



Институт высокотемпературной электрохимии
Уральского отделения Российской академии наук

Забабахинские научные чтения (19-23 мая 2025 г., г. Снежинск)

Экспериментальное обоснование пирохимической переработки смешанного нитридного уран-плутониевого отработавшего ядерного топлива

Зайков Юрий Павлович
Холкина Анна Сергеевна
Ковров Вадим Анатольевич
Потапов Алексей Михайлович

ИВТЭ УрО РАН





Энергетическая стратегия РФ до 2035 года

Утверждена Распоряжением Правительства РФ
от 09.06.2020 № 1523-р



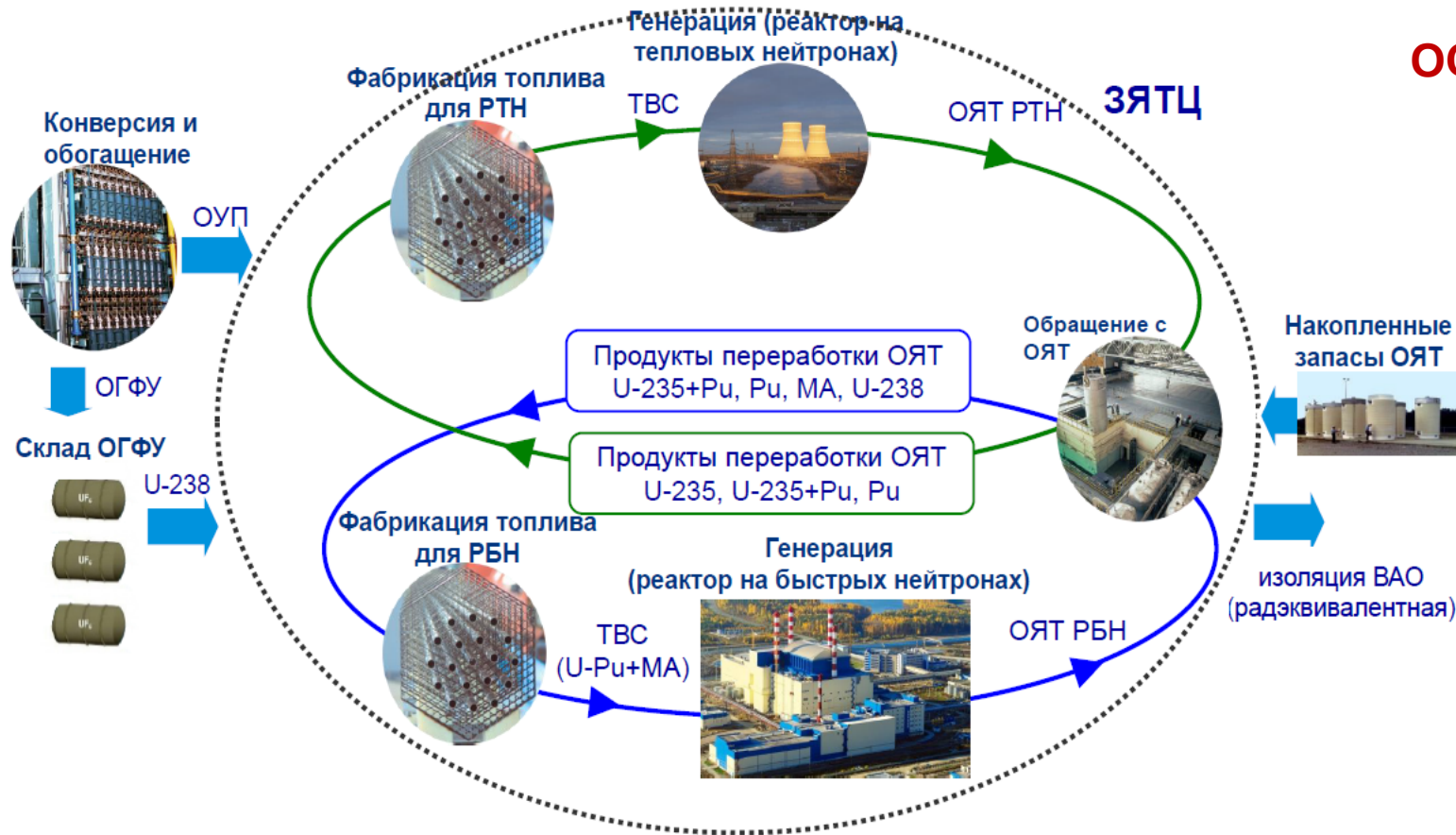
Стратегия развития ЯЭ России до 2050 года

Утверждена Стратсоветом
Госкорпорации Росатом от 11.04.2022

- РФ лидирует в создании новой технологии атомной энергетики, основанной на параллельной эксплуатации реакторов на тепловых и быстрых нейтронах, объединённых замкнутым ядерным топливным циклом
- Такая система способствует решению проблем воспроизводства ядерного топлива, минимизации РАО и соблюдению режима нераспространения ЯМ
- Будущее ядерной отрасли России и её стабильное развитие связано с формированием двухкомпонентной ЯЭ и переходом к замкнутому ЯТЦ
- Задача развития ЯЭ на горизонте до 2050 года связана с выполнением поручения Президента РФ по увеличению доли ЯЭ в энергобалансе страны до 25% к 2045 году

Дорожная карта сооружения АЭС в РФ до 2045 г.:

2023 год: 37 действующих энергоблоков (29,6 ГВт)
2045 год: ввод 48 новых энергоблоков (+32,4 ГВт)



ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ЗЯТЦ:

- расширение ресурсной базы ЯЭ
- исключение накопления облучённого ядерного топлива
- технологическая поддержка режима нераспространения ЯМ
- переработка, утилизация и рецикл основных актинидов (U, Pu)
- выжигание долгоживущих нуклидов (MA)
- достижение радиационной и радиоэкологической эквивалентности РАО

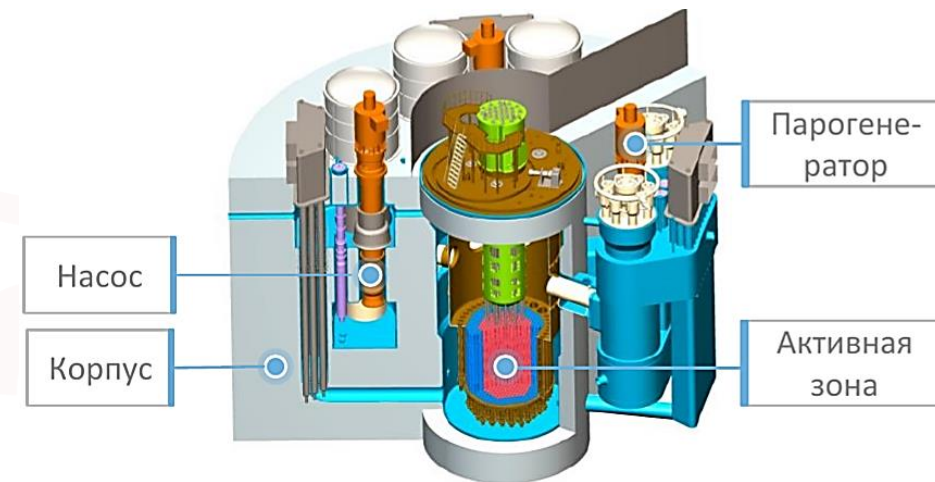
Обобщённая схема ЗЯТЦ двухкомпонентной ядерной энергетики

БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ – ОСНОВА ЗЯТЦ (2)



БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем:

- «плотное» нитридное топливо (СНУП)
- «естественная безопасность» - детерминистическое исключение тяжёлых реакторных аварий
- теплоноситель первого контура – расплавленный свинец

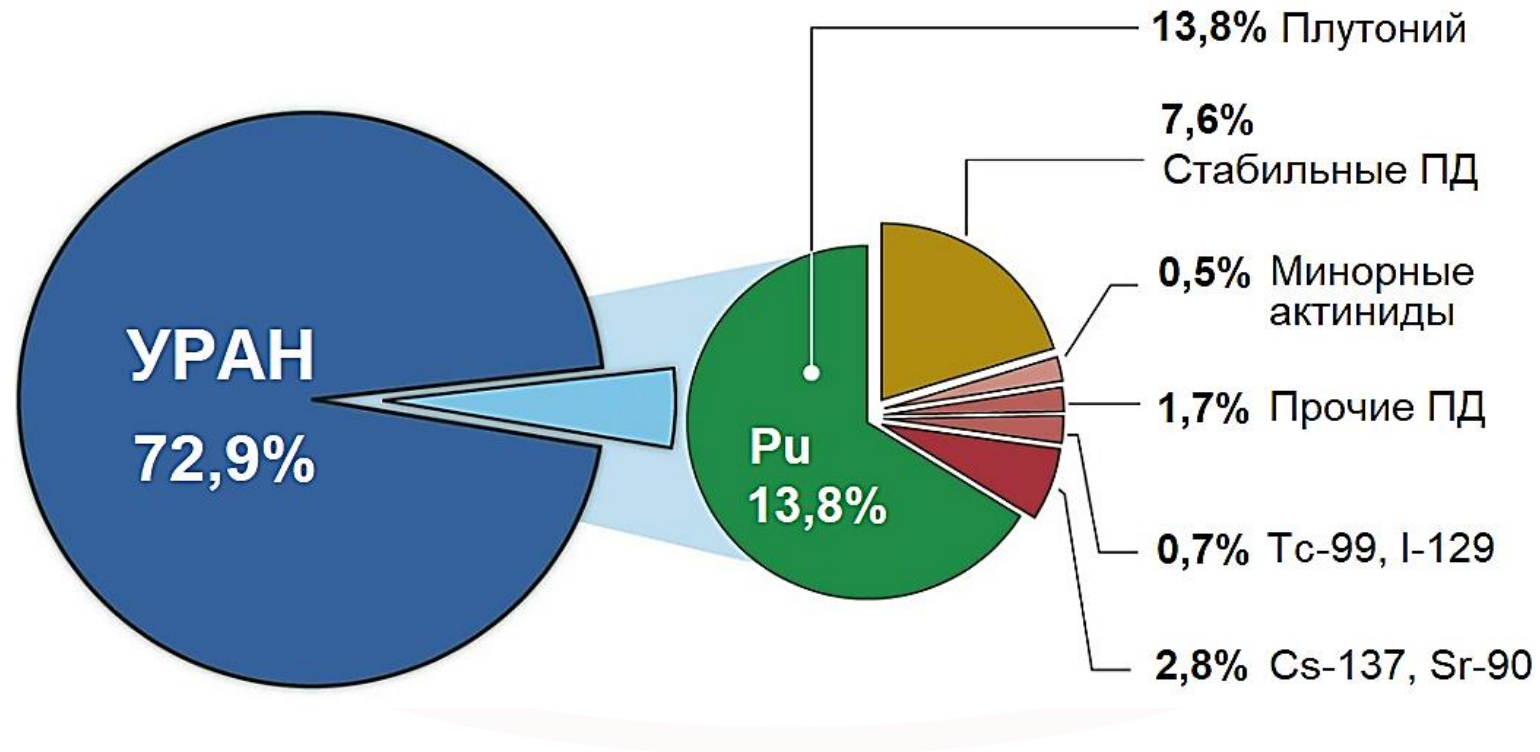


Опытно-демонстрационный комплекс (ОДЭК):

- ОДЭК – полный топливный цикл на одной площадке (изготовление ЯТ, быстрый реактор, переработка ОЯТ и обращение с РАО)
- промышленное освоение СНУП-топлива
- переработка ОЯТ с малой выдержкой и демонстрация короткого ЯТЦ (2-3 года)



ОТРАБОТАВШЕЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО (ОЯТ)



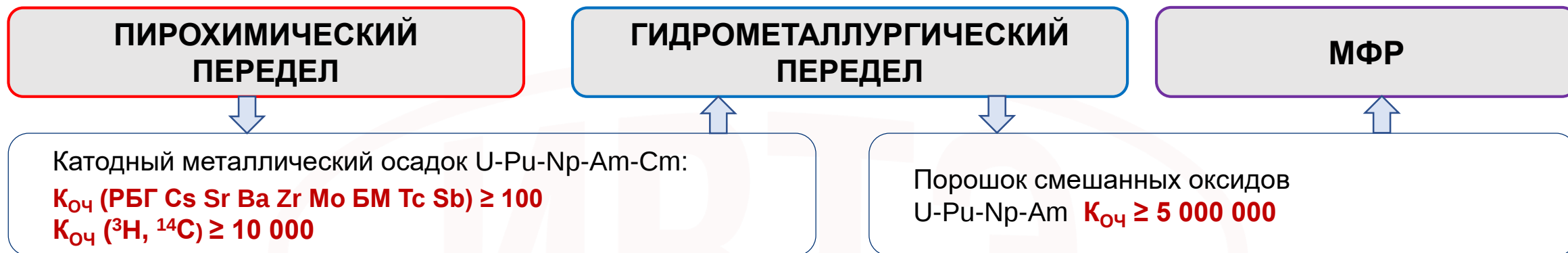
СНУП ОЯТ с выгоранием 10% т.а. и выдержкой 1 год (ВРХ) и 1 год вне ВРХ:

- ❑ тепловыделение – 7,9 кВт на тонну ОЯТ
- ❑ активность – $7,25 \times 10^{16}$ Бк на тонну ОЯТ

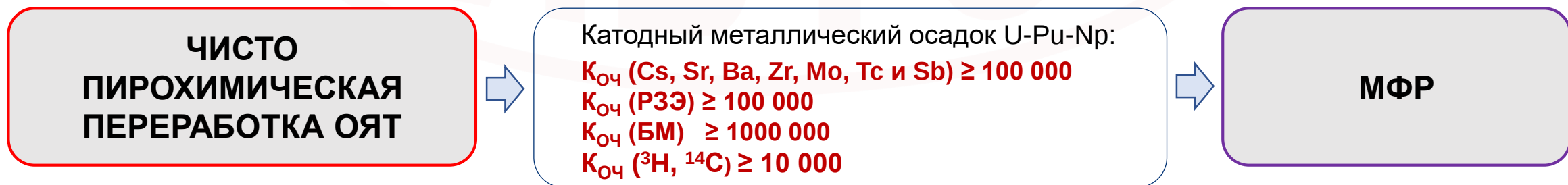
ТРЕБОВАНИЯ К ОЧИСТКЕ ДМ от ПД



КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ:



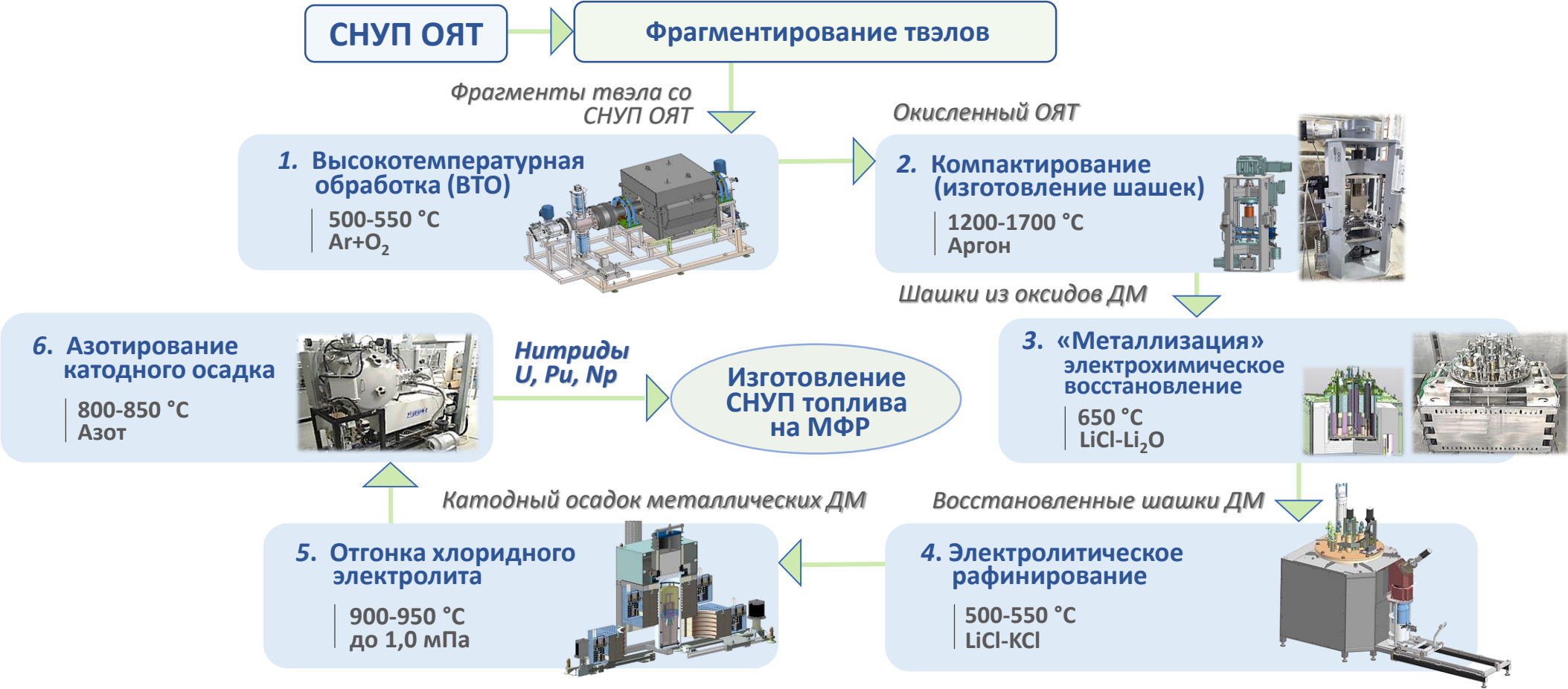
ЧИСТО ПИРОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ:



* «Исходные данные на проектирование МП ОДЭК» (корректировка, вариант 2). Книга 1. АО «Прорыв». Инв. №740-инв/2-кт от 29.05.2023 г.

** «ТЗ на разработку обlikового проекта «Промышленный энергокомплекс на базе РУ БР-1200» (ГК Росатом, инв. № 72ТЗ от 06.07.2016 г.)

СХЕМА ПИРОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ РБН



КОЭФФИЦИЕНТЫ ОЧИСТКИ ДМ ОТ ПД



Коэффициенты очистки рефабрицированных актинидов от ПД (РАСЧЁТ)*			Коэффициенты очистки от ПД в ходе пирохимической переработки ОЯТ (ЭКСПЕРИМЕНТ: МЯТ, СНУП МЯТ)			
$K_{\text{оч}}$ (ИОД)	$1 \cdot 10^2$	I	$K_{\text{оч}}$ (^3H , ^{14}C)	$1 \cdot 10^4$	ВТО Компактирование	✓
$K_{\text{оч}}$ (ЩМ/ЩЗМ)	50 $5 \cdot 10^2$	Ba, Cd Cs	$K_{\text{оч}}$ (ЩМ/ЩЗМ)	$1 \cdot 10^4$ Ba, Sr $1 \cdot 10^5$ Cs, Rb	«Металлизация»	✓
$K_{\text{оч}}$ (РЗЭ)	50 $1 \cdot 10^2$ $5 \cdot 10^2$	La Ce, Pr, Gd Nd, Sm	$K_{\text{оч}}$ (РЗЭ)	$1 \cdot 10^3$ Ce, La, Nd	Электролитическое рафинирование	✓
$K_{\text{оч}}$ (Благородные)	$2 \cdot 10^2$ $5 \cdot 10^2$ $1 \cdot 10^3$	Zr, Ag Mo, Rh, Tc Pd, Ru	$K_{\text{оч}}$ (Благородные)	10^5 Pd, Rh, Ru, Mo	Электролитическое рафинирование	✓

* Техническая справка «Рекомендации по коэффициентам очистки актинидов от продуктов деления для многократного рецикла в замкнутом ядерном топливном цикле реакторов на быстрых нейтронах» (Тихомиров Г.В., Хомяков Ю.С. и др.)

ОТРАБОТКА ПРОЦЕССОВ И ОПЫТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ

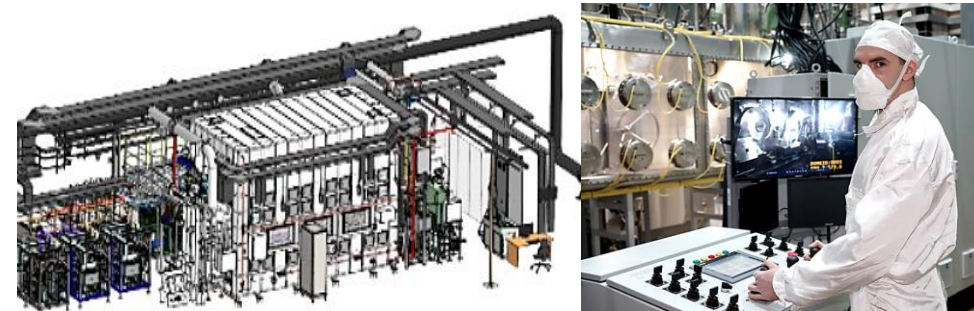


Экспериментальный участок «Камера» в АО «СХК»

В АО «СХК» введён в эксплуатацию уникальный экспериментальный комплекс «Инертная камера» для испытаний опытных установок.

Оригинальные технические решения в конструкции камеры и кессонное оформление проходок обеспечивают требуемую чистоту аргона 1-5 ppm по кислороду и воде.

Получен опыт изготовления и монтажа камеры, необходимый при создании МП ОДЭК, в проекте которого более 10 камер с инертной атмосферой.



Участок «Камера» АО «СХК»

График испытаний опытных установок 2022-2026 гг.:



ВТО испытан 2022 г



Компактирование
испытан 2023 г



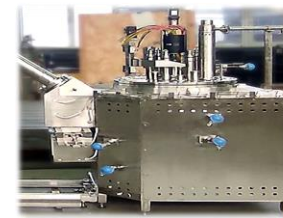
«Металлизация»
испытан 2024 г



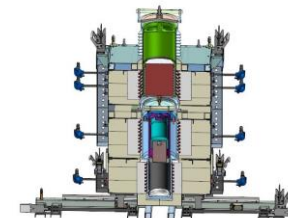
Очистка от эл-та
испытан 2024 г



«Переплав и
изготовление анодов»
испытания 2025 г



«Электролитическое
рафинирование»
испытания 2025 г



«Переработка
катодного осадка»
испытания 2026 г

ОБРАЩЕНИЕ С ОТХОДАМИ ПИРОТЕХНОЛОГИИ (РАО)



Основные продукты, направляемые на кондиционирование (РАО)

1. Отработавший электролит на основе LiCl с ПД
2. Продукт на основе оксидов РЗЭ
3. Продукт на основе благородных ПД (Pd, Mo, Rh)
4. Керамические детали установок

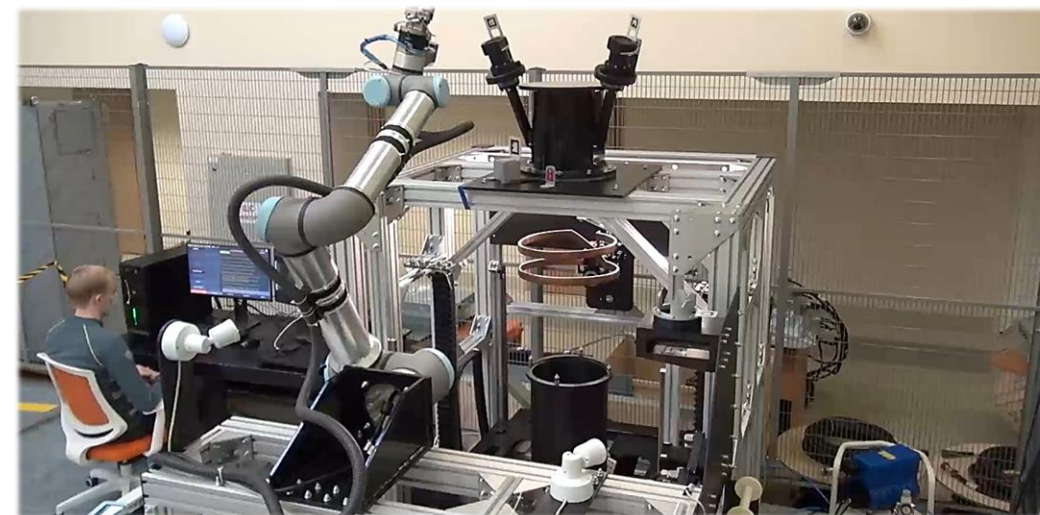
Отработаны операции остекловывания нецелевых продуктов ПИРО в полномасштабной установке ИПХТ на имитаторах. Подтверждено соответствие полученных продуктов НД.



Образцы продуктов остекловывания (РАО)



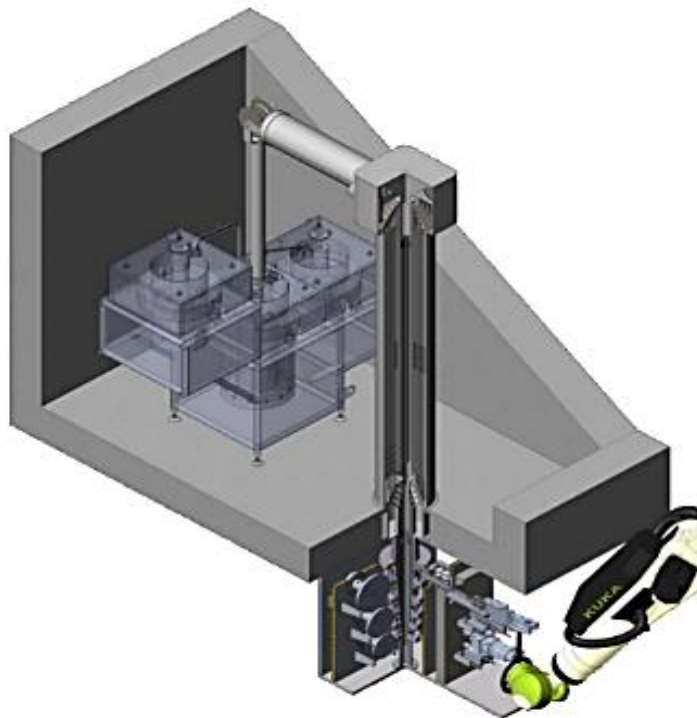
Полномасштабная установка остекловывания ВАО на основе ИПХТ в процессе приготовления стекла и выливки продукта



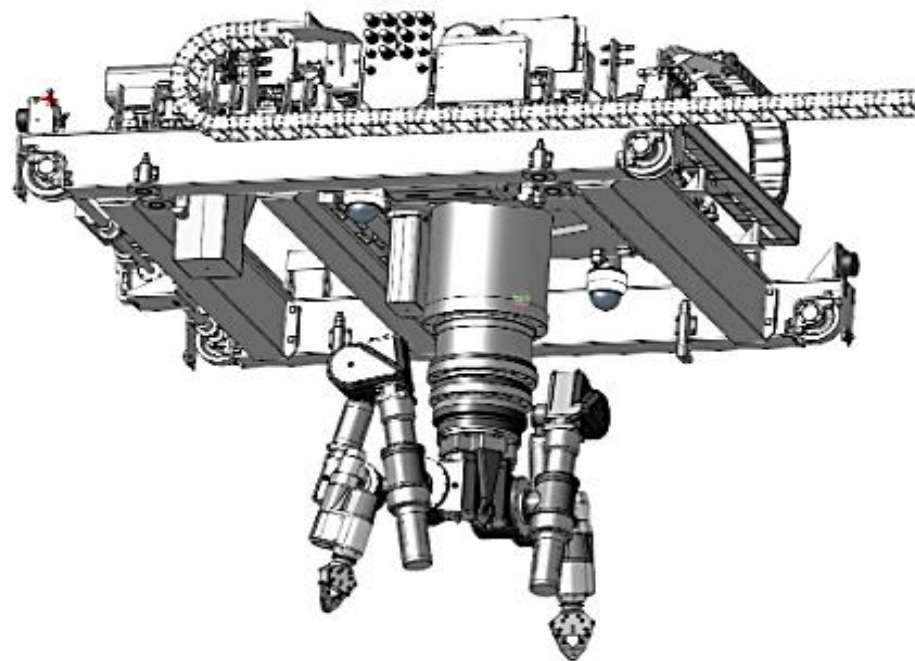
Экспериментальный стенд роботизации установки остекловывания ВАО



Роботизированный
комплекс ТИП II
АО «Диаконт»



Роботизированный
радиационностойкий
комплекс «ЦНИИ РТК»



Транспортный порталный
манипулятор
АО «НПФ Сосны»

ОБСЛУЖИВАНИЕ И РОБОТИЗАЦИЯ ВНУТРИКАМЕРНЫЙ МАНИПУЛЯТОР



Особенности конструкции:

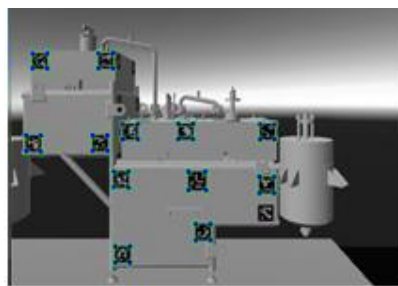
- Система полых валов для передачи момента
- Линейный привод – ШВП
- Все двигатели и датчики – вне камеры (рад. стойкость)
- Основание – динамическое уплотнение герметизирующей жидкостью (масло ПФМС-АС, ИНЭОС РАН)

Характеристики ВКМ:

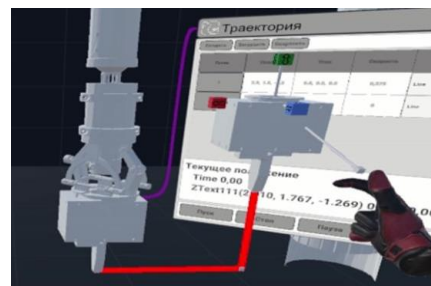
- зона обслуживания: $R_p = 651,5 - 2451,5$ мм
- грузоподъемность в основной зоне: до 150 кг;
- повторяемость траектории манипулятора: 2 ± 1 мм ($p = 95\%$)



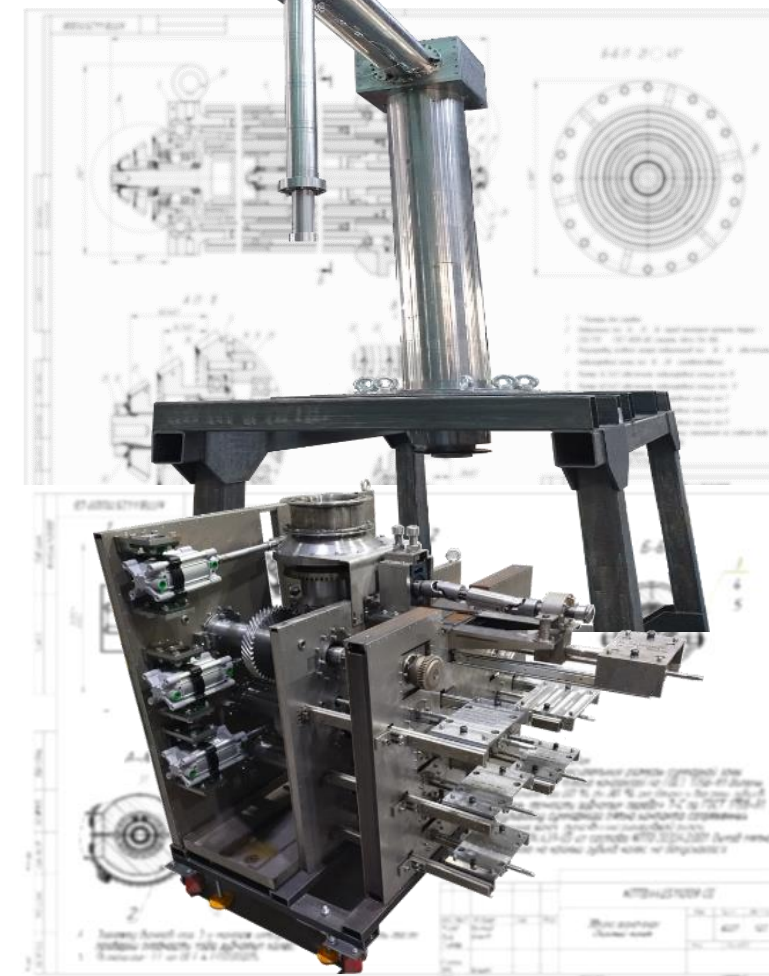
3D-модели оборудования для виртуальной среды



Маркеры системы технического зрения



Задание траектории манипулятора



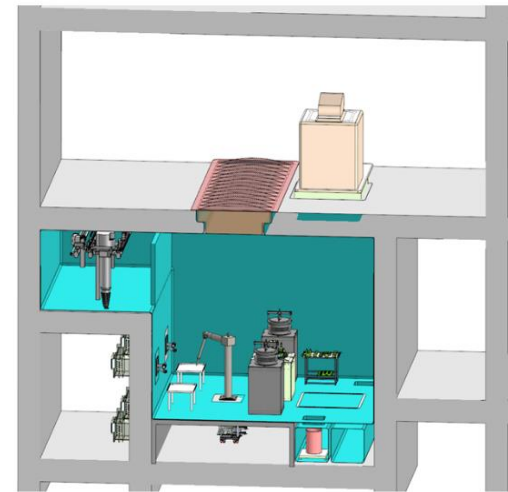
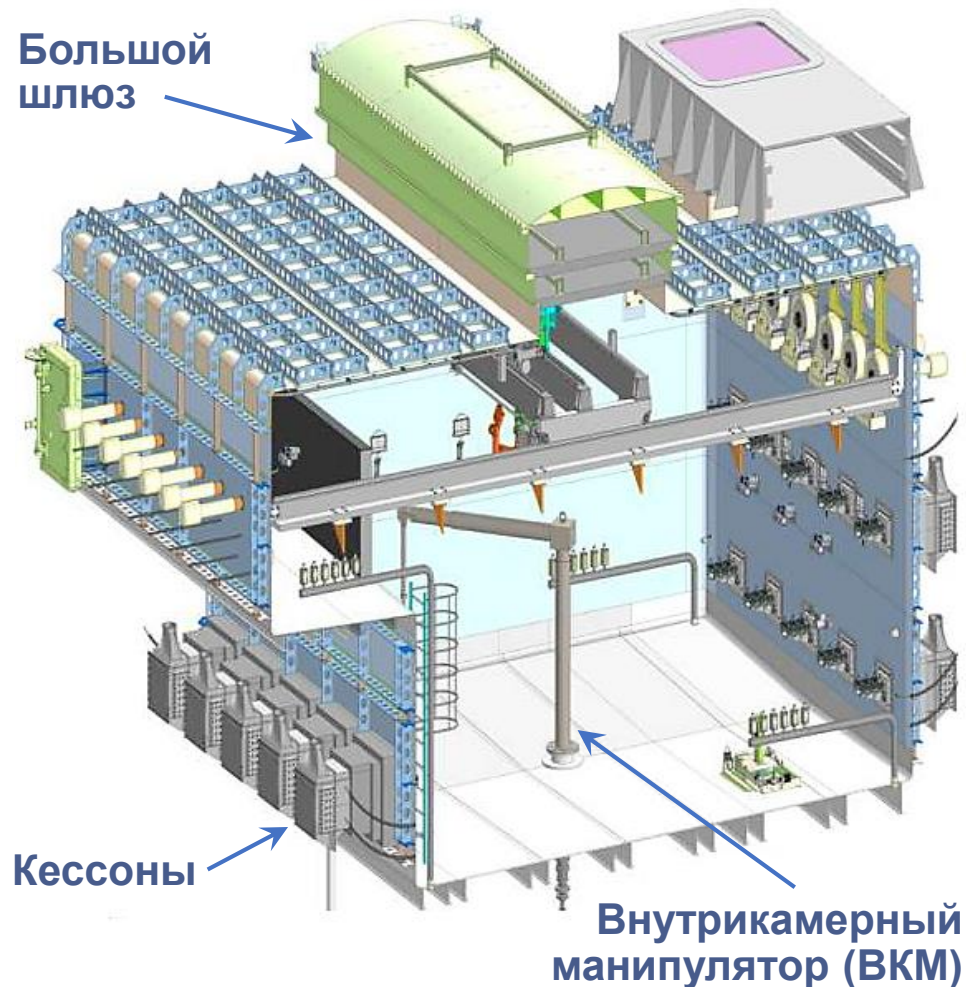
Внутрикамерный манипулятор (ВКМ) с коробкой отбора мощности

ГЕРМЕТИЧНАЯ КАМЕРА ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ

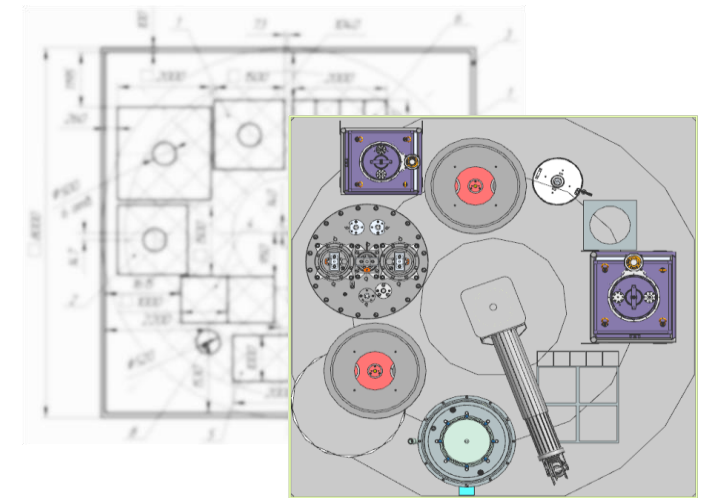


Атмосфера – АРГОН: $\text{H}_2\text{O} \leq 1 \text{ ppm}$; $\text{O}_2 \leq 10 \text{ ppm}$; $\text{N}_2 \leq 50 \text{ ppm}$

1. Внутрикамерный манипулятор (ВКМ)
2. Транспортный манипулятор
3. Система регенерации (очистки) аргона
4. Система рециркуляции и охлаждения аргона
5. Шлюзы технологические
6. Кессоны для подключения обеспечивающих систем



Размещение Камеры



Концентрическая компоновка
оборудования вокруг ВКМ

РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ РБН



Институт высокотемпературной электрохимии
Уральского отделения Российской академии наук

Модуль переработки опытно-демонстрационного энергетического комплекса
МП ОДЭК (АО «Сибирский химический комбинат», ЗАТО «Северск», Томская обл.)

ИВТЭ УрО РАН - научный разработчик технологии, головной исполнитель НИОКР.

АО «СХК», г. Северск - эксплуатирующая организация

АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград - отработка процессов на реальных объектах

АО НПФ «Сосны», г. Димитровград - конструктор экспериментального оборудования

ЦНИИ РТК, г. Санкт-Петербург – роботизация технологии на МП ОДЭК

АО «ВНИИНМ», г. Москва - кондиционирование отходов и обращение с РАО

1. Разработаны ИД и ИТТ по технологии и оборудованию пирохимической переработки ОЯТ.
2. Разработано и утверждено Техническое задание на выполнение проектно-изыскательских работ «Проектная документация «Строительство модуля переработки отработавшего ядерного топлива реакторов на быстрых нейтронах, Акционерное общество «Сибирский химический комбинат», ЗАТО «Северск», Томская область».



**Модуль переработки опытно-демонстрационного энергокомплекса
с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300**



КОЛЛЕКТИВ ИВТЭ УрО РАН – НАУЧНЫЙ РАЗРАБОТЧИК ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ





Институт высокотемпературной электрохимии
Уральского отделения Российской академии наук

Спасибо за внимание!



Email: info@ihte.ru

www.ihte.ru

