

В начале 2000 гг. на предприятиях Госкорпорации «Росатом» и смежных отраслей скопились десятки тонн урана, в том числе высокообогащенного, которые стали неликвидами, поскольку не могли использоваться по своему прямому назначению (обороты при изготовлении топлива требуемого качества, запасные блоки, образцы после испытаний и исследований).

Если при массовом производстве топлива для энергетических установок обороты перерабатывались непосредственно и своевременно на заводах по производству топлива, то при изготовлении специальных установок, опытных изделий с разнообразным обогащением и химическим составом, конструктивным исполнением, невостребованное по прямому назначению ядерное топливо накапливалось, поскольку каждая такая композиция требовала разработки специальной технологии для сравнительно небольшого количества топлива. Такие композиции содержали сплавы уран-алюминий с добавками кремния, магния, меди в оболочке из нержавеющей стали или алюминия, сплавы урана с цирконием в циркониевой оболочке, уран-молибден, уран-бериллий, распределенный уран в хромоникелевой, полимерной и графитовой матрицах, микротвэлах.

На рисунках 1 и 2 показаны примеры таких композиций – уран –  $UO_2-Al$ ,  $UO_2-Mg$  – в оболочке из алюминия и хромоникелевого сплава, –  $U-Al-Si$ ,  $U-Cu$  – в оболочке из нержавеющей стали и хромоникелевого сплава, сплав  $U-Zr$  в оболочке из циркония, шаровой и цилиндрический графитовый твэл с распределенными в нем многослойными микротвэлами.

Госкорпорацией «Росатом» была поставлена задача разработать концепцию и инновационные технологии выделения высокообогащенного урана из невостребованных по прямому назначению ядерных материалов.

Выработка критериев, механизмов и процедур возврата в ядерный топливный цикл неиспользуемого высокообогащенного урана проведена на



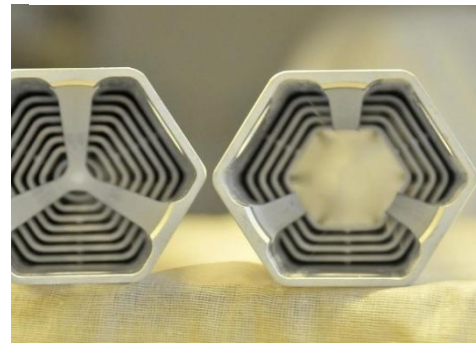
а



б



в



г

Рисунок 1 – Топливные композиции: а – уран-циркониевые композиции; б – уран-алюминиевые композиции; в – уран-циркониевые композиции; г – уран-алюминиевые композиции



а



б



в



г

Рисунок 2 – Уран-графитовые композиции: в – шаровые твэл; б – компакты; в – микросферы; г – шаровой твэл в разрезе

основе разработанного Госкорпорацией «Росатом» Положения о системе Государственного учета и контроля ядерных материалов и универсальной системой отчетности, на регулярной основе от более 60 предприятий, объединяющих более 500 зон балансов.

Для выполнения поставленной задачи были разработаны Госкорпорацией «Росатом» в 2003 и в 2010 гг. Программы по консолидации и конверсии не востребуемых ядерных материалов. В Программах предусматривались также для решения задач нераспространения высокообогащенного урана возврат и конверсия высокообогащенного топлива российского происхождения из Латвии, Ливии, Германии, Польши, Венгрии, Чехии, Украины, Белоруссии, Казахстана, Болгарии, Вьетнама, ранее поставленного туда в составе активных зон научно-исследовательских реакторов.

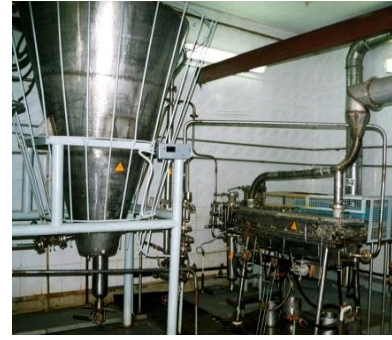
Для выполнения задачи по возврату высокообогащенного урана в ядерный топливный цикл приказом Госкорпорации «Росатом» от 05.12.2008 № 626 АО «НИИ НПО «ЛУЧ» было определено центром консолидации и конверсии не востребуемых ядерных материалов, где в течение ряда лет был создан уникальный научно-производственный комплекс в составе технологических и аналитической лабораторий и опытно-промышленного цеха с возможностью достаточно быстрой перестройки технологий и материальной части на переработку очередных партий неиспользуемых ядерных материалов.

На рисунке 3 показаны фрагменты технологического оборудования по переработке ядерных материалов, на рисунке 4 – установки аналитического обеспечения.

Созданные инновационные технологии переработки неиспользуемых ядерных материалов защищены патентами Российской Федерации на изобретение.



а



б



в



г

Рисунок 3 – Технологическое оборудование: а – центробежные экстракторы; б – установка электрохимического растворения; в – реакторы растворения урана; г – реакторы осаждения урана плоского типа



а



б



в



г

Рисунок 4 – Аналитическое оборудование: а – масс-спектрометр ТРИТОН; б – масс-спектрометр МАТ 262; в – анализатор кислорода/азота EMGA-620W, анализатор углерода МЕТАВАК CS-30; г – атомно-эмиссионный спектрометр СПАС 01

1. Патент РФ № 2314582 от 10.07.2006 на изобретение «Способ переработки уран-алюминиевых отходов ядерного производства».
2. Патент РФ № 2379774 от 18.12.2008 на изобретение «Способ переработки отходов ядерного производства».
3. Патент РФ № 2379776 от 15.12.2008 на изобретение «Способ переработки уран-циркониевых отходов».
4. Патент РФ № 2370837 от 24.07.2008 на изобретение «Способ переработки отходов ядерного производства».
5. Патент РФ № 2106029 от 24.07.1996 на изобретение «Способ переработки урансодержащих изделий».
6. Патент РФ № 2395857 от 26.01.2009 на изобретение «Способ переработки уран- молибденовых композиций».
7. Патент РФ № 2502142 от 20.12.2023 на изобретение «Способ переработки уран-молибденовой композиции».
8. Патент РФ № 2396211 от 23.03.2009 на изобретение «Способ переработки урансодержащих композиций». (Полимерная композиция).
9. Патент РФ № 22343119 от 06.09.2007 на изобретение «Способ переработки урансодержащих композиций».
10. Патент РФ № 2408538 от 06.07.2009 на изобретение «Способ получения оксида урана с требуемым содержанием изотопа  $^{235}\text{U}$ ».
11. Патент РФ № 2576819 от 08.12.2014 на изобретение «Способ переработки кремний содержащих отходов уранового производства».
12. Патент РФ № 2613352 от 11.04.2016 на изобретение «Способ переработки уран-циркониевых отходов».
13. Патент РФ № 2646535 от 06.03.2018 на изобретение «Способ переработки отходов ядерного производства».
14. Патент РФ № 2705845 от 12.11.2019 на изобретение «Способ рафинирования черного металла».
15. Патент РФ № 27443383 от 24.08.2020 на изобретение «Способ переработки кислотоупорных ураносодержащих материалов».

16. Патент РФ № 2687935 от 10.12.2019 на изобретение «Способ получения тетрафторида урана».

В работе приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований по выбору реактивов, технологических режимов, в т. ч. диапазонов температур, последовательности и длительности операций по растворению и смешиванию необходимых компонентов в процессе выделения урана из различных композиций, очистки его от различных примесей с доведением извлечения урана до 99%.

Расчетные исследования использовались для определения количества и последовательности применения реактивов, температур, давлений, оборудования, исключения захвата урана труднорастворимыми соединениями, образования гелей, затрудняющих экстракцию урана, связывание агрессивных соединений и т. п. Оптимальные условия выделения урана из материалов с высокообогащенным ураном определялись экспериментально для каждого типа материалов.

На рисунке 5 приведена в качестве примера схема совместной переработки не востребуемых уран-циркониевых и уран-алюминиевых материалов в соответствии с патентом РФ на изобретение № 2379774. Перерабатываются не востребуемые изделия в циркониевой оболочке с сердечником уран-цирконий и в алюминиевой оболочке с сердечником уран-алюминий при наличии магния. При этом экономится дорогостоящий нитрат натрия, а извлечение урана достигает 99%. Схема усовершенствована в соответствии с патентом РФ на изобретение № 2613352.

На рисунке 6 приведена схема электрохимической переработки урансодержащих материалов на основе патента РФ на изобретение № 2370837 с использованием электролизера. Бракованные изделия, содержащие высокообогащенный уран, представлены в виде сердечника U-Al-Si, U-Cu. Схема затем усовершенствована в соответствии с патентом РФ на изобретение № 2576819. Извлечение урана из такого типа изделий составило ~ 98%.

В целях обеспечения нераспространения высокообогащенного урана большая часть не востребуемых изделий перерабатывалась в закись-окись урана обогащением 19,75% по изотопу  $^{235}\text{U}$  и оставалась в России.

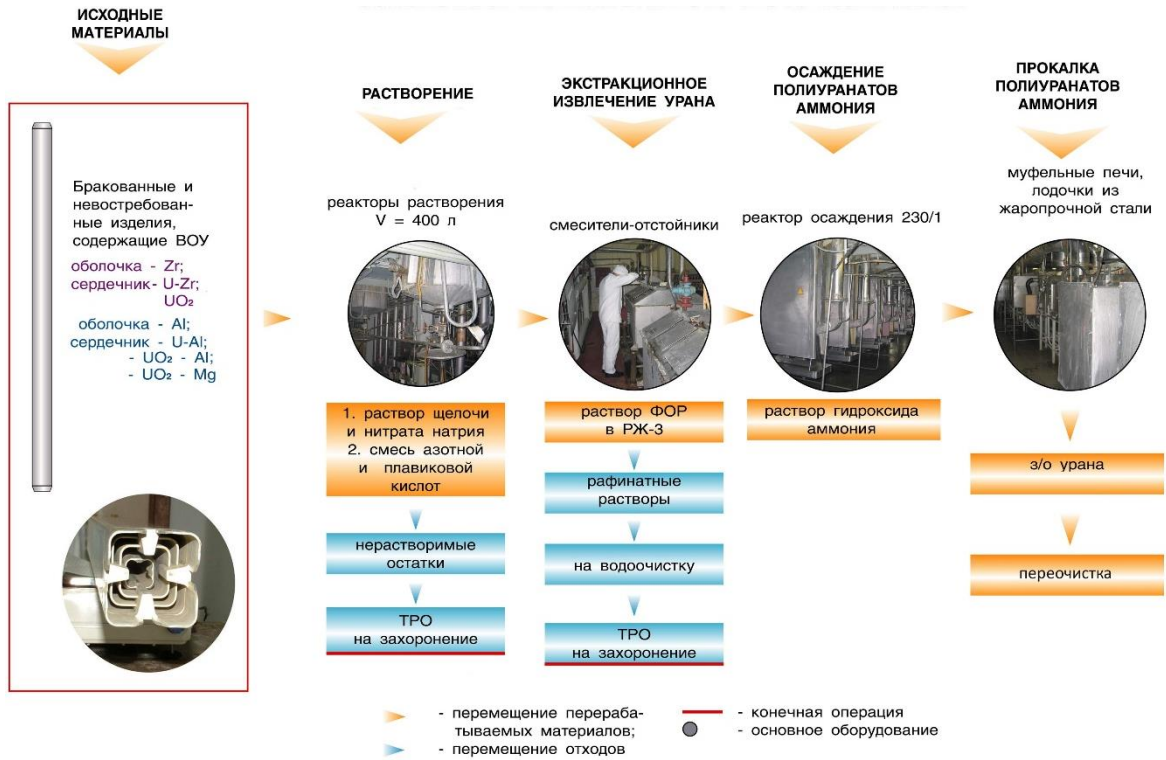


Рисунок 5 – Совместная переработка U-Zr и U-Al композиций

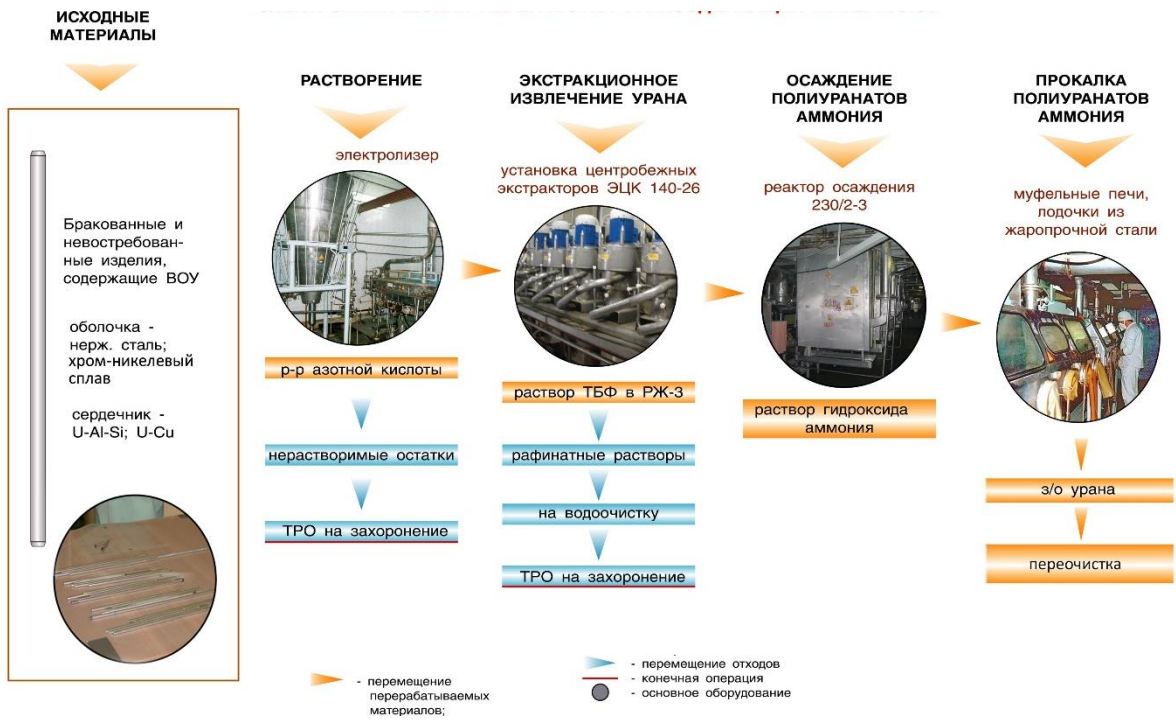


Рисунок 6 – Электрохимическая переработка урансодержащих материалов

Однако в соответствии с контрактом с французской фирмой ORANO в 2018 г. был переработан широкий спектр неостребованных материалов в металлический уран обогащением 19,75% - по стандарту CERCA ROMAN SG 160 Rev и возвращен во Францию.

Поставленные партии неликвидов ядерных материалов из «ORANO» состояли из следующих позиций: закись окись урана, с обогащением от 0,1 до 89 процентов по изотопу урана 235; тетрафторид урана с обогащением от 22,8 до 28 процентов по изотопу урана 235; куски металлического урана с обогащением 35 процентов по изотопу урана 235; диоксид урана с обогащением от 17 до 90 процентов по изотопу урана 235; отходы уранового производства в виде порошков с обогащением от 12 до 93 процентов по изотопу урана 235.

В переработке использовались технологические схемы по патентам №2676819 и № 2408538, а при изготовлении металлического урана – патенты РФ на изобретения № 26879335 и № 2705845.

При наличии требования заказчика о сохранении обогащения выделен уран из уран-циркониевых сплавов (в соответствии с патентами РФ на изобретение № 237976 и № 2613352). За 2017-2023 гг. таких материалов возвращено в топливный цикл свыше 1500 кг.

Техногенные отходы характеризуются низким содержанием урана, неоднородностью и сложностью фазового и химического состава нестандартным обогащением и др. Это, как правило, нерастворимые соединения, шламы, сметки, осадки из отстойников, скрубберов, отработанная технологическая оснастка и т. п. Усредненный химический состав зольных отходов представлен на рисунке 7.



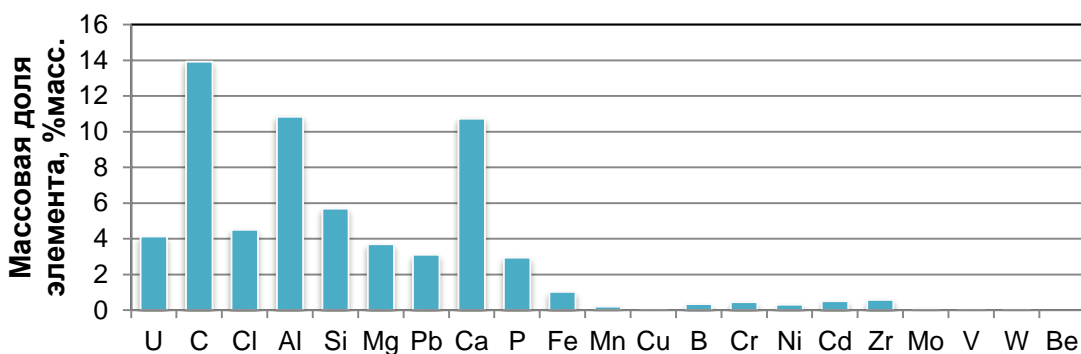


Рисунок 7 – Усредненный состав зольных отходов

Разработаны способы переработки зольных отходов (Патент № 2576819 и № 2743383). Технологическая схема на основе этих патентов позволяет получить степень извлечения урана ~ 96% и сократить количество твердых отходов в 4 раза.

Использование результатов выполнения настоящей работы, а также ее продолжение в последующие годы в связи с ростом новых разработок инновационных ядерных установок ведут к снижению затрат на учет, контроль и физическую защиту высокообогащенного урана, снижению риска несанкционированного распространения, повышению ядерной и радиационной безопасности, улучшению экологической ситуации, экономии природного урана и Единиц Работы Разделения (ЕРР), необходимых для получения урана соответствующего обогащения.

Экономический эффект в 2000-2023 гг. определяется возвратом в ядерный топливный цикл из неликвидов свыше 60 тонн урана низкого и среднего обогащения, в том числе за счет возврата из-за рубежа 300 кг высокообогащенного урана Российского происхождения, что эквивалентно экономии ~ 1800 тонн природного урана и 3 000 000 ЕРР, необходимых для получения указанного количества урана соответствующих обогащений из природного урана, что в ценах 2023 г. составляет ~ 25 млрд. руб.