



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

# Концепции замкнутого ядерного топливного цикла и ключевые развилки

Ю.С. Хомяков

- Концепция минимального времени удвоения
- Современная концепция двухкомпонентной ядерной энергетики
- Концепция старта с урана
- Трансмутация МА
- Ключевые развилки ЗЯТЦ

- **Коэффициент воспроизводства:**

$$KB = \frac{\text{количество произведенного топлива}}{\text{количество израсходованного топлива}} = KBA + KB_{БЭ} + KB_{ТЭ} \approx \frac{\nu}{1 + \alpha} - 1 - L$$

где KBA - KB активной зоны, KB – бокового экрана, KB – торцевого экрана, L-утечка нейтронов

$$KB = \frac{\sum \rho_{U-238} \cdot \sigma_{c238} + \rho_{Pu-240} \cdot \sigma_{c240}}{\sum \rho_{Pu-239} \cdot (\sigma_{c239} + \sigma_{f239}) + \rho_{Pu-241} \cdot (\sigma_{c241} + \sigma_{f241})} = \frac{N_c^{U-238} + N_c^{Pu-240}}{N_a^{Pu-239} + N_a^{Pu-241}}$$

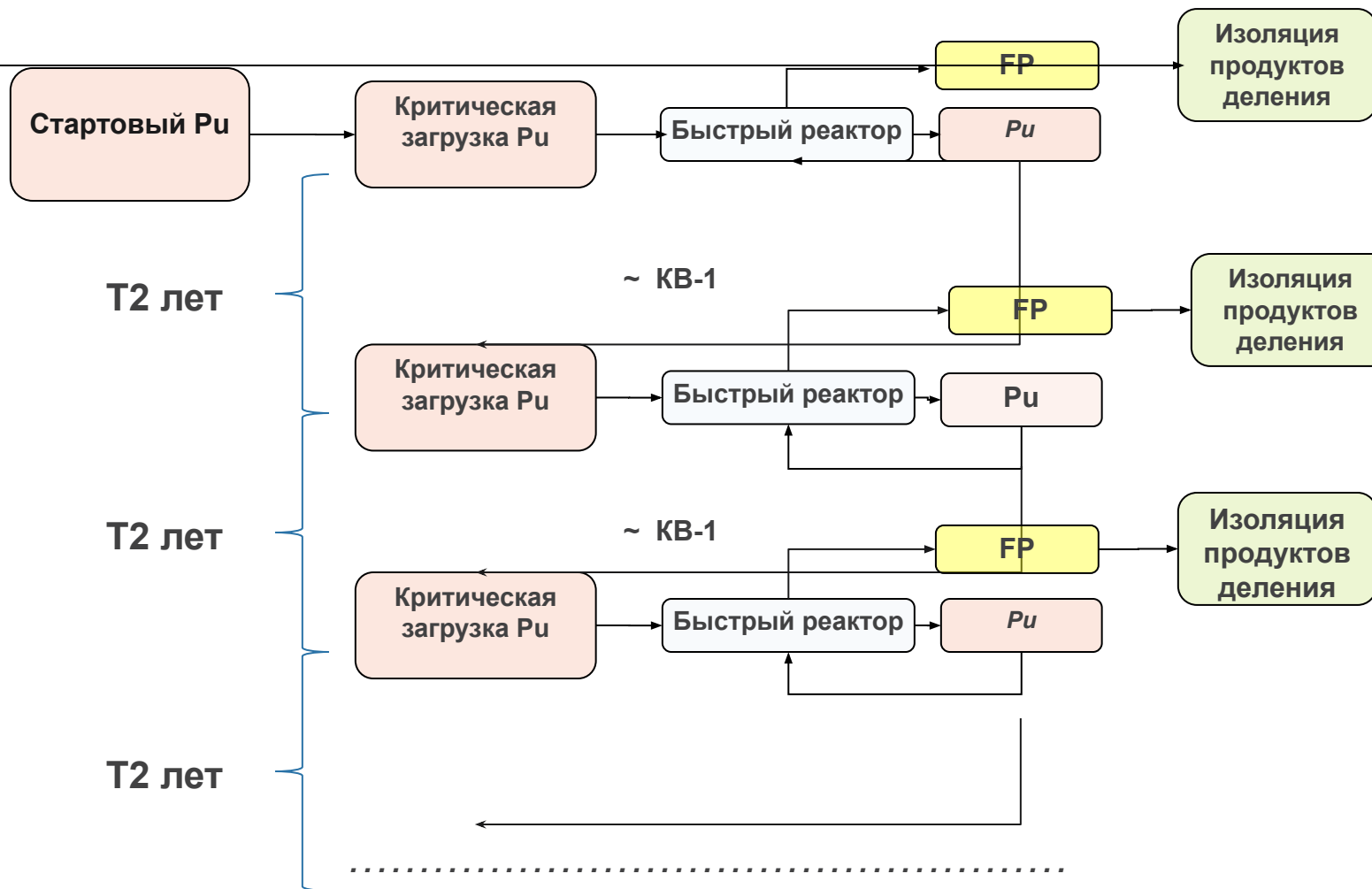
- **Breeding Gain:**

$$BG = \frac{\sum \gamma_i \cdot (N_c^{i-1} - N_{c,f}^i)}{\sum_i N_f^i}$$

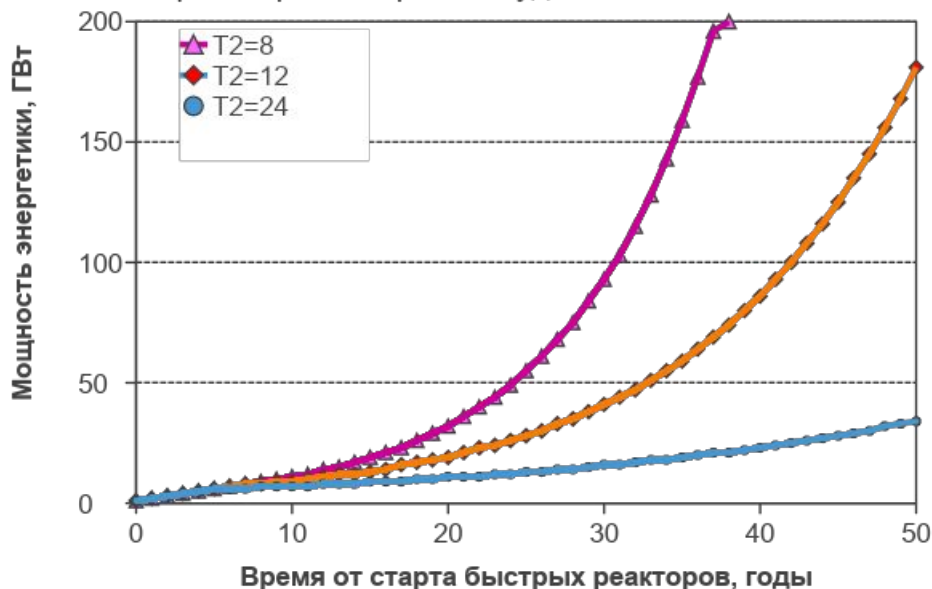
- **Время удвоения  $T_2$  количества делящегося топлива в системе:**

$$T_2 \approx \frac{\left( \frac{W}{M_{крит}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{T_{ТЦ}}{T_P} \right)}{(KB - 1)}$$

# Модель концепции минимального времени удвоения ( $T_2$ )



Зависимость суммарной мощности быстрых реакторов от времени удвоения



$$T_2 = \frac{\ln 2}{\omega_0} = \ln 2 \frac{g_0 \left(1 + \frac{T_{ВН}}{T_p}\right)}{\varphi(1 + \alpha)(KB - 1 - \frac{\epsilon}{\Delta})} \text{ лет}$$

В.В.Орлов. Каким должно быть время удвоения быстрых реакторов?

Атомная энергия, 1971, вып.3, т.31, с.195-197

## Требования , вытекающие из концепции минимального $T_2$ :

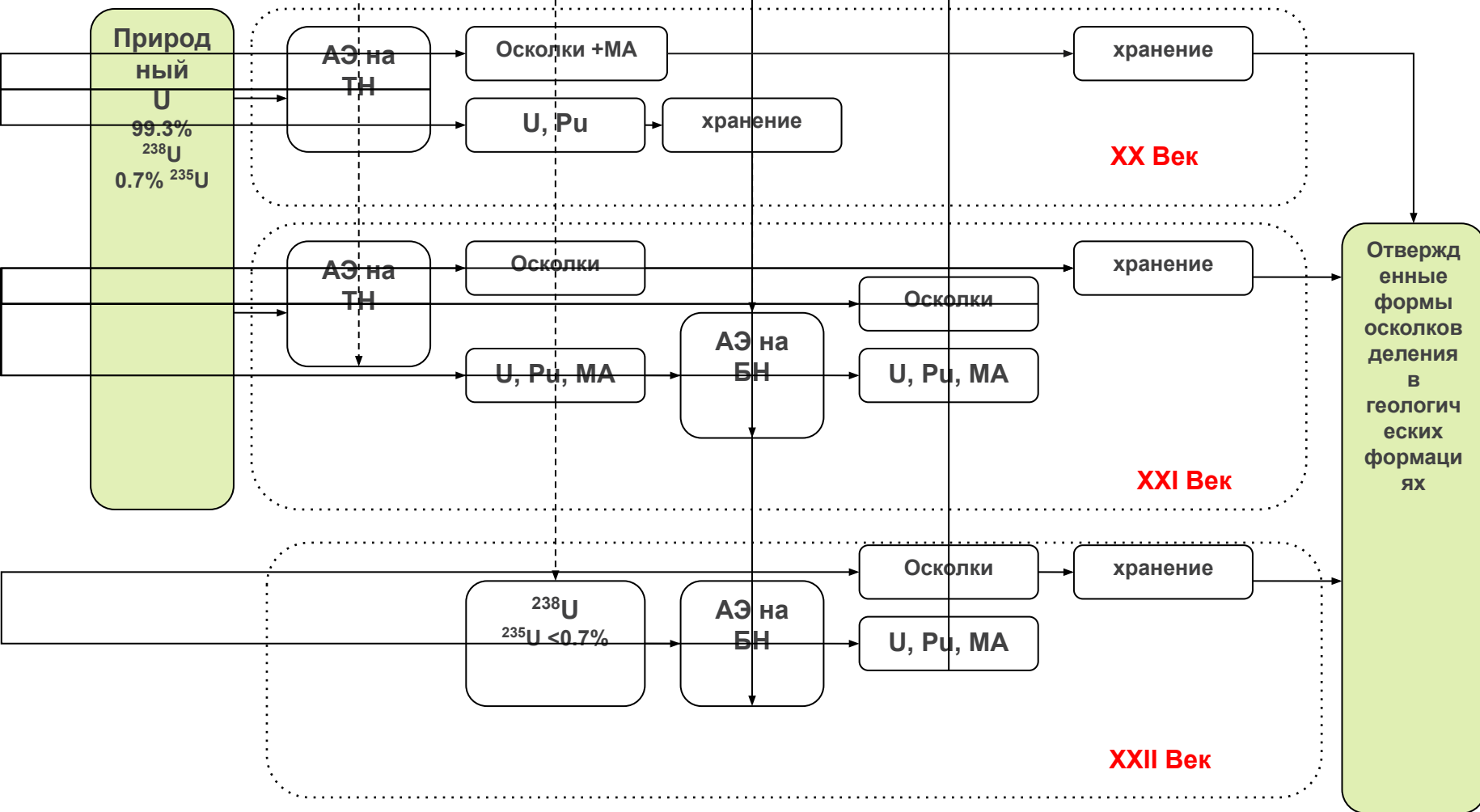
- минимальная критическая загрузка  $g_0$
- высокая удельная теплонапряженность топлива ( $q_v \sim 1/g_0$ )
- высокий избыточный коэффициент воспроизводства (KB-1)
- короткий внешний топливный цикл  $T_{ВН}$

## Асимптотическая мощность ядерной энергетики

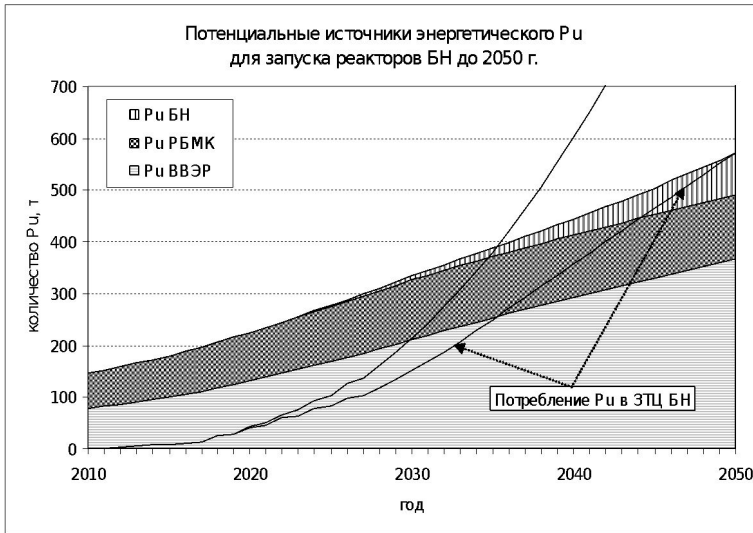
$$W_{ЯЭ}^{асс} \approx \frac{M_{Pu}}{M_{крит}} \cdot \frac{T_p}{T_p + T_{ВН}} \approx \frac{M_{Pu}}{\frac{\rho_{топлива}}{q_v} + \frac{T_{ВН}}{B}}$$

$M_{Pu}$  – количество имеющего  $Pu$ ,  $M_{крит}$  – критзагрузка по  $Pu$ ,  $T_p$  – кампания топлива,  $B$  – выгорание топлива

# Модель 2-х компонентной энергетики и старта с плутония из ОЯТ тепловых реакторов



# Современные оценки развития 2-х компонентной ЯЭ



✓ Развитие ЯЭ на тепловых нейтронах и накопление ОЯТ тепловых нейтронов приводит к тому, что до середины века при реалистичных сценариях будет доминировать Р<sub>и</sub> из ОЯТ тепловых реакторов

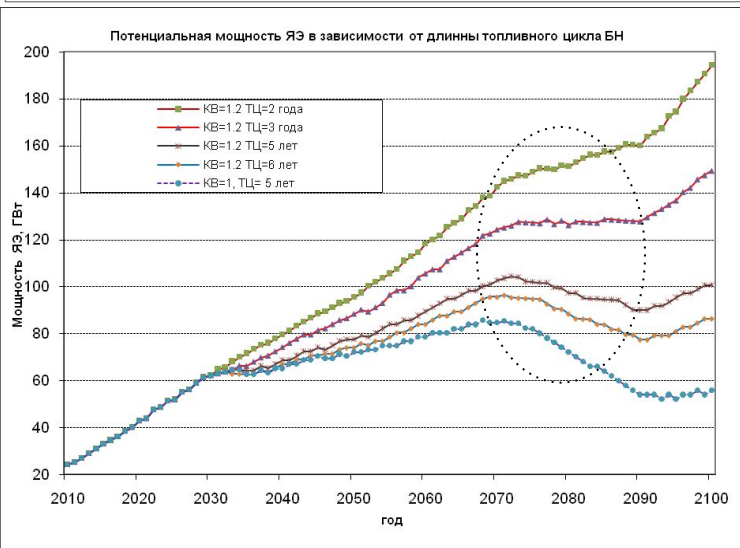
✓ Высокий уровень КВ не требуется, однако и уровень КВ=1 может привести к серьезным ограничениям на мощность ядерной энергетики

✓ Уровень КВ порядка 1.2 является приемлемым

✓ Возможен отказ от высокой теплонапряженности и применение других (не Na) теплоносителей

✓ Требование короткого топливного цикла не потеряло актуальности

✓ При уменьшенной теплонапряженности активной зоны и увеличенной кампании реалистичны требования ~ 3 года



# Роль факторов длительности топливного цикла и удельной теплонапряженности



| Масса Pu в системе    | Кампания топлива, годы | Длительность ТЦ годы | Мощность системы отн. ед |
|-----------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|
| 100·M <sub>крит</sub> | 5 / 1.5                | 0                    | 100 / 100                |
| 100·M <sub>крит</sub> | 5 / 1.5                | 1                    | 83 / 60                  |
| 100·M <sub>крит</sub> | 5 / 1.5                | 3                    | 63 / 33                  |
| 100·M <sub>крит</sub> | 5 / 1.5                | 5                    | 50 / 23                  |
| 100·M <sub>крит</sub> | 5 / 1.5                | 10                   | 33 / 13                  |
| 100·M <sub>крит</sub> | 5 / 1.5                | 20                   | 20 / 7                   |

Увеличение длительности топливного цикла резко ограничивает потенциал ядерной энергетики.

При низкой напряженности активной зоны, роль внешнего топливного цикла ниже, но и в этом случае при  $T_{ТЦ} = 3$  года мы теряем ~1/3 энергетики.

При коротком реакторном цикле внешний топливный цикл в три раза увеличивает потребность в плутонии для запуска 1 ГВт мощности и мы уже теряем ~2/3 потенциальной энергетики

| Характеристика                                 | Низкая     | Высокая |
|--|------------|---------|
| Кампания, лет / кратность перегрузок           | 5 / 5      | 1.5 / 3 |
| Среднее выгорание, % т.а                       | 11.6 (6.5) | 6.5     |
| Стартовая загрузка по Pu, т/ГВт                | 6.3        | 3.2     |
| Годовое потребление Pu, т/ГВт                  | 1.0        | 2.5     |
| Суммарное потребление Pu для запуска БН, т/ГВт | 9.3 (11.7) | 10.7    |

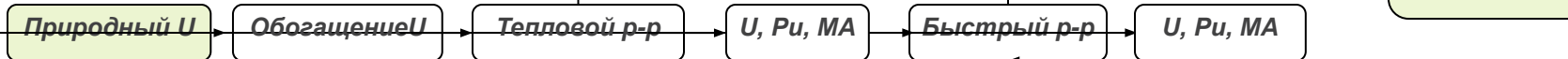
Снижение удельной теплонапряженности не приводит к автоматическому росту потребления топлива на запуск 1 ГВт

Пример (см.табл.) показывает, что при двукратном увеличении стартовой загрузки суммарное потребление Pu для запуска 1 ГВт оказывается одного порядка ~10 т/ГВт: 9.3 - 10.7 – 11.7 т/ГВт

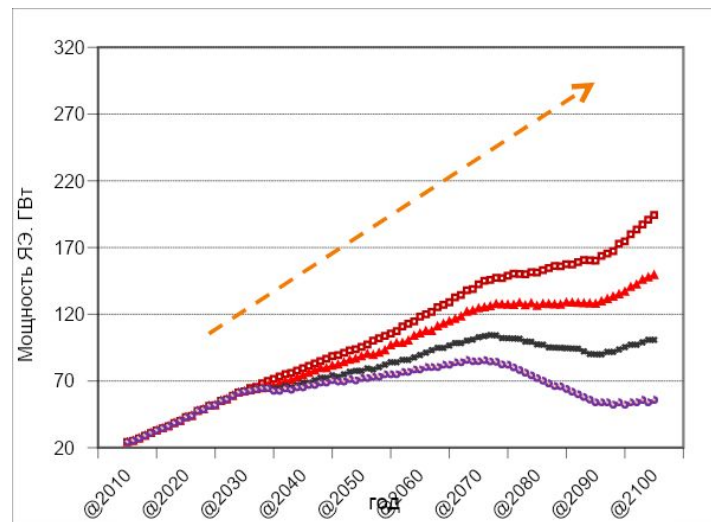
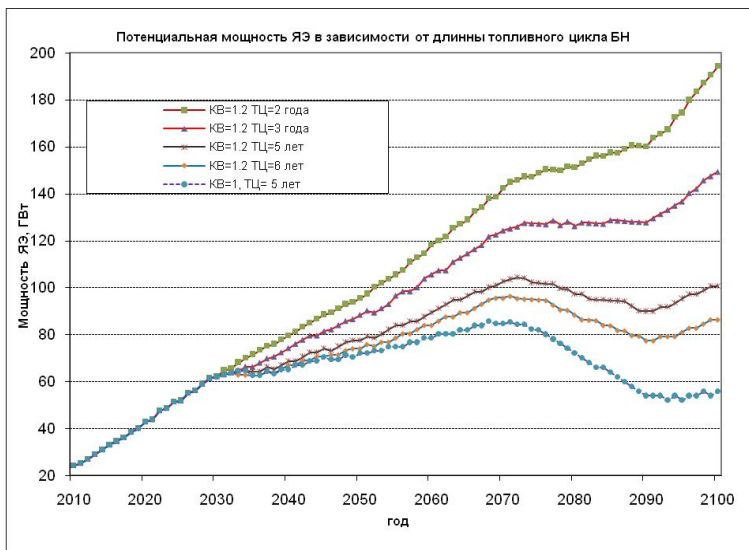


# Концепция «старта с урана-235»

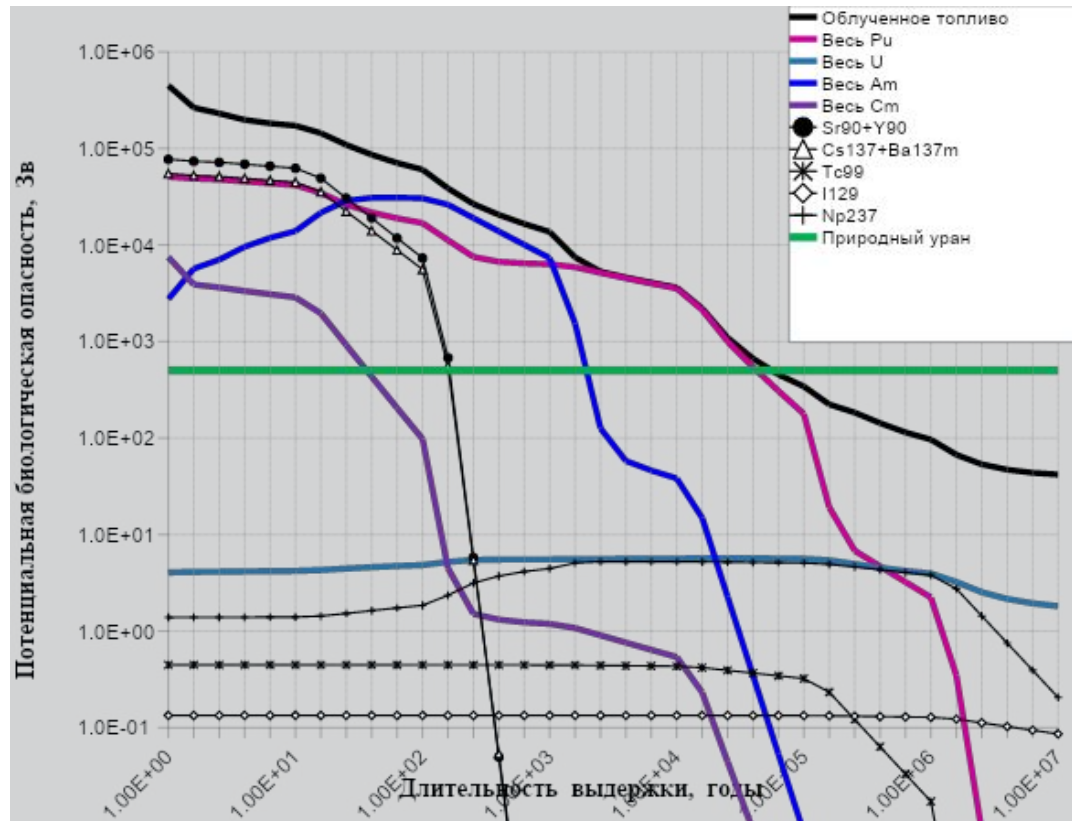
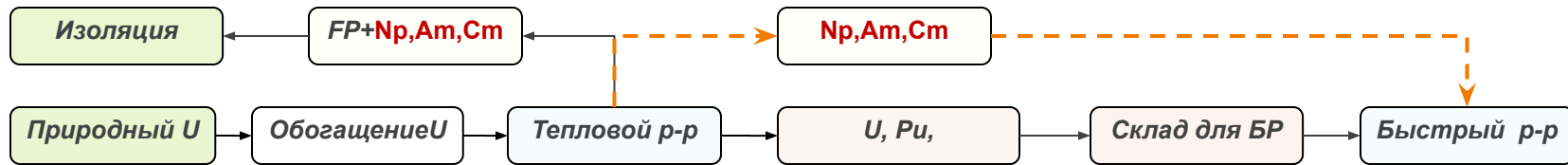
## Модель старта с Pu ОЯТ тепловых реакторов



## Модель старта с урана-235



# Трансмутация МА: постановка проблемы



## Дискуссия по трансмутации МА:

- Трансмутация – «лженаука 21 века»?
- Допустимо ли захоронение ОЯТ?
- Можно ли оставлять нерешенной проблему РАО будущим поколениям?

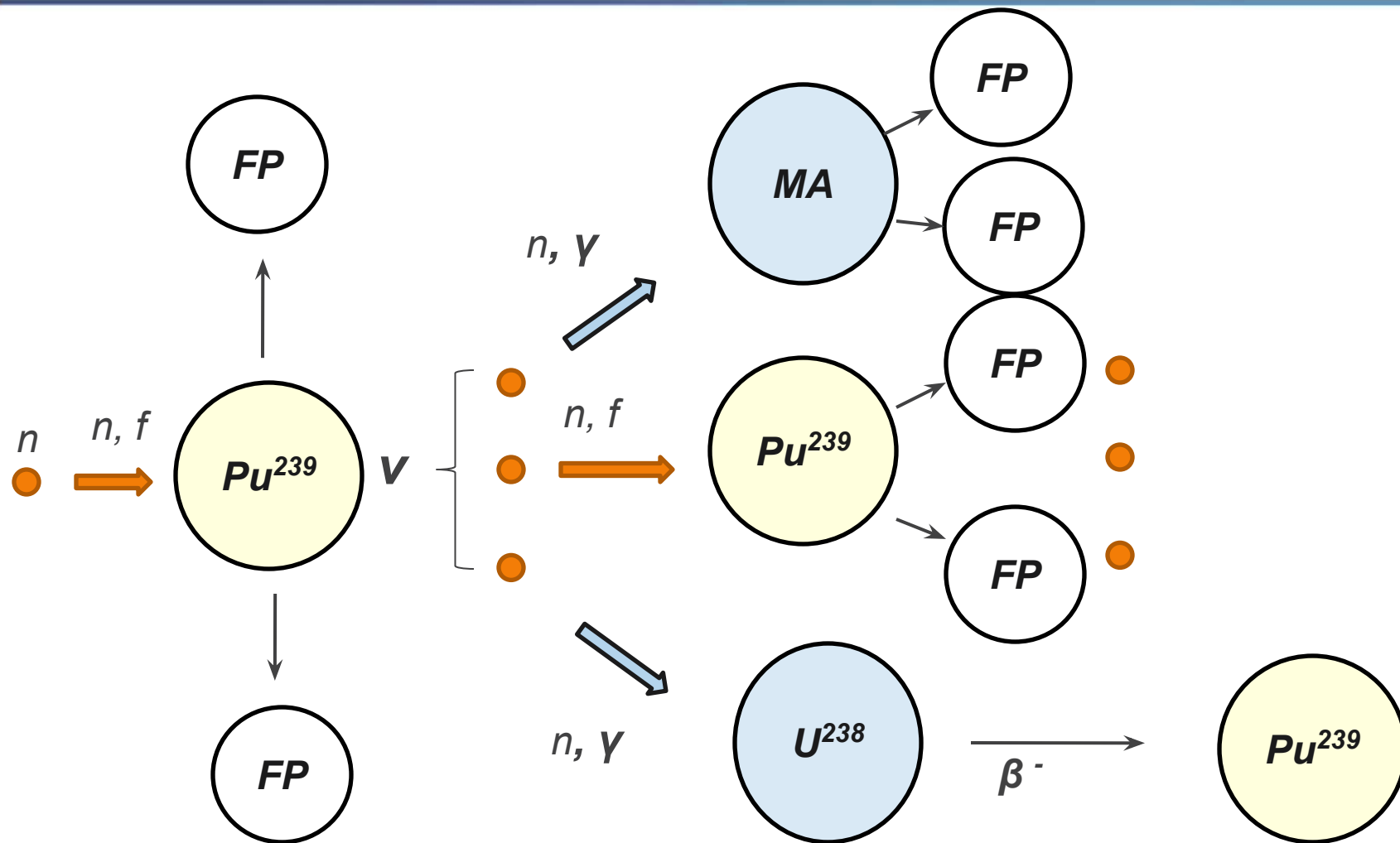
## Российская концепция обращения в ОЯТ и РАО:

- переработка ОЯТ с использованием Pu в быстрых реакторах
- предварительная выдержка образовавшихся РАО
- радиационно-миграционное захоронение РАО

# Трансмутация МА: 1-ая базовая физическая идея



РОСАТОМ



# Исследования трансмутации $^{241}\text{Am}$



| Нуклид   | $^{241}\text{Am}$ , образец 1 |                                | $^{241}\text{Am}$ , образец 2 |                                |
|--|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|  | Деление, т.е. выгорание т. а. | Накопление вторичных актинидов | Деление, т.е. выгорание т. а. | Накопление вторичных актинидов |
| $^{237}\text{Np}$                              | -                             | 0.89%                          | -                             | 0.89%                          |
| $^{238}\text{Pu}$                              | 1.5%                          | 16.2%                          | 1.6%                          | 17.3%                          |
| $^{242}\text{Pu}$                              | 0.12%                         | 3.9%                           | 0.14%                         | 4.18%                          |
| $^{241}\text{Am}$                              | 5.0%                          | -                              | 5.1%                          | -                              |
| $^{242m}\text{Am}$                             | 1.7%                          | 3.3%                           | 1.7%                          | 2.98%                          |
| $^{243}\text{Am}$                              | 0.01%                         | 0.33%                          | 0.01%                         | 0.34%                          |
| $^{242}\text{Cm}$                              | 0.64%                         | -                              | 0.69%                         | -                              |
| $^{243}\text{Cm}$                              | 0.11%                         | 0.26%                          | 0.11%                         | 0.28%                          |
| $^{244}\text{Cm}$                              | -                             | 0.04%                          | -                             | 0.04%                          |
| <b>Сумма</b>                                   | <b>~9.1%</b>                  | <b>~25.6%</b>                  | <b>~9.5%</b>                  | <b>~27.8%</b>                  |
| <b>Уменьшение <math>^{241}\text{Am}</math></b> | <b>~34.7%</b>                 |                                | <b>~38.2%</b>                 |                                |

**Эксперимент подтвердил суммарное выгорание тяжелых атомов за цикл облучения: ~9.1-9.5%**

**Эффективность выжигания МА ограничена большой вероятностью образования вторичных актинидов: ~26-28% за цикл облучения**

**Накопление Pu.** Расчетное накопление плутония ( в основном  $^{238}\text{Pu}$  и  $^{242}\text{Pu}$ ) хорошо согласуется с экспериментальными значениями.

**Накопление вторичных изотопов Am.** В эксперименте получено более низкое значение накопления  $^{242m}\text{Am}$ ., образование  $^{243}\text{Am}$  подтверждено в пределах ~10%.

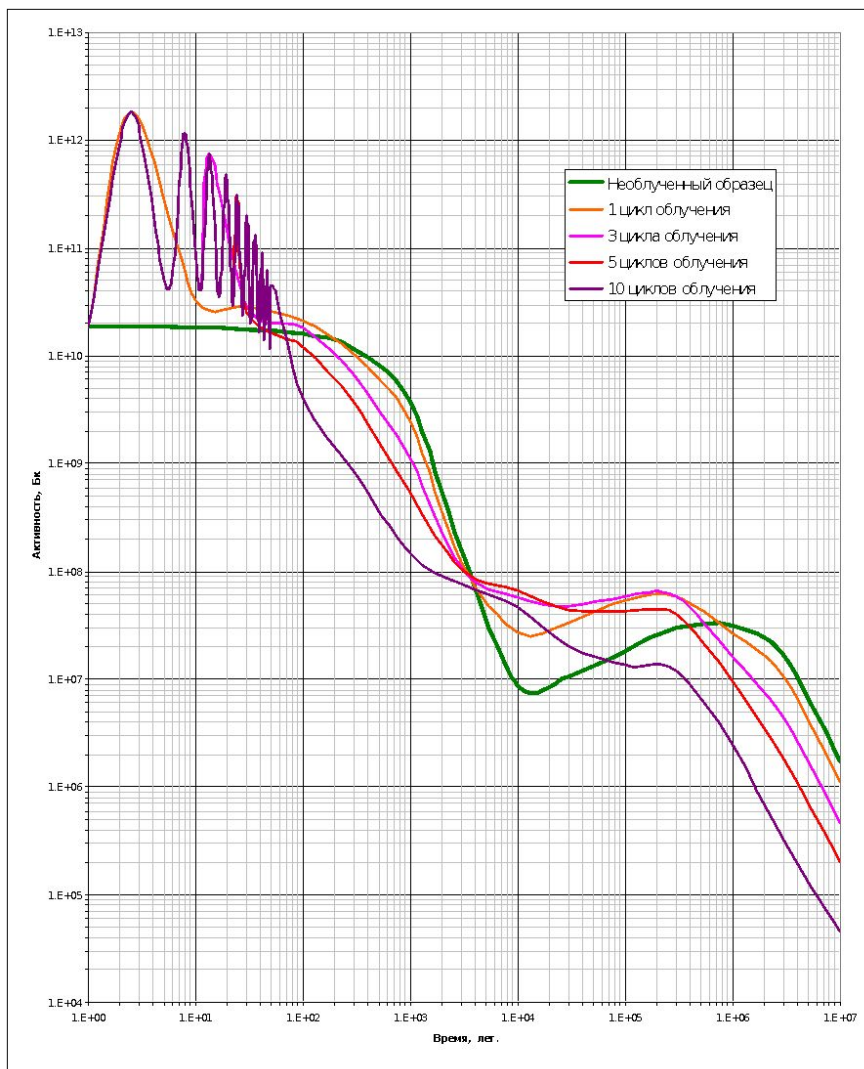
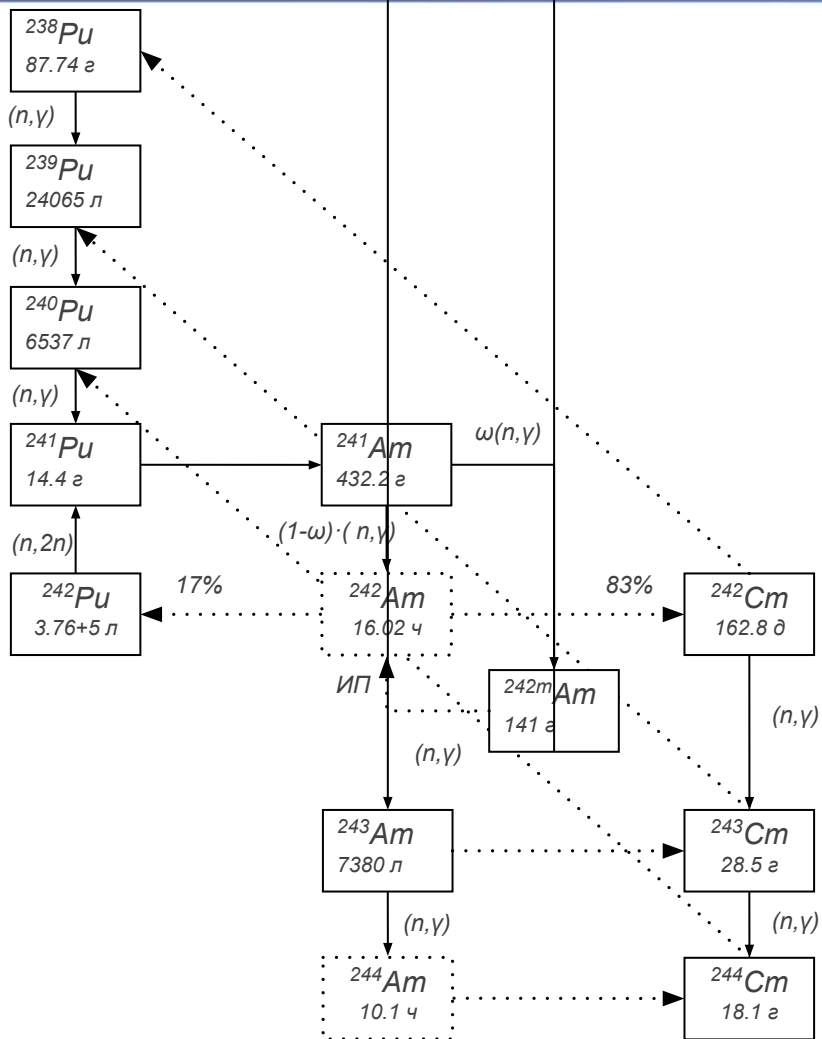
**Образование изотопов Cm.** В эксперименте обнаружено заметно большее накопление изотопов кюрия  $^{243}\text{Cm}$  и  $^{244}\text{Cm}$  (~20-30%).

| Изотоп  | BNAB-90 | BNAB-93 | BROND3 | ENDF/B6.r7 | JENDL3.3 | JEF3 |
|---------|---------|---------|--------|------------|----------|------|
| Pu-238  | 0.94    | 0.97    | 1.11   | 0.92       | 0.89     | 1.31 |
| Pu-239  | 0.77    | 0.79    | 0.93   | 0.73       | 0.73     | 1.05 |
| Pu-242  | 1.01    | 1.05    | 1.20   | 0.96       | 0.95     | 1.41 |
| Am-241  | 1.00    | 1.00    | 1.00   | 1.00       | 1.00     | 1.00 |
| Am-242m | 1.30    | 1.26    | 1.16   | 1.25       | 2.25     | 0.66 |
| Am-243  | 0.88    | 0.87    | 0.93   | 0.83       | 1.29     | 0.86 |
| Cm-242  | 1.09    | 1.07    | 0.99   | 1.06       | 1.87     | 0.60 |
| Cm-243  | 0.76    | 0.73    | 0.84   | 0.45       | 0.61     | 0.90 |
| Cm-244  | 0.43    | 0.59    | 0.60   | 0.54       | 0.88     | 0.62 |

# Трансмутации $^{241}\text{Am}$ возможна?



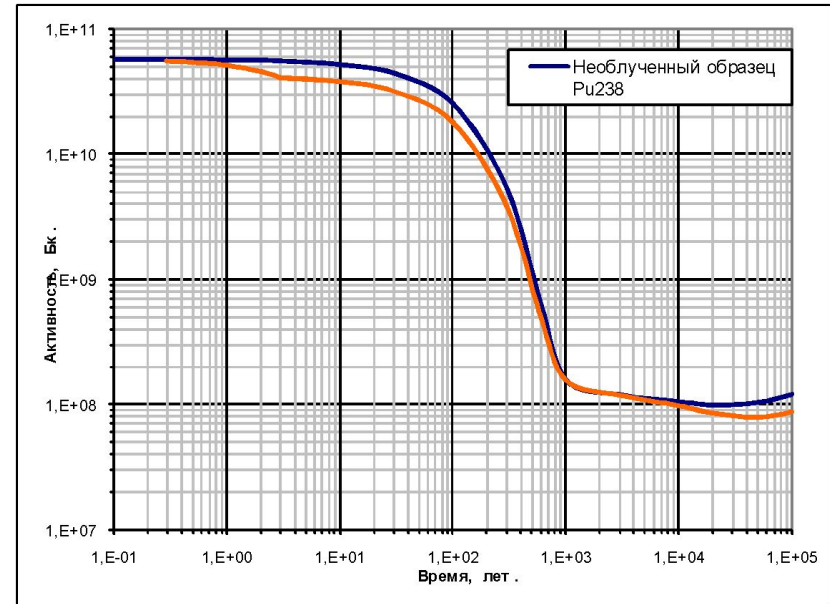
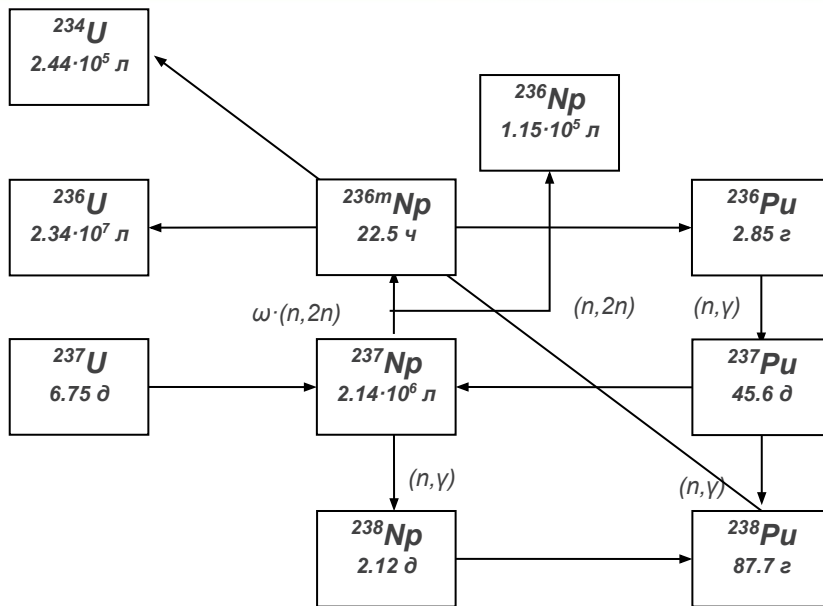
РОСАТОМ



# Исследования трансмутации $^{237}\text{Np}$



РОСАТОМ



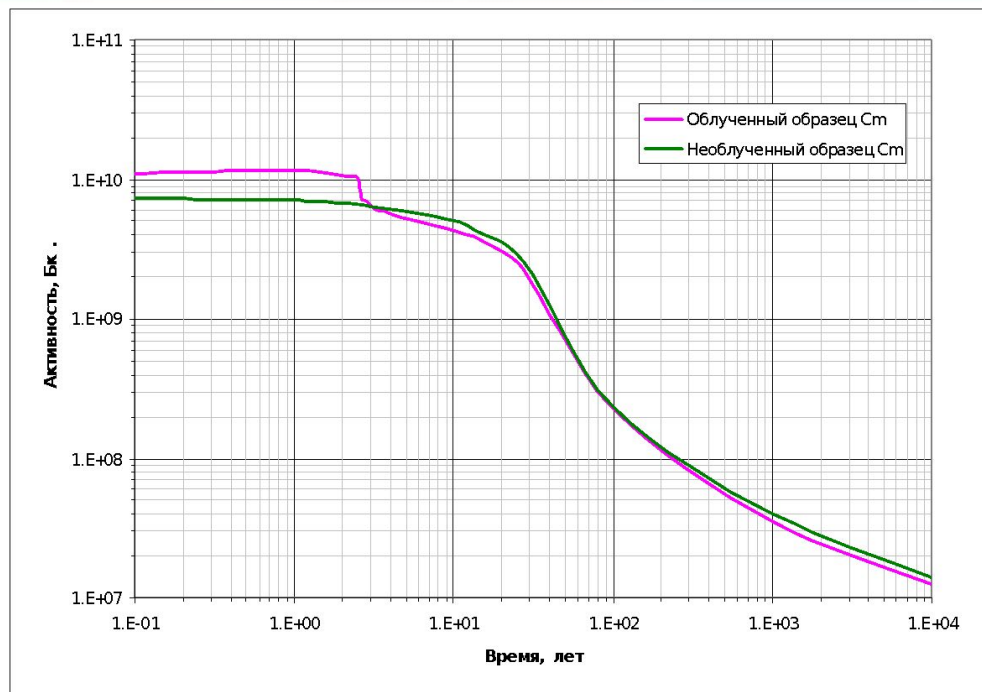
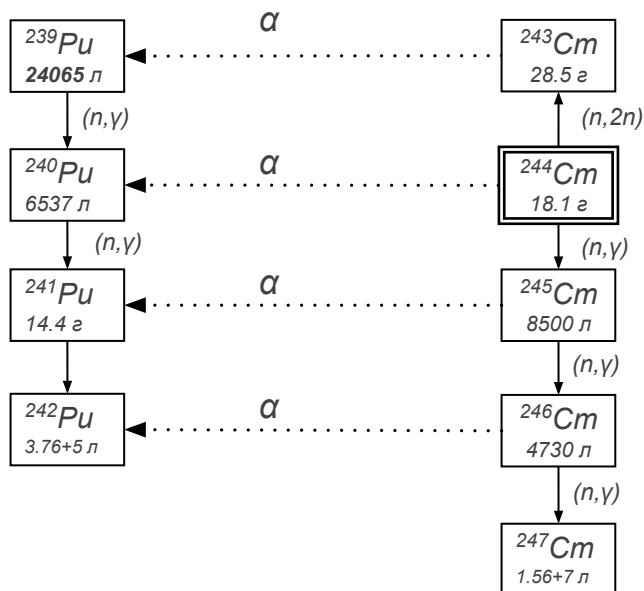
| Нуклид               | Выгорание                       | Накопление дочерних             |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $^{237}\text{Np}$    | 6.5%                            | -                               |
| $^{238}\text{Np}$    | 0.04%                           | -                               |
| $^{236}\text{Pu}$    | -                               | $\sim 2.5 \cdot 10^{-5} \%$     |
| $^{238}\text{Pu}$    | 3.6%                            | 21.9%                           |
| $^{239}\text{Pu}$    | 0.2%                            | 1.3%                            |
| <b>Сумма</b>         | <b><math>\sim 10.3\%</math></b> | <b><math>\sim 24.6\%</math></b> |
| <b>Уменьшение Np</b> | <b><math>\sim 34.9\%</math></b> |                                 |

| Нуклид   | Выгорание                       | Накопление вторичных            |
|--|---------------------------------|---------------------------------|
| $^{234}\text{U}$                               | 0.7%                            | 4.7%                            |
| $^{238}\text{Pu}$                              | 20.7%                           | -                               |
| $^{239}\text{Pu}$                              | 1.5%                            | 7.1%                            |
| $^{240}\text{Pu}$                              | -                               | 0.4%                            |
| <b>Сумма</b>                                   | <b><math>\sim 22.3\%</math></b> | <b><math>\sim 12.3\%</math></b> |
| <b>Уменьшение <math>\text{Pu}^{238}</math></b> | <b><math>\sim 34.6\%</math></b> |                                 |

# Исследования трансмутации $^{244}\text{Cm}$



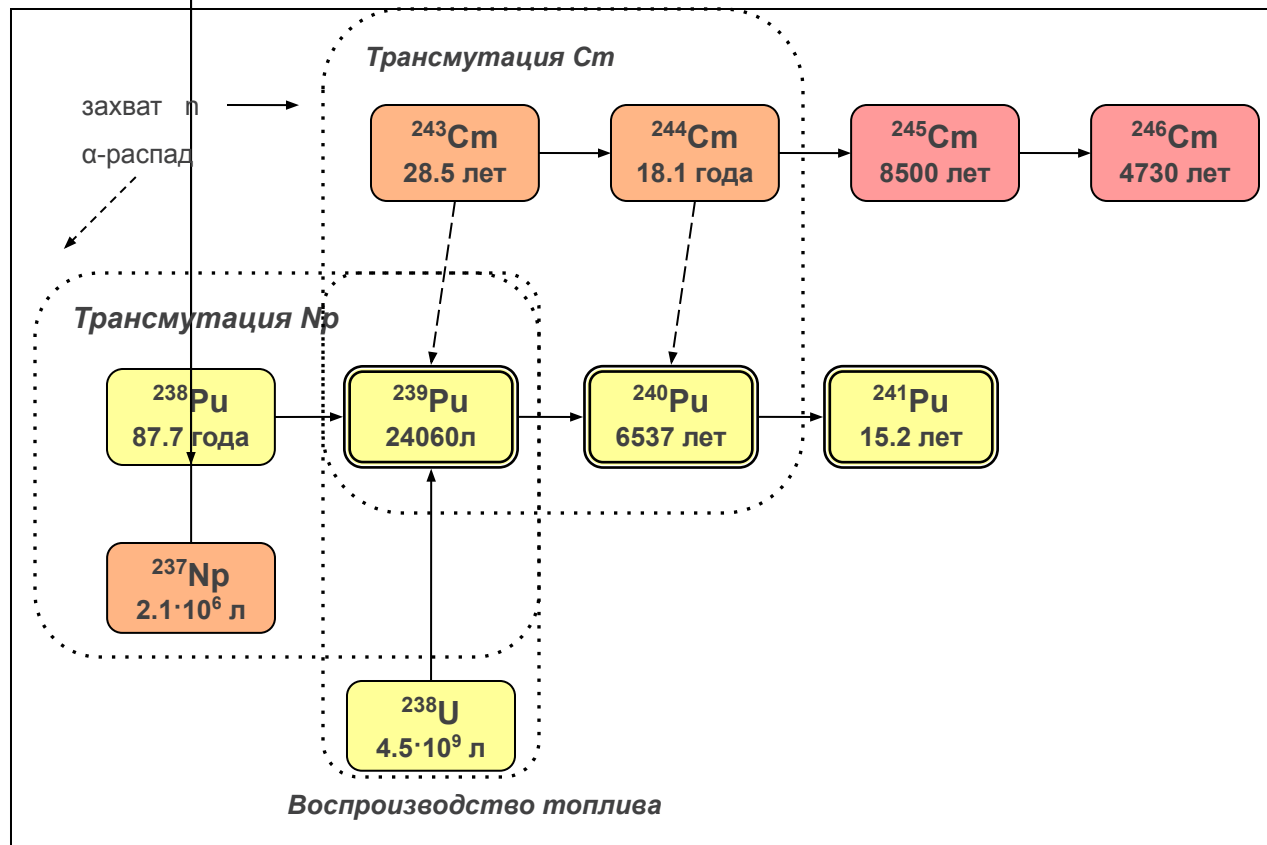
РОСАТОМ



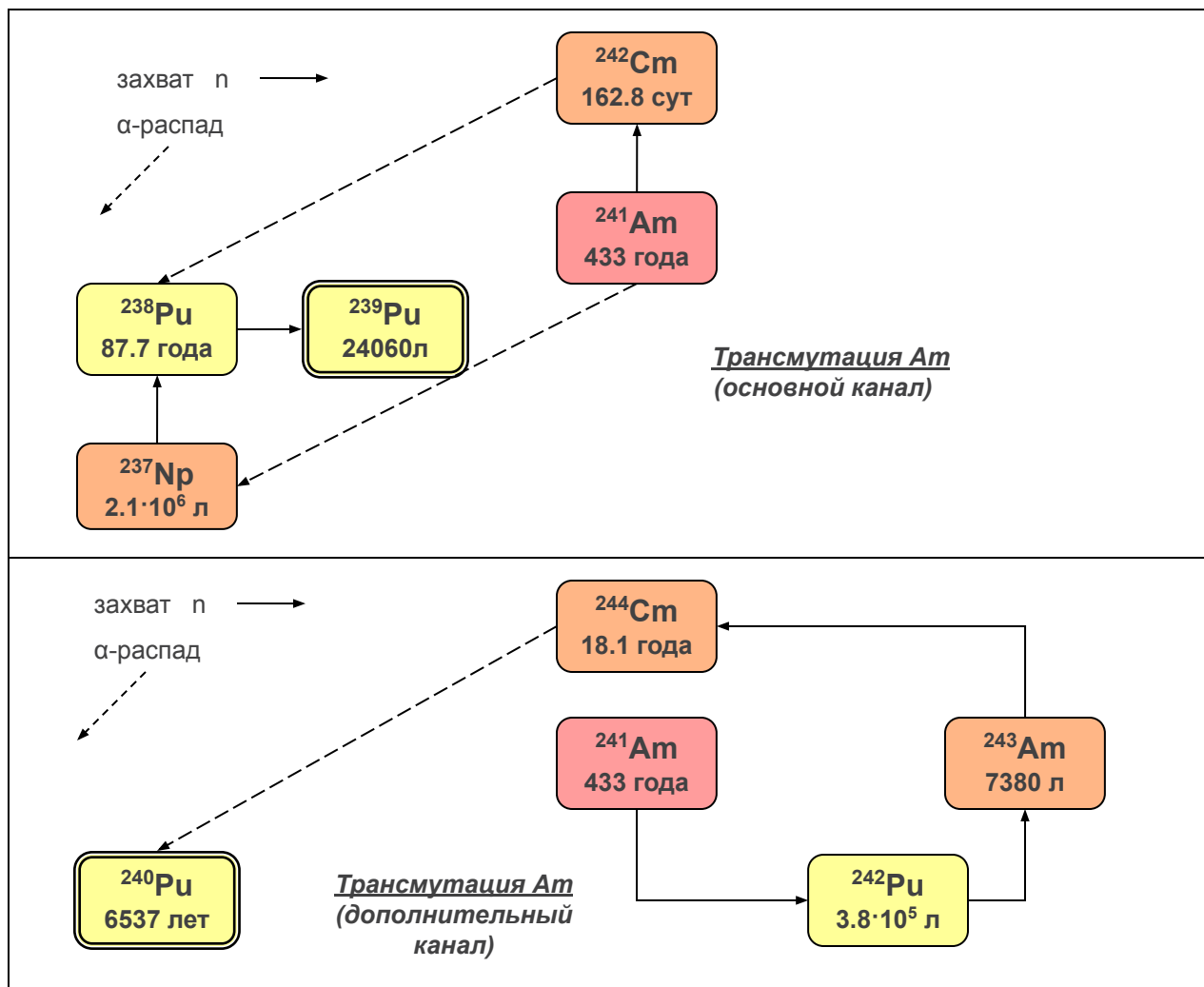
| Нуклид   | Деление (выгорание) | Накопление вторичных МА |
|--|---------------------|-------------------------|
| $^{240}\text{Pu}$                              | 0.3%                | 24.4%                   |
| $^{241}\text{Pu}$                              | 0.06%               | 0.2%                    |
| $^{244}\text{Cm}$                              | 7.5%                | -                       |
| $^{245}\text{Cm}$                              | 2.5%                | 8.4%                    |
| $^{246}\text{Cm}$                              | 0.01%               | 0.3%                    |
| <b>Сумма</b>                                   | <b>~10.3%</b>       | <b>~33.4%</b>           |
| <b>Уменьшение <math>^{244}\text{Cm}</math></b> | <b>~43.7%</b>       |                         |

Трансмутация  $^{244}\text{Cm}$  неэффективна с учетом большой скорости  $\alpha$ -распада ввиду малого периода полураспада

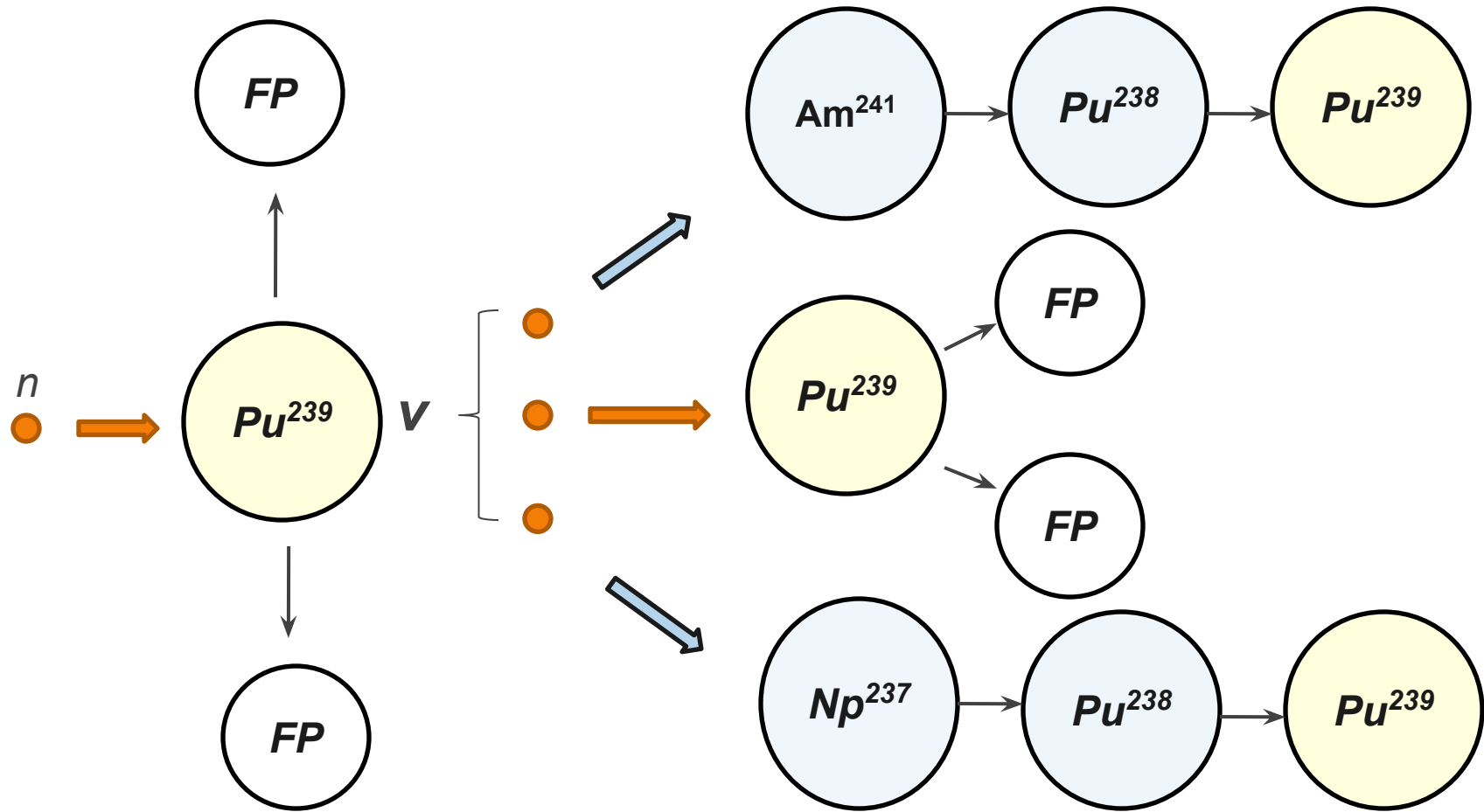
Радиационный захват нейтронов приводит к образованию долгоживущих изотопов вместо короткоживущего  $^{244}\text{Cm}$

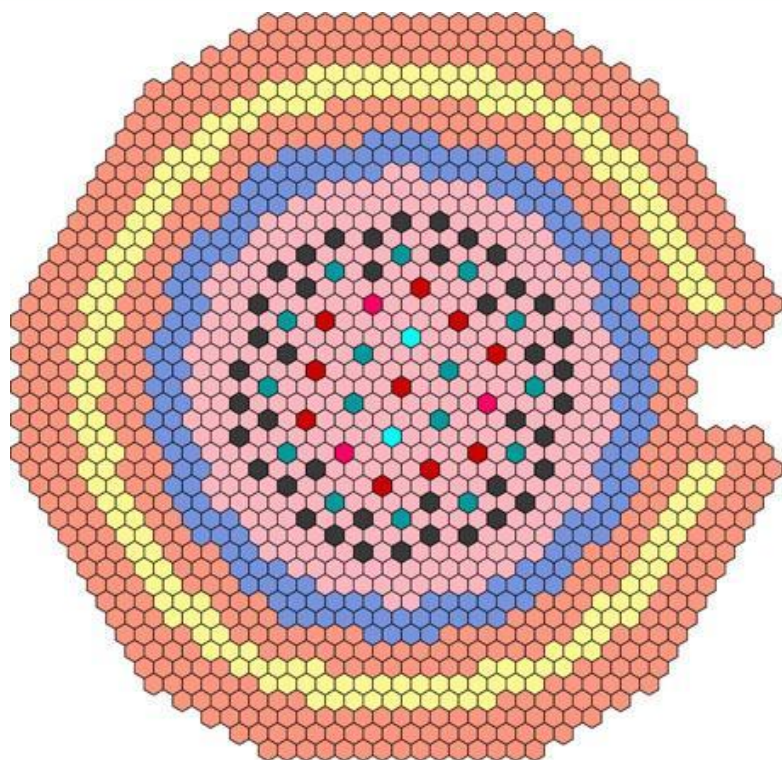






# Трансмутация МА: базовая физическая идея





При разработке концепции реактора БН-1200 рассмотрены следующие возможности:

- **рециклирование только плутония**, изоляция МА
- **гомогенная трансмутация МА** в составе топлива
- **гетерогенная трансмутация МА** в специальных выжигательных сборках активной зоны
- **рецикл всех МА** (без фракционирования)
- **рецикл МА** с отделением Cm (без Cm)
- **рецикл только Np**

Расчеты показали, что основные нейтронно-физические характеристики и параметры ядерной безопасности при утилизации собственных МА не изменяются существенно.

Суммарный остаток МА для различных способов их выжигания

| Способ выжигания МА | Без выжигания | гомогенный |        |           | гетерогенный |        |           |
|---------------------|---------------|------------|--------|-----------|--------------|--------|-----------|
|                     |               | все МА     | без Cm | без Cm+Am | все МА       | без Cm | без Cm+Am |
| Остаток МА          | 2520          | 310        | 500    | 1150      | 315          | 500    | 1140      |

При этом:

- **за время работы реактора** в нем может **утилизировано более 2 тонн МА**, т.е
- **снижение массы МА за счет рецикла составляет примерно порядок**

# Радиационные последствия рецикла МА

Тепловыделение в регенерированном топливе, кВт/ТВС

| Вариант организации ТЦ        | № кампании |      |      |
|-------------------------------|------------|------|------|
|                               | 1          | 2    | 8    |
| Рецикл плутония (без МА)      | 0.30       | 0.20 | 0.10 |
| Рецикл всех МА (Np, Am и Cm)  | 0.56       | 0.95 | 0.66 |
| Рецикл Np и Am                | 0.44       | 0.61 | 0.26 |
| Рецикл Np                     | 0.29       | 0.37 | 0.13 |
| Рецикл всех МА (гетерогенный) | 2.66       | 4.42 | 4.37 |
| Рецикл Np и Am (гетерогенный) | 1.53       | 1.30 | 0.60 |
| Рецикл Np (гетерогенный)      | 0.22       | 0.33 | 0.13 |

Источники  $\gamma$ -излучения в регенерированном топливе,  $10^{13}/с$  ТВС

| Вариант организации ТЦ        | № кампании |      |      |
|-------------------------------|------------|------|------|
|                               | 1          | 2    | 8    |
| Рецикл Pu (без МА)            | 3.80       | 2.45 | 1.17 |
| Рецикл всех МА (Np, Am и Cm)  | 23.4       | 25.9 | 14.2 |
| Рецикл Np и Am                | 21.9       | 20.7 | 8.99 |
| Рецикл Np                     | 3.77       | 4.67 | 1.60 |
| Рецикл всех МА (гетерогенный) | 184        | 185  | 108  |
| Рецикл Np и Am (гетерогенный) | 171        | 138  | 59.8 |
| Рецикл Np (гетерогенный)      | 2.89       | 4.09 | 1.51 |

Источники нейтронного излучения в регенерированном топливе,  $10^6/с$  ТВС

| Вариант организации ТЦ        | № кампании |      |       |
|-------------------------------|------------|------|-------|
|                               | 1          | 2    | 8     |
| Рецикл Pu (без МА)            | 13.7       | 11.3 | 0.785 |
| Рецикл всех МА (Np, Am и Cm)  | 476        | 1030 | 1550  |
| Рецикл Np и Am                | 16.9       | 22.6 | 13.0  |
| Рецикл Np                     | 13.6       | 16.2 | 9.41  |
| Рецикл всех МА (гетерогенный) | 4300       | 9140 | 14300 |
| Рецикл Np и Am (гетерогенный) | 39.9       | 38.2 | 21.0  |
| Рецикл Np (гетерогенный)      | 10.2       | 14.1 | 9.00  |

**“Платой” за утилизацию МА является ухудшение радиационных свойств регенерированного топлива:**

### *Гомогенная трансмутация МА:*

- тепловыделение возрастает в  $\sim 7$  раз,
- $\gamma$ -излучение – в  $\sim 10$  раз,
- нейтронное излучение – в  $\sim 600$  раз

### *Гетерогенная трансмутация МА:*

- тепловыделение возрастает в  $\sim 40$  раз,
- $\gamma$ -излучение – в  $\sim 100$  раз,
- нейтронное излучение – в  $\sim 2000$  раз

Наилучшим компромиссом является вариант в отделении Cm, который снижает:

- тепловыделение в  $\sim 7$  раз,
- нейтронное излучение – в  $\sim 500$  раз

# Трансмутация МА: выводы

- Быстрые реакторы способны использовать в составе топлива активной зоны (гомогенная трансмутация МА) минорные актиниды при без существенного влияния на физику и безопасность РУ при разумной доле МА ~1-4%
- Возможно также прямое выжигание МА в специальных гетерогенных сборках (гетерогенная трансмутация), однако такие сборки ухудшают распределение нейтронного поля в реакторе;
- Из-за высокой величины  $\alpha$  (большой величины радиационного захвата по отношению к делению) эффективность прямого выжигания МА может оказаться невысокой – облучение МА может приводить даже к увеличению активности образующейся композиции (отрицательному эффекту);
- Наиболее эффективным способом утилизации МА является их трансмутация в плутониевые изотопы с последующим использованием в виде ядерного топлива – процесс аналогичный воспроизводству Pu из U-238. При этом Np-237 и Am-241 целесообразно добавлять в топливо, а изотопы Cm отделять и выдерживать до распада в Pu изотопы;
- «Платой» за уничтожение долгоживущих МА является существенное ухудшение радиационных характеристик регенерированного топлива: нейтронной и гамма-активности топлива, радиационного тепловыделения в топливе, что осложняет изготовление топлива и обращение с ним;
- В настоящее время задача трансмутации не решена на технологическом уровне, хотя возможности трансмутации продемонстрированы в экспериментах в реакторе Phenix (Франция), БН-350 (Россия, Казахстан)

# Ключевые развилки при создании ЗЯТЦ



РОСАТОМ

| Проблема, параметр, технология, ключевые развилки принятия решений | Альтернативы  |  |
|--|---|--|
| Воспроизводство (КВ) и время удвоения                              | Активные зоны БН с высоким КВ и теплонапряженностью                                     | Активные зоны с КВА~1 и низкой теплонапряженностью (БН, БРЕСТ)                         |
| Использование природных свойств безопасности                       | РУ с натриевым теплоносителем   | РУ с тяжелым теплоносителем  |
| Улучшение технико-экономических показателей энергоблоков с БР      | Интегральная компоновка оборудования энергоблока большой мощности (БН-1200, БРЕСТ-1200) | Модульная компоновка с высоким уровнем заводской готовности оборудования (СВБР-75/100) |
| Топливо  | МОКС-топливо  | Плотное топливо: нитридное, металлическое  |
| Конструкционные материалы (для повышения выгорания топлива)        | Усовершенствованные аустенитные стали   | Ферритно-мартенситные стали, в том числе дисперсно-упрочненные                         |
| Производство топлива   | Таблеточное   | Виброуплотненное   |
| Переработка ОЯТ  | Водно-экстракционная  | Пирохимическая   |
| Транспортировка ОЯТ, схема размещения производств                  | Централизованный завод с развитым контейнерным парком                                   | Пристанционная организация топливного цикла  |
| Фракционирование и обращение с МА                                  | Без отделения МА и удаление в геологические формации                                    | Выделение МА, долгоживущих продуктов деления, минимизация их количества и токсичности  |
| Рецикл МА  | Гетерогенная в отдельных устройствах (или системах-выжигателях)                         | Гомогенная с топливом  |
| Ядерная трансмутация   | Быстрый реактор – выжигатель с твердотельными элементами                                | Жидко-солевой пережигатель   |



**Спасибо за внимание**