



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Цапко Сергей Геннадьевич

26.11.2025



РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТА

Разработка, изготовление и испытание гибридного средства измерения для неразрушающего контроля концентрации смеси актинидов (U, Pu, Am, Cm, Np) в технологических растворах ядерного топливного цикла.

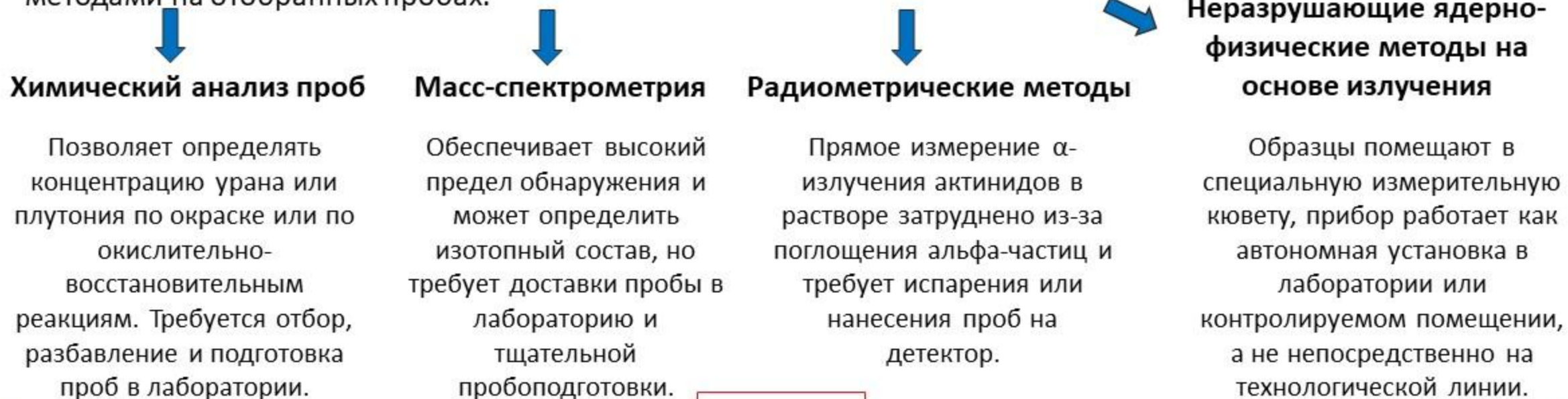
Прибор сочетает методы рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и К-краевой рентгеновской денситометрии, что позволяет проводить прямой (безпробоотборный) анализ состава высокоактивных растворов в реальном времени.

Гибридное средство измерения обеспечивает оперативный и точный мониторинг технологических процессов переработки отработавшего ядерного топлива, повышая ядерную безопасность и эффективность производства.

Работы выполнены в Томском политехническом университете в рамках проекта «Приоритет-2030».

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

В настоящее время контроль актинидов в технологических растворах осуществляется лабораторными методами на отобранных пробах.



Проблема

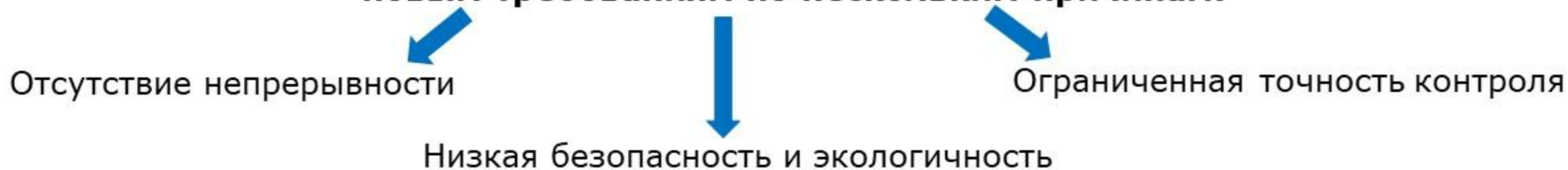
Не дают результата в режиме реального времени, требуют пробоотбора и сложной инфраструктуры, а также вовлекают персонал в работу с радиоактивными материалами, что снижает оперативность и безопасность анализа.

Скорость традиционного анализа измеряется часами или сутками, тогда как технологический процесс требует более быстрых решений.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ

Площадки, такие как АО «Сибирский химический комбинат» (СХК), реализуют технологии переработки отработавшего ядерного топлива и фабрикацию смешанного топлива (МОКС), где необходимо полное извлечение урана, плутония и минорных актинидов из ОЯТ и возврат их в цикл.

Традиционные методы контроля состава не удовлетворяют новым требованиям по нескольким причинам:



Без оперативного контроля концентраций на всех стадиях переработки возникают риски:



НАУЧНАЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМЫ

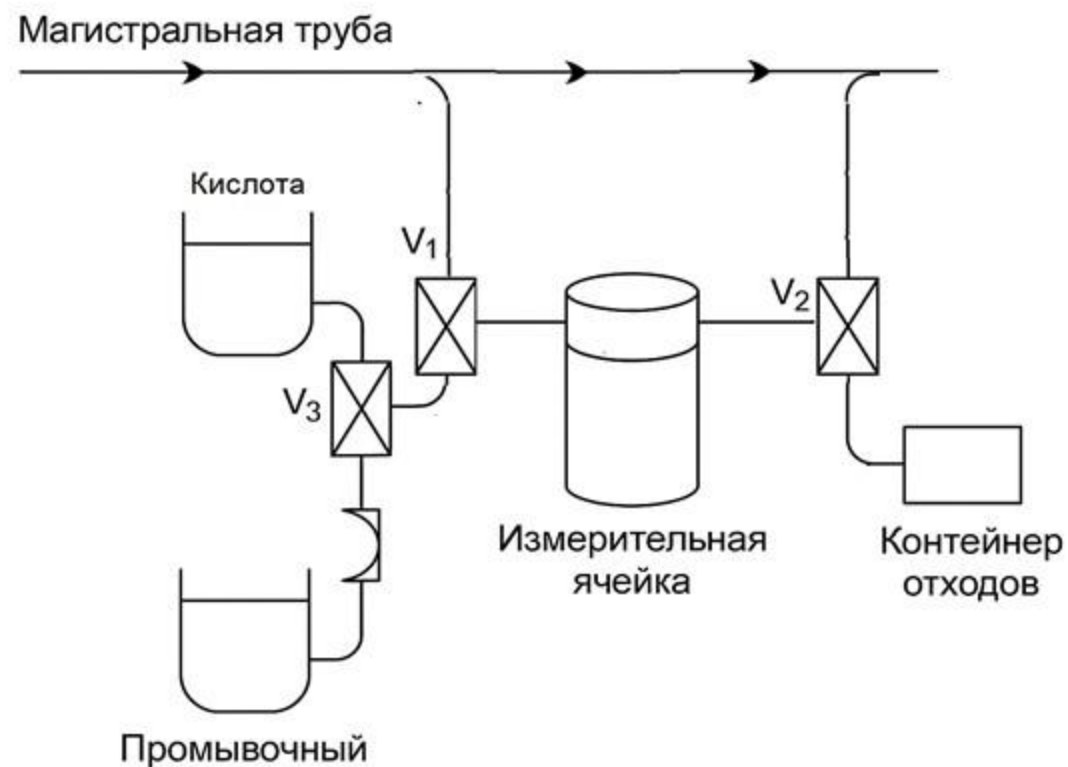
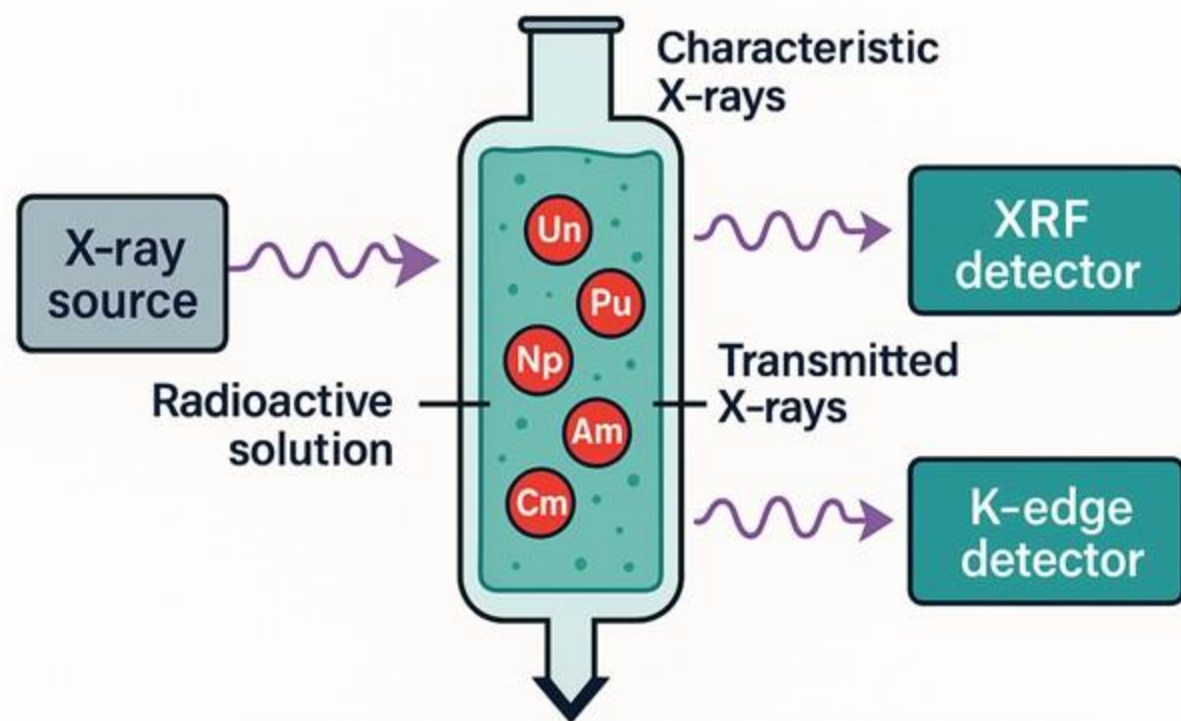
Отсутствие оперативных методов количественного анализа актинидов в жидких технологических средах без отбора проб.

Традиционные подходы (например, лабораторный химический анализ проб или масс-спектрометрия) не позволяют получать результаты в реальном времени.

Отбор проб в зонах с высоким радиационным фоном несёт риски облучения персонала и приводит к образованию дополнительных радиоактивных отходов.

Отсутствие на предприятиях готовых безпробоотборных средств контроля приводит к информационному разрыву при управлении технологическими процессами и потенциально снижает уровень ядерной безопасности.

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ



ДОСТОИНСТВА ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

Достижение высокой точности и чувствительности измерения сразу нескольких актинидных элементов без прямого отбора проб.

Одновременное определение концентрации нескольких актинидов в экстремальных условиях радиохимических производств.

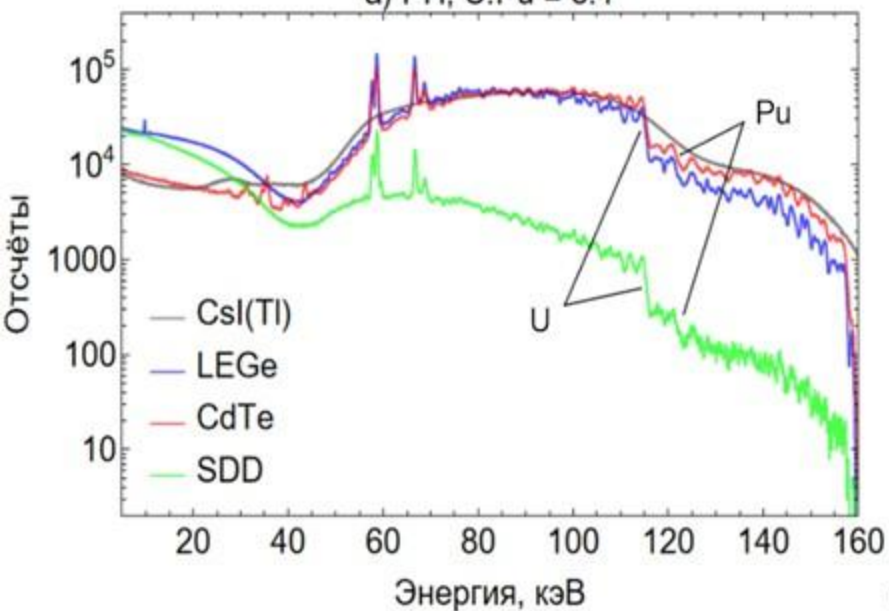
Исключение регулярного ручного отбора проб значительно снижает дозовые нагрузки на персонал и риск радиационного воздействия.

Повышение экологической безопасности: детальный контроль и учёт актинидов.

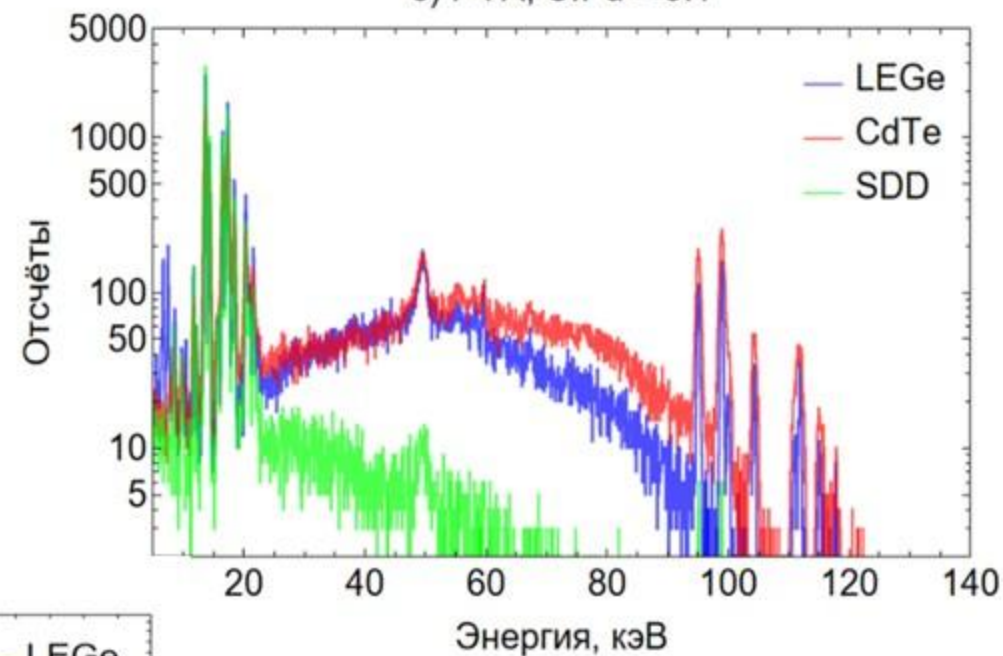
Контроль концентрации урана, плутония и минорных актинидов на всех стадиях переработки – от исходных растворов до выделенных целевых фракций.

ВЫБОР ДЕТЕКТОРА

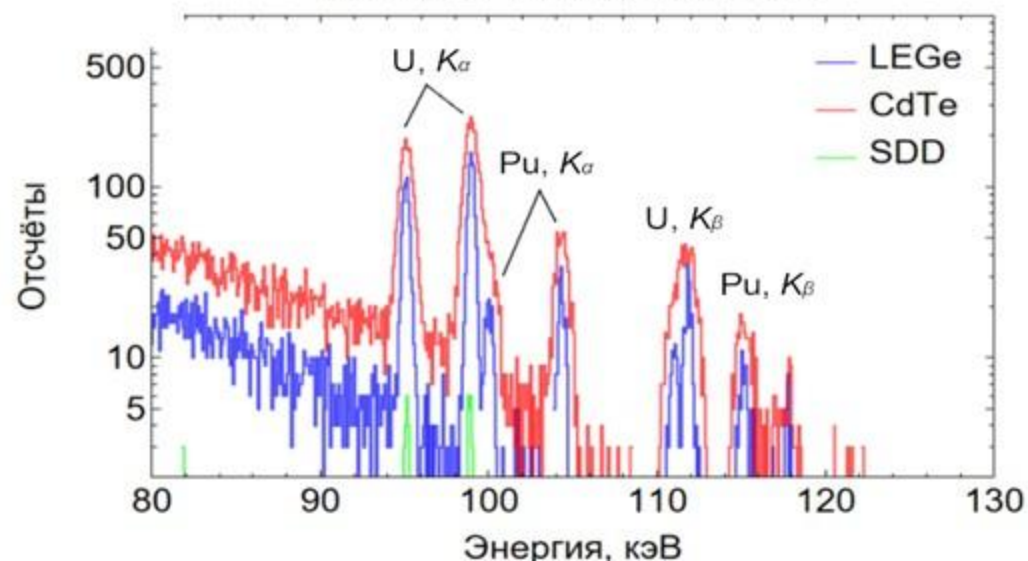
а) РП, U:Pu = 3:1



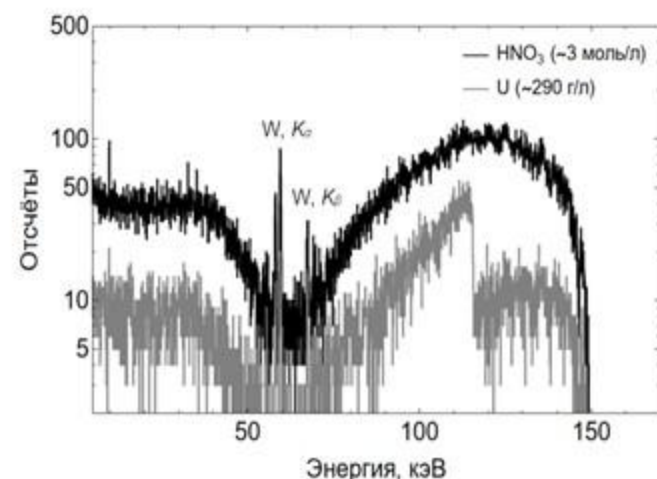
б) РФА, U:Pu = 3:1



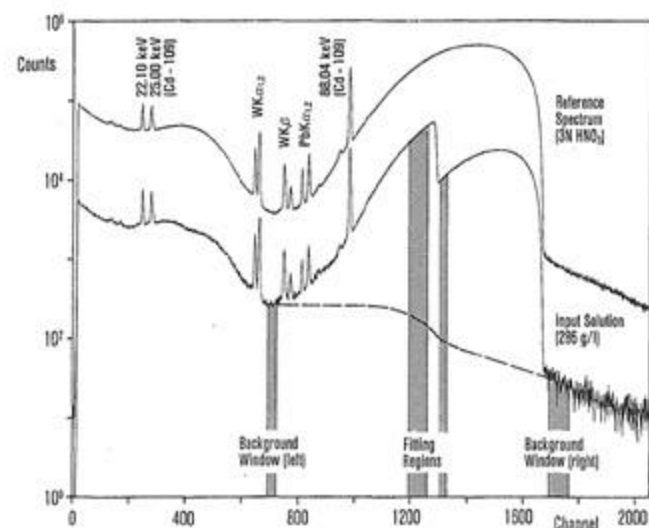
в) РФА (K-линии), U:Pu = 3:1



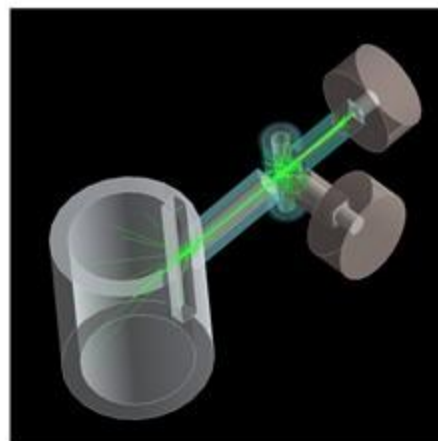
РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В GEANT4



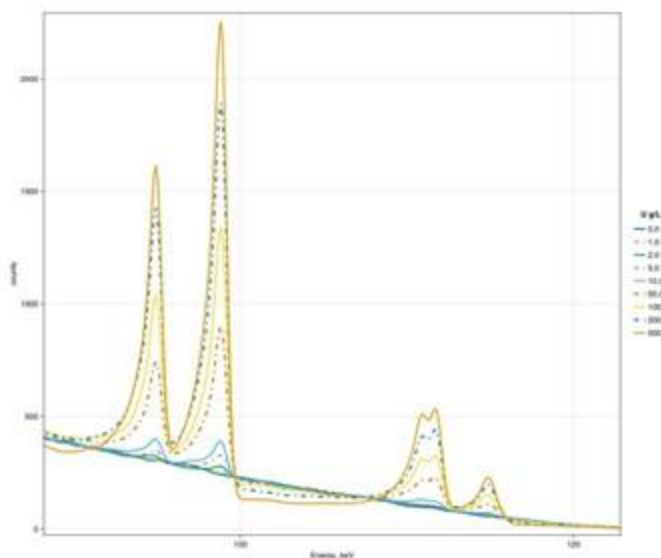
Результат моделирования



Результат физического эксперимента



Геометрия модели

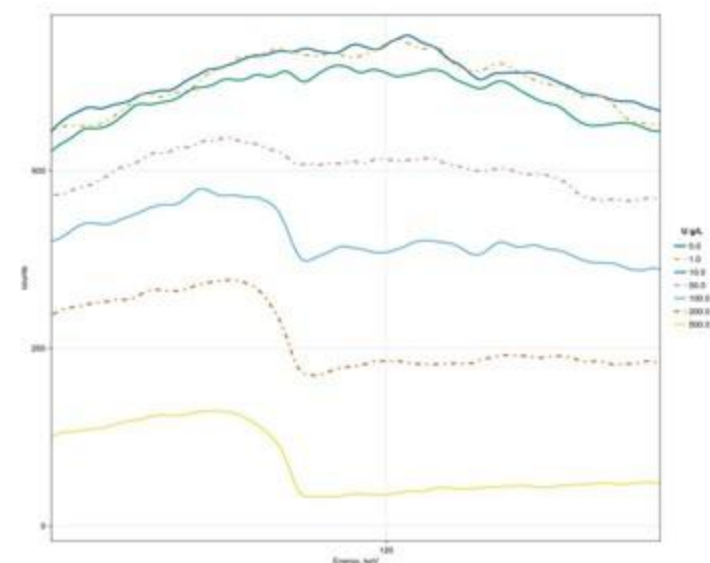


Спектр РФА

Результаты моделирования

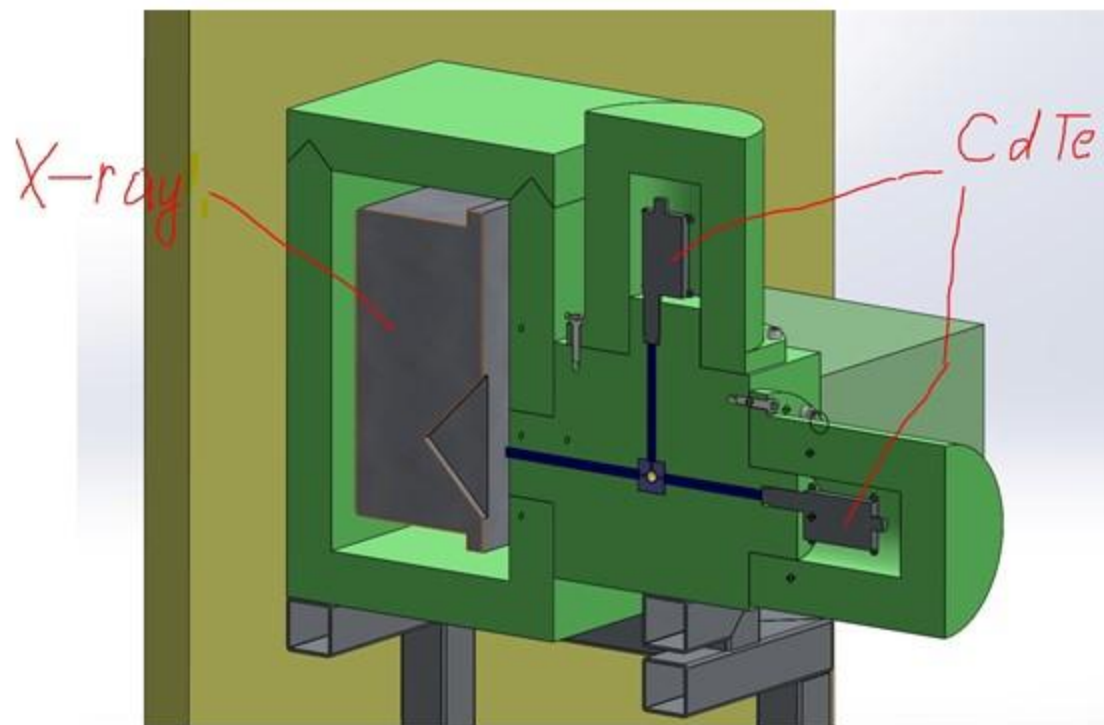
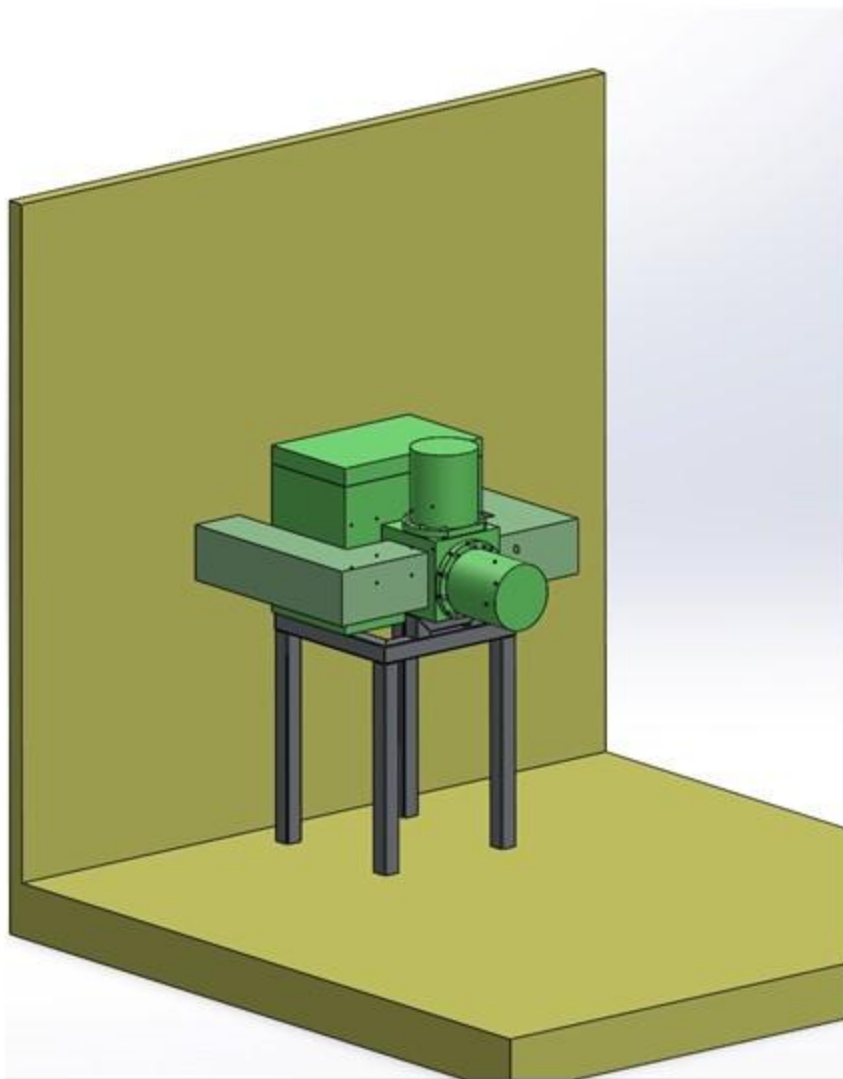
Денситометрия: Возможна оценка плотности U вплоть до 50 г/л возможна оценка до 20 г/л или меньше при большем времени моделирования.

РФА: Гарантировано видна чувствительность до 1 г/л, однако ограничение вызвано малой статистики из-за длительности моделирования.

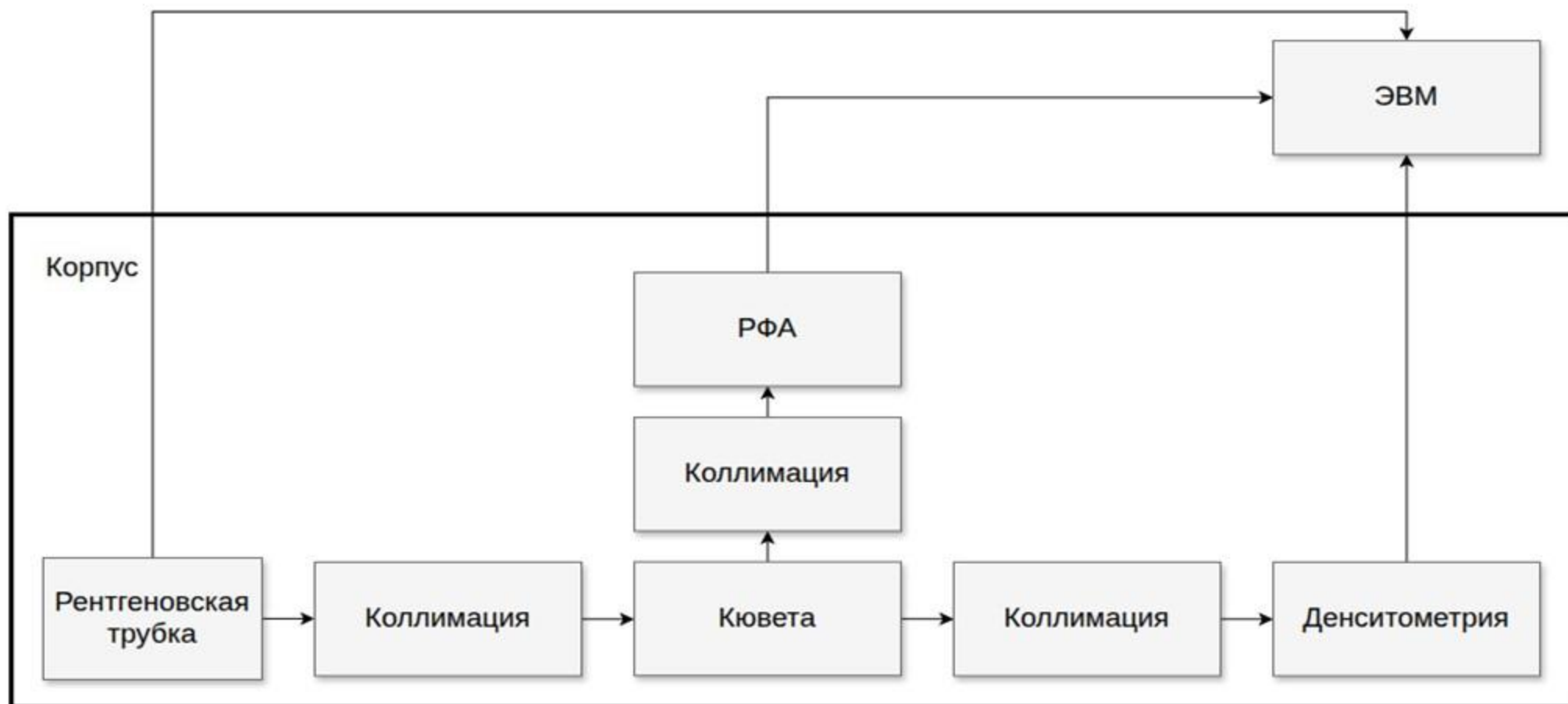


Спектр денситометрии по краю поглощения

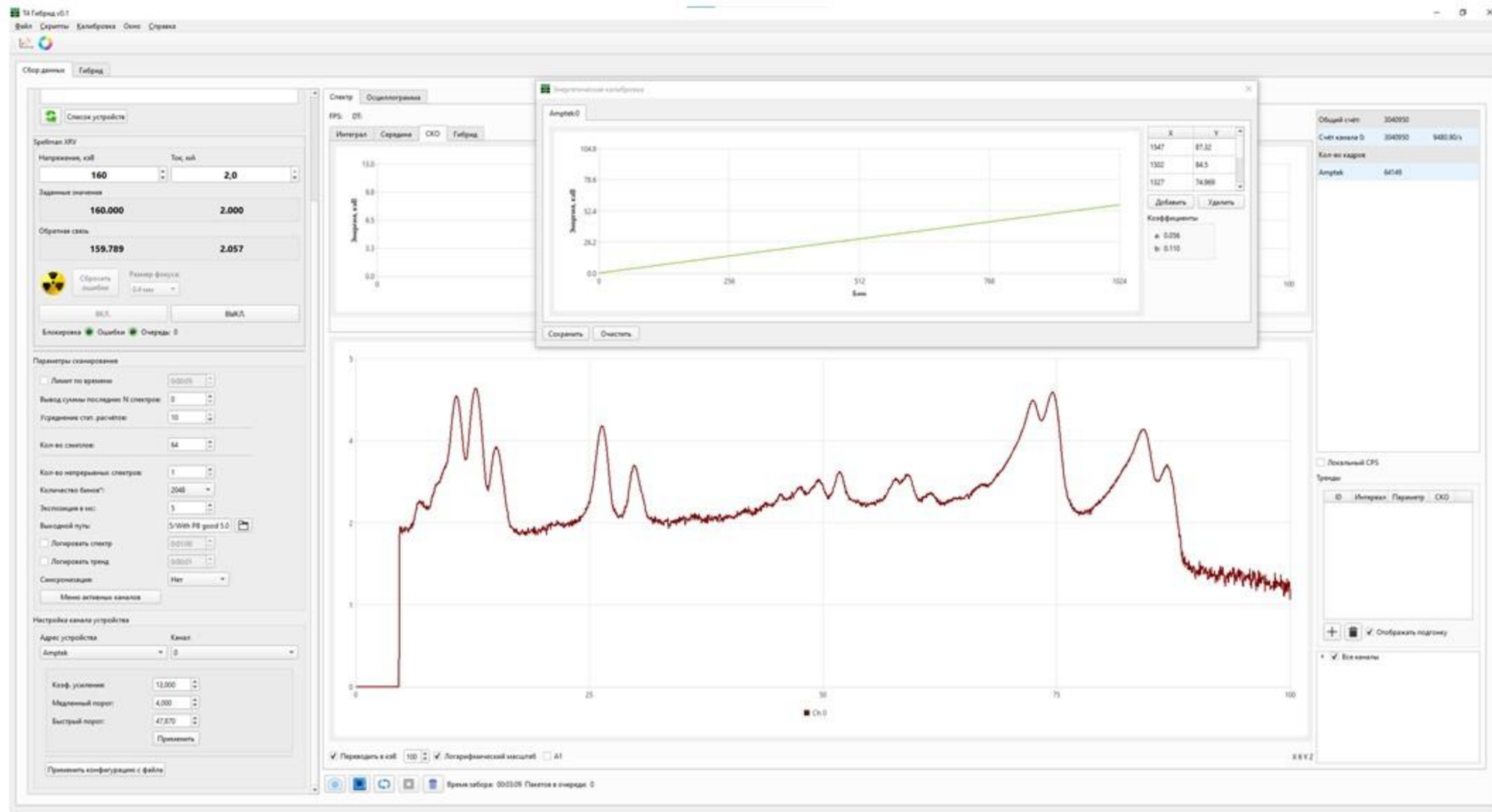
ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА УСТРОЙСТВА (КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА)



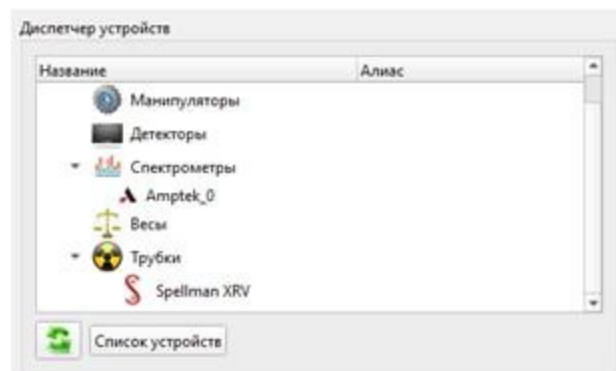
СХЕМНОЕ РЕШЕНИЕ



ОСНОВНОЙ ИНТЕРФЕЙС ПО



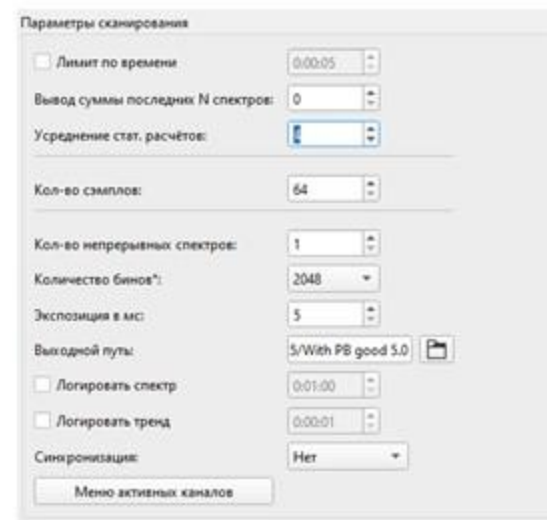
ОСНОВНОЙ ФУНКЦИОНАЛ ПО



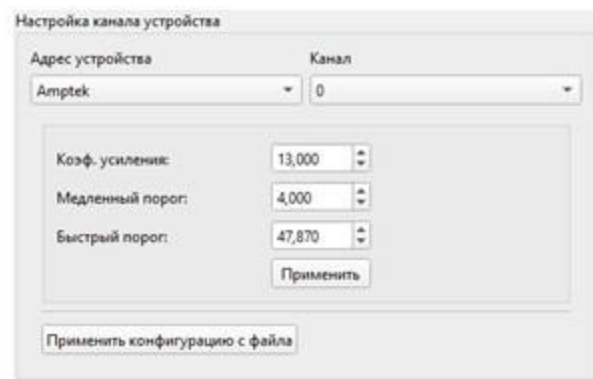
Диспетчер устройств



Управление источником питания



Запись спектра и параметры сканирования



Настройка детектора

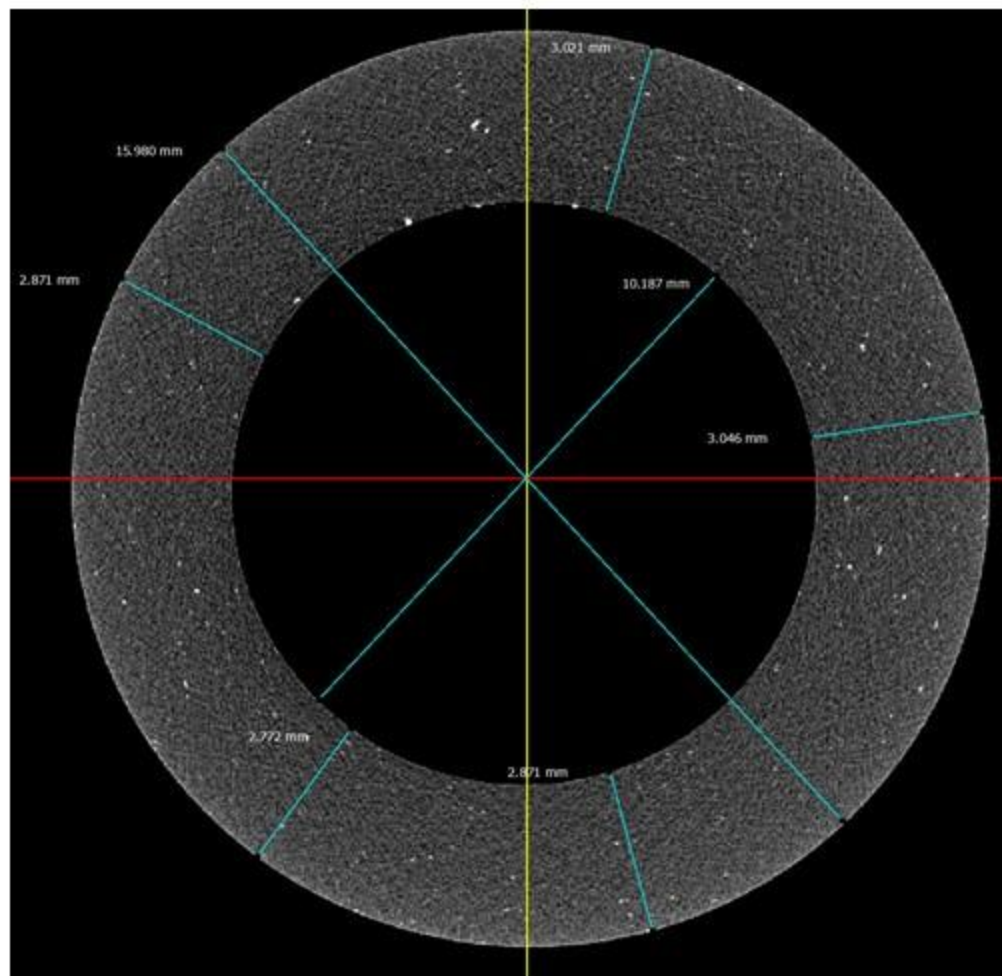


Энергетическая калибровка бинов

КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ

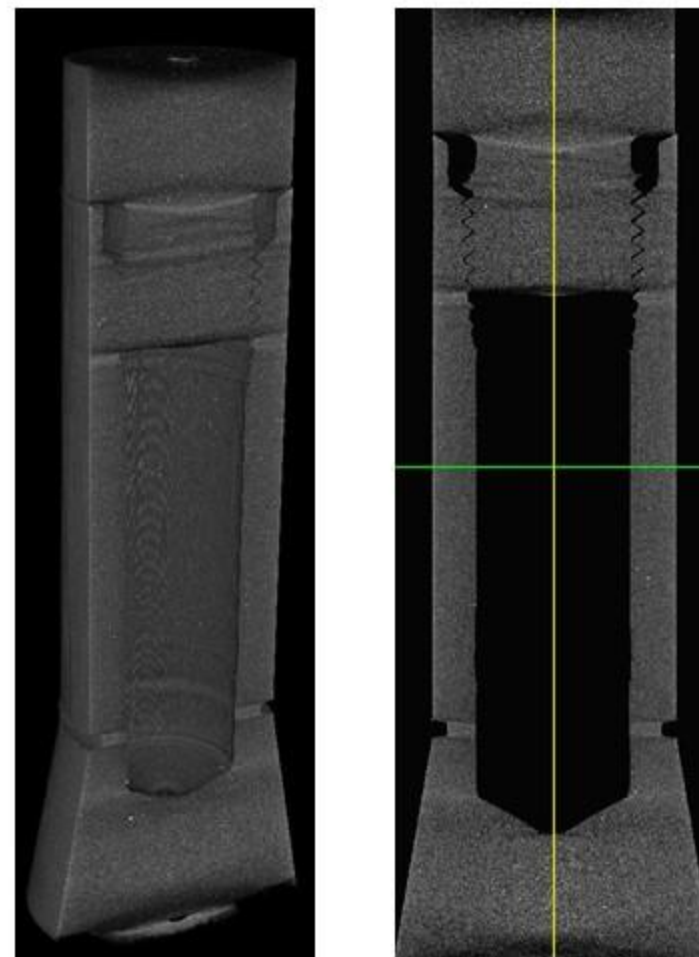


ИССЛЕДОВАНИЕ КЮВЕТЫ (ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ)



Анализ на основе КТ

- Экспериментальная оценка диаметров для коррекции анализа
- Оценка равномерности распределения материала
- Инспекция наличия дефектов
- Оценка соосности

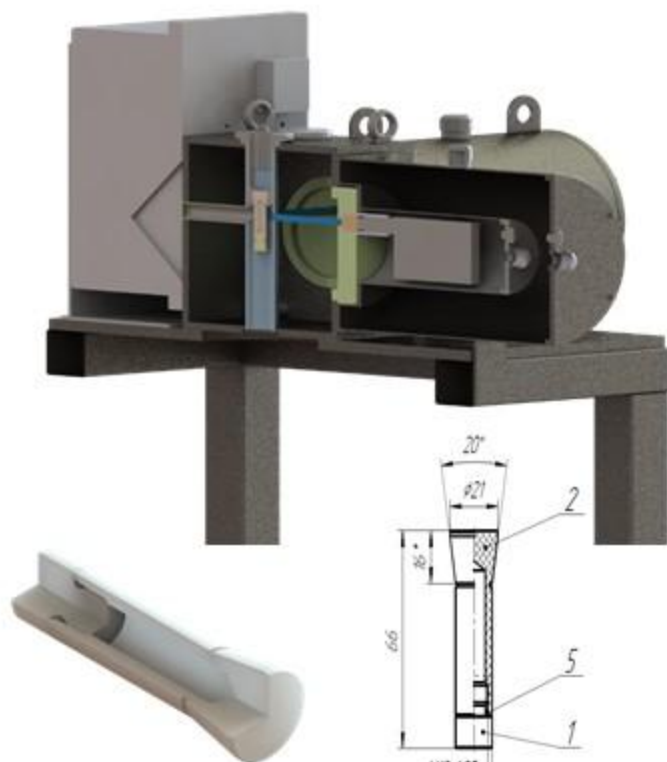


Реконструкция кюветы

ИСПЫТАНИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ КСА В ТР



РЕЗУЛЬТАТ-ПЛАН



Описание результата:

Гибридный рентгеновский денситометр-концентрамер:

- Гибридное средство измерения для неразрушающего контроля концентрации смеси актинидов в технологических растворах ядерного топливного цикла;
- Специализированная измерительная ячейка из полиэфирэфиркетона с самоцентрированием;
- Программное обеспечение сбора и анализа спектрометрических данных.

Эффект (ценность):

- **30%** снижение операционных затрат;
- **100%** автоматизация производства;
- Переход к безлюдному производству;
- Отечественное специализированное программное обеспечение.

Текущий статус разработки : TRL 6

Изготовлен экспериментальный образец. Проведены испытания приближенные к реальным условиям.

Соответствие разработки:

Высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика, технологии создания энергетических систем с замкнутым топливным циклом. технологии создания отечественных средств производства и научного приборостроения, новые атомные и энергетические технологии.

Заказчик/Потенциальный потребитель:

АО «СХК», ФГУП «ГХК», АО «ЧМЗ», ФГУП «Маяк»

РЕЗУЛЬТАТ-ПЛАН

Период получения результата:

2023-2027

Стоимость разработки:

30 млн. рублей

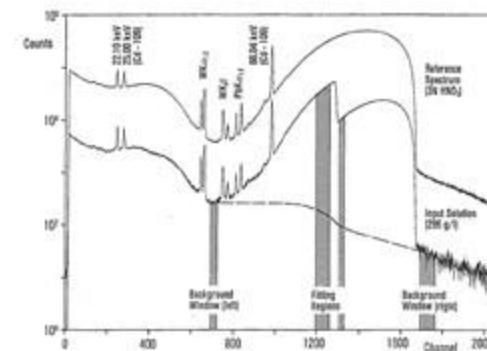
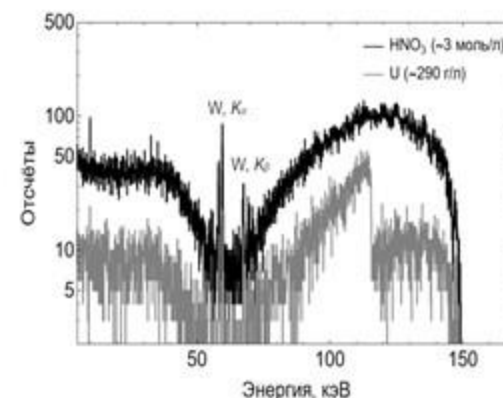
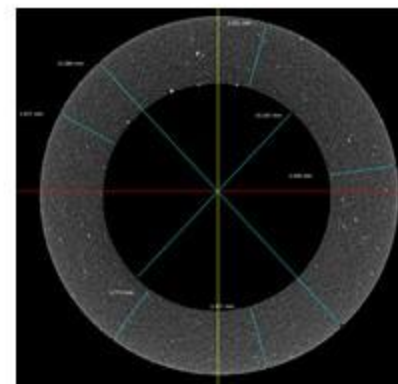
Ожидаемый объем выпуска: до 7 шт/год

Внедрение разработанного гибридного рентгеновского денситометра-концентратора на всех заводах по переработке ОЯТ.

Экономический эффект от внедрения устройства оценивается в диапазоне от 150 млн. руб. до 3,76 млрд руб. в год в зависимости от масштаба установки, стоимости радиохимической пробы и цены 1 кг регенерированного материала.

Оценка степени локализации: 40%

Целевая 70+ (2030 г.)



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

