



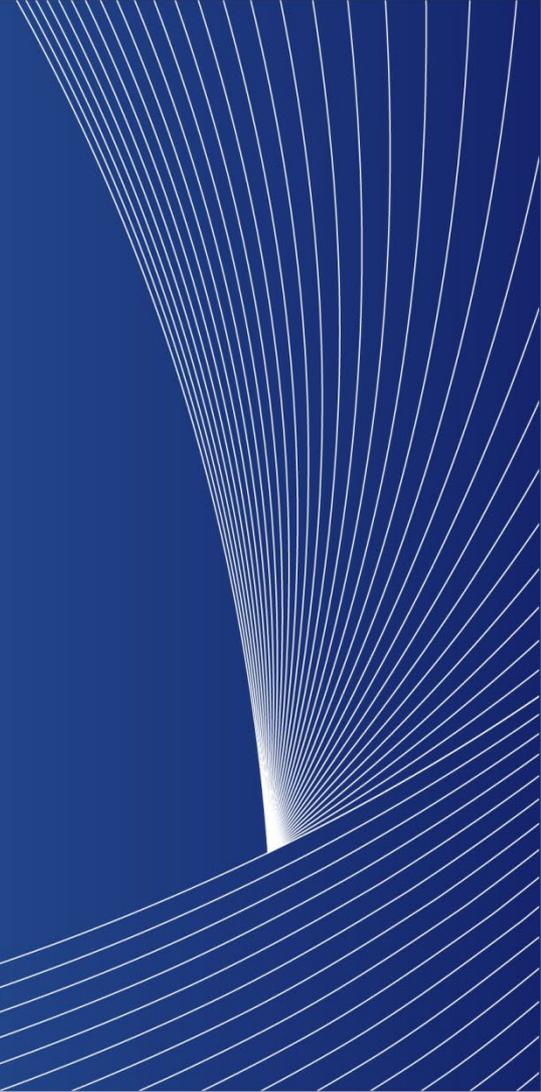
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

# Моделирование системы обращения с ОЯТ на платформе АТЭК

XVI международная конференция  
«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»  
г. Снежинск, 29.05-02.06.2023 г.

*Инга Равильевна Макеева,  
Н.Д. Дырда, А.А. Пыркова, Н.Ю. Романова, Ю.Г. Сырцова,  
Д.В. Хмельницкий, Л.Р. Файрушина*

# Стратегические цели развития АЭ и задачи системы обращения с ОЯТ



# Стратегические цели развития ядерной энергетики России

Ядерная энергетика России должна обеспечить системное развитие для достижения следующих целей, отвечающих интересам обеспечения энергетической безопасности страны:

- Составить основу создания безуглеродной энергетики, причем экономическая эффективность ЯЭ должна отвечать требованиям конкурентоспособности с другими видами генерации электрической и тепловой энергии.
- Способствовать максимально возможному высокотехнологичному экспорту АЭС, исследовательских реакторов, ядерного топлива, оборудования и услуг на рынке ядерных технологий
- Обеспечить сбережение органики для неэнергетического использования.
- Решать проблемы экологии и выполнения международных обязательств РФ в отношении снижения выбросов CO<sub>2</sub>.

# Системные требования к ядерной энергетике

- ✓ **Гарантированная безопасность** атомной генерации, промышленных объектов ЯТЦ и обращения с РАО, с минимальным экологическим воздействием на окружающую среду, не создающим опасности для биосферы;
- ✓ **По структуре энергопроизводства** должна иметься возможность расширения рынков сбыта, т.е. производства тепловой энергии как для электрогенерации, так и для «неэлектрических» применений (теплоснабжения, опреснения воды, производства водорода и моторного топлива и новых технологических приложений);
- ✓ **По сырьевой базе** не должно быть ограничений на исторически значимый период времени (сотни лет);
- ✓ **По обращению с отходами топливного цикла** необходима гарантированная безопасность окончательной изоляции радиоактивных отходов.

# Задачи развития системы обращения с ОЯТ

Остановить накопление ОЯТ – задача остается даже без вовлечения  $Pu$  в ЯТЦ

Не накапливать  $Pu$  – решение вовлечение  $Pu$  в ЗЯТЦ в виде  $U$ - $Pu$  топлива для РБН и, возможно, РТН

Определить оптимальный способ обращение с минорными актинидами

Минимизировать объёмы глубинного захоронения РАО за счет фракционирования

Минимизировать объёмы РАО за счет рецикла  $U$  из ОЯТ РТН

# Варианты развития ЯЭ



# Современное состояние АЭК

10 действующих АЭС

35 энергоблоков, установленная мощность 29,04 ГВт

Доля АЭ – 19%

Основа ЯЭ – тепловые реакторы: РБМК – 9, ВВЭР-1000 – 13, ВВЭР-1200 – 4, ВВЭР-440 – 5

Два РБН – БН-600, БН-800

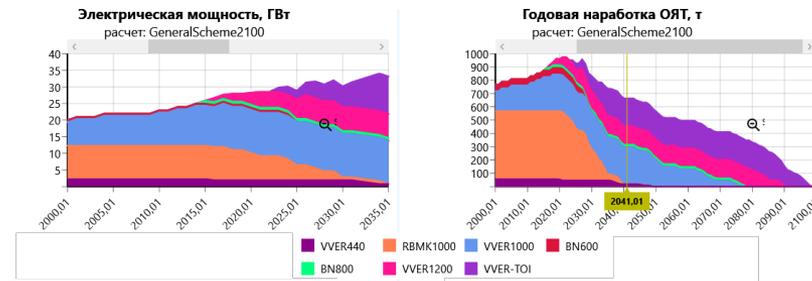
Перерабатывается ОЯТ ВВЭР-440 и БН-600 на РТ-1

Ежегодная наработка ОЯТ  $\approx 900$  т

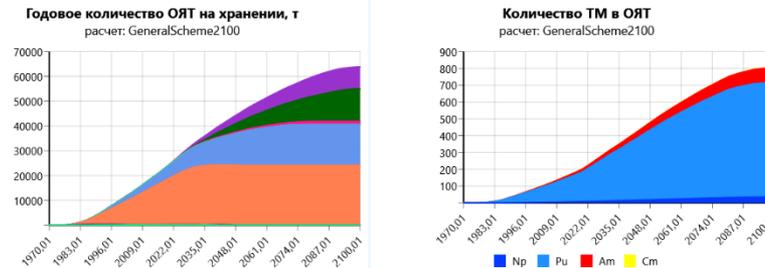
$\approx 27\ 000$  т ОЯТ РФ находится на хранении

Вывод ОДЦ на проектную мощность 220 т ОЯТ/год в 2028 г.

Строится ОДЭК с РБН БРЕСТ-300 и ПЯТЦ

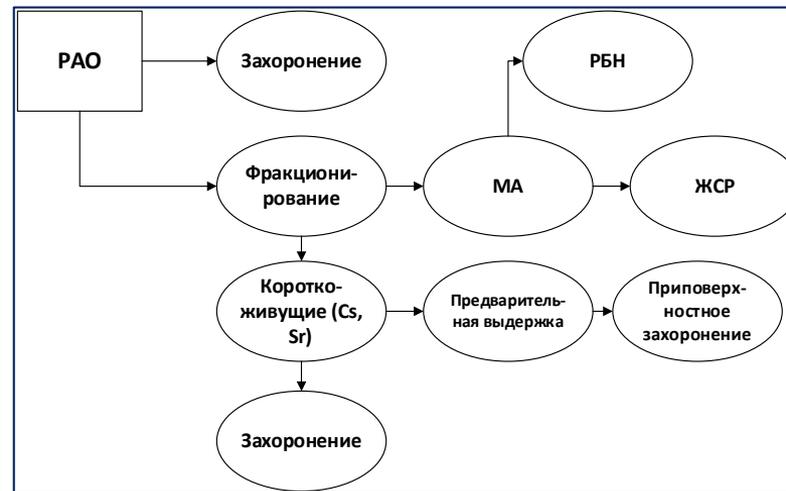
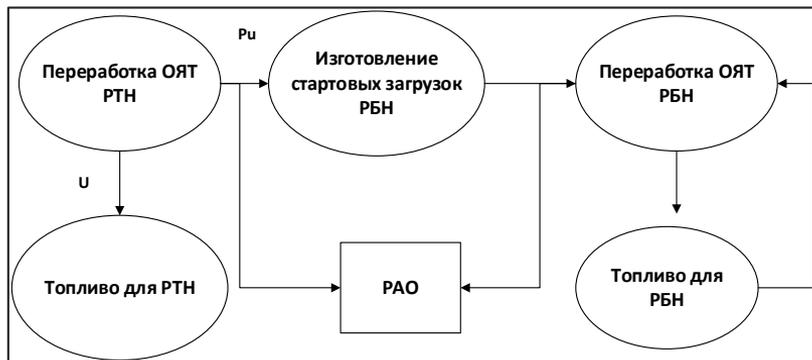
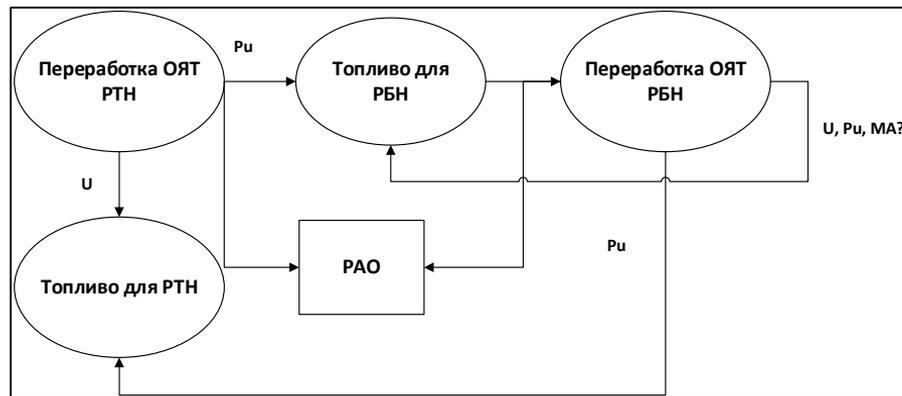
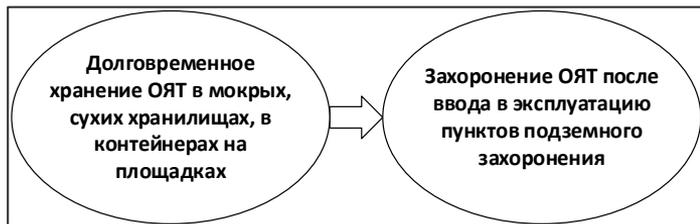


*Если остановить ввод новых энергоблоков, то к 2100 г. на хранении останется  $\approx 64$  тыс. т ОЯТ, где содержится  $\approx 710$  т Pu и 125 т МА*



# Варианты организации ЯТЦ

## Двухкомпонентная структура ЯЭ



# Перспективные типы реакторных установок

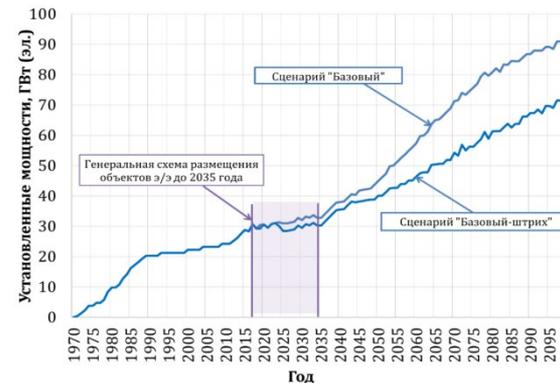
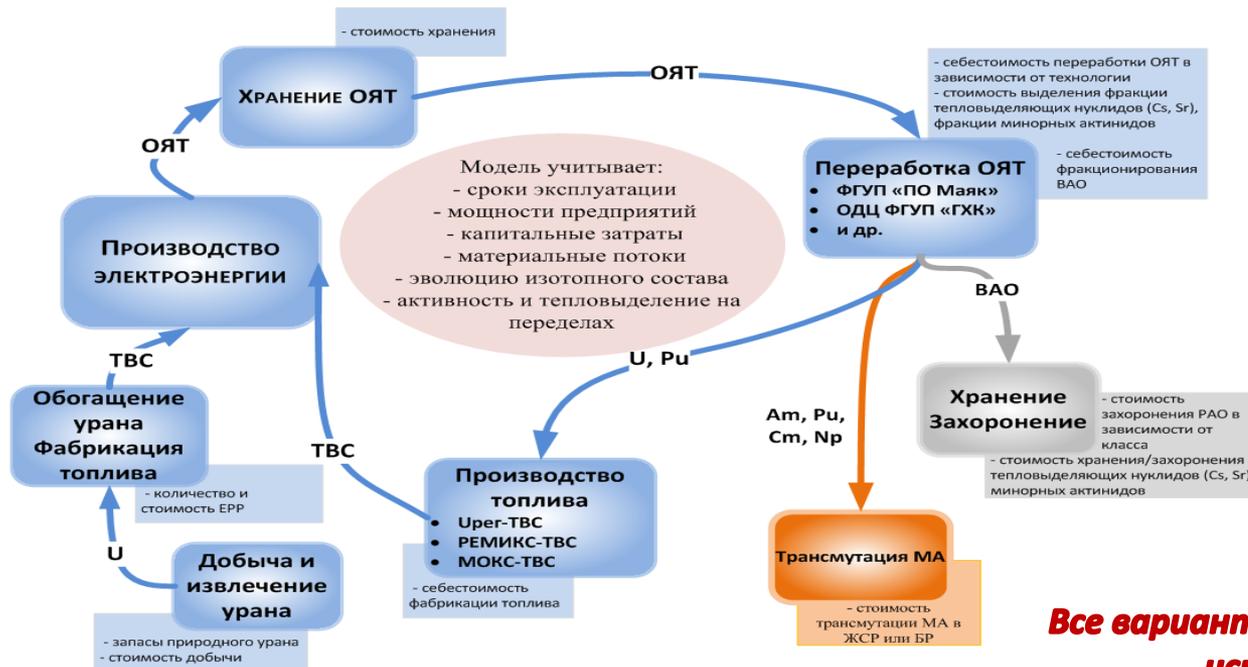


Тип РУ	Характеристики РУ	Топливо	Технология переработки	КВ	Тип переработки
ВВЭР	тепловой водородной	урановое или смешанное оксидное	варианты ПУРЭКС-процесса	<1	3-5 лет выдержка, централизованный
БН	быстрый натриевый	смешанное оксидное или нитридное	варианты ПУРЭКС-процесса, комбинированная (пиро+гидро)	1,13 – 1,3	1-7 лет выдержка, централизованный или пристанционный
БРЕСТ	быстрый свинцовый	смешанное нитридное	варианты ПУРЭКС-процесса, комбинированная (пиро+гидро), в перспективе один из вариантов «сухой» переработки	1,05	1-2,5 года выдержка, пристанционный

# Оценки вариантов организации ЯТЦ



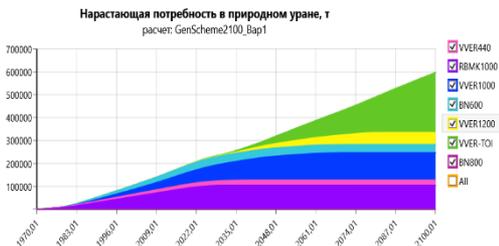
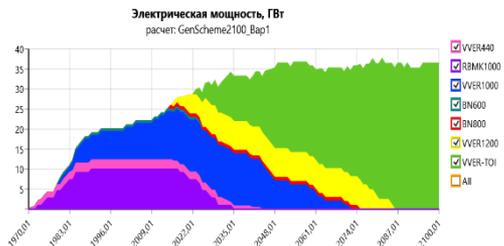
## Цель моделирования: Оптимизация организации и работы, снижение стоимости ЯТЦ



**Все варианты могут быть промоделированы с использованием ПК АТЭК-ЯТЦ**

- Основа модели – материальный баланс и эксплуатационные характеристики производств
- Существующие и перспективные объекты ЗЯТЦ
- Различные варианты организации ЯТЦ и услуг на внешнем рынке

## Замещение выводимых мощностей за счет ВВЭР-ТОИ



**Электрическая мощность на уровне  
36 ГВт**

**Максимальная производительность  
обогащительных заводов –  
9 млн. ЕРР/год**

**На хранении  $\approx$  85 тыс. т ОЯТ  
(890 т плутония, 165 т – Am, Cm, Np)**

**Необходимая площадь контейнерных  
площадок  $\approx 162 \cdot 10^3 \text{ м}^2$**

**Минимальный объем для  
окончательного захоронения ОЯТ –  
 $1,4 \cdot 10^6 \text{ м}^3$**

Переработка ОЯТ ВВЭР-440, БН-600 на ПО «Маяк»

U<sub>рег</sub> – топливо РРТН, Pu – топливо БН-800

Хранение ОЯТ – хранилища, контейнерные  
площадки

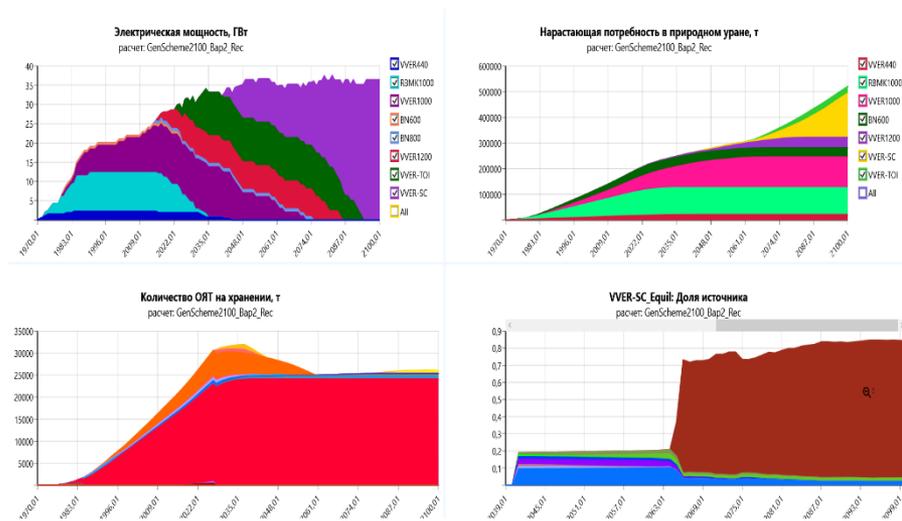
## Требования к БСС

Процент включения РБМ в массу стекла, %	4
Процент включения Мо в массу стекла, %	1
Процент включения Zr в массу стекла, %	3
Процент включения оксидов РЗЭ в массу стекла, %	10
Процент включения ТУЭ в массу стекла, %	0,2
Процент включения альфа-излучателей в массу стекла, %	0,2
Предел по $\beta$ -, $\gamma$ -излучению, Гр за $10^4$ лет	$10^9$
Предел по $\alpha$ -излучению, $\alpha$ -распадов/см <sup>3</sup>	$10^{19}$
Допустимое тепловыделение в стекле, Вт/л	1.5

# Объем БСС для захоронения РАО

РУ	ОЯТ, т	Активность стекла с ВАО, Бк	Объем стекла с ВАО, м <sup>3</sup>	Контейнеры (шт /S, м <sup>2</sup> )
ВВЭР-ТОИ	32216	2,24E+10	5 656 423 (по максимальному включению альфа-излучателей)	2856/ 34272
РБМК-1000	24913	9,24E+10	4 384 924 (по максимальному включению альфа-излучателей)	7984/ 95818
ВВЭР-1000	16879	1,17E+10	2 963 582 (по максимальному включению альфа-излучателей)	1635/ 19629
ВВЭР-1200	8818	6,13E+09	1 548 247 (по максимальному включению альфа-излучателей)	782/ 9380
ВВЭР-440	113	1,46E+09	1 867 (по радиационной стойкости)	
БН-800	1222	9,78E+08	216 117 (по максимальному включению альфа-излучателей)	203/ 2444

# Частичное замыкание ЯТЦ , реакторы ВВЭР-С



Замещение выводимых мощностей за счет реакторов ВВЭР-С  
Использование Pu для производства топлива ВВЭР-С  
ОЯТ РБМК – на хранении,  $\approx 170$  т Pu

Электрическая мощность на уровне 36 ГВт

Производительность заводов переработки ОЯТ: 1000 т/год – урановое топливо, 600 т/год – смешанное топливо

Максимальная производительность обогатительных заводов – 12 млн. ЕРР/год

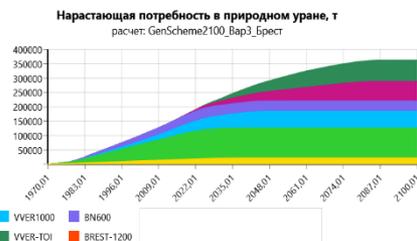
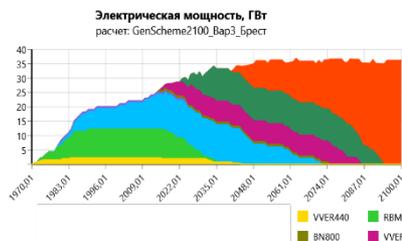
Am, Np, Cm: в РАО  $\approx 150$  т,  $\approx 15$  т в ОЯТ РБМК

В 2045 г. возникает дефицит плутония

# Объем БСС для захоронения РАО

РУ	ОЯТ	Активность стекла с ВАО, Бк	Объем стекла с ВАО, м <sup>3</sup>	Контейнеры (шт)	S, м <sup>2</sup>
<b>ВВЭР-ТОИ</b>	13161	9,14E+09	2 310 783 (по максимальному включению альфа-излучателей)	1166	14000
<b>РБМК-1000</b>	24913	9,24E+10	4 384 924 (по максимальному включению альфа-излучателей)	7985	95818
<b>ВВЭР-1000</b>	16879	1,17E+10	2963582 (по максимальному включению альфа-излучателей)	1635	19626
<b>ВВЭР-1200</b>	8774	6,10E+09	1 540 522 (по максимальному включению альфа-излучателей)	778	9334
<b>ВВЭР-440</b>	113	1,46E+09	1 867 (по радиационной стойкости)		0
<b>БН-800</b>	1222	9,78E+08	216 117 (по максимальному включению альфа-излучателей)	203	2444
<b>ВВЭР-С</b>	17790	1,24E+10	3 123 534 (по максимальному включению альфа-излучателей)	1577	18924

# Замыкание ЯТЦ , реакторы на быстрых нейтронах



**Потребность в обогащении урана постепенно сокращается после 2033 г.**

**Производительность заводов переработки ОЯТ – 700 т/год урановое топливо, 350 т/год – смешанное топливо**

**Максимальная производительность обогатительных заводов – 7 млн. ЕРР/год,**

**Плутоний вовлекается в топливный цикл**

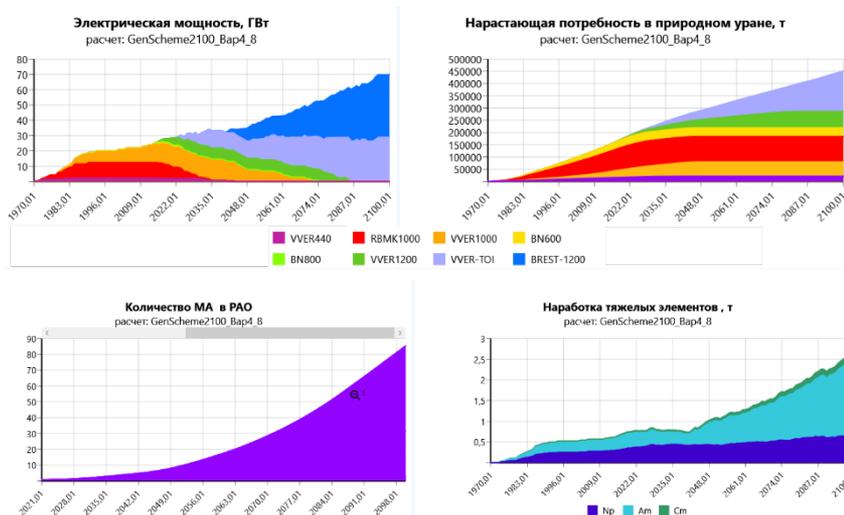
**Возникает дефицит плутония, когда в системе РБН:РТН>1,5**

**В РАО остается ≈7 т МА к 2050 г., 50 т МА к 2100 г. Нароботка МА до 1,7 т/год в основном в РБН**

# Объем БСС для захоронения РАО

РУ	ОЯТ	Активность стекла с ВАО, Бк	Объем стекла с ВАО, м <sup>3</sup>	Контейнеры (шт)	S, м <sup>2</sup>
<b>ВВЭР-ТОИ</b>	470	4,94E+09	7 623 (по радиационной стойкости)		
<b>РБМК-1000</b>	24913	9,24E+10	4 384 924 (по максимальному включению альфа-излучателей)	7985	47909
<b>ВВЭР-1000</b>	415	4,36E+09	6 731 (по радиационной стойкости)		
<b>ВВЭР-1200</b>	4	4,20E+07	65 (по радиационной стойкости)		
<b>БН-1200</b>	93	1,75E+18	2,49E+04 (по максимальному включению альфа-излучателей)		
<b>ВВЭР-440</b>	113	1,46E+09	1 867 (по радиационной стойкости)		
<b>ВВЭР-С</b>	69	7,25E+08	1 119 (по радиационной стойкости)		

# Наращивание мощности ЯЭ, реакторы на быстрых нейтронах



Реакторы БР-1200, кв=1,05

При кв=1,13 – поддерживающий ввод 2 РТН на 5 РБН

Производительность заводов переработки ОЯТ – 700 т/год урановое топливо, 750 т/год – смешанное топливо

Максимальная производительность обогатительных заводов – 7,5 млн. ЕРР/год,

Плутоний вовлекается в топливный цикл

Чтобы исключить дефицит плутония, необходим поддерживающий ввод 2 РТН на 3 РБН

В РАО остается  $\approx 10$  т МА к 2050 г., 85 т МА к 2100 г. Нарботка МА до 2,5 т/год

## Объемы БСС (л/кг ОЯТ) по отдельным критериям



РФЯЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ

Критерии	БРЕСТ-300 8-10% т.а., 2 года	ВВЭР 1000 50 ГВт*сут/т, 7 лет	ВВЭР МОХ 50 ГВт*сут/т., 7 лет
РБМ $\leq 4\%$	0,13	0,06	0,09
Mo $\leq 1\%$	0,25	0,19	0,17
Zr $\leq 3\%$	0,07	0,07	0,04
Оксиды РЗЭ $\leq 10\%$	0,09	0,07	0,06
ТУЭ $\leq 0,2 \%$	0,41	0,28	1,15
$\alpha$ -излучатели $\leq 0,2 \%$ (без $^{144}\text{Nd}$ , $^{147,148}\text{Sm}$ )	1,01 (0,55)	0,96 (0,45)	1,67 (1,31)
$\beta$ -, $\gamma$ -доза КФ (все ПД) за $10^4$ лет $\leq 10^9$ Гр	0,76 (0,86)	0,64 (0,67)	0,46 (0,5 4)
$\alpha$ -распады за $10^4$ лет $\leq 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (МА + $10^{-3}$ Целевые)	0,52	0,2	1,52
Тепловыделение $\leq 1,5$ Вт/л	0,37	0,26	0,56

1. БРЕСТ: целевые U+Pu+Np, МА Am,Cm; ВВЭР: целевые U+Pu, МА Np,Am,Cm

2. Доля МА при выдержки 7 лет (и на момент выгрузки): для ОЯТ ВВЭР 1000 - 0.15% (0.11%), для ОЯТ ВВЭР МОХ – 0.61% (0.37%)

## Фракционирование РАО

Сценарий	БРЕСТ-300 выгорание 8-10% т.а., выдержка 2 года	ВВЭР 1000 выгорание 50 ГВт*сут/т, выдержка 7 лет	ВВЭР МОХ выгорание 50 ГВт*сут/т., выдержка 7 лет
Без фракционирования	1,38 ( $\beta$ -, $\gamma$ -доза + $\alpha$ -распады )	0,87 ( $\beta$ -, $\gamma$ -доза + $\alpha$ -распады )	2,07 ( $\beta$ -, $\gamma$ -доза + $\alpha$ -распады )
Выделение МА	0,84 ( $\beta$ -, $\gamma$ -доза)	0,67 ( $\beta$ -, $\gamma$ -доза)	0,5 ( $\beta$ -, $\gamma$ -доза)
Выделение КФ	0,63 ( $\alpha$ -распады)	0,45 ( $\alpha$ -излучатели $\leq 0,2\%$ )	1,6 ( $\alpha$ -распады)
Выделение МА+КФ	0,25 ( $Mo \leq 1\%$ )	0,19 ( $Mo \leq 1\%$ )	0,18 ( $\alpha$ -излучатели $\leq 0,2\%$ )

# Заключение

**В настоящее время не существует объектов для подземного захоронения ОЯТ, в случае открытого ЯТЦ понадобится от 70 до 150 объектов типа создаваемого в нижнеканском массиве**

**Для решения задачи топливообеспечения необходима производительность заводов по переработке более 1500 т/год даже при умеренном сценарии развития ЯЭ**

**При существующей нормативной базе целесообразно выделение фракции минорных актинидов и короткоживущей фракции**

**При низких КВ обеспечить рост АЭ можно только в условиях двухкомпонентной энергетики**

**Развитие технологий ВВЭР – фактор обеспечения устойчивого развития ЯЭ**

# Спасибо за внимание

**Макеева Инга Равильевна**  
Начальник отдела

Тел.: +7 (35146) 54885  
Моб. тел.: +7 (982) 280 05 32  
E-mail: [i.r.makeyeva@vniitf.ru](mailto:i.r.makeyeva@vniitf.ru)

**01.06.2023**