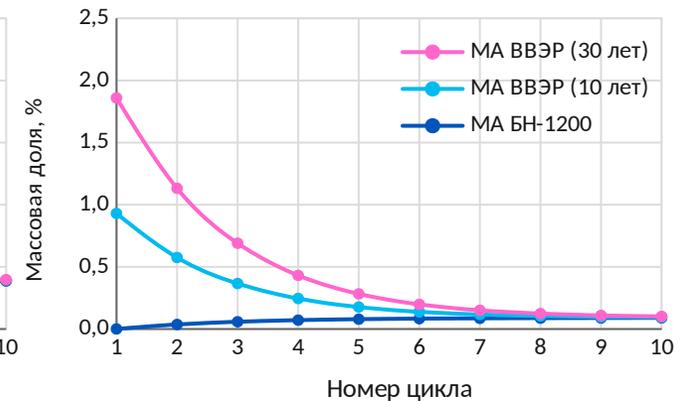
## Сбалансированная схема утилизации МА ВВЭР в РБН

- ✓ В двухкомпонентной системе Pu из ОЯТ ВВЭР используется для запуска РБН (стартовая загрузка и перегрузки до рецикла топлива)
- ✓ Логично использовать МА из ОЯТ ВВЭР вместе с Pu ВВЭР при запуске реакторов на быстрых нейтронах
- ✓ За ~6 циклов полностью сжигаются МА из ОЯТ ВВЭР: от 1,6т (при выдержке ОЯТ ВВЭР ~10 лет) до 3,3 т МА (~ 30 лет)
- ✓ Таким образом реакторы на быстрых нейтронах на этапе двухкомпонентной ЯЭ утилизируют и Pu, и МА от ВВЭР

Массовая доля Am в топливе

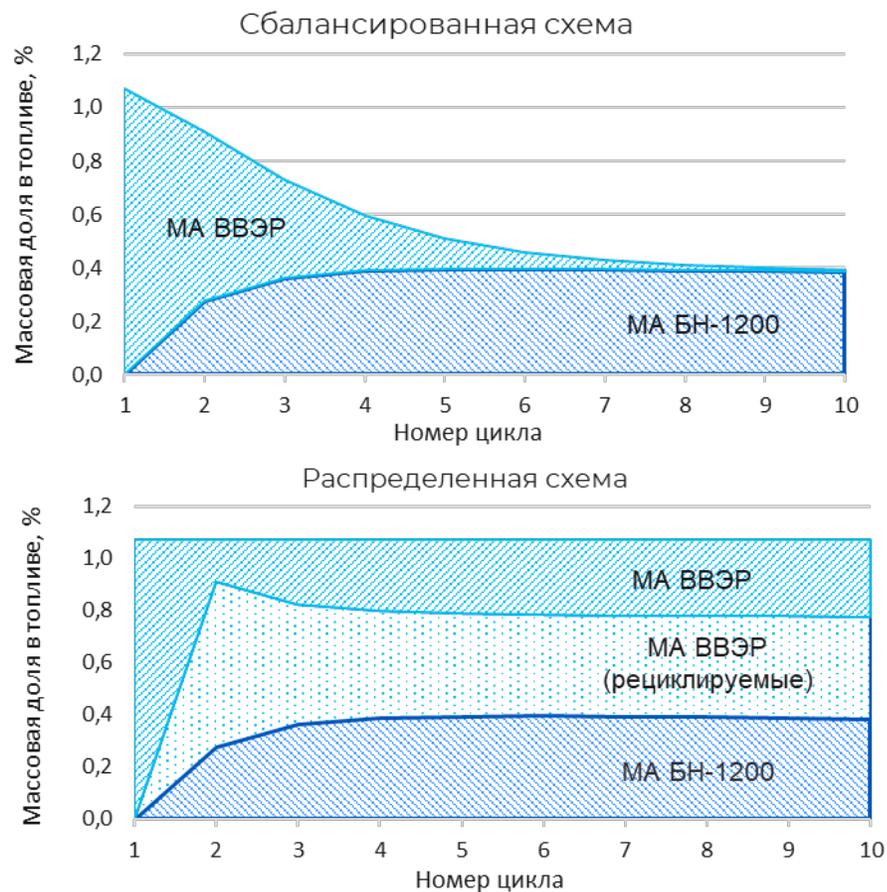


Массовая доля Np в топливе



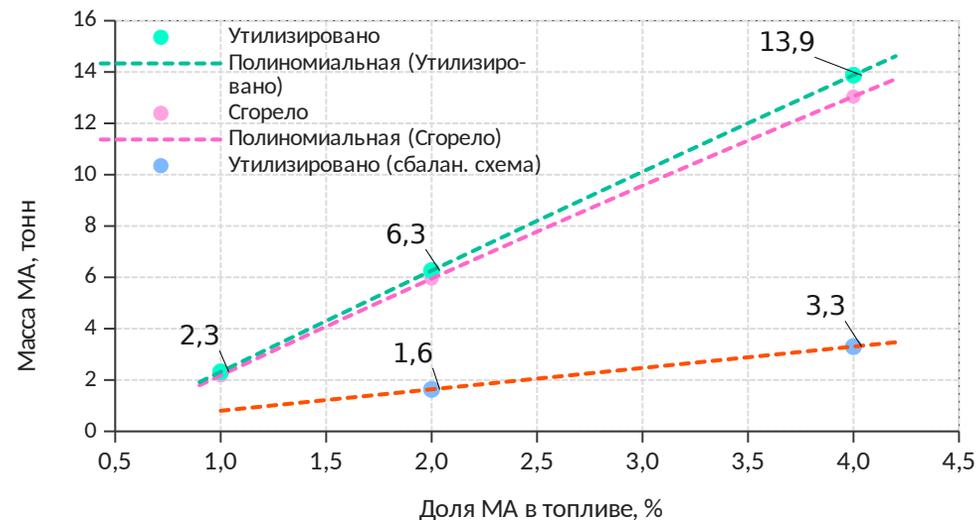
# Максимальная утилизация МА ВВЭР в БН-1200

## Схемы утилизации МА ВВЭР на всем жизненном цикле РБН



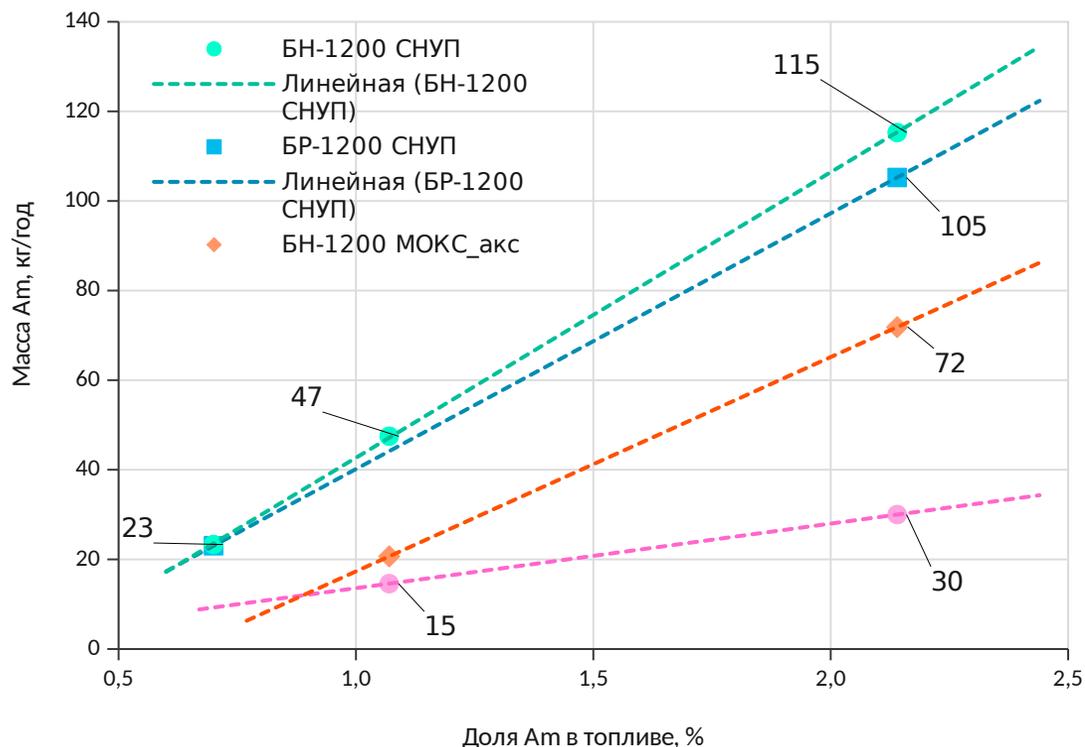
## Параметры утилизации МА в БН-1200 за 10 циклов

1. При одинаковых концентрациях МА в топливе распределённая схема либо увеличивает объем утилизируемых МА в ~3 раза по сравнению со сбалансированной схемой
2. Либо распределенная схема может позволить снизить концентрацию МА в топливе для достижения сбалансированного (минимально достаточного) объема :
  - ~0,7% Am и ~0,3% Np для СНУП топлива



# Анализ влияния типа топлива и реактора

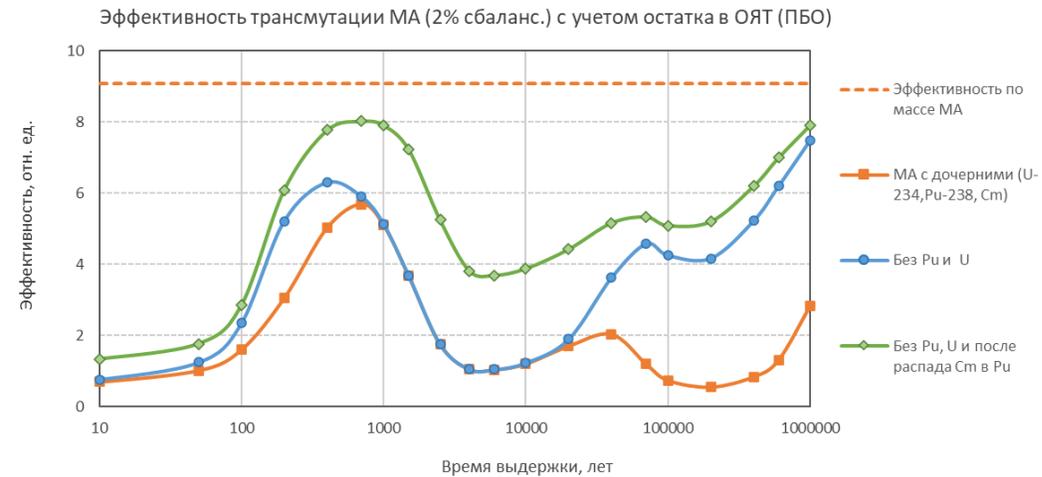
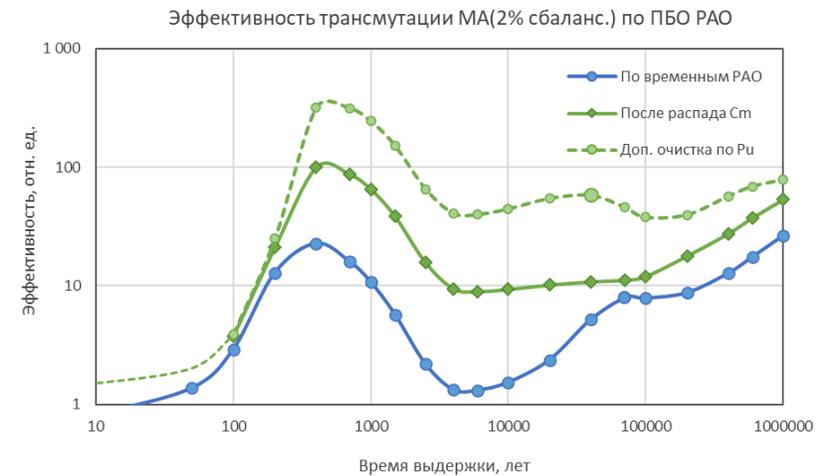
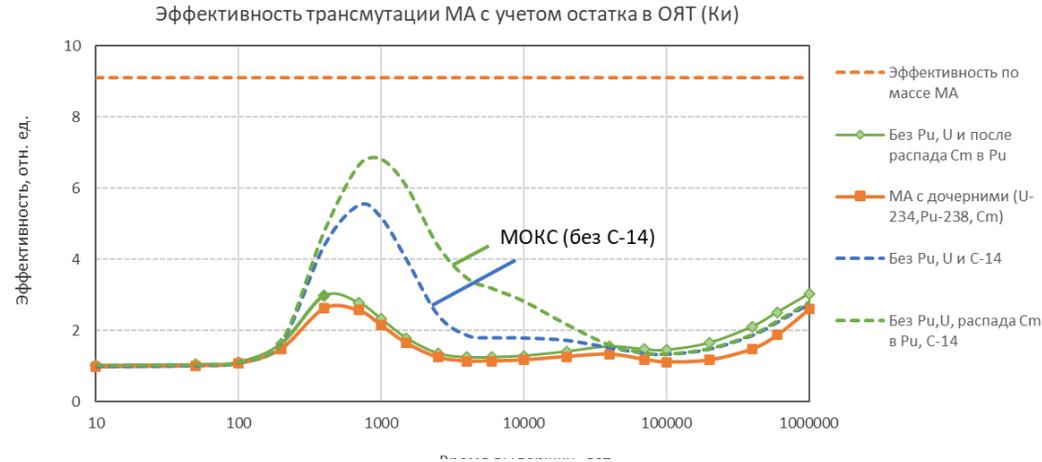
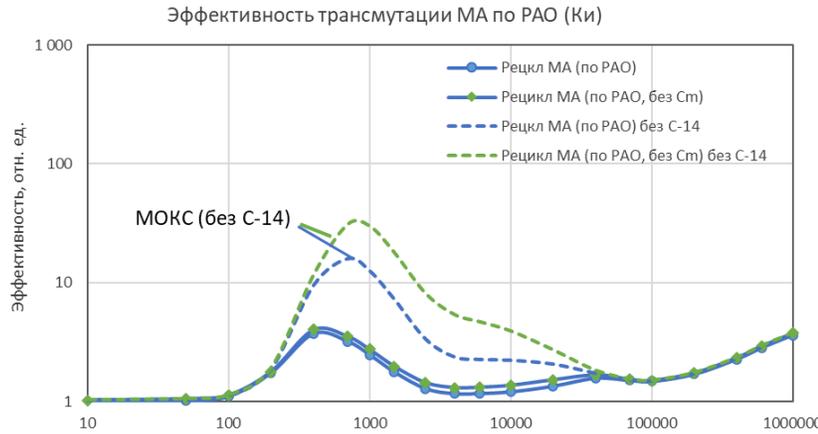
## Средний темп утилизации $A_m$ ВВЭР в реакторах БН-1200 (СНУП, МОКС) и БР-1200



## Результаты моделирования 10 циклов (60 лет)

- ✓ Потребление МА неравномерно (значительная часть - при запуске РБН в стартовой загрузке): средний темп = интегральное потребление / время работы реактора
- ✓ Несмотря на различие теплоносителей и массы топлива в активной зоне БН-1200 и БР-1200 показатели утилизации МА ВВЭР в них близки
- ✓ При использовании МОКС и одной концентрации МА в топливе потребление МА ВВЭР ниже (из-за более высокой равновесной концентрации «собственных» МА и меньшей массы топлива), но МОКС допускает большую концентрацию МА в топливе, что приведет к близким показателям со СНУП
- ✓ При концентрации МА ~4% РБН-1200 теоретически может утилизировать до ~ 230 кг МА из ОЯТ ВВЭР в год, однако целесообразность и возможность создания такой концентрации МА в топливе требует обоснования

# Сравнение критериев эффективности трансмутации МА



Критерии по массе и при учете только самих МА близки, но завышают эффективность

Критерий по активности занижает из-за FP и <sup>14</sup>C- (для СНУП)

По критериям ПБО (и W) эффективность трансмутации зависит от FP до 200 лет и существенно выше чем по активности

«Незавершенная трансмутация»:

учет не только РАО, но и текущего остатка МА с дочерними в ОЯТ снижает эффективность

учет вовлечения U, Pu в ЗЯТЦ и утилизация Cm существенно повышают эффективность

## Заключение

1. Оценка эффективности трансмутации существенно зависит от применяемых критериев: оценка по массе «сожженных» МА не всегда эквивалента снижению реальной опасности РАО
2. Для оценки эффекта от трансмутации МА в РБН рекомендуется использовать набор оценок опасности РАО: по активности, потенциальной биологической опасности и/или тепловыделению и учитывать все источники РАО (технологические потери U и Pu, дочерние от трансмутации МА, осколки деления, углерод-14, Т и т.п.)
3. Наличие в РАО осколков (в т.ч. долгоживущих) и  $^{14}\text{C}$  (для СНУП) нивелирует и делают весьма небольшим эффект от трансмутации МА по активности, а по ПБО и остаточному тепловыделению эффект трансмутации МА существенно больше и составляет 10-100 раз после утилизации Cm (выдержка и вовлечение Pu в ЗЯТЦ РБН)
4. Эффективность трансмутации МА ограничивается «следами» Pu – рекомендуется снизить технологические потери Pu в РАО до 0,01%, что позволит повысить эффективность трансмутации МА до 30-300 раз
5. Эффективность трансмутации реакторного Am при больших временах достигается за счет выжигания  $^{243}\text{Am}$
6. Быстрый реактор полностью в равновесном режиме утилизирует собственные МА
7. РБН способен утилизировать 1,6 т МА от ВВЭР совместно с плутонием (сбалансированная схема) за ~6 циклов с максимальной концентрацией МА на уровне 2%
8. При повышении концентрации МА до 4% и в распределенной схеме РБН показывает выжигание до ~ 230 кг МА из ОЯТ ВВЭР в год, а с «собственными» до ~ 260 кг/год, но требуется анализ целесообразности допустимости таких концентраций МА в топливе



ТВЭЛ  
РОСАТОМ

**Хомяков Андрей Юрьевич**

[AYKhomyakov@tvel.ru](mailto:AYKhomyakov@tvel.ru)

+7 492 988-82-82 доб. 6438

**19.02.2024**