



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 621.039.7

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9220

Сравнение эффективности извлечения америция и плутония на твердофазных экстрагентах ТОДГА, DN Resin-B и TEVA Resin-B из модельных пульп накопленных высокоактивных отходов

Наталья Михайловна Истомина, Павел Васильевич Козлов[✉],
Анатолий Николаевич Усолкин, Елена Максимовна Дворянчикова

ПО «Маяк», Озерск, Россия

[✉]cpl@po-mayak.ru

Аннотация. Исследование посвящено разработке технологии выделения из растворенных осадков накопленных высокоактивных отходов (ВАО) сложного состава радионуклидов америция и плутония с целью выведения их в отдельный поток, направляемый на остекловывание. Подобное решение позволит отвердить оставшийся раствор, содержащий основное количество макрокомпонентов, более простым и доступным методом цементирования. Для обеспечения возможности цементирования растворенных пульп накопленных ВАО необходимо достичь следующих коэффициентов очистки от основных альфа-излучающих радионуклидов: от америция ~300, от плутония ~150. Содержание урана в растворенных пульпах не ограничивает степень включения данного раствора в цементный компаунд. Для имитации присутствия в растворе америция и плутония в экспериментах использовали их химические аналоги – Nd и Th, соответственно.

Изучена эффективность совместного извлечения неодима и тория из модельного раствора, имитирующего растворенные осадки накопленных высокоактивных отходов, на твердофазных экстрагентах отечественного и импортного производства на основе N,N,N',N'-тетраоктилдигликольамина (ТОДГА и DN RESIN-B). Для селективного извлечения тория применяли ТФЭ на основе четвертичного аммониевого основания TEVA Resin-B. Показана возможность достижения требуемых коэффициентов очистки. По эффективности сорбции на ТФЭ DN Resin-B и ТОДГА компоненты раствора можно расположить в следующем порядке: Th>Nd>U.

Проведены испытания двухстадийной схемы с предварительным выделением тория на твердофазном экстрагенте TEVA RESIN-B и последующим извлечением неодима на твердофазном экстрагенте DN Resin-B. Установлено, что предварительное выделение тория позволяет увеличить эффективность очистки от неодима в 3 раза. Однако эффективность извлечения тория на ТФЭ TEVA Resin-B ниже, чем на ТФЭ ТОДГА и DN Resin-B. С учетом этого, предпочтительной выглядит схема с двумя последовательными ступенями очистки на ТФЭ DN Resin-B. Снижение содержания урана в модельном растворе с 3.2 г/дм³ до 0.9 мг/дм³ позволило значительно увеличить эффективность извлечения неодима и тория.

Ключевые слова: высокоактивные отходы, осадки, америций, плутоний, неодим, торий, коэффициент распределения, коэффициент очистки, твердофазный экстрагент

Для цитирования: Истомина Н.М., Козлов П.В., Усолкин А.Н., Сравнение эффективности извлечения америция и плутония на твердофазных экстрагентах ТОДГА, DN Resin-B и TEVA Resin-B из модельных пульп накопленных высокоактивных отходов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22, № 2. С. 155-164. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9220>



Original article

A comparison of the efficiency of extraction of americium and plutonium on solid-phase extractants TODGA, DN Resin-B, and TEVA Resin-B from model pulps of accumulated higher activity waste

Natalia M. Istomina, Pavel V. Kozlov[✉], Anatolii N. Usolkin, Elena M. Dvoryanchikova

Production Association "Mayak", Ozersk, Russian Federation

[✉]cpl@po-mayak.ru

Abstract. The study is devoted to the development of a technology for the separation of accumulated higher activity waste (HAW) of a complex composition of americium and plutonium radionuclides from dissolved sediments for their removal into a separate stream for vitrification. Such a solution will make it possible to harden the remaining solution, containing the main amount of macrocomponents, by a simpler and more accessible method of cementing. For the provision of the possibility of cementing of dissolved pulps accumulated by HAW, it is necessary to achieve the following purification factors from the main alpha-emitting radionuclides: for americium ~ 300, for plutonium ~ 150. The content of uranium in dissolved pulps does not limit the degree of inclusion of this solution in the cement compound. For the simulation of the presence of americium and plutonium in the solution, their chemical analogues, Nd and Th, respectively, were used in the experiments. The efficiency of combined extraction of neodymium and thorium from a model solution simulating dissolved sediments of accumulated higher activity waste was studied using solid-phase extractants of domestic and foreign production based on N,N,N',N'-tetraoctyldiglycolamide (TODGA and DN RESIN-B). For the selective extraction of thorium, solid phase extraction based on the quaternary ammonium base TEVA Resin-B was used. The possibility of achieving the required purification coefficients was shown.

According to the efficiency of sorption on TFE DN Resin-B and TODGA, the components of the solution can be arranged in the following order: Th>Nd>U.

A two-stage scheme was tested with preliminary separation of thorium on a solid-phase extractant TEVA RESIN-B and subsequent extraction of neodymium on a solid-phase extractant DN Resin-B. It was established that the preliminary separation of thorium allows increasing the efficiency of neodymium removal by 3 times. However, the efficiency of thorium recovery by solid phase extraction using TEVA Resin-B SPE was lower than for TODGA and DN Resin-B SPE. Therefore, the scheme with two successive stages of purification on SPE DN Resin-B is more preferable.

The reduction of the uranium content in the model solution from 3.2 g/dm³ up to 0.9 mg/dm³ allowed significantly increasing the efficiency of extraction of neodymium and thorium.

Keywords: higher activity waste, sediments, americium, plutonium, neodymium, thorium, distribution coefficient, purification coefficient, solid phase extractant

For citation: Istomina N.M., Kozlov P.V., Usolkin A.N., Dvoryanchikova E.M. A comparison of the efficiency of extraction of americium and plutonium on solid-phase extractants TODGA, DN Resin-B, and TEVA Resin-B from model pulps of accumulated higher activity waste. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(2): 155-164. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9220>

Введение

В результате реализации оборонной программы на ФГУП «ПО «Маяк» накоплено значительное количество гетерогенных высокоактивных отходов (далее – ВАО), представляющих плотный осадок и осветленный раствор. Отходы находятся на хранении более 50 лет и представляют серьезную радиационную опасность вследствие естественного износа

емкостей-хранилищ [1]. С точки зрения приведения жидких и пульпообразных отходов к критериям приемлемости для последующего захоронения в специализированных пунктах, данные отходы должны быть отверждены с получением устойчивого стекло- или цементоподобного компаунда. Разработанная на предприятии концепция предполагает раздельное обращение с осадком и осветленным раствором [2].



Переработка осадков емкостей-хранилищ представляет наибольшую сложность, как с химической, так и с радиохимической точек зрения. Растворенные осадки обладают сложным химическим составом и содержат значительное количество «проблемных» для остекловывания стабильных элементов (Fe, Cr, Ni, S). По этой причине они не могут быть эффективным образом напрямую отверждены в стеклоподобную матрицу, являющейся общепризнанной формой размещения ВАО (РАО 1 класса в соответствии с [3]). Объем полученного компаунда будет неприемлемо велик, что непомерно увеличит объем отчислений за его захоронение. Кроме того, переработка данной группы отходов практически полностью займет производительность печей остекловывания и объемы хранения в промежуточном хранилище на предприятии, существенно снизив возможности по отверждению ВАО от текущей переработки облученного ядерного топлива.

В то же время, в связи со значительным содержанием в осадках долгоживущих альфа-излучающих радионуклидов, подобные субстанции не могут быть напрямую отверждены в цементную матрицу на технически более простых и производительных установках цементирования. Для получения цементного компаунда, по уровню активности относящегося к радиоактивным отходам 3 класса, с возможностью его захоронения в приповерхностных пунктах захоронения, удельная активность трансурановых элементов в отверждаемых отходах не должна превышать $3 \cdot 10^5$ Бк/дм³ [3].

В основе одного из вариантов обращения с осадками лежит принцип фракционирования, то есть разделения исходных ВАО на два потока: ВАО и САО. После растворения осадков емкостей-хранилищ в азотной кислоте предполагается осуществить выделение основной части радионуклидов (Am, Pu, U, Cs, Sr) и их отверждение с получением минимального объема высокоактивного стекла (РАО

1 класса). Отходы, оставшиеся после выделения указанных фракций радионуклидов и содержащие основное количество стабильных макрокомпонентов, по уровню активности будут относиться к САО и могут быть отверждены методом цементирования (РАО 3 класса). Финансовое преимущество подобного подхода выражается в том, что тариф за захоронение 1 м³ РАО 3 класса в 9 раз ниже, чем за РАО 1 класса.

Теоретическая часть

Одним из эффективных методов извлечения радионуклидов из растворов является метод экстракционной хроматографии. Данный метод сочетает в себе достоинства экстракционных и сорбционных процессов и характеризуется высокой степенью концентрирования радионуклидов, простотой нанесения экстрагента на поверхность сорбента, исключение использования органических растворителей [4].

В процессах экстракции радиоактивных редкоземельных и трансплутониевых элементов широко используются экстрагенты на основе диаминов дигликолевой кислоты [5]. Наилучшими экстракционными свойствами среди них обладает N,N,N',N'-тетра-н-октилдигликольамид (ТОДГА). Структурная формула ТОДГА представлена на рисунке 1.

ТОДГА применяется в качестве компонента неподвижной фазы в коммерчески доступном сорбенте импрегнированного типа DN Resin-B фирмы «Triskem International», полученном импрегнированием матрицы стиролдивинилбензолного сополимера жидким дигликольамидом. Этот твердофазный экстрагент (ТФЭ) успешно применяется для разделения РЗЭ и ТПЭ [6]. Описаны результаты исследований возможностей применения ТФЭ на основе ТОДГА для выделения макроколичеств Am(III), РЗЭ(III), Th(IV) [5,7].

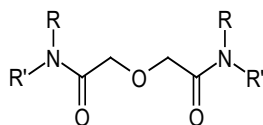


Рис. 1. Структурная формула N,N,N',N'-тетра-*n*-октилдигликольамида
Fig. 1. Structural formula of N,N,N',N'-tetra-*n*-octyldiglycolamide

В настоящей работе для решения задачи извлечения альфа-излучающих радионуклидов (Am, Pu), применяли ТФЭ на основе ТОДГА, полученный самостоятельно в лабораторных условиях и коммерческий DN Resin-B.

Для селективного извлечения Pu применяли ТФЭ на основе четвертичного аммониевого основания TEVA Resin-B фирмы «Triskem International».

Целью работы являлась оценка эффективности совместного извлечения америция и плутония на ТФЭ на основе N,N,N',N'-тетраоктилдигликольамида отечественного (ТОДГА) и импортного производства (DN Resin-B), а также предварительного извлечения плутония на ТФЭ TEVA Resin-B.

Для обеспечения возможности цементирования растворенных пульп накопленных ВАО необходимо достичь следующих коэффициентов очистки от основных альфа-излучающих радионуклидов: от америция ~300, от плутония ~150. Содержание урана в растворенных пульпах не ограничивает степень включения данного раствора в цементный компаунд.

Решение поставленной задачи позволит реализовать финансовые и технологические преимущества схемы с фракционированием потоков и отверждением РАО с использованием методов остекловывания и цементирования, описанные выше.

Экспериментальная часть

Для совместного извлечения америция и плутония применяли ТФЭ DN Resin-B с размером фракции 50-100 мкм и массовой долей экстрагента 50% и ТФЭ ТОДГА с размером фракции 50-100 мкм и массовой долей экстрагента 40%.

Испытания проводили в динамическом режиме на установке, которая состоит из: насоса высокого давления для подачи исходного, десорбирующего и промывных растворов; сети капилляров; экстракционно-хроматографической колонки, заполненной ТФЭ; емкостей исходного, десорбирующего и промывных растворов; пробирок для сбора фракций фильтрата на выходе из колонки.

Извлечение компонентов проводили из модельного раствора, имитирующего растворенные пульпы накопленных ВАО. Состав модельного раствора определен расчетным путем, исходя из условия полного растворения пульпы ВАО в азотной кислоте. Для приготовления раствора были использованы следующие реагенты: $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, CsNO_3 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$, $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$. В готовом модельном растворе концентрация азотной кислоты составляла 5 моль/дм³.

Для имитации присутствия в растворе ²⁴¹Am и ²³⁹Pu использовали их химические аналоги Nd и Th, соответственно. Катионный состав модельного раствора представлен в таблице 1.

Для проведения экспериментов использовали экстракционно-хроматографические колонки (диаметр 4 мм, высота 10 мм, внутренний объем 1.7 см³), заполненные ТФЭ ТОДГА и DN Resin-B. Перед проведением сорбции колонки с ТФЭ промывали раствором азотной кислоты с молярной концентрацией 5 моль/дм³, объем промывки составлял 10 к.о. Далее проводили сорбцию Nd и Th, пропуская модельный раствор со скоростью 5 к.о./час. Фильтрат на выходе из колонки

Таблица 1. Катионный состав модельного раствора, имитирующего растворенные пульпы накопленных ВАО

Table 1. Cationic composition of a model solution simulating dissolved pulps of accumulated HAW

Элемент	Содержание, мг/дм ³	Элемент	Содержание, мг/дм ³
Al	3500	Cr	190
U	3200	Th	100
Fe	1100	Cs	90
Ni	550	Nd	75
Mn	200	Sr	10

собирали по фракциям и анализировали на содержание Nd и Th. Определение содержания компонентов проводили на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой «Aligent 7800 CX».

Значение динамического коэффициента распределения рассчитывали как отношение объема раствора, который может быть профильтрован через слой сорбента до момента «проскока» в фильтрат определенного количества извлекаемого компонента, к массе сорбента, по формуле 1. В качестве «проскоковой» концентрации элемента использовали «половинную» концентрацию

$$K_d = \frac{V_{0,5C_0}}{m_{н.ф.}}, \quad (1)$$

где K_d – коэффициент распределения элемента; $V_{0,5C_0}$ – объем жидкой фазы, соответствующий половинному «проскоку»

элемента в фильтрат, см³; $m_{н.ф.}$ – масса неподвижной фазы в колонке, г.

Массу неподвижной фазы в колонке рассчитывали по формуле:

$$m_{н.ф.} = \frac{m_{экстрагента} \cdot \omega}{100\%}, \quad (2)$$

где ω – массовая доля экстрагента, %.

Значения коэффициентов распределения индивидуальных компонентов раствора позволяют сравнить эффективность их сорбции из раствора в условиях эксперимента. По результатам экспериментов также определяли эффективный фильтроцикл – объем модельного раствора, который может быть пропущен через ТФЭ с достижением требуемых коэффициентов очистки.

Обсуждение результатов

На рисунке 2 представлена выходная кривая сорбции слабосорбируемых элементов (макрокомпонентов раствора).

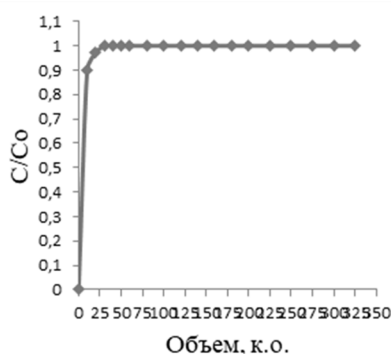


Рис. 2. Выходная кривая сорбции Al, Fe, Ni, Mn, Cr на ТФЭ DN Resin-B

Fig. 2. The elution curve of sorption of Al, Fe, Ni, Mn, Cr by solid phase extraction using DN Resin-B

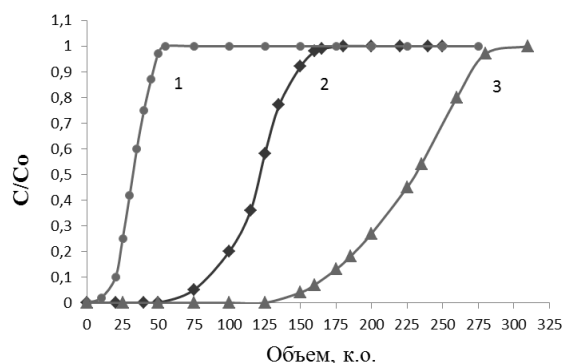


Рис. 3. Выходные кривые сорбции элементов на ТФЭ DN Resin-B: 1 – U; 2 – Nd; 3 – Th.

Fig. 3. The elution curve of sorption of elements by solid phase extraction using DN Resin-B: 1 – U; 2 – Nd; 3 – Th

Согласно полученным данным, такие макрокомпоненты раствора, как Al, Fe, Ni, Mn, Cr не извлекаются на ТФЭ DN Resin-B в условиях данного эксперимента, их концентрация в первых фракциях фильтрата резко возрастает до исходной концентрации в модельном растворе. Данные элементы не препятствуют извлечению целевых компонентов.

На рисунке 3 представлены фронтальные выходные кривые сорбции тория, неодима и урана на ТФЭ DN Resin-B. Коэффициенты распределения тория, неодима и урана составили, соответственно, 600, 319 и 60. По эффективности сорбции элементы можно расположить в следующем порядке: Th>Nd>U.

Требуемый коэффициент очистки раствора от неодима ($K_{оч} \sim 300$), достигается при пропускании модельного раствора до 82 к.о. Коэффициент очистки от тория достигается при пропускании 154 к.о модельного раствора. Несмотря на низкий коэффициент распределения по сравнению с неодимом и торием, коэффициент очистки от урана при пропускании первых 15 к.о. модельного раствора, составляет 78900. Это означает, что уран занимает частично емкость ТФЭ DN Resin-B и снижает эффективность извлечения тория и неодима. О результатах эксперимента неодим занимает 15% от теоретического значения полной обменной емкости ТФЭ DN Resin-B, торий – 27%, уран – 58%.

Результаты сорбции компонентов модельного раствора на ТФЭ ТОДГА. Результаты эксперимента, полученные в цикле сорбции элементов на ТФЭ ТОДГА, представлены на рисунке 4. Требуемый коэффициент очистки раствора от неодима достигается при пропускании модельного раствора до объема 60 к.о., коэффициент очистки от тория – при пропускании модельного раствора до объема 79 к.о.

Коэффициенты распределения тория, неодима и урана составили 766, 388 и 70, соответственно. Полученные значения

коэффициентов распределения сопоставимы со значениями, полученными в процессе сорбции на ТФЭ DN Resin-B.

Теоретическая полная обменная емкость ТФЭ ТОДГА по неодиму реализована на 20%, по торию – на 38%. Уран занимает значительную часть емкости ТФЭ – 42%.

Результаты двухстадийного процесса сорбции компонентов модельного раствора на ТФЭ TEVA Resin-B и DN Resin-B. В соответствии с результатами предыдущих экспериментов по испытанию ТФЭ на основе ТОДГА, было установлено, что торий извлекается из растворов на данных ТФЭ в большей степени, чем неодим. С целью увеличения эффективности извлечения неодима, была рассмотрена возможность предварительного выделения из раствора Th. Для селективного извлечения тория фирмой Triskem предложена экстракционно-хроматографическая смола TEVA Resin-B с размером фракции 50-100 мкм и массовой долей экстрагента – 50%. Активным веществом данного ТФЭ является соль четвертичного амина.

Схема двухстадийной очистки включала в себя стадию предварительного выделения тория из раствора на ТФЭ TEVA Resin-B, и последующую стадию извлечения из очищенного раствора неодима на DN Resin-B.

Для проведения эксперимента одну экстракционно-хроматографическую колонку заполнили ТФЭ TEVA Resin-B, другую – ТФЭ DN Resin-B. Сначала модельный раствор пропускали через колонку с ТФЭ TEVA Resin-B со скоростью 5 к.о./ч. Фильтрат на выходе собирали в отдельную емкость, периодически отбирая пробы на анализ. Выходные кривые сорбции Th, Nd и U на ТФЭ TEVA Resin-B представлены на рисунке 5. По полученным результатам, коэффициенты распределения неодима ($K_d=52$) и урана ($K_d=52$) значительно ниже коэффициента распределения тория ($K_d=355$).

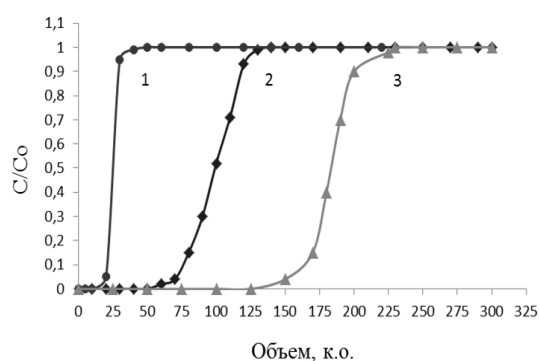


Рис. 4. Выходные кривые сорбции элементов на ТФЭ ТОДГА: 1 – U; 2 – Nd; 3 – Th.

Fig. 4. The elution curve of sorption of elements by solid phase extraction using TODGA: 1 – U; 2 – Nd; 3 – Th

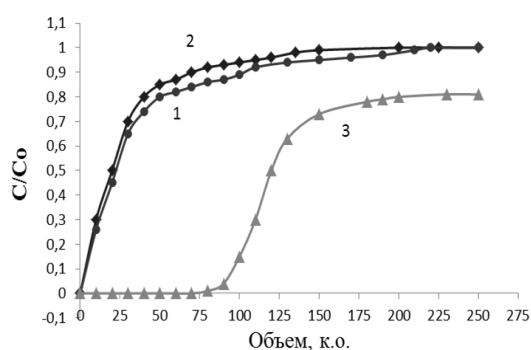


Рис. 5. Выходные кривые сорбции элементов на ТФЭ TEVA Resin-B: 1 – U; 2 – Nd; 3 – Th.

Fig. 5. The elution curve of sorption of elements by solid phase extraction using TEVA Resin-B: 1 – U; 2 – Nd; 3 – Th

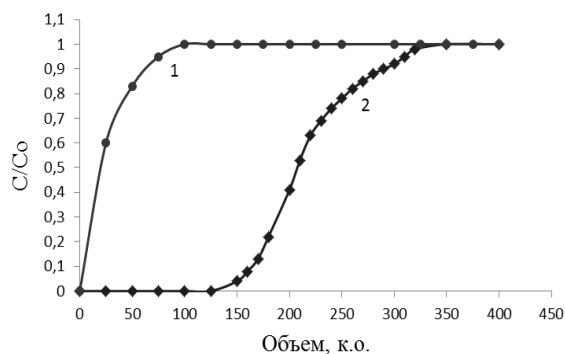


Рис. 6. Выходные кривые сорбции элементов на ТФЭ DN Resin-B: 1 – U; 2 – Nd.

Fig. 6. The elution curve of sorption of elements by solid phase extraction using DN Resin-B: 1 – U; 2 – Nd.

После сорбции теоретическая полная обменная емкость реализована на 17% по торю, на 1% по неодиму и на 44% по урану. Полного насыщения сорбента TEVA Resin-B не достигнуто. После предварительной очистки на ТФЭ TEVA модельный раствор, с содержанием тория примерно 4 мг/дм³, пропускали через ТФЭ DN Resin-B со скоростью 5 к.о./час. Объем пропущенного раствора составил 360 к.о. Результаты представлены на рисунке 6.

По полученным результатам можно сделать вывод о значительном улучшении эффективности извлечения неодима. Коэффициент распределения неодима составил 600, что примерно в 2 раза выше, чем в эксперименте без предварительного извлечения тория. Требуемый коэф-

фициент очистки раствора от неодима достигается при пропускании 240 к.о., что в 3 раза больше, чем при фильтрации раствора через ТФЭ DN Resin-B без стадии предварительного выделения тория.

В экспериментах с ТФЭ DN Resin-B насыщение сорбента неодимом не превышало 30%. В данном опыте теоретическая полная обменная ёмкость сорбента реализована на 50%. Обобщенные результаты экспериментов приведены в таблице 2.

В связи с тем, что уран занимает значительную часть ёмкости исследуемых ТФЭ по причине его высокого содержания в растворе, провели эксперимент по оценке эффективности извлечения Nd и Th на ТФЭ DN Resin-B из модельного раствора с пониженным содержанием

Таблица 2. Обобщенные результаты экспериментов по извлечению Nd и Th из модельного раствора

Table 2. Generalized results of experiments on the extraction of Nd and Th from a model solution

Параметр	Совместное извлечение Nd и Th				Последовательное извлечение Th и Nd			
	DN Resin-B		ТОДГА		TEVA Resin-B		DN Resin-B	
Элемент	Nd	Th	Nd	Th	Nd	Th	Nd	Th
Коэффициент распределения	319	600	388	766	52	355	600	-
Эффективный фильтроцикл, к.о.	82	154	60	79	-	75	240	-
Реализованная ёмкость от теоретической ПОЕ, %	15	27	20	38	-	17	50	-

урана (0.9 мг/дм^3). Методика эксперимента аналогична экспериментам, описанным выше. Отличие заключается в том, что поступенчатый отбор и анализ фракций фильтрата не проводился.

Суммарный объем модельного раствора, пропущенный через колонку, составил 237 к.о. В последней фракции фильтрата содержание неодима составило 0.008 мг/дм^3 , тория – 1 мг/дм^3 , урана – 1 мг/дм^3 . Таким образом, коэффициент очистки от неодима составил 6250 (требуемый $K_{оч} \sim 300$). Насыщение сорбента по Nd достигнуто не было. Для сравнения, эффективный фильтроцикл в первом цикле на ТФЭ DN Resin-B для Nd с содержанием урана в растворе $\sim 3 \text{ г/дм}^3$ составил 84 к.о.

Установить эффективный фильтроцикл для Th не удалось в связи с отсутствием данных по химическому составу фильтратов. По имеющимся данным, при фильтрации 237 к.о. исходного раствора коэффициент очистки от тория составил 90, что ниже требуемого значения $K_{оч} \sim 150$. С учетом объема модельного раствора, пропущенного через колонку, а также содержания Nd и Th в растворе, полная обменная ёмкость ТФЭ DN Resin-B была реализована не более, чем на 50%. Таким образом, можно сделать вывод, что при низком содержании в растворе урана, эффективность сорбции неодима и тория значительно выше.

Заключение

На модельном растворе, имитирующем растворенные пульпы накопленных ВАО, показана принципиальная возможность достижения требуемых коэффициентов очистки от неодима и тория (аналогов америция и плутония).

По эффективности сорбции на ТФЭ DN Resin-B и ТОДГА компоненты раствора можно расположить в следующем порядке: $\text{Th} > \text{Nd} > \text{U}$.

На ТФЭ DN Resin-B эффективный фильтроцикл для неодима и тория выше, соответственно, на 36 и 94%, чем на ТФЭ ТОДГА.

Двухстадийная схема эксперимента с предварительным выделением тория на ТФЭ TEVA Resin-B позволила увеличить эффективность последующего выделения неодима на ТФЭ DN Resin-B из очищенного от тория раствора в 3 раза. Однако следует отметить, что эффективность извлечения тория на ТФЭ TEVA Resin-B ниже, чем на ТФЭ ТОДГА и DN Resin-B. С учетом этого, предпочтительной выглядит схема с двумя последовательными ступенями очистки на ТФЭ DN Resin-B.

Снижение содержания урана в модельном растворе с 3.2 г/дм^3 до 0.9 мг/дм^3 позволило значительно увеличить эффективность извлечения неодима и тория.



Полученные результаты позволяют сделать вывод о принципиальной возможности применения рассмотренного метода и материалов для решения задачи фракционирования компонентов осадков ВАО, накопленных от реализации оборонной программы, с последующим отверждением образующихся потоков ВАО и САО методами остекловывания и цементирования, с целью обеспечения финансовых и технологических преимуществ.

Список литературы

1. Логунов М.В., Карпов В.И., Дружинина Н.Е. Подходы к переработке высокоактивных пульп, накопленных на ФГУП ПО «Маяк» // *Вопросы радиационной безопасности*. 2011. № 1. С. 15-28.
2. Козлов П.В., Ремизов М.Б., Макаровский Р.А. Основные подходы, опыт и проблемы переработки накопленных в емкостях жидких радиоактивных отходов сложного химического состава // *Радиоактивные отходы*. 2018. № 4(5). С. 55-66.
3. Постановление правительства № 1069 от 19.10.2012.
4. Туранов А.Н., Карандашев В.К. Извлечение редкоземельных элементов из азотнокислых растворов полимерным сорбентом, импрегнированным оксидами дифенил (диалкилкарбамоилметил)фосфинов // *Радиохимия*. 2002. Т. 44. № 6. С. 506-511.
5. Милютин В.В., Гелис В.М. Сорбция ионов РЗЭ (III), Th(IV) и U(VI) из азотнокислых растворов сорбентами на основе тетраоктилдигликольамида // *Радиохимия*. 2015. Т. 57. № 5. С. 438-441.
6. Ansari S.A., Pathak P.N. 6N,N,N',N',-TetraoctylDiglycilamide (TODGA): A Promising Extractant for Actinide-Partitioning from High-Level Waste (HLW) // *Solv. Extr. Ion Exch.* 2005. Vol. 23. No. 4. P. 463-479.
7. Чухланцева Е.В., Сергеева Н.Л. Определение макроколичеств америция сорбентом, импрегнированным тетраок-

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

тилдигликольамидом, с целью последующего спектрального определения примесей в диоксиде америция // *Аналитика и контроль*. 2012. Т. 16. № 2. С. 143-150.

References

1. Logunov M.V., Karpov V.I., Druzhinina N.E. Approaches to Reprocessing of Highly Radioactive Sludge Accumulated at the Mayak PA. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti*. 2011; 1: 15-28. (In Russ.)
2. Kozlov P.V., Remizov M.B., Makarovskij R.A. Main Approaches, Practices and Challenges Faced at Reprocessing of Liquid Radioactive Waste with Complex Chemical Composition Stored in Vessels. *Radioaktivnye othody*. 2018; 4(5): 55-66. (In Russ.)
3. Postanovlenie pravitel'stva no. 1069 ot 19.10.2012.
4. Turanov A.N., Karadashev V.K. Recovery of Rare-Earth Elements From Nitric Acid Solutions Using Polymer Sorbent Impregnated With Diphenyl (Dialkyl Carbamoyl Methyl) Phosphine Oxides. *Radiohimija*. 2002; 44(6): 506-511. (In Russ.)
5. Miljutin V.V., Gelis V.M. Sorption of Ions of REE(III), Th(IV) and U(VI) from Nitric Acid Solutions Using Tetraoctyl Diglycolamide-Based Sorbents. *Radiohimija*. 2015; 57(5): 438-441.
6. Ansari S.A., Pathak P.N. N, N, N', N',-Tetraoctyl Diglycolamide (TODGA): A Promising Extractant for Actinide-Partitioning from High-Level Waste (HLW). *Solv. Extr. Ion Exch.* 2005; 23(4): 463-479.
7. Chuhlanceva E.V., Sergeeva N.L. Determination of Americium Macroquantities



Using Tetraoctyl Diglycolamide Impregnated Sorbent for Subsequent Spectral De-

termination of Impurities in Americium Dioxide. *Analitika I kontrol'*. 2012; 16(2): 143-150. (In Russ.)

Информации об авторах / Information about the authors

И.М. Истомина – инженер-технолог 3 категории, ПО «Маяк», Озерск, Россия

П.В. Козлов – к.т.н., доцент кафедры Химии и химической технологии, начальник исследовательской лаборатории, ПО «Маяк», Озерск, Россия

А.Н. Усолкин – к.х.н., Озерск, Россия

Е.М. Дворянчикова – инженер-физик 2 категории, ПО «Маяк», Озерск, Озерск, Россия

N.M. Istomina – engineer-technologist of the third category, PA «Mayak», Ozersk, Russian Federation, e-mail: ya.pavlovanm@yandex.ru

P.V. Kozlov – Ph.D. in Technology, associate professor of the department of chemistry and chemical technology, head of research laboratory, PA «Mayak», Ozersk, Russian Federation, e-mail: kozlov_pavel@inbox.ru

A.N. Usolkin – Ph.D. in Chemistry Ozersk, Russian Federation, e-mail: podands@gmail.com

E.M. Dvoryanchikova – engineer-physicist of the second category, PA Mayak», Ozersk, Russian Federation, e-mail: elenathebrave@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23.11.2021; одобрена после рецензирования 25.03.2022; принята к публикации 29.04.2022.

The article was submitted 23.11.2021; approved after reviewing 25.03.2022; accepted for publication 29.04.2022.