

Рыкунова А.А.¹, Евсюкова Ю.А.², Шмидт О.В.², Шадрин А.Ю.²

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», ² ИТЦП «ПРОРЫВ»

При проектировании технологических цепочек по обращению с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО), а также фабрикации ядерного топлива, в рамках работ по замыканию ядерного топливного цикла (рисунок 1) особую важность получила задача моделирования технологических узлов и операций для расчета баланса материальных потоков предлагаемых вариантов технологических схем, а так же построения циклограмм работы оборудования. Для решения подобных задач ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» в рамках проектного направления «ПРОРЫВ» [1] был разработан программный комплекс (ПК) ВИЗАРТ [2] (рисунок 2).

Результаты расчетов, полученные с помощью ПК ВИЗАРТ, дают информацию об образующихся продуктах и их количестве, продолжительности отдельных операций или всей технологической схемы, что позволяет сделать выбор того или иного варианта компоновки технологической схемы, а также принять решение об оптимизации и корректировке выбранного варианта.

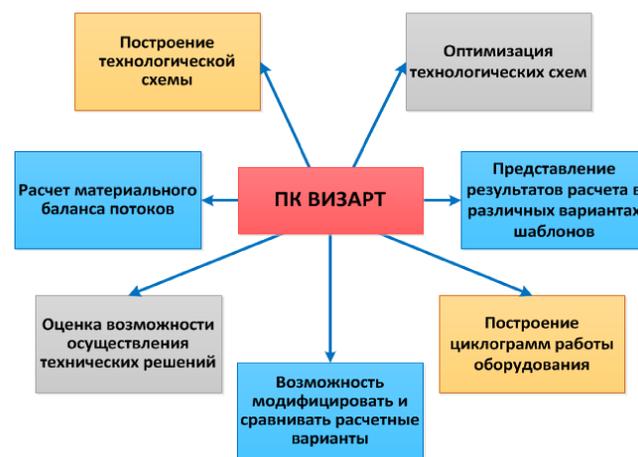


Рисунок 2 – Функционал ПК ВИЗАРТ

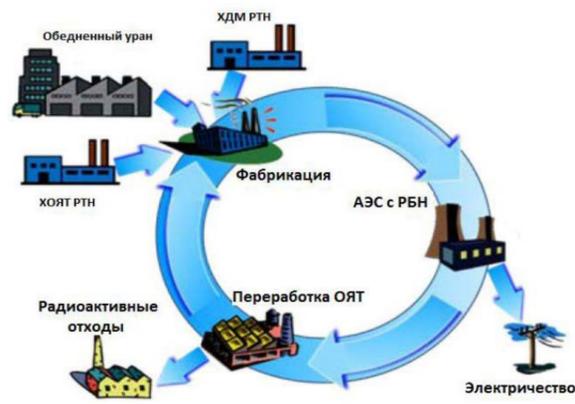


Рисунок 1 – Замкнутый ядерный топливный цикл

В настоящее время программный комплекс активно используется при подготовке исходных данных для конструирования и проектирования радиохимических переделов технологии переработки ОЯТ, выборе и обосновании компоновок технологических линий. В том числе при выборе технологии обращения с РАО.

При переработке ОЯТ необходимо снижать количество и класс РАО как для достижения необходимых требований по потерям делющихся материалов (ДМ), так и для уменьшения стоимости хранения РАО. Поэтому при разработке технологии встала задача расчетного обоснования выбора технологической схемы с наименьшим количеством образуемых РАО с использованием ПК ВИЗАРТ.

Для этого были выбраны технологические схемы переработки ОЯТ на основе гидрометаллургической технологии (рисунки 3 и 4). Для снижения попадания ДМ в РАО в технологическую схему добавлена стадия доизвлечения ДМ из концентрата среднеактивных отходов (САО) с их возвратом на операцию растворения ОЯТ (рисунок 4).

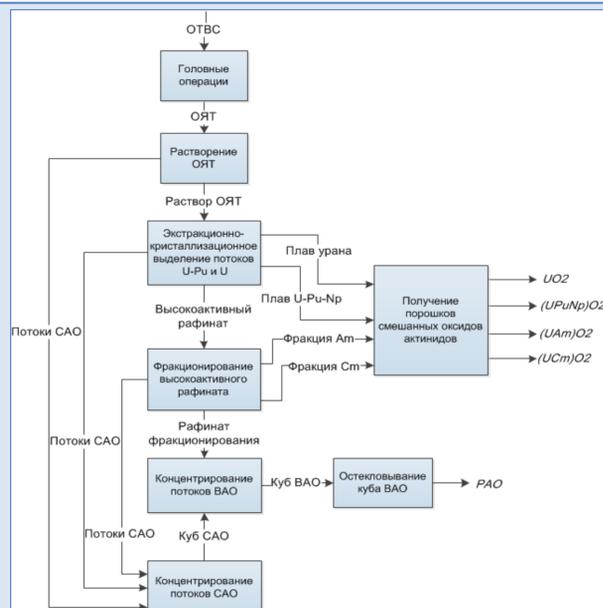


Рисунок 3 – Принципиальная схема материальных потоков при переработке ОЯТ

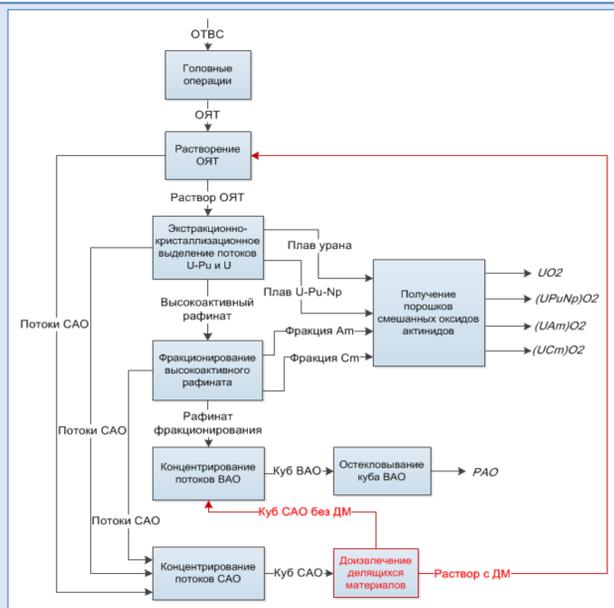


Рисунок 4 – Принципиальная схема материальных потоков при переработке ОЯТ с учетом доизвлечения ДМ из куба САО

Расчеты, исходные данные для расчетов и варианты

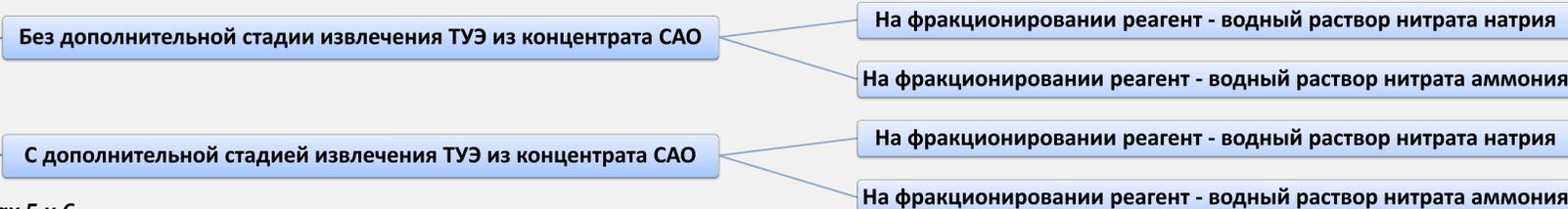
В качестве исходных данных использовался модельный состав смешанного нитридного уран-плутониевого ОЯТ реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 со средним выгоранием 10%, выдержкой во вне реакторном хранилище 1,5 года и массой 1 тонна, полученный по программам ПРИЗМА [3] и РИСК [4]. Содержание основных компонентов ОЯТ представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Исходный состав топлива

	Содержание компонентов, кг/т ОЯТ													
	U	Pu	Np	Am	Cm	Редко-земельные элементы	Легко-летучие ПД	Щелочные металлы	Щелочно-земельные металлы	Ba	Tc	Mo	Zr	Благородные металлы
Исходный состав топлива	748,10	130,48	0,26	1,85	0,11	17,47	9,39	7,21	3,63	2,80	1,44	5,74	4,79	11,89

Расчеты материального баланса проведены для двух компоновок технологических линий МП (без дополнительной стадии извлечения ДМ и с доизвлечением ДМ), а также с анализом влияния состава реагентов на стадии фракционирования. В качестве реагентов рассматривались водные растворы нитрата натрия или нитрата аммония.

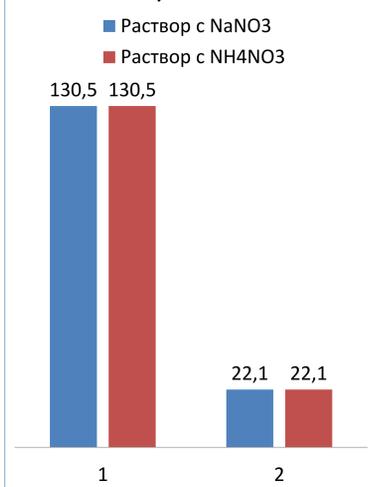
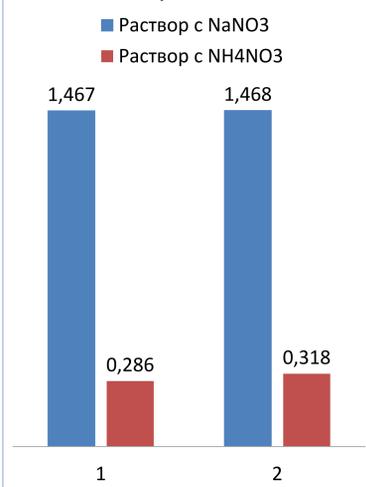
Расчетные варианты



Результаты представлены на рисунках 5 и 6.

Объем стекла с ВАО, м³/1 т ОЯТ

Содержание ТУЭ в стекле ВАО, г/1 т ОЯТ



1 – без доизвлечения ДМ из САО, 2 – с доизвлечением ДМ из куба САО

1 – без доизвлечения ДМ из САО, 2 – с доизвлечением ДМ из куба САО

Рисунок 5 – Сравнение объемов РАО

Рисунок 6 – Сравнение содержания ТУЭ в РАО

Анализ результатов

Объемы конечного продукта РАО при использовании на стадии фракционирования раствора нитрата аммония в обоих случаях (без доизвлечения ДМ и с доизвлечением ДМ из концентрата САО) ниже, чем при использовании раствора нитрата натрия. Это связано с различием в поведении NH_4NO_3 и $NaNO_3$ при прокаливании на стадии остекловывания: NH_4NO_3 полностью разлагается до газов, а при разложении $NaNO_3$ образуется оксид натрия, концентрация которого в образующемся стекле не должна превышать 24-27% согласно требованиям к составу стекол [5].

Содержание ДМ в конечном продукте РАО в случае схемы с доизвлечением ДМ из САО снижается при любом составе раствора на стадии фракционирования. Кроме этого, возвращение на операцию растворения извлеченных из концентрата САО ДМ увеличивает выход ДМ в целевые продукты порошки оксидов актиноидов (таблица 2).

Таблица 2 – Выход ДМ в целевые продукты

Расчетная схема переработки ОЯТ	Выход компонента в целевой продукт, %				
	U	Pu	Np	Am	Cm
Без доизвлечения ДМ	99,88	99,64	99,31	97,84	98,87
С извлечением ДМ	99,92	99,73	99,50	97,89	98,88

Также была проанализирована дозовая нагрузка на стекло, получившееся по схеме с дополнительной стадией доизвлечения ТУЭ из концентрата САО и водным раствором нитрата аммония в качестве реагента на стадии фракционирования. Через 10 тыс. лет нагрузка на стекло составит $1,59 \cdot 10^9$ Гр, что удовлетворяет требованиям к безопасности [6].

Выводы

Была доказана возможность выбора технологической схемы с минимальным количеством РАО на основе результатов расчета материального баланса с использованием ПК ВИЗАРТ. Использование на стадии фракционирования нитрата аммония позволяет снизить объем остеклованного ВАО более чем в 5 раз. Доизвлечение ДМ из куба САО позволяет снизить содержание ТУЭ в остеклованных ВАО более чем в 4 раза.

[1] Адамов Е.О., Алексахин Р.М., Большов Л.А., Дедуль А.В., и др. Проект «Прорыв» – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики. – Изв. РАН. Энергетика, 2015, №1, с.5-12.
 [2] Шмидт О.В., Макеева И.Р., Ливенцов С.Н. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ, как инструмент при создании и оптимизации технологических производств. // Радиохимия, 2016, т. 58, № 4, с. 316–323.
 [3] Кандиев Я.З., Малахов А.А., Серова Е.В., Спирина С.Г. Оценка эффектов малых возмущений в многовариантных расчетах по программе ПРИЗМА-Д. – Атомная энергия, 2005. т. 99, вып. 3, с. 203 – 210.
 [4] Модестов Д.Г. Программа решения задач ядерной кинетики РИСК-2014: Препринт РФЯЦ-ВНИИТФ № 243, 2014.
 [5] Фосфатные стекла с радиоактивными отходами. // Под ред. Вашмана А.А., Полякова А.С. М.: ЦНИИАтоминформ, 1997.
 [6] Изменения в Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование ЖРО. Требования безопасности» (НП-019-15). Ядерная и радиационная безопасность. Проекты нормативных документов, №3 (81) – 2016, стр.1-2.