

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СМЕШАННОГО НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Ю. П. Зайков, А. С. Холкина, В. А. Ковров, А. М. Потапов

ФГБУН Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Одним из основных элементов замкнутого ядерного топливного цикла является переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) с вовлечением в топливный цикл плутония как материала, обеспечивающего воспроизводство топлива путем многократного рецикла топливных материалов [1]. Замыкание ядерного топливного цикла включает в себя разработку и внедрение технологии переработки ОЯТ [2]. Наиболее перспективной выглядит пирохимическая технология, которая позволяет перерабатывать отработавшее ядерное топливо с минимальной выдержкой и высоким выгоранием, что важно для экономической эффективности замкнутого ядерного топливного цикла [3].

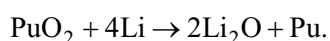
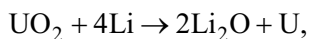
В настоящее время пирохимическая переработка разрабатывается в рамках проектного направления «Прорыв» [4, 5]. В качестве радиационно-стойких технологических сред приняты расплавы хлоридов щелочноземельных металлов. Разрабатываемая схема пирохимической переработки смешанного нитридного уран-плутониевого топлива включает следующие базовые операции:

- **Высокотемпературная обработка** путем окисления UN для снятия оболочки ТВЭЛа, удаления легколетучих продуктов деления и перевода нитридов в оксидную фазу.



- **Компактирование** для изготовления таблеток из продуктов высокотемпературной обработки. В порошок окисленного отработавшего топлива в качестве связующего добавляют стеарат цинка, из полученной смеси прессуют таблетки и спекают в атмосфере аргона при 1700°C.

- **Электрохимическое восстановление** оксидов актинидов в расплаве LiCl-Li₂O (650°C) до металла с использованием инертных анодов [6]. Оксиды U, Pu, Np, Am и Cm восстанавливаются на катоде по реакции:



- **Высокотемпературная вакуумная отгонка** для очистки восстановленных таблеток от электролита. Восстановленные таблетки актинидов очищают от оксида лития Li₂O путем отмывки в расплаве чистого LiCl, а от хлорида лития LiCl – методом высокотемпературной вакуумной отгонки при 800–900°C. Здесь важно подчеркнуть, что при восстановлении и очистке ядерные материалы в электролит не переходят.

- **Переплав** для изготовления расходоуемых металлических анодов в виде компактных слитков. Эта операция необходима для получения анодов, пригодных для электролитического рафинирования. Отработаны режимы индукционного переплава восстановленных таблеток UO₂ и UO₂ модельного топлива с добавками имитаторов Pd, Ru и оксидов La, Nd, Ce в лабораторной боксированной установке. Получены компактные слитки.

- **Электролитическое рафинирование** актинидов в хлоридном расплаве для очистки от редкоземельных и благородных металлов. В качестве рабочей среды использовалась эвтектика LiCl-KCl. Анодом служил сплав актинидов, содержащий благородные и редкоземельные металлы. На аноде в первую очередь растворяются редкоземельные элементы, затем уран и плутоний, а благородные металлы при выбранных режимах электролиза не растворяются и формируют анодный остаток. На катоде выделяются уран и плутоний, при этом редкоземельные элементы накапливаются в электролите.

- **Очистка катодного осадка от электролита.** Электролит удаляют методом высокотемпературной вакуумной отгонки при 800–900°C.

Такая технологическая схема позволяет очистить отработавшее нитридное топливо от основных продуктов деления, а уран и плутоний вернуть на стадию изготовления ядерного топлива, замыкая ядерный топливный цикл.

Для реализации пирохимической переработки создаются радиационно-защитные камеры с инертной атмосферой. Изготовлен опытный образец радиационно-защитной камеры, предназначенной для отработки инженерных систем, создания и поддержания инертной атмосферы высокой чистоты в больших технологических объемах и испытаний оборудования. Аппараты пирохимической переработки, установленные внутри камеры, обслуживают в дистанционном режиме с помощью средств роботизации, включающих манипуляторы, систему технического зрения и виртуальную среду оператора.

Литература

1. **Адамов, Е. О.** Переработка отработавшего ядерного топлива и рециклирование ядерных материалов в двухкомпонентной ядерной энергетике [Текст] / Е. О. Адамов, Ю. С. Мочалов, В. И. Рачков и др. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130, № 1. – С. 28–34.
 2. **Шадрин, А. Ю.** Методы переработки смешанного U-Pu ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах с повышенным выгоранием и малым временем выдержки [Текст] / А. Ю. Шадрин, В. А. Кашеев, К. Н. Двоеглазов и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Материаловедение и новые материалы». – 2016. – Т. 87, № 4. – С. 48–60.
 3. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общей ред. Е. О. Адамова. – М. : АО «НИКИЭТ». – 2020. – 496 с.
 4. **Kizub, P. A.** Criticality analysis of pyrochemical reprocessing apparatuses for mixed uranium-plutonium nitride spent nuclear fuel using the MCUFR and MCNP program codes [Text] / P. A. Kizub, A. I. Blokhin, P. A. Blokhin et al. // Nuclear Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 55, No. 3. – P. 1097–1104.
 5. **Zaikov, Yu. P.** Research and development of the pyrochemical processing for the mixed nitride uranium-plutonium fuel [Text] / Yu. P. Zaikov, V. Yu. Shishkin, A. M. Potapov et al. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2020. – Vol. 1475. – P. 012027.
 6. **Zaikov, Yu. P.** Prospects for use of oxide composites as nonsacrificial anodes in high-temperature electrolysis of oxide-halide salt melts [Text] / Yu. P. Zaikov, A. P. Khramov, L. E. Ivanovskii // Russian Journal of Electrochemistry. – 1997. – Vol. 33. – P. 1306–1310.
-