



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

Топливный цикл двухкомпонентной атомной энергетики с точки зрения обращения с ОЯТ

«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»
Снежинск, Челябинская область, Россия

Шадрин Андрей Юрьевич

Заместитель директора – директор направления радиохимии
частное учреждение «Наука и инновации»

19-23.05.2025

Содержание

- 01** Двухкомпонентная ядерная энергетика и энергосистема IV поколения
- 02** Переработка ОЯТ: состояние и перспективы
- 03** Требования к переработке ОЯТ в энергосистеме IV поколения
- 04** Примеры технологий и задачи математического моделирования

Целью ГК РОСАТОМ в области переработки ОЯТ является замыкание топливного цикла

ЗСЖЦ
back-end

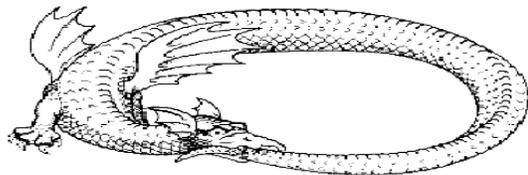
Очень велик
too long



Отбросить?
to fall off?



Замкнуть!
to close!

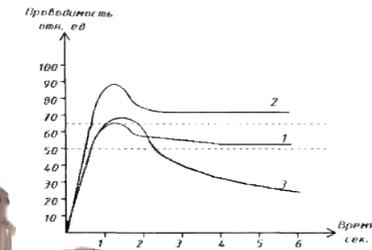


Что делать с хвостом?
what to do with the back-end?

Сделать так, чтобы хвост не рос
to prevent SNF accumulation

Утилизировать наследие
to utilize the nuclear heritage

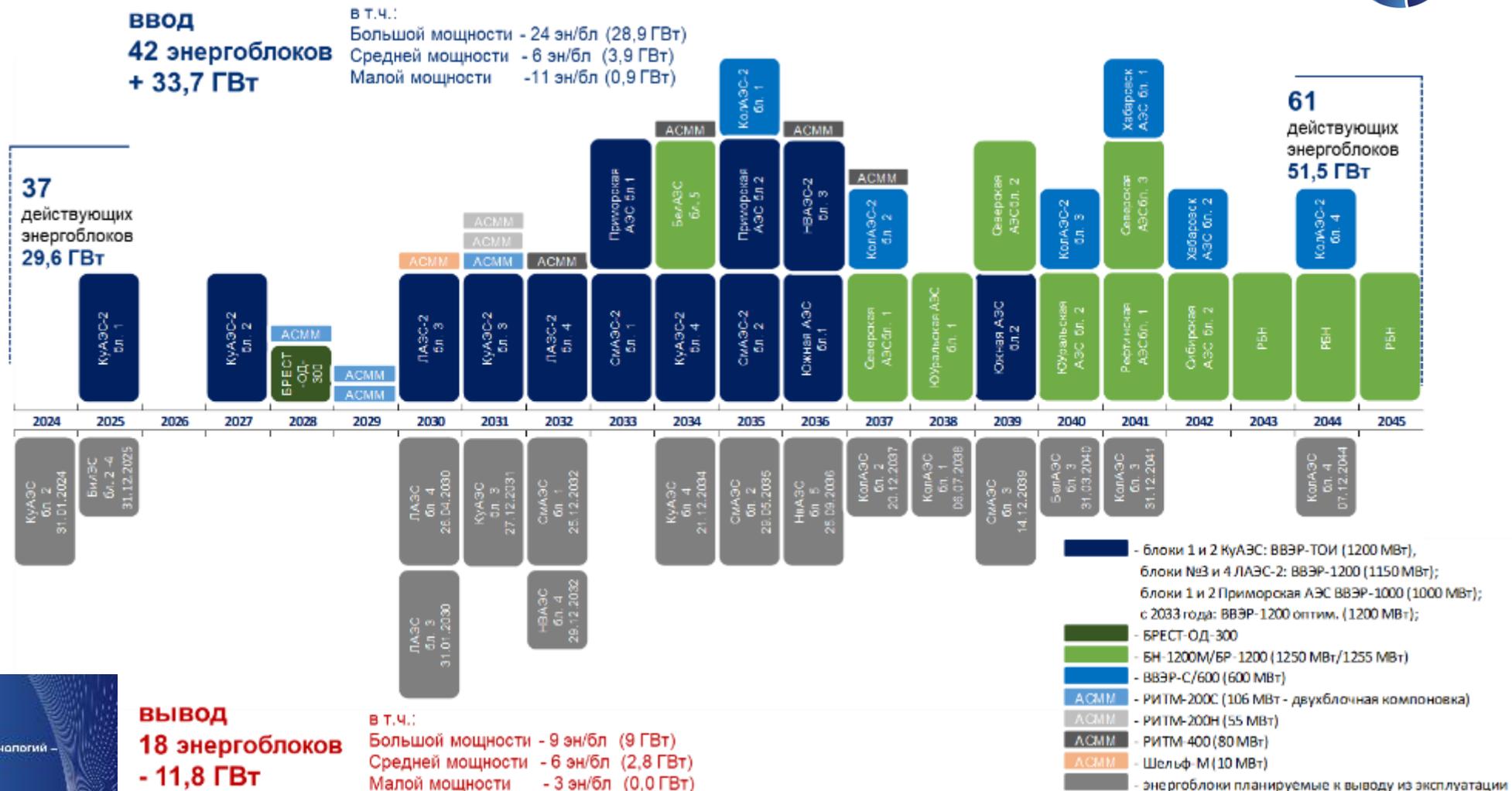
Вот, собственно, зачем мы создаем
ту самую систему обращения с ОЯТ
that's why we develop the system of SNF management



Барышников М.В., АТОМЭКО, Москва, 16.10.2012

Стратегия развития двухкомпонентной ядерной энергетики подразумевает замыкание ЯТ

Дорожная карта сооружения АЭС в РФ до 2045 года



**Развитие РБН с формированием двухкомпонентной ядерной энергетики –
Стратегическое направление развитие ядерной энергетики Российской Федерации**

Преимущества ЗЯТЦ на базе энергосистем четвертого поколения



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

ОТСУТСТВИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ ПО РЕСУРСНОЙ БАЗЕ

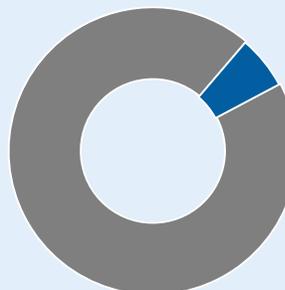
Энергоемкость различных природных ресурсов

ОТКРЫТЫЙ ЯТЦ

Ограниченная ресурсная база урана

94%

Уголь,
нефть
и газ



6%

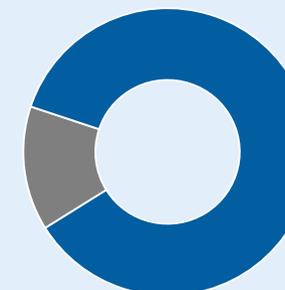
Уран
(ЯЭ на базе
U-235)

ЗАМКНУТЫЙ ЯТЦ

Решение проблемы ресурсной базы за счет использования U-238

14%

Уголь,
нефть
и газ



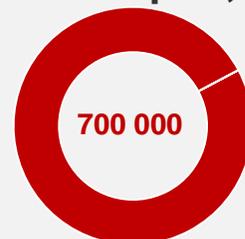
86%

Уран
(ЯЭ на базе
U-238)

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Время достижения радиационной эквивалентности РАО и исходного уранового сырья, лет

700 000



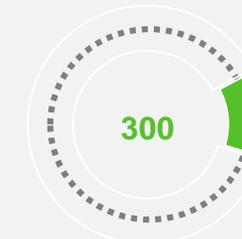
ОТКРЫТЫЙ ЯТЦ

10 000



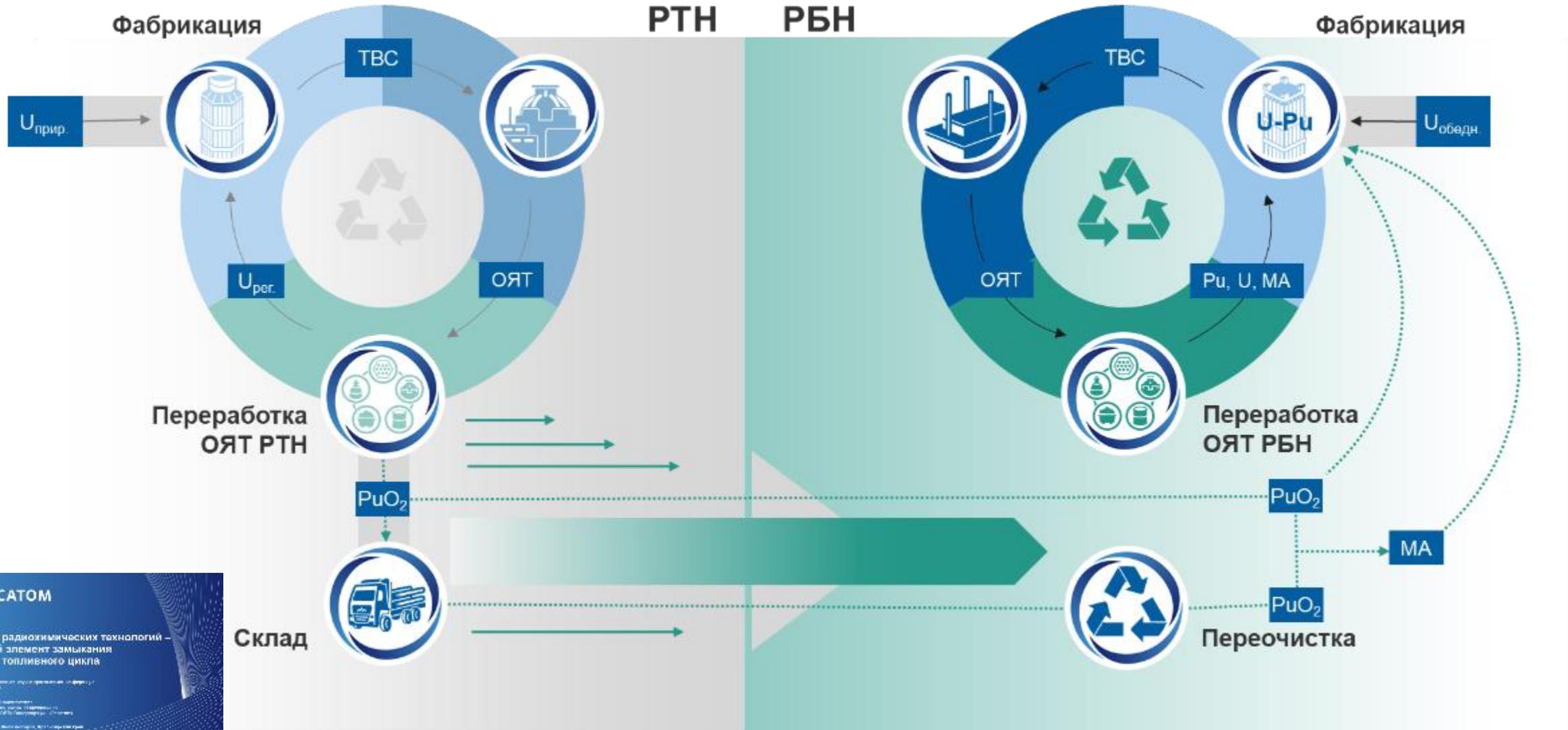
ПЕРЕРАБОТКА ОЯТ

300



ПЕРЕРАБОТКА,
ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ
И ДОЖИГАНИЕ МА

Роль и место радиохимической переработки ОЯТ в ЗЯТЦ двухкомпонентной ядерной энергетики



Переработка ОЯТ РТН становится неотъемлемым элементом замыкания ЯТЦ и запуска энергосистем IV поколения с решением проблем наследия

Требования к переработке ОЯТ в двухкомпонентной атомной энергетике

Требования проектного направления «Прорыв»

ИМПЕРАТИВНЫЕ

1. **Безопасность**
2. **Экологическая приемлемость**
3. **Экономическая эффективность**



Чем точнее мы знаем координаты частицы, тем менее точно мы можем определить ее импульс и наоборот.
– Вернер Гейзенберг, 1927

ТЕХНИЧЕСКИЕ

1. **Возможность переработки ОЯТ с низким временем выдержки и высоким выгоранием**
2. **Устойчивость к нераспространению**
3. **Потери $P_u \leq 0,1\%$**
4. **Конечные продукты пригодны для фабрикаци топлива**
5. **Низкие объемы ВАО**
6. **Фракционирование**



ТВЭЛ

V Региональный Общественный Форум-диалог
«Атомные производства. общество, безопасность 2012»
г. Томск, 29 ноября 2012 г.



4

+ Ожидания ЗАКАЗЧИКА (производителя электроэнергии):

- **Рецикл урана и плутония без удорожания топлива**
- **Отсутствие глубинного захоронения РАО**
- **Дожигание Np, Am, Cm**

Дополнительные требования к новым мощностям по переработке ОЯТ

- **Замкнутый водо и кислотооборот.**
- **U, Pu, Np, Am и даже Tc и Cm - товарные продукты усредненные и аттестованные**
- **Фракционирование в объеме необходимом и достаточном для минимизации затрат на переработку и окончательную изоляцию РАО.**
- **Короткий топливный цикл за счет использования высоко-температурных головных операций для решения проблемы трития**
- **Технология рассчитана на переработку топлива будущего (высокое выгорание, высокое содержание ДМ, разные топливные композиции)**
- **Отсутствие отложенных решений по всем вида РАО, включая КМ**

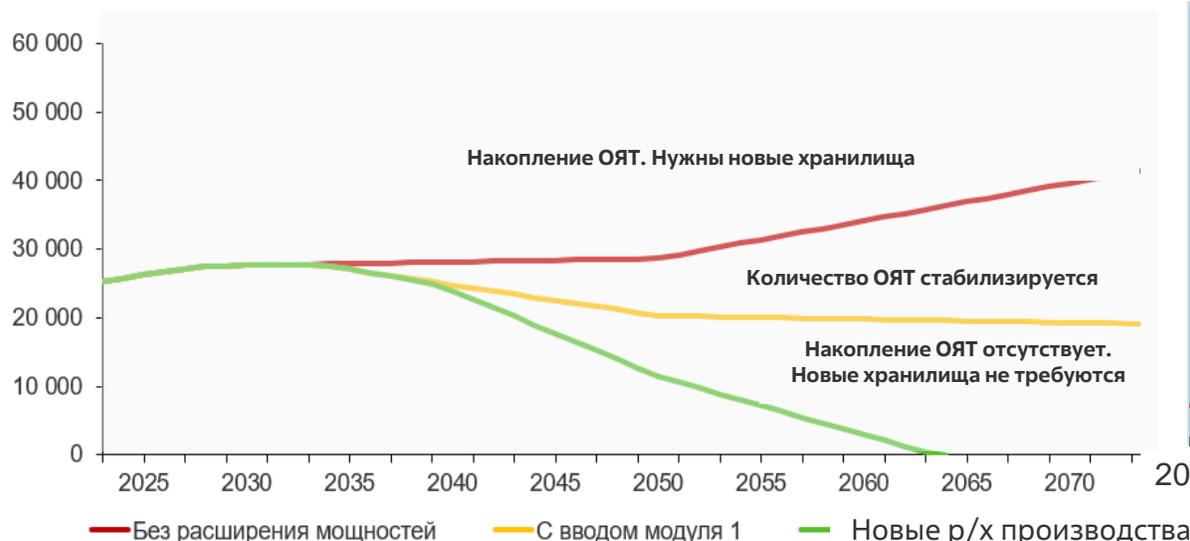


Переработка ОЯТ в двухкомпонентной энергетической системе является обязательным условием и инструментом комплексного решения актуальных задач



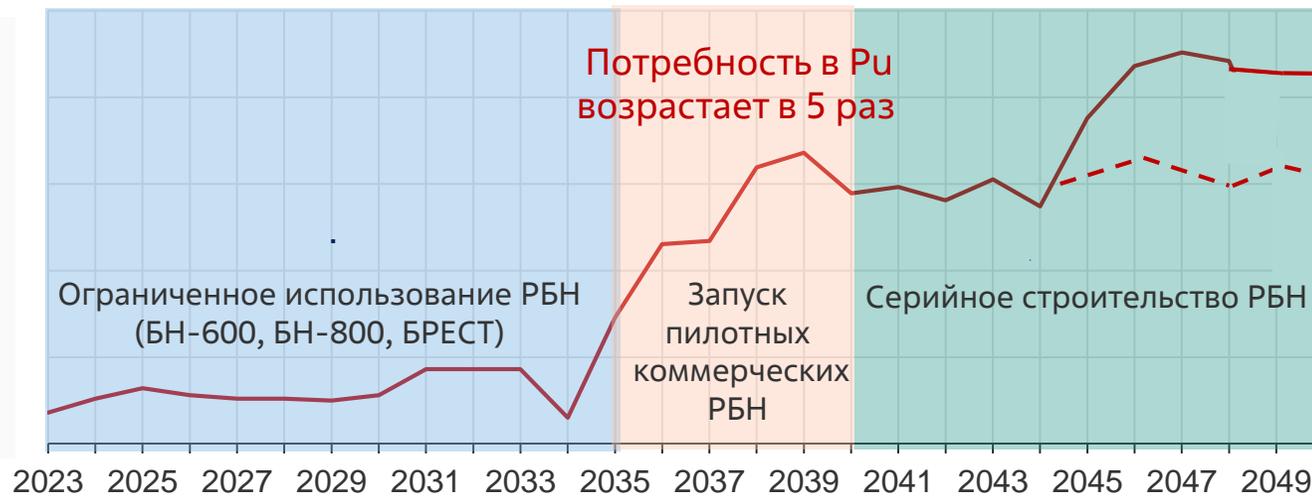
НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

Решение вопроса накопления ОЯТ, в т.ч. «наследия»



- Без развития мощностей необходимо строительство новых хранилищ.
- Модернизация действующих производств не позволяет снизить количество накопленного в стране ОЯТ.
- Крупномасштабная переработка решает проблему ОЯТ в полном объеме.

Обеспечение РБН «внешним» плутонием



- Потребность в Pu для РБН резко возрастает к 2035 году и достигает порядка 15 тонн/год.
- Для запуска РБН с темпом 1 энергоблок в год требуется переработка ОЯТ более 1200 тТМ/год.
- Регенерированный U может быть целиком вовлечен в ЯТЦ РТН, что снизит топливные затраты и позволит сэкономить природный уран.

Развитие мощностей по переработке ОЯТ позволит решить как проблему накопления ОЯТ, так и обеспечить новые РБН сырьевыми делящимися материалами



Заводы по переработке ОЯТ (первоочередные задачи)

1. РТ-1 ФГУП «ПО «Маяк»

Единственный действующий промышленный завод по переработке ОЯТ в России.

Переработка всех видов ОЯТ.
Проектная мощность 400 т ТМ/год.

Задачи:

- комплексная модернизация до 2029 г.
- переработка ОЯТ МОКС БН-800 и высоковыгоревшего ОЯТ ВВЭР.



2. ОДЦ ФГУП «ГХК»

Опытно-демонстрационный центр по отработке технологий третьего поколения.

Проектная мощность объекта: 220 т ТМ/год.
1ПК ОДЦ введен в эксплуатацию.

Задачи:

- ввод в эксплуатацию - 2024 г.
- выход на проектную мощность - 2029 г.



3. Модуль переработки ОДЭК АО «СХК»

Отработка комбинированной (пиро- + гидро-) технологии переработки СНУП ОЯТ.

Проектная мощность: 10 т ТМ/год ОЯТ РУ БРЕСТ-ОД-300.

Задача:

- ввод в эксплуатацию в 2030 г.



Результат развития радиохимических направлений

Обеспечение
двухкомпонентной
ядерной энергетики
топливом



Обеспечение
рационального
ядерного
топливного цикла



Минимизация
воздействия
от РАО на будущие
поколения



Снижение накопления
ОЯТ в стране



Обеспечение
технологического
лидерства в
технологиях
переработки ОЯТ

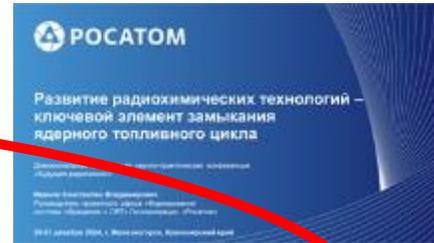
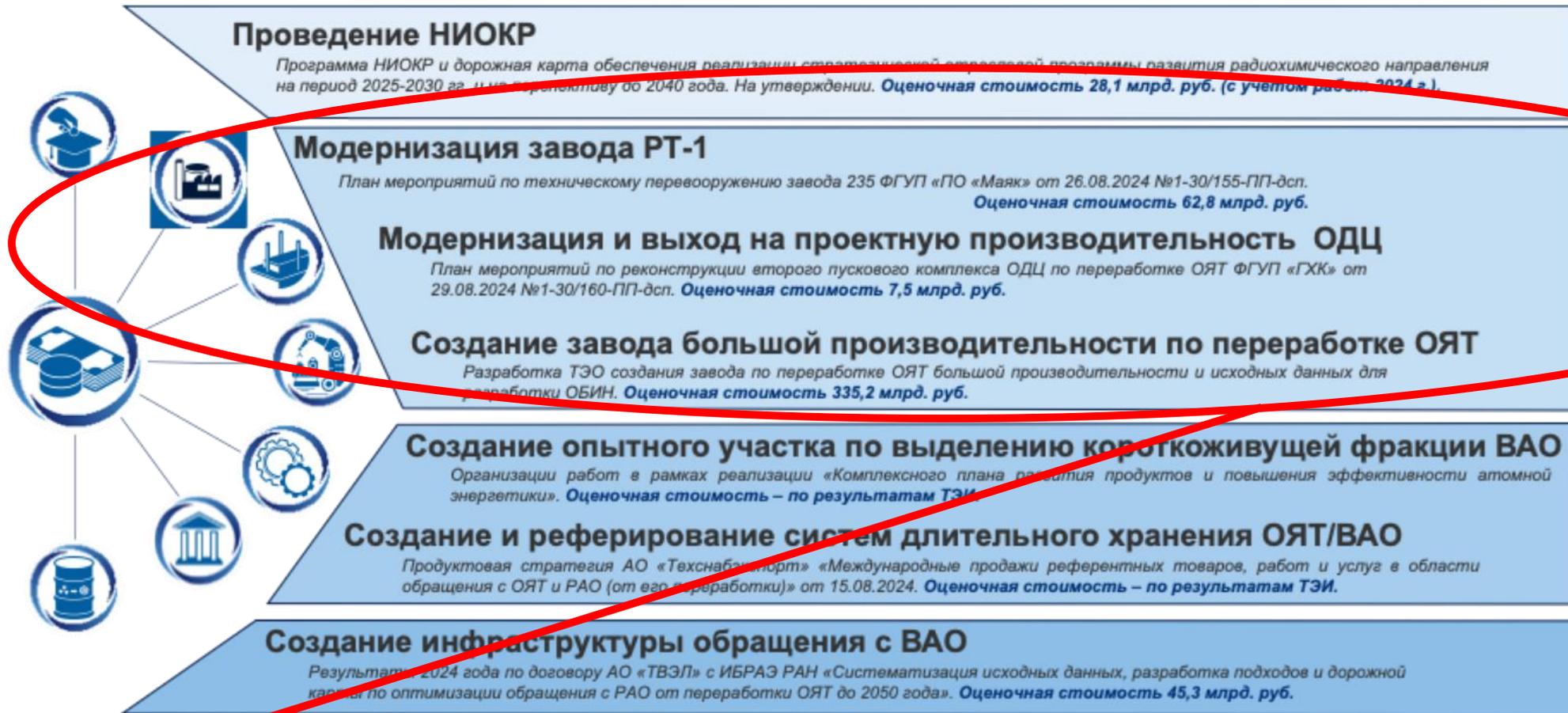


Создание устойчивой
системы
обращения с ОЯТ

Основная задача стратегической программы «Развитие радиохимического направления»



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

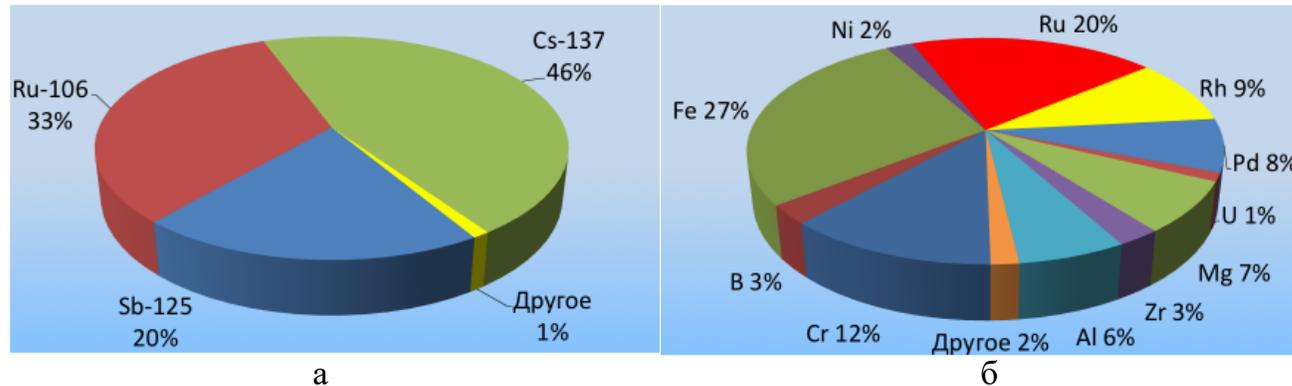


Основная проблема-отсутствие оборудования

Без решения этой задачи дальнейшее развитие невозможно



Растворение МОКС БН-600 на ПО «Маяк»



Состав осадков по данным гамма-спектрометрического (а) и элементного (б) анализа

Повышенных потерь плутония в отходы при переработке МОКС ОЯТ БН-600 на заводе РТ-1 не зафиксировано.

Показано, что захват Рu осадком молибдата циркония составил 0,008 % от массы плутония поступившего на операцию растворения.

- Проточная (мембранная) фильтрация
 - пульпа сгущена до 100 г/л/
 - мембранная фильтрация полностью соответствует требованиям/



Стенд осветления на ПО «Маяк»

Проведена комплексная проверка полномасштабного макета установки осветления (200 час.)

Пульпы сконцентрированы до 100-103 г/л. Полностью удалена твердая фаза (менее 0,1 г/л – предел обнаружения). НИОКР завершен.

Как снизить объем тритий-содержащих РАО (ОДЦ ГХК)



Задачи:

- удалить тритий на операции волоксации;
- растворить окисленный ОЯТ в минимальном объеме кислоты;
- максимально замкнуть водооборот.

Охрупчивание и волоксация ОЯТ

ОЯТ ВВЭР-1000 с выгоранием 70 ГВт•сут/т U и выдержкой ~6 лет

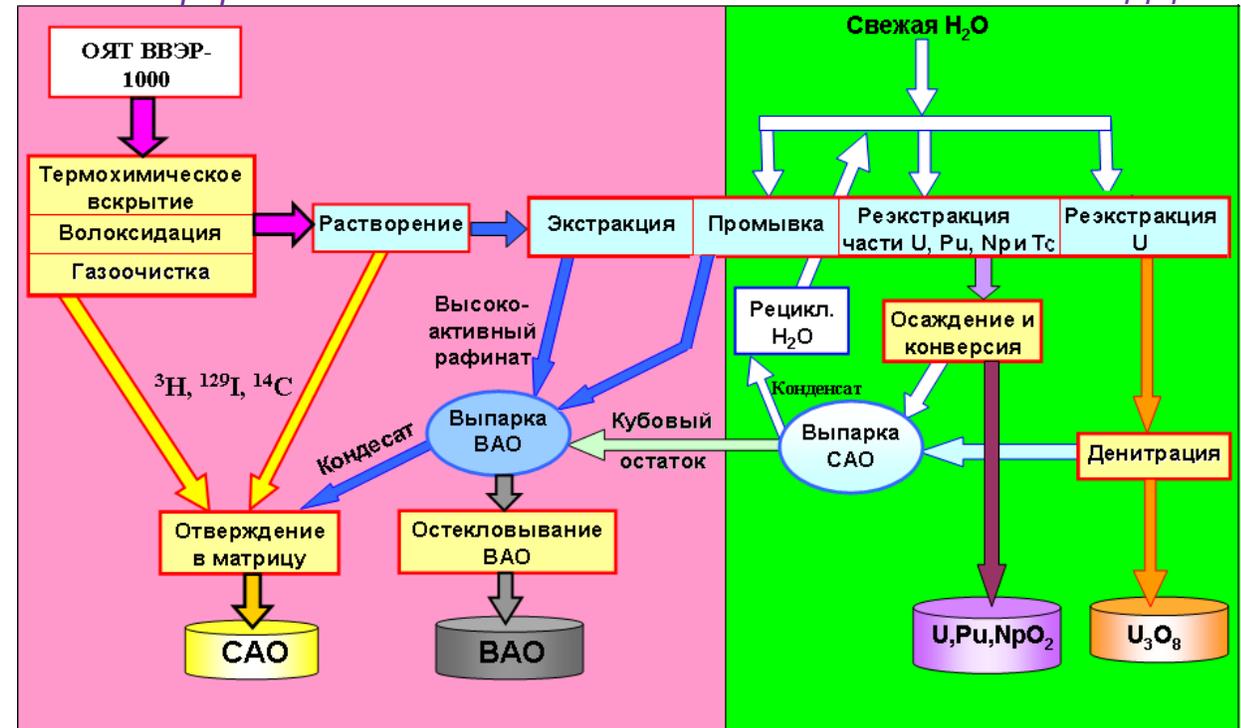
Элемент	% выхода на операции		
	Охрупчивание	Волоксация	Р-р на экстракцию
Тритий	52,5	46,3	1,2
C-14	42,0	58,0	-
I-129	-	3,9	0,9 (отдувка)
Cs-137		1,5	98,5

Волоксация - хорошо известный процесс.

Растворение – как растворить в минимальном объеме кислоты, избежав осадкообразования.

Замкнутый водооборот – как избежать образования «маточников», содержащих ДМ.

Схема переработки ОЯТ ВВЭР-1000 по базовой технологии на ОДЦ



Локализация трития

Рецикл H₂O

Не все вошло в проектную схему, но решения придется либо внедрять, либо предлагать новые

PP-процесс – комбинированная (пиро + гидро) технология переработки ОЯТ БР (МП ОДЭК)



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

Экспериментально продемонстрирована техническая реализуемость:

- ✓ окисления СНУП ОЯТ (подтверждена сухая сепарация ОЯТ и оболочек твэл, удаление из ОЯТ более 99,9 % трития и более 98 % ^{14}C);
- ✓ экстракционного и экстракционно-кристаллизационного аффинажа неразделенной смеси U+Pu+Np (подтвержден суммарный коэффициент очистки $5 \cdot 10^6$);
- ✓ достижимости глубины извлечения актинидов (более 99,9 %) при переработке СНУП ОЯТ для радиационно-эквивалентного захоронения оставшихся в РАО продуктов деления;
- ✓ технологии получения методом СВЧ-денитрации смешанных оксидов U+Pu+Np, U-Am, U-Cm и чистого U (проверена на U и Ce);
- ✓ технологии выделения суммы РЗЭ-ТПЭ и разделения Am и Cm;
- ✓ отверждения ВАО в боросиликатное стекло в дистанционно-удаляемом холодном тигле.

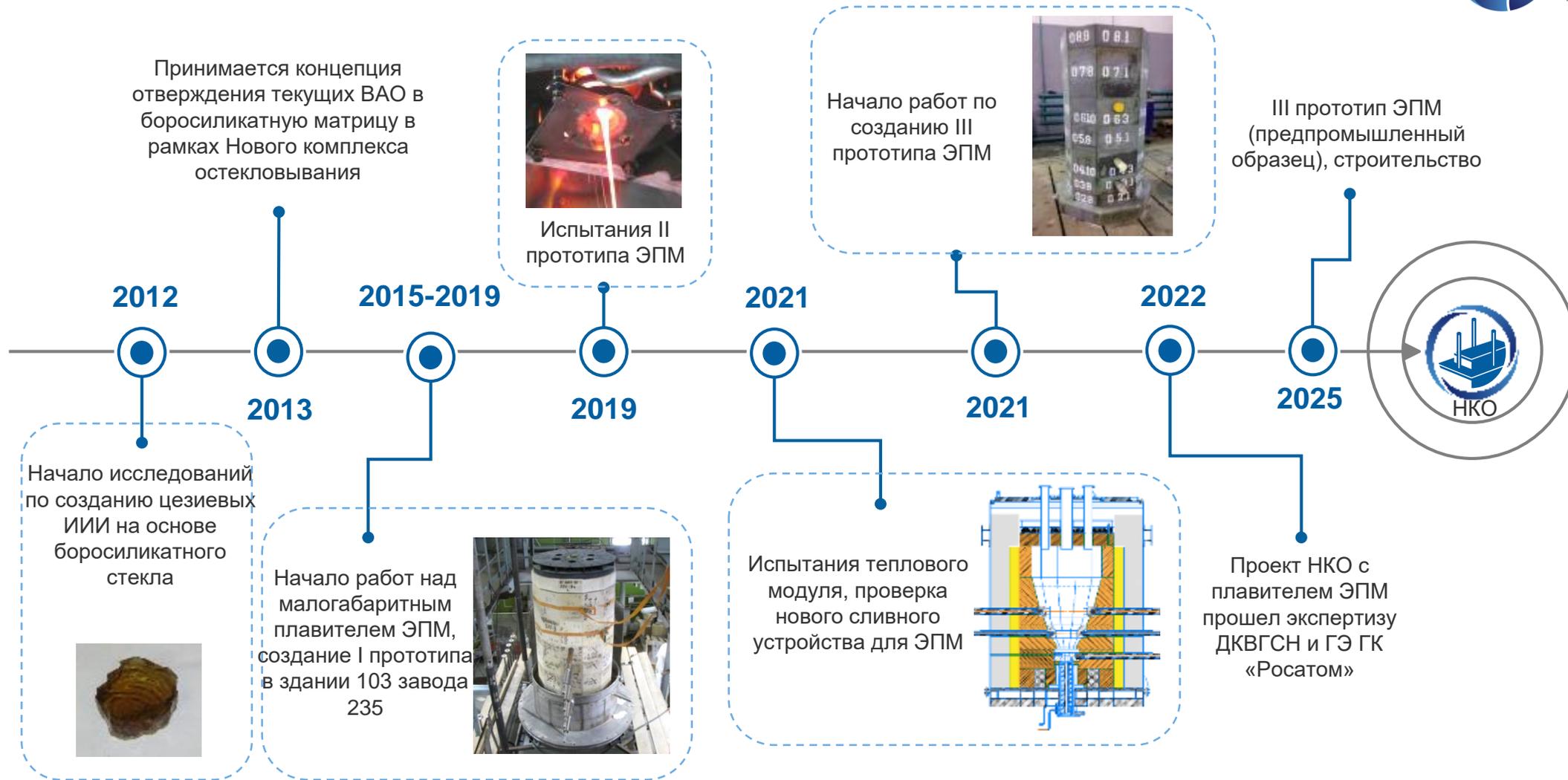


- В 2021 г. начато сооружение реактора БРЕСТ-ОД-300
- В 2024 г. ввод в эксплуатацию производства СНУП топлива
- В 2030 г. планируется ввод в эксплуатацию модуля переработки ОЯТ

Разработка малогабаритной печи остекловывания ФГУП «ПО «Маяк»



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ



13 лет

Неприемлемо

5 лет

не более



Цифровые двойники и кооперация для сокращения сроков разработки оборудования и внедрения

Цифровые двойники производств

- АО «ВНИИАЭС» и ИБРАЭ РАН - «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»
- АО «Прорыв» - ЦД МФР и его технологических линий (модуля фабрикации/рефабрикации смешанного уран-плутониевого нитридного топлива)
-



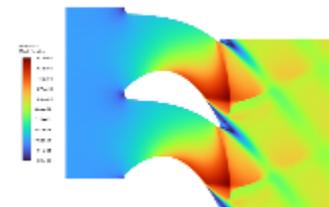
Цифровые двойники объектов / процессов

- АО «ВНИИНМ» - ЦД твэла
- В ООО «Центротех инжиниринг» - оборудование для гидрофторирования и работы с фторидами урана
- Передовая инженерная школа СПбПУ - ЦД печи остекловывания для ПО «Маяк»
-

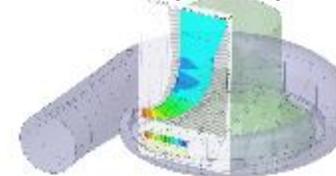
Принято считать, что разработка ЦД на этапе проектирования (конструирования) позволяет на 20 % снизить капитальные затраты и снизить затраты на эксплуатацию

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ (в 2d и 3d постановке)

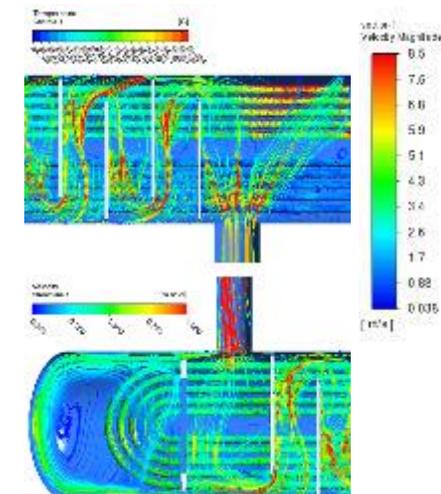
Обтекание решетки аэродинамических профилей



Центробежный компрессор



Теплообменный аппарат



Цифровые двойники радиохимического оборудования

Практически отсутствуют –
разработка системы цифрового
инжиниринга только начата

Проблема – имеющиеся системы не учитывают химические процессы, протекающие в оборудовании (тепловыделение, газовыделение, образование осадков, кинетика химических реакций)



Цифровой
НИОКР

Задача - совместить уже имеющиеся Цифровой НИОКР и отдельные (физико-химические и химические) модели, разрабатываемые для радиохимических процессов

Протекающие процессы



- Окисление – эндо- и экзотермические реакции.
- Тепловыделение за счет радиоактивного распада.
- Ионизация газа из-за радиоактивного распада.
- Изменение параметров кристаллической решетки.
- Разрушение таблетки.
- Выход летучих продуктов в газовую фазу:
 - собственная фаза элемента;
 - включение в кристаллическую решетку и в узлы, и в промежутки.
- Конденсация летучих продуктов на холодных частях оборудования.
- Витание порошков в газовом потоке и унос порошков из аппарата.

• ???????

Research Article

Engineering Design of a Voloxidizer with a Double Reactor for the Hull Separation of Spent Nuclear Fuel Rods

Young-Hwan Kim, Yung-Zun Cho, Jae-Won Lee, Ju-Hoo Lee, Sang-Chae Jeon, and Do-Hee Ahn

Hindawi

Science and Technology of Nuclear Installations

Volume 2017, Article ID 9854830, 12 pages

<https://doi.org/10.1155/2017/9854830>

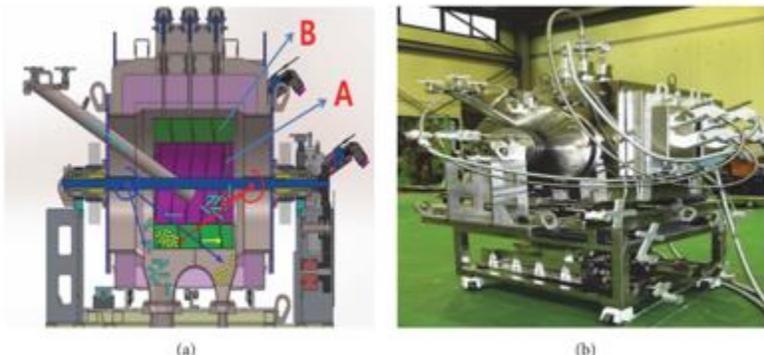
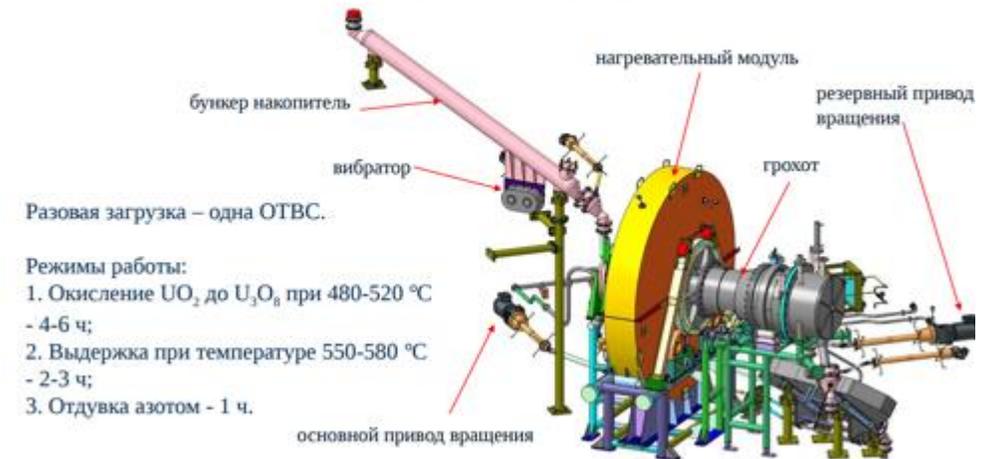


FIGURE 16: Optimized reactor and device: (a) double reactor; (b) voloxidizer.

Установка волоксации



Общий вид установки волоксации



Активация Windows
6
Чтобы активировать Windows



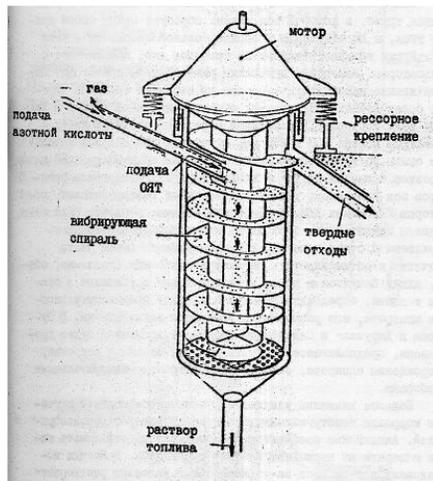
Отраслевой семинар:
«Обращение с тритий-содержащими РАО в процессе переработки ОЯТ. Технологии выделения и иммобилизации трития. Опыт эксплуатации пунктов глубинного захоронения ЖРО»
27-29 апреля 2024, г. Озерск

Имеющиеся модели

Процесс	Возможности модели
Волоксиядация	<p>Модель аппарата для волоксиядация смешанного нитридного и оксидного уран-плутониевого ОЯТ, описывающая стационарный режим работы и позволяющая определять:</p> <ul style="list-style-type: none">• характерное время, необходимое для полного окисления поступающего топлива;• зависимость концентрации кислорода в газовом потоке от координаты вдоль оси аппарата;• зависимость массы неокисленного топлива от координаты вдоль оси аппарата;• рабочую длину аппарата;• температуру стенок рабочего объема аппарата, необходимую для обеспечения нужного температурного режима процесса; распределение концентрации кислорода по длине реторты аппарата;• распределение количества неокисленного ОЯТ по длине реторты аппарата.

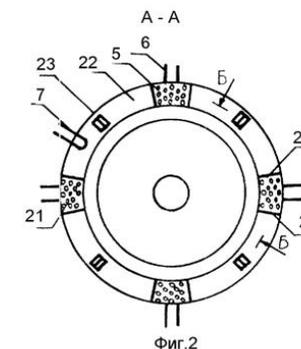
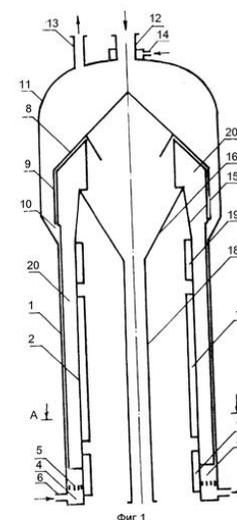
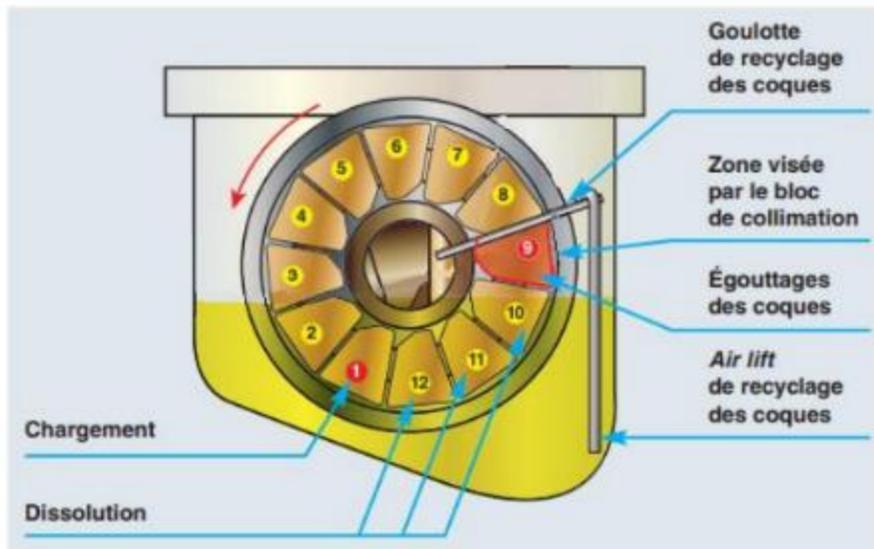
Моделей явно не достаточно

Протекающие процессы при растворении



Katsuurai K., Ohyama K., Kondo Y., Nomura K., Takeuchi M., Myochin M. Development of highly effective dissolution technology for FBR MOX fuels. // Proceedings of international conference on «Global 2009», Paris, France, September 6-11, 2009. — Paper 9219

- Окисление элементов
- Образование нитратов
- Эндотермические эффекты
- Образование осадков
- Газовыделение, в том числе, выделение водорода
- Изменение размеров таблеток и порошков (твердых частиц)
- Тепловыделение за счет радиоактивного распада
- Радиолиз воды и азотной кислоты



Устройство для растворения ядерного топлива измельченных тепловыделяющих сборок атомных реакторов: пат. 2105361. Рос. Федерация: МПК G21C19/38, G21C19/42, G21C19/44, G21C19/46/ Истомин В.Л., Рыжаков В.А., Самохотов С.А., Федосов Ю.Г.; заявитель и патентообладатель Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН — № 96103198/25; заявл. 20.02.1996; опубл. 20.02.1998, Бюл. № 28. 8 с.

Рисунок 4 – Зональная схема и фотографии вращающегося аппарата растворителя непрерывного действия на заводах UP-2 и UP-3 (Франция)

Доступных моделей нет

Цифровые двойники в радиохимических технологиях

Виртуальный Завод Радиохимических Технологий (ВИЗАРТ) – программный комплекс, предназначенный для математического моделирования переделов замыкающей части топливного цикла (переработки ОЯТ, производства топлива и обращения с РАО).

Применяется в расчетах баланса и циклограмм МФР и МП ОДЭК, ПРК, ОДЦ.

Может быть использован как составная часть цифровых двойников любого радиохимического производства.

Ближайшие задачи – технологические двойники:

- **Опытно-демонстрационный центр по переработке ОЯТ (2-ой пусковой комплекс, ФГУП ГХК).**
- **Модуль переработки ОЯТ Опытного энергокомплекса СХК.**
- **Новый завод по переработке ОЯТ.**

ВИЗАРТ обеспечивает:

- Расчет материального баланса радиохимических производств (масса, плотность, объёмы, химические и изотопные составы, абсолютные и удельные активности, тепловыделение).
- Оценку потребностей в ресурсах: материалов, реагентов, расходных компонентов, энергетики, воды....
- Оценки объемов и составов РАО.

ВИЗАРТ может быть использован, но требует доработки:

- Построение циклограмм работы оборудования.
- Оценки затрат на обращение с РАО.



Опытно-демонстрационный центр ФГУП «ГХК»



НАУКА
И ИННОВАЦИИ
РОСАТОМ

Опытно-демонстрационный центр для отработки технологий для строительства крупномасштабного завода по переработке ОЯТ.

Проектная мощность объекта: 220 тТМ/год ОЯТ ВВЭР-1000.

Принятые изменения в 2022 году – причина корректировки проекта и основных технологических отделений

- *Изменение конечных продуктов:*
 - *вместо порошка закиси-оксида урана – получение плава уранилнитрата;*
 - *вместо порошка смешанных оксидов U, Pu, Np – получение порошка диоксида плутония.*
- *Изменение процесса растворения ОЯТ.*
- *Изменения в оборудовании.*
- *Направление Np на операцию остекловывания.*
- *Совмещение отделений по обращению с жидкими САО.*

Результаты расчета материального баланса 2ПК ОДЦ в 2023 году

Отделение	Операция	Показатель	Значение в ИД	Значение по расчету	Величина Расчет/ИД
11	Растворение	Объем неосветленного раствора ОЯТ, м ³	1,40	2,24	1,60
13	Экстракция	Объем приходящего раствора, м ³	1,50	2,51	1,67
16	Упаривание САО	Объем подаваемого раствора, м ³	6,10	10,64	1,75
18	Упаривание ВАО	Объем подаваемого раствора, м ³	1,40	2,44	1,74
Зд. 26	Цементирование	Объем цемента, м ³	3,10	9,80	3,16

Задачи на 2025-2026 гг. и последующие годы

2025
Начальный этап

- матбалансы и циклограммы работы оборудования для проектной схемы ОДЦ ГХК;
- комплекс мат.моделей для описания гидродинамики, химии и тепловых процессов в аппаратах (растворитель, экстрактор);
- методика (алгоритм) разработки компьютерных моделей, с учетом радиохимических процессов.

2026
Промежуточный результат

- цифровое описание технологии 2ПК ОДЦ, корректировка технологической схемы;
- методология создания цифровых двойников оборудования радиохимических производств для технологов, разработчиков аппаратов и инженерно-технологического персонала.

2030
Конечный результат

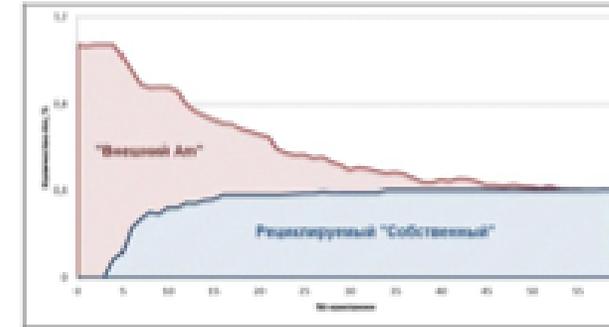
- верифицированный цифровой технологический двойник 2ПК ОДЦ;
- цифровые технологические двойники МП ОДЭК и нового завода;
- интеграция цифровых технологических двойников, цифровых двойников оборудования и объектов.

Создание цифровых двойников (технологических, оборудования и объектов) и внедрение их в практику проектирования – задача не отдельных дивизионов или проектов, а ОБЩЕОТРАСЛЕВАЯ

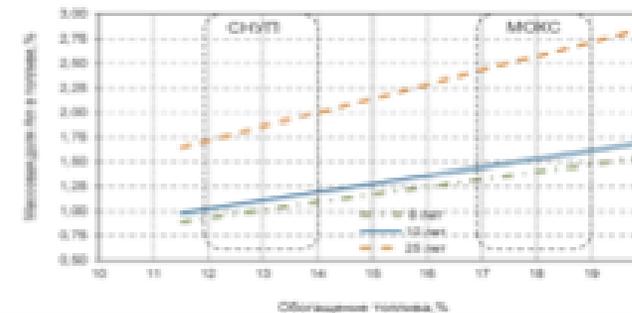
Утилизация плутония и америция



- Вариант соответствует стратегии использования Pu и MA из ОЯТ ВВЭР: MA совместно с Pu при формировании стартовой загрузки РБН и первых перегрузок с переходом РБН в режим самообеспечения и рецикла топлива с МА
- Схема позволяет гарантированно утилизировать МА ВВЭР совместно с Pu ВВЭР в РБН и кардинально решить проблему ОЯТ ВВЭР и МА РБН-1200
- РБН-1200 утилизирует (вовлекает в ЗЯТЦ РБН):
 - * 0,76 т нептуния (Np) из ОЯТ РТН
 - * 0,93 т америция (Am) из ОЯТ РТН
 - * 1,69 т МА (сумма Am и Np) из ОЯТ РТН



Массовая доля Am в топливе РБН в зависимости от облучения



Рекомендации по требуемой доле Am в топливе: СНУП – до 1.2 % т.а., МОКС – до 2.7% т.а.

Сбалансированная утилизация америция в РБН (гомогенный вариант)

Вариантов утилизации может быть несколько:

- В РБН – гомогенный или гетерогенной;
- В ЖСР.

Практически все варианты утилизации Am связаны с утилизацией Pu



Утилизация актиноидов как продуктов переработки ОЯТ, включая трансмутацию МА в энергетических РБН и двухкомпонентной ЯЭ РФ

Семинар НТС Госкорпорации «Росатом», 9 марта 2023 г.

Хомяков Ю. С.
АО «Прорыв»



Первый шаг к ЗЯТЦ с уран-плутониевым топливом
сделан – из плутония, выделенного из ОЯТ ВВЭР,
изготавливается свежее МОКС топливо для БН-800
Следующий шаг – выделить плутоний из МОКС
ОЯТ БН-800 и вернуть его в реактор



Задача – обеспечить переход к ЯЭС IV поколения
на базе РБН и ЗЯТЦ на уран-плутониевом топливе

Спасибо за внимание!

Шадрин Андрей Юрьевич

AnYShadrin@rosatom.ru

19-23.05.2025