

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЛУБОКОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ РАФИНАТА ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ПО СХЕМЕ ОПЫТНО-ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ЦЕНТРА ЭКСТРАКЦИЕЙ СМЕСЬЮ ХДК, ПЭО И Д2ЭГФК В ПОЛЯРНОМ РАСТВОРИТЕЛЕ

© 2022 г. Д. Н. Шишкин*, Н. К. Петрова, Н. Д. Голецкий,
М. В. Мамчич, А. Д. Ушанов, А. В. Бизин

Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, 194021, Санкт-Петербург 2-й Муринский пр., д. 28

**e-mail: dn.shishkin@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.04.2021, после доработки 18.02.2022, принята к публикации 24.02.2022

Показана возможность глубокого фракционирования высокоактивных отходов (ВАО), а именно рафината, полученного экстракционной переработкой ОЯТ по схеме Опытного-демонстрационного центра (ОДЦ) экстрагентом на основе смеси ди-2-этилгексилфосфорной кислоты (Д2ЭГФК), полиэтиленоксида (ПЭО) и хлорированного дикарболлида кобальта (ХДК) в полярном растворителе. Лабораторные исследования показали, что данная экстракционная смесь эффективно извлекает цезий, стронций, ТПЭ и РЗЭ из азотнокислого раствора ВАО и позволяет получить отдельные фракции элементов, что способствует увеличению безопасности их длительного хранения и снижению затрат на хранение и захоронение радиоактивных отходов. Предложена схема экстракционного процесса фракционирования ВАО, имеющая ряд преимуществ перед схемами, описанными ранее.

Ключевые слова: экстракция, фракционирование, цезий, стронций, редкоземельные элементы, трансплутониевые элементы, хлорированный дикарболлид кобальта, полиэтиленоксид, ди-2-этилгексилфосфорная кислота.

DOI: 10.31857/S0033831122030042, **EDN:** FPRTSI

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей стран с ядерной энергетикой является безопасное обращение с радиоактивными отходами. Согласно разработанной и принятой в России концепции радиационной эквивалентности, радиоактивность и нуклидный состав захораниваемых отходов должны быть такими, чтобы температурная стабильность материала, содержащего РАО, и степень риска миграции нуклидов с учетом их опасности были бы подобны таковым или не хуже, чем для природных урановых месторождений. Для обеспечения этих условий РАО должны быть фракционированы, т.е. разделены на фракции элементов, отличающихся тепловыделением и периодом полураспада [1].

По расчетам ряда исследователей [1, 2], чтобы биологическая опасность РАО через 200 лет сравнялась с биологической опасностью урановой руды, из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) должно быть извлечено 99.9% изотопов Pu, Am, Cm, 90% Np и Tc, 99% ^{129}I , ^{14}C , ^{137}Cs и ^{90}Sr . В процессе волюксации удаляются ^{129}I и ^{14}C , остальные радионуклиды удаляются при экстракционной переработке ОЯТ. Предлагается изотопы Pu, Am, Cm, и Np трансмутировать – перевести в короткоживущие или стабильные изотопы путем сжигания в ядерных установках (реакторах или ускорителях) [3]. Остальные изотопы с высокой радиотоксичностью необходимо поместить в матрицы, обладающие высокой радиационной, физической и химической устойчивостью.

Большинство из разработанных до сих пор процессов фракционирования ВАО характеризуются большим числом стадий переработки, включающих для выделения отдельных радионуклидов из ВАО различные экстрагенты или твердые сорбенты [4–6]. Примером является давно разработанная в Швеции технологическая схема с использованием растворов Д2ЭГФК и ТБФ в углеводородном разбавителе (СТН-процесс) [7].

Очевидно, что чем меньше различных экстрагентов и сорбентов будет использовано в схеме фракционирования ВАО, тем проще и дешевле будет процесс. В Радиовом институте для строящегося в г. Железногорск ОДЦ был разработан упрощенный Пурекс-процесс [8], позволяющий получить слабнокислый рафинат, содержащий менее 0.7 моль/л азотной кислоты, а также дополнительно выделить из ОЯТ Np, Tc и Zr,

Такая кислотность рафината позволяет использовать для его переработки технологию с хлорированным дикарболлидом кобальта (ХДК), отличающуюся чрезвычайно высокой устойчивостью экстрагента к радиационному воздействию и проверенную на реальных ВАО, на промышленной экстракционной установке ПО «Маяк» [9]. По этой технологии возможно выделение в отдельные фракции изотопов РЗЭ, ТПЭ, цезия и стронция. Недостатком технологии переработки ВАО с ХДК является трудность достижения хорошей очистки америция и кюрия от европия, гадолиния и иттрия из-за относительно небольших степеней разделения америция и вышеуказанных РЗЭ в условиях селективной реэкстракции ТПЭ раствором комплексона.

Важным аспектом разрабатываемых технологий фракционирования ВАО является минимизация количества остеклованных отходов, так как стоимость единицы объема отхода, полученного высокотемпературным способом (остекловыванием), в несколько раз превышает стоимость единицы объема отхода, полученного низкотемпературным способом. Обычно предлагается остекловывать изотопы цезия, стронция и РЗЭ. Если из РЗЭ остекловывать только относительно долгоживущие и представляющие наибольшую опасность изотопы прометия, европия и самария, а относительно короткоживущие и стабильные изотопы лантана, церия и неодима отверждать низкотемпературным способом,

то это позволит существенно уменьшить объемы остеклованных ВАО.

Перспективным низкотемпературным способом отверждения отходов является магний-калий-фосфатная (МКФ) матрица $MgKPO_4 \cdot 6H_2O$ [10] – синтетический аналог природного минерала К-струвит. Минералоподобный компаунд на основе МКФ матрицы может быть использован для иммобилизации жидких средне- и высокоактивных отходов [11].

В данном сообщении приводятся результаты лабораторных экспериментов по экстракции целевых и примесных элементов в экстрагент ХДК, Д2ЭГФК и ПЭО в полярном растворителе с целью определения возможности создания перспективной схемы фракционирования высокоактивных ЖРО.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Органические реагенты подвергали дополнительной очистке от примесей. Д2ЭГФК очищали комбинацией двух методов [12, 13]. Растворители гексахлорбутадием (ГХБД, х.ч.) и о-нитротолуол (ОНТ, х.ч.), поставленные немецкой фирмой abcr GmbH, предварительно промывали растворами NaOH и HNO_3 . В состав экстрагента входит ПЭО квалификации х.ч. с молярной массой 1300 г/моль, поставленный торговой компанией АНТ. ХДК дополнительной очистке не подвергали. Для перевода ХДК из формы цезиевой соли в форму кислоты раствор цезиевой соли ХДК в полярном растворителе контактировали 8 раз со свежими порциями 8 моль/л HNO_3 и 1 раз с раствором 1 моль/л HNO_3 (O : B = 1). Содержание стабильных элементов в водной фазе определяли методом ICP OES на приборе IRIS. Содержание α -излучающих нуклидов (изотопы Am) определяли на α -спектрометре Canberra Model 7401. γ -Спектрометрическое исследование проводили в отношении основных γ -излучающих компонентов ОЯТ (^{137}Cs , ^{154}Eu , ^{241}Am) с применением γ -спектрометра фирмы Canberra с охлаждаемым детектором. Концентрацию элементов в органической фазе определяли теми же методами. Стабильные элементы (железо, цирконий и др.), а также уран перед анализом методом ICP OES предварительно реэкстрагировали из органической фазы раствором карбоната аммония с трилоном Б (O : B = 1 : 5). Опыты проводили в мерных пробирках при температуре $20 \pm 2^\circ C$ и длительности контакта фаз

5 мин. В качестве радиоактивных меток использовали разбавленный водой рафинат Пурекс-процесса переработки ОЯТ ВВЭР-1000 с выгоранием 50–60 ГВт×сут/т. Аликвоты отбирали на анализ после центрифугирования. Степень разделения элементов (β) определяли как отношение их коэффициентов распределения: $\beta_{1/2} = D_1/D_2$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены коэффициенты распределения (D) микроколичеств основных элементов, присутствующих в слабокислом рафинате, в зависимости от содержания в органической фазе ПЭО.

Как следует из результатов, представленных в табл. 1, добавление ПЭО в экстракционную смесь, содержащую ХДК и Д2ЭГФК, приводит к заметному росту коэффициентов распределения стронция и бария, что позволяет извлечь их в органическую фазу. Коэффициент распределения цезия снижается (но остается достаточно большим для его извлечения), железа – растет, а коэффициенты распределения кальция и молибдена не изменяются. Таким образом, экстрагент ХДК + Д2ЭГФК + ПЭО эффективно извлекает из слабокислого рафината модифицированного Пурекс-процесса изотопы цезия, стронция, РЗЭ и ТПЭ.

Таблица 2. Влияние концентрации HNO_3 и $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ в исходной водной фазе на распределение элементов. Органическая фаза: 0.1 моль/л ХДК, 2% ПЭО и 0.4 моль/л Д2ЭГФК в смеси ОНТ–ГХБД (1 : 1)

| $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, моль/л | HNO_3 , моль/л | D | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|------|----|------|----|
| | | ^{137}Cs | ^{241}Am | ^{154}Eu | Zr | U | Mo | Cr | Sr |
| 0.05 | 0.5 | 7.4 | 7.7 | 18 | >100 | >100 | 25 | 0.01 | 22 |
| 0.1 | 0.4 | 9.3 | 12.5 | 29 | >100 | >100 | 30 | 0.02 | 25 |
| 0.15 | 0.3 | 10 | 29 | 71 | >500 | >100 | 30 | 0.01 | 31 |
| 0.2 | 0.2 | 13.2 | 100 | >100 | >500 | >100 | 20 | 0.03 | 35 |
| 0.25 | 0.1 | 16.6 | >200 | >100 | >500 | >100 | 20 | 0.03 | 42 |

Таблица 3. Влияние концентрации HNO_3 в исходной водной фазе на распределение элементов. Органическая фаза: 0.15 моль/л ХДК, 1.5% ПЭО и 0.5 моль/л Д2ЭГФК в смеси ОНТ–ГХБД (1 : 1)

| HNO_3 , моль/л | D | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----|------|-----|-----|-------|-----|
| | ^{137}Cs | ^{241}Am | ^{154}Eu | Sr | U | Mo | Ba | La | Fe |
| 1 | 14 | 1 | 1.7 | 7 | >100 | 20 | 32 | 1 | 30 |
| 3 | 2.1 | 0.02 | 0.03 | 1 | >100 | 18 | 13 | 0.02 | 6 |
| 5 | 0.74 | <0.01 | <0.01 | 0.6 | >100 | 30 | 4 | 0.02 | 11 |
| 7 | 0.32 | <0.01 | <0.01 | 0.4 | >100 | 60 | 2 | <0.01 | 45 |
| 9 | 0.19 | <0.01 | <0.01 | 0.3 | >100 | 150 | 1.5 | <0.01 | 100 |

Таблица 1. Влияние концентрации ПЭО в органической фазе на распределение элементов. Органическая фаза: 0.15 моль/л ХДК и 0.5 моль/л Д2ЭГФК в смеси ОНТ–ГХБД (1 : 1); водная фаза: 0.7 моль/л HNO_3

| ПЭО, % | D | | | | | | | | |
|-----------|-----|-------------------|-------------------|-----|----|-----|----|-----|------|
| | Ba | ^{241}Am | ^{154}Eu | Fe | Mo | Sr | Cs | Ca | Y |
| 0 | 0.1 | >100 | >100 | 30 | 12 | 0.1 | 25 | 0.3 | >100 |
| 0.5 | 2 | >100 | >100 | 45 | 10 | 1 | 21 | 0.4 | >100 |
| 1 | 50 | >100 | >100 | 60 | 11 | 10 | 18 | 0.3 | >100 |
| 2 | 70 | >100 | >100 | 150 | 12 | 18 | 15 | 0.3 | >100 |
| 3 | 80 | >100 | >100 | 300 | 10 | 23 | 12 | 0.4 | >100 |

Изменение коэффициентов распределения элементов при нейтрализации рафината оксидом магния показано в табл. 2.

Нейтрализация рафината оксидом магния приводит к росту коэффициентов распределения цезия, стронция, америция и европия, что способствует их извлечению в органическую фазу и упрощает последующее отверждение высокоактивного раствора в МКФ матрицу.

Влияние концентрации азотной кислоты в исходной водной фазе на распределение элементов показано в табл. 3.

Увеличение концентрации азотной кислоты в растворе приводит к резкому падению коэффициентов распределения РЗЭ и ТПЭ, у цезия и стронция падение коэффициентов распределения более медленное, но они могут быть реэкстрагированы

Таблица 4. Влияние концентрации $H_2C_2O_4$ в исходной водной фазе на распределение элементов. Органическая фаза: 0.1 моль/л ХДК, 1.5% ПЭО и 0.4 моль/л Д2ЭГФК в смеси ОНТ–ГХБД (1 : 1); водная фаза: 0.6 моль/л HNO_3

| $H_2C_2O_4$, моль/л | <i>D</i> | | | | | | | | |
|----------------------|----------|------------|------------|------|-------|----|----|------------|------|
| | Pd | ^{241}Am | ^{154}Eu | Fe | Mo | Sr | Cs | ^{106}Ru | Tc |
| 0 | <0.1 | 45 | 60 | 80 | 2.2 | 9 | 25 | <0.1 | <0.1 |
| 0.05 | <0.1 | 10.6 | 25 | 2.3 | 0.13 | 11 | 21 | <0.1 | <0.1 |
| 0.1 | <0.1 | 3.9 | 9.4 | 0.51 | 0.05 | 9 | 18 | <0.1 | <0.1 |
| 0.15 | <0.1 | 2.4 | 6 | 0.32 | 0.03 | 9 | 15 | <0.1 | <0.1 |
| 0.2 | <0.1 | 1.5 | 3.5 | 0.19 | <0.01 | 10 | 12 | <0.1 | <0.1 |

из органической фазы 9 моль/л HNO_3 . Барий, уран, молибден и железо не реэкстрагируются азотной кислотой.

Возможность отмывки экстракта цезия, стронция, РЗЭ и ТПЭ от примесных элементов раствором щавелевой кислоты показана в табл. 4.

Увеличение концентрации щавелевой кислоты в водной фазе приводит к падению коэффициентов распределения большинства целевых и примесных элементов, однако *D* примесных элементов или остается низким (Pd, Ru), или (Fe, Mo, Tc) падает гораздо резче, чем *D* целевых элементов (РЗЭ, ТПЭ, Cs, Sr), что позволяет их отделить на операциях экстракции и промывки экстракта.

Влияние концентрации Na_5 ДТПА на экстракцию РЗЭ, ТПЭ и ряда других элементов, содержащихся в ВАО, показано в табл. 5.

Раствор ДТПА и нитрата натрия позволяет эффективно разделить РЗЭ и ТПЭ. Наименьшая степень разделения РЗЭ и америция – 4 – наблюдается для пар Eu/Am и Sm/Am. Для остальных РЗЭ она превышает 15 и увеличивается с уменьшением порядкового номера лантанида. В данной системе, как и в описанной ранее системе ХДК–Д2ЭГФК [7], для реэкстракции ТПЭ не требуется вводить в реэкстрагирующий раствор оксикарбоновую кислоту (обычно молочную или лимонную), как в классическом TALSPEAK-процессе, и жестко контролировать его pH. Это существенно упрощает стадию разделения РЗЭ и ТПЭ.

Возможность разделения РЗЭ на 2 группы, отличающиеся радиотоксичностью, показана в табл. 6.

Включение в реэкстрагирующий раствор наряду с ДТПА 2 моль/л метиламиннитрата позволяет от-

Таблица 5. Влияние концентрации Na_5 ДТПА в растворе на распределение элементов. Органическая фаза: 0.1 моль/л ХДК, 1.5% ПЭО и 0.4 моль/л Д2ЭГФК в смеси ОНТ–ГХБД (1 : 1). Водная фаза: 1 моль/л $NaNO_3$, ДТПА

| Na_5 ДТПА, моль/л | <i>D</i> | | | | | | | | |
|---------------------|----------|-----|-----|-----|-----|------------|------------|-----|-----|
| | La | Ce | Pr | Nd | Sm | ^{154}Eu | ^{241}Am | Sr | Cs |
| 0.03 | 340 | 180 | 160 | 11 | 3.1 | 5.7 | 0.79 | 8.3 | 6.2 |
| 0.05 | 240 | 124 | 41 | 6.7 | 2.2 | 2.5 | 0.5 | 8.1 | 6.4 |
| 0.06 | 110 | 55 | 9.4 | 3.5 | 1.8 | 1.2 | 0.25 | 7.9 | 6.8 |
| 0.07 | 57 | 18 | 4 | 1.4 | 1.2 | 0.42 | 0.09 | 7.8 | 6.3 |
| 0.08 | 25 | 5.7 | 1.8 | 0.9 | 1.2 | 0.25 | 0.06 | 7.5 | 6.1 |

Таблица 6. Влияние концентрации ДТПА в растворе на экстракцию редкоземельных и сопутствующих элементов. Органическая фаза: 0.1 моль/л ХДК, 1.5% ПЭО и 0.4 моль/л Д2ЭГФК в смеси ОНТ–ГХБД (1 : 1). Водная фаза: 2 моль/л метиламиннитрат (ман), ДТПА

| ДТПА, моль/л | <i>D</i> | | | | | | | | |
|--------------|----------|------|------|------|------|------------|------------|-------|------|
| | La | Ce | Pr | Nd | Sm | ^{154}Eu | ^{241}Am | Sr | Cs |
| 0.02 | 29 | 38 | 9.5 | 5.1 | 3.1 | 5.7 | 0.23 | <0.01 | 0.07 |
| 0.03 | 14 | 21 | 4.3 | 2.3 | 1.5 | 1.7 | 0.11 | <0.01 | 0.06 |
| 0.05 | 11.7 | 10.5 | 1.9 | 0.91 | 0.6 | 0.64 | 0.05 | <0.01 | 0.05 |
| 0.07 | 8.5 | 4.6 | 1 | 0.41 | 0.29 | 0.26 | 0.02 | <0.01 | 0.05 |
| 0.08 | 3.7 | 1.3 | 0.35 | 0.13 | 0.1 | 0.09 | <0.01 | <0.01 | 0.04 |

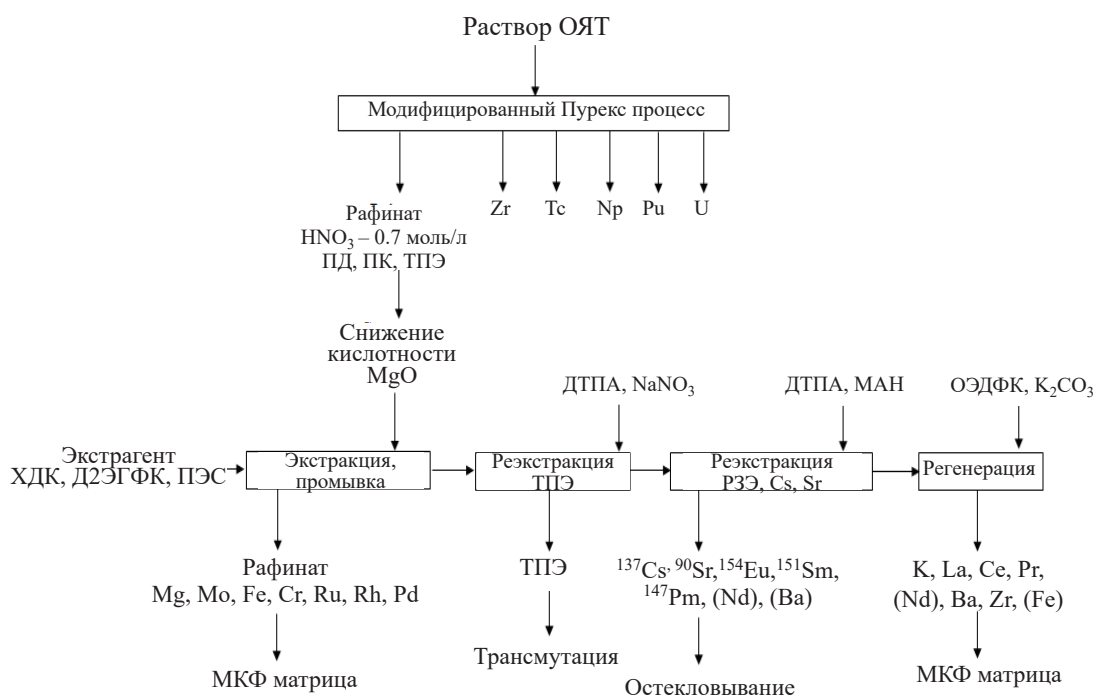


Рис. 1. Схема глубокого фракционирования ОЯТ и ВАО.

делить наиболее радиотоксичные и долгоживущие лантаниды (^{152}Eu , $T_{1/2}$ 13.5 лет; ^{151}Sm , $T_{1/2}$ 90 лет; ^{146}Pm , $T_{1/2}$ 5.5 лет) от стабильных и менее долгоживущих, а также менее радиотоксичных (La; ^{144}Ce , $T_{1/2}$ 285 сут; Pr). Вместе с радиотоксичными РЗЭ в реэкстракт переходят долгоживущие и радиотоксичные осколочные элементы (^{137}Cs и ^{90}Sr). Разделение РЗЭ позволяет уменьшить объем остеклованных ВАО и соответственно стоимость переработки РАО.

Возможность глубокой регенерации экстрагента с очисткой от элементов с наиболее высокими зна-

чениями коэффициентов распределения показана в табл. 7.

Раствор карбоната калия и оксиэтилидендифосфоновой кислоты (ОЭДФК) позволяет осуществить глубокую регенерацию экстрагента с выведением большинства экстрагированных элементов.

Схема глубокого фракционирования ОЯТ и рафината Пурекс процесса показана на рис. 1.

Преимуществом представленной схемы глубокого фракционирования является то, что двумя экстракционными составами осуществляется выделение всех фракционируемых элементов. Схема не требует большого количества ступеней экстракции.

Таблица 7. Влияние карбоната калия на экстракцию элементов. Органическая фаза: 0.1 моль/л ХДК, 1.5% ПЭО и 0.4 моль/л Д2ЭГФК в смеси ОНТ–ГХБД (1 : 1). Водная фаза: 0.05 моль/л $\text{Na}_3\text{OЭДФК}$ (ОЭДФК – оксиэтилидендифосфоновая кислота), K_2CO_3

| K_2CO_3 , моль/л | <i>D</i> | | | | | | | | |
|----------------------------------|----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Ba | Ce | Mo | Th | U | Zr | Fe | Sr | Cs |
| 0.5 | 12 | 0.2 | 0.1 | 0.9 | 0.15 | 1.5 | 0.4 | 3.3 | 3.2 |
| 1 | 6 | <0.01 | 0.05 | 0.09 | 0.11 | 0.11 | 0.08 | 2.1 | 1.2 |
| 1.5 | 1.5 | <0.01 | 0.03 | 0.06 | 0.13 | 0.06 | 0.06 | 0.3 | 0.75 |
| 2 | 0.4 | <0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.12 | 0.06 | 0.05 | 0.1 | 0.52 |
| 2.5 | 0.3 | <0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.15 | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.41 |

Фракционируемые элементы могут быть сконцентрированы в реэкстрактах в несколько раз. Доля остеклованных ВАО относительно отвержденных в МКФ матрицу является минимальной, что, по-видимому, положительно скажется на экономичности процесса обращения с ВАО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования подтверждают предложенную технологическую схему глубокого фракционирования ОЯТ и ВАО с использованием экстракционной смеси на основе ХДК и ФОК в полярном разбавителе. В этой технологической схеме кислотность рафината, полученного после модифицированного Пурекс-процесса, должна быть скорректирована. Это достигается путем снижения концентрации HNO_3 при добавлении оксида магния до требуемого эффекта высаливания. В то же время оптимальное количество магния определяется минимальным удельным объемом фосфатной матрицы магния. На стадии экстракции отделяются МПП, Sr, Fe. Для сброса Mo в рафинат в промывной раствор добавляют такие реагенты, как ацетогидроксамовую кислоту, H_2O_2 , $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ [14]. При добавлении ДТПА и NaNO_3 происходит реэкстракция ТПЭ с возможностью дальнейшей трансмутации в реакторе. Реэкстракцию РЗЭ, Cs и Sr проводят раствором, содержащим ДТПА и МАН. При регенерации экстрагента растворами ОЭДФК и K_2CO_3 отделяются легкие лантаниды и щелочноземельные металлы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лопаткин А.В., Величкин В.И., Никипелов Б.В., Полуэктов П.П. // Атом. энергия. 2002. Т. 92, № 4. С. 308.
2. Verkerk B., Petten E.C.N. // Proc. Tripartite Symp. Mol, May 17–19, 1978. P. 170.
3. Коробейников В.В., Колесов В.В., Каражелевская Ю.В., Терехова А.М. // Ядерная энергетика. 2019. № 2. С. 154.
4. Lav J.D., Herbst R.S., Todd T.A., Romanovskiy V.N., Babain V.A., Esimantovskiy V.M., Smirnov I.V., Zaitsev B.N. // Solvent Extr. Ion Exch. 2001. Vol. 19, N 1. P. 23.
5. Kubota M., Nakamura H., Tachimori S. // Management of Alpha-Contaminated Wastes: Symp. 2–6.06. 1980. Vienna, 1981. P. 551.
6. Кох Г., Колакик Э., Хауч Х. // Радиохимия. 1975. Т. 18, № 4. С. 601.
7. Libjenzin J.O., Persson G., Wignefo S. // Radiochim. Acta. 1984. Vol. 35, N 3. P. 155.
8. Голецкий Н.Д., Зильберман Б.Я., Федоров Ю.С., Кудинов А.С., Тимошук А.А., Сытник Л.В., Пузииков Е.А., Родионов С.А., Криницын А.П., Рязанцев В.И., Рябков Д.В. // Радиохимия. 2014. Т. 56, № 5. С. 427.
9. Шишкин Д.Н., Голецкий Н.Д., Петрова Н.К. // Радиохимия. 2020. Т. 62, № 1. С. 32.
10. Винокуров С.Е., Куляко Ю.М., Слюнчев О.М., Ровный С.И., Ваг А.С., Мэлони М.Д., Мясоедов Б.Ф. // Радиохимия. 2009. Т. 51, № 1. С. 56–62.
11. Винокуров С.Е., Куликова С.А., Мясоедов Б.Ф. // Тез. докл. IX Всерос. конф. по радиохимии. СПб., 17–21.09.2018 г. СПб., 2018. С. 363.
12. Peppard D., Ferraro J., Mason G. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1958. Vol. 7, N 3. P. 231.
13. Смелов В.С., Ланин В.П. // Атом. энергия. 1968. Т. 25, № 2. С. 157.
14. Федоров Ю.С., Голецкий Н.Д., Зильберман Б.Я., Рябков Д.В., Шадрин А.Ю., Блажева И.В., Кудинов А.С., Кухарев Д.Н. Пат. RU 2454742. Заявл. 23.12.10; опубл. 27.06.12 // Б.И. 2012. № 18.