



**I Международная
научно-практическая
конференция
ЯДЕРНЫЕ ЗНАНИЯ В XXI ВЕКЕ
Сборник научных трудов**

**26 ноября 2025 года
Минск, Беларусь**



СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Введение

Средства и способы переработки отработанного ядерного топлива и замыкания ядерного топливного цикла предполагают не только разработку технологических схем разделения и кондиционирования материалов, но и обеспечение инструментальной базы для их надежной, безопасной и верифицируемой эксплуатации [1]. Современное развитие атомной энергетики неразрывно связано с решением задачи замыкания ядерного топливного цикла. Переход к замкнутому циклу позволяет решить несколько фундаментальных проблем: повторно использовать ценные делящиеся материалы, такие как уран и плутоний, сократить объем высокоактивных отходов, подлежащих захоронению, и дополнительно получить до 25-30% энергии, которая теряется при разомкнутом цикле. Однако промышленная реализация замкнутого ядерного топливного цикла сопряжена с серьезными технологическими вызовами, среди которых ключевым является отсутствие надежных и точных средств оперативного контроля критически важных технологических параметров [2].

Традиционные лабораторные методы радиохимического анализа обладают высокой точностью, но они принципиально не могут обеспечить оперативный контроль над процессами в реальном времени из-за своей длительности, необходимости ручного отбора проб и последующей сложной подготовки образцов. Без метрологически обеспеченных непрерывных измерений методами неразрушающего контроля интервалы между радиохимическими анализами остаются слишком большими, увеличивается неопределённость балансов, риск непреднамеренных потерь и транзакционных ошибок при передаче материалов между производственными стадиями [3]. Как следствие, снижается общая эффективность и безопасность всего процесса переработки.

Таким образом, создание средств неразрушающего контроля, способных предоставлять точную и метрологически обоснованную информацию в режиме онлайн, становится не просто желательным улучшением, а обязательным условием для практической реализации концепции замкнутого ядерного топливного цикла в промышленных масштабах.

Основная часть

Авторами статьи предложено использовать гибридное средство измерений, которое сочетает в себе два независимых физических метода: рентгенофлуоресцентный анализ и денситометрию. Такой комбинированный подход позволяет преодолеть ограничения, присущие каждому из методов в отдельности.

Рентгенофлуоресцентный анализ обеспечивает количественное спектральное определение элементного состава раствора, в то время как денситометрия, измеряя плотность, предоставляет дополнительные данные, позволяющие компенсировать матричные эффекты и эффекты самоэкранирования, существенно повышая итоговую точность и достоверность измерений. Гибридный принцип работы устройства позволяет с высокой точностью определять концентрации не только урана и плутония, но и минорных актинидов в сложных многокомпонентных технологических потоках без необходимости какого-либо отбора проб (рис. 1).

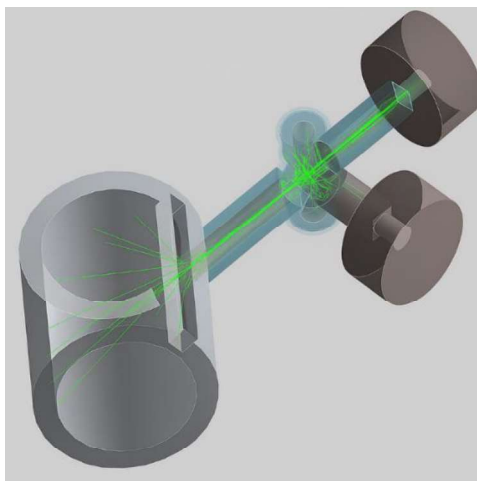


Рисунок 1. Схематичное представление гибридного устройства

Предлагаемый подход позволяет обеспечить радиационную безопасность персонала и непрерывность технологического процесса.

Новизна предлагаемого решения заключается не только в самом гибридном подходе, но и в комплексной интеграции этих методов в единое устройство, оснащенное специализированной измерительной ячейкой, изготовленной из радиационно-стойкого полимера – полиэфирэфиркетона. Конструкция ячейки включает систему самоцентрирования, что обеспечивает стабильность и воспроизводимость измерений в условиях интенсивного химического и радиационного воздействия, характерных для реальных производственных условий на радиохимических предприятиях (рис. 2).



Рисунок 2. 3-Д модель кюветы

Дистанционное управление прибором, с помощью разработанного специализированного программного обеспечения, позволяет проводить измерения и настраивать прибор вне воздействия ионизирующего излучения. Архитектурно программное обеспечение разделено на два ключевых модуля: модуль управления аппаратной частью прибора и модуль анализа и визуализации данных.

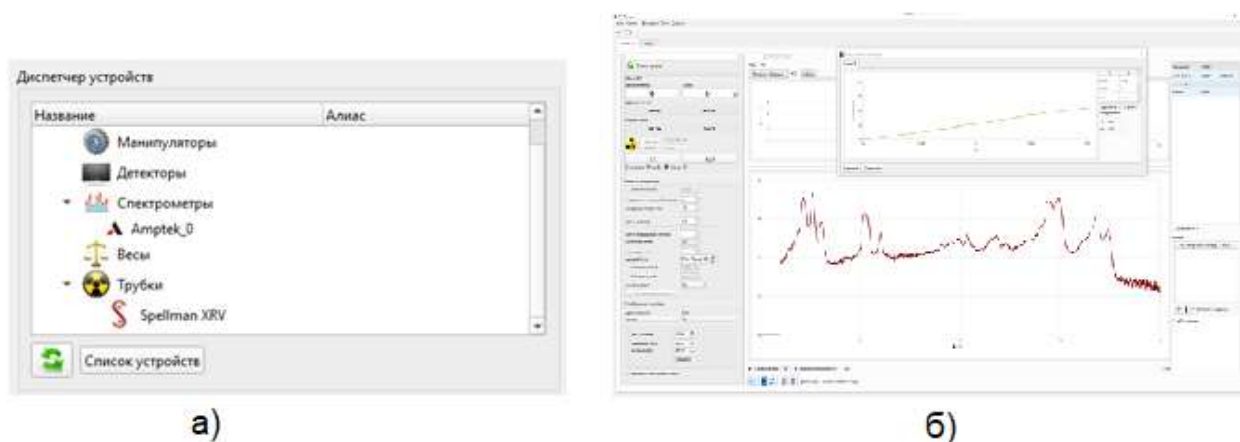


Рисунок 3. Специализированное программное обеспечение

Модуль управления отвечает за калибровку прибору, управления датчиками и рентгеновским излучателем. Модуль анализа и визуализации данных обеспечивает расчёт сложных математических алгоритмов декомпозиции сложных спектров и компонентного состава анализируемых растворов.

Работы над созданием прибора выполнялись в тесной кооперации Томского политехнического университета с АО «Сибирский химический комбинат», что обеспечило прямую связь научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с реальными производственными задачами и требованиями. Такое партнерство позволило на ранних стадиях верифицировать разрабатываемые решения. Авторами работы проведены модельные исследования в программной среде Geant4 (рис. 4), которые доказали принципиальную возможность детектирования устройством минимальных концентраций урана и соответствие его исходным требованиям производственных задач.

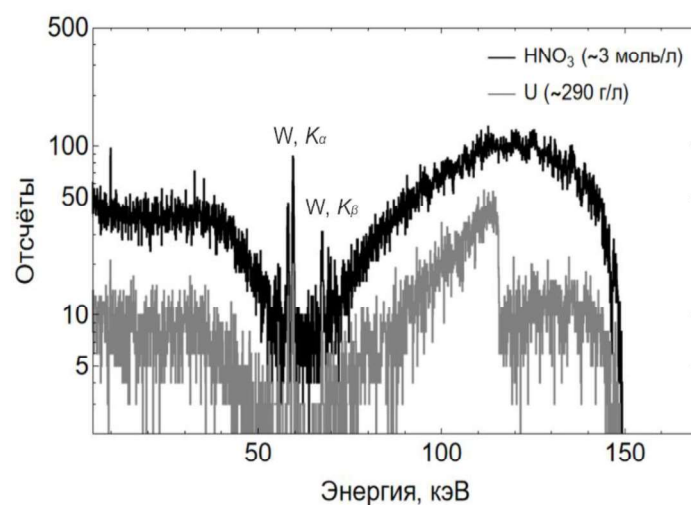


Рисунок 4. Результаты модельных исследований

На данный момент разработана полная рабочая конструкторская документация на гибридный денситометр-концентратор и на измерительную ячейку, изготовлены два экспериментальных образца ячейки, собран экспериментальный образец устройства и проведены его стендовые испытания.



Рисунок 5. Экспериментальный образец гибридного устройства

На текущий момент разработан экспериментальный образец измерительного устройства (рис. 5), который проходит испытания на площадке ТПУ. В дальнейшем, по результатам испытаний, будут внесены доработки в конструкцию измерительного устройства, реализована проточная измерительная ячейка, что позволит сделать данный прибор ключевым элементом для построения систем автоматизированного управления технологическими режимами, точного учета ядерных материалов и проведения инспекционной верификации. Оно является востребованным продуктом для ведущих предприятий госкорпорации «Росатом», в первую очередь для АО «СХК», ФГУП «Горно-химический комбинат», АО «Чепецкий механический завод» и ФГУП «Маяк». Планируется, что для каждого из этих предприятий устройство будет решать конкретные производственные задачи: от оперативного контроля концентраций на входе и выходе радиохимических стадий до валидации качества регенерированного сырья для последующего производства топлива. В перспективе планируется организация научно-производственного для серийного выпуска до 7 устройств в год с поэтапным увеличением степени локализации производства, которая в будущем должна достигнуть 90% после налаживания выпуска детекторов в России.

Ожидаемые экономические эффекты от внедрения устройства весьма значительны и оцениваются в диапазоне от 75 миллионов до нескольких миллиардов рублей в год на одну установку. Основными источниками экономии являются резкое сокращение количества дорогостоящих лабораторных анализов (до 20-25%), уменьшение операционных потерь ценных делящихся материалов, снижение внеплановых остановок оборудования и повышение общей эффективности технологической цепочки. При капитальных затратах на систему порядка 50 миллионов рублей ее окупаемость в большинстве реальных сценариев составляет менее одного года. Помимо экономических эффектов, проект имеет ярко выраженные социальные и стратегические эффекты. К социальным относится повышение радиационной безопасности персонала за счет исключения

контакта с пробами и снижения дозовых нагрузок на 30-40%. Стратегические эффекты включают импортозамещение критически важных технологий неразрушающего контроля, усиление технологического суверенитета России и повышение конкурентоспособности отечественных решений на международном рынке, в том числе через поставки в страны с атомной энергетикой российского оборудования в сотрудничестве с МАГАТЭ.

Заключение

Разработка гибридного рентгеновского денситометра-концентратора представляет собой значительный и своевременный шаг в развитии инструментальной базы, необходимой для практического замыкания ядерного топливного цикла. Устройство должно не просто заполнить существующий технологический пробел в области оперативного аналитического контроля, но и стать необходимым звеном технологического процесса при построения цифровых и автоматизированных систем управления будущего в атомной отрасли.

Проведенные натурных на имитаторах технологических растворах позволили не только верифицировать работоспособность и надежность экспериментального образца в реальных условиях, но и собрать большой набор данные для окончательной доводки и оптимизации устройства измерения. Полученные результаты станут основой для разработки полного пакета технической и нормативной документации, необходимой для сертификации устройства и его внесения в Государственный реестр средств измерений. Дальнейшие планы, включающие коммерциализацию, серийный выпуск и адаптацию устройства под нужды других предприятий Росатома и международных заказчиков, свидетельствуют о высоком потенциале масштабируемости и востребованности данной разработки.

Успешная реализация разработки серийного образца откроет новые возможности для безопасного, экономически эффективного и экологически ответственного замыкания ядерного топливного цикла. Это в полной мере соответствует долгосрочным целям развития атомной отрасли России, способствуя укреплению ее энергетической независимости, технологического лидерства и выполнения строгих международных стандартов в области ядерной и радиационной безопасности. Таким образом, представленная разработка является не просто новым измерительным прибором, а ключевой технологией, которая закладывает основу для устойчивого развития атомной энергетики будущего.

Работа выполнена в рамках реализации госпрограммы «Приоритет 2030».

Литература

1. Мясоедов Б.Ф., Калмыков С.Н., Шадрин А.Ю. Химические технологии замыкания ядерного топливного цикла // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91. № 5. С. 459–469.
2. Dixon B. et al. Reassessing methods to close the nuclear fuel cycle // Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 147. 107652.
3. Lumetta G.J. et al. Closing the Nuclear Fuel Cycle with a Simplified Minor Actinide Lanthanide Separation Process (ALSEP) and Additive Manufacturing // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. 12842.