

УДК 621.039.73: 546.798.23

<https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-01>

EDN APDCTL



## Высаливание америция-241 в процессе сорбции с использованием твердофазного экстрагента на основе ТОДГА

А.А. Савельев  , В.И. Рачков

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

 [aasavelev@mephi.ru](mailto:aasavelev@mephi.ru)

**Аннотация.** На сегодняшний день в проекте «Прорыв» разрабатываются эффективные методы переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ) для возвращения в топливный цикл долгоживущих радионуклидов с целью его замыкания. Одной из задач разработки замкнутого топливного цикла является переработка высокоактивных азотнокислых рафинатов PUREX-процесса. Для реализации данной задачи требуется выделение америция-241 из жидких радиоактивных отходов. При переработке и фракционировании ЖРО широко используют экстракционные и сорбционные технологии извлечения, очистки и концентрирования радионуклидов. Наибольшую эффективность и избирательность в процессах экстракции актиноидов (III) и лантаноидов (III) с редкоземельными (РЗЭ) и трансплутониевыми элементами (ТПЭ) из азотнокислых растворов переработки отработавших ядерных материалов показали экстрагенты на основе N, N, N', N' – тетраоктилдигликольамида (ТОДГА). Перед использованием твердофазного экстрагента на основе ТОДГА ионы вещества в растворе должны быть переведены в нейтральные комплексы или другие недиссоциированные соединения. Этого можно достичь путем добавления в раствор нейтральных солей, которые снижают растворимость разделяемых элементов, смещают экстракционное распределение и значительно повышают эффективность извлечения. Высаливаемое вещество извлекается в виде новой фазы – твердого осадка, жидкой или газовой фазы, причем в случае жидкостной экстракции происходит увеличение емкости экстрагента по целевому компоненту. Поэтому добавление в водную фазу солей-высаливателей, для повышения ионной силы раствора увеличивает коэффициенты распределения извлекаемых веществ, что в свою очередь, повышает емкость сорбентов. Целью настоящей работы является исследования процесса высаливания америция-241 в процессе сорбции с использованием опытного модифицированного образца ТВЭКС ТОДГА в исследуемых модельных растворах ЖРО с урановым макрокомпонентом для различных содержаний  $\text{NaNO}_3$ . В результате исследования выявлено, что наиболее высокие коэффициенты распределения при сорбции америция-241 и урана были получены в растворе с содержанием 100 г/л  $\text{NaNO}_3$ , однако для урана этот эффект выражен значительно меньше, чем для америция-241. В процессе исследования кинетики сорбции америция-241 и урана был выявлен эффект высаливания, который подтверждается величинами равновесных концентраций америция-241 и урана в растворе в одной и той же точке времени, но с разной концентрацией  $\text{NaNO}_3$ . Для америция-241 разница в равновесных концентрациях составила порядок в сторону ее уменьшения при увеличении концентрации  $\text{NaNO}_3$  до 100 г/л. Использование данного эффекта позволяет получить максимальную емкость по америцию-241 в системе с урановым макрокомпонентом.

**Ключевые слова:** америций-241, высаливание, сорбция, ТОДГА.

**Для цитирования:** Савельев А.А., Рачков В.И. Высаливание америция-241 в процессе сорбции с использованием твердофазного экстрагента на основе ТОДГА. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(4):5–10. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-01>

**For citation:** Savelev A.A., Rachkov V.I. Salting out of americium-241 in the sorption process using a solid-phase extractant based on TODGA. *Global nuclear safety*. 2023;13(4):5-10 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-04-01>

## Salting out of americium-241 in the sorption process using a solid-phase extractant based on TODGA

Aleksandr A. Savelev  , Valeriy I. Rachkov

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

 [aasavelev@mephi.ru](mailto:aasavelev@mephi.ru)

**Abstract.** Today, the «Proryv» project is developing effective methods of reprocessing irradiated nuclear fuel (SNF) to return long-lived radionuclides to the fuel cycle to close it. One of the challenges of closed fuel cycle development is the reprocessing of highly active nitric acid raffinates from the PUREX-process. To achieve this task, it is necessary to separate americium-241 from liquid radioactive waste. When processing and fractionating liquid radioactive waste, extraction and sorption technologies for the extraction, purification and concentration of radionuclides are widely used. The highest efficiency and selectivity in the extraction processes of actinoids (III) and lanthanides (III) with rare earth elements (REE) and transplutonium elements (TPE) from nitric acid solutions of spent nuclear materials reprocessing were shown by extractants based on N, N, N', N'-tetraoctyldiglycolamide (TODGA).

Before using a solid-phase extractant based on TOGDA, the ions of the substance in solution must be converted to neutral complexes or other non-dissociated compounds. This can be achieved by adding neutral salts to the solution, which reduce the solubility of the elements to be separated, shift the extraction distribution and significantly increase the extraction efficiency. The extracted substance is extracted in the form of a new phase - solid precipitate, liquid or gas phase, and in the case of liquid extraction there is an increase in the capacity of the extractant for the target component. Therefore, the addition of salts-salting agents to the aqueous phase to increase the ionic strength of the solution increases the distribution coefficients of extracted substances, which in turn increases the capacity of sorbents. The purpose of this work is to study the process of salting out of americium-241 during sorption using an experimental modified sample of solid-phase extractant based on TODGA in the studied model solutions of liquid radioactive waste with a uranium macrocomponent for different  $\text{NaNO}_3$  contents. The study revealed that the highest distribution coefficients for the sorption of americium-241 and uranium were obtained in a solution containing 100 g/l  $\text{NaNO}_3$ , but for uranium this effect is much less pronounced than for americium-241. During the study of the sorption kinetics of americium-241 and uranium, the salting effect was revealed, which is confirmed by the values of the equilibrium concentrations of americium-241 and uranium in solution at the same time point but with different  $\text{NaNO}_3$  concentrations. The difference in the equilibrium concentrations for americium-241 was an order of magnitude towards its decrease when  $\text{NaNO}_3$  concentration was increased up to 100 g/litre. The use of this effect makes it possible to obtain the maximum capacity for americium-241 in the system with uranium macrocomponents.

**Keywords:** americium-241, salting out, sorption, TODGA.

### Введение

На сегодняшний день в проекте «Прорыв» разрабатываются эффективные методы переработки облученного ядерного топлива (ОЯТ) для возвращения в топливный цикл долгоживущих радионуклидов с целью его замыкания [1-3]. Одной из задач разработки замкнутого топливного цикла является переработка высокоактивных азотнокислых рафинатов PUREX-процесса [4-6]. Для реализации данной задачи требуется выделение наиболее радиоактивных минорных актинидов – америция-241 и юрия-244, которые образуются при работе реактора и находятся в облученном топливе [5, 7]. Основные изотопы юрия имеют короткий период полураспада и обладают высокой радиоактивностью, в том числе нейтронную, что значительно повышает радиоактивность ядерного топлива при возвращении его в реактор для трансмутации, затрудняя его производство и переработку. Поэтому, желательно извлекать юрий из облученного топлива при переработке и хранить его в течении 50–100 лет, возвращая в реактор продукты его распада – изотопы плутония и долгоживущий юрий. Америций-241 необходимо выделять из ОЯТ по нескольким причинам. Во-первых, это высокотоксичный и долгоживущий элемент с периодом полураспада 432,6 года (распадается в нептуний-237 с периодом полураспада более 2,2 миллиона лет). Во-вторых, при хранении ОЯТ с америцием-241 растет его альфа-активность (за счет распада плутония-241 с периодом полураспада около 14 лет). В заключении следует отметить, что америций-241 проявляет химические свойства как редкоземельные элементы (РЗЭ), которых в облученном топливе довольно много (лантан, церий, неодим и др.). Выделение минорных актинидов позволит осуществлять трансмутацию в реакторах IV поколения с получением короткоживущих радионуклидов или стабильных элементов [8]. Концепция выделения минорных актинидов позволит существенно сократить суммарную активность ОЯТ в долгосрочной перспективе. Однако разделение америция, юрия и лантаноидов – сложная задача, поскольку химические свойства этих элементов очень похожи [9].

В проекте «Прорыв» реализуется комплексный подход к переработке высокоактивных отходов, т.е.

фракционирование – выделение в одном цикле переработки сразу нескольких групп схожих по химическим, одинаковым/однородным физическим свойствам радионуклидов. При переработке и фракционировании жидких радиоактивных отходов (ЖРО) широко используют экстракционные и сорбционные технологии извлечения, очистки и концентрирования радионуклидов [10-13]. Наибольшую эффективность и избирательность в процессах экстракции актиноидов (III) и лантаноидов (III) с редкоземельными (РЗЭ) и трансплутониевыми элементами (ТПЭ) из азотнокислых растворов переработки отработавших ядерных материалов показали экстрагенты на основе  $N, N, N', N'$  – тетраоктилдигликольамида (ТОДГА) [14-18]. Структура ТОДГА представлена на рисунке 1.

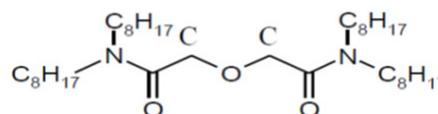


Рисунок 1. Структура  $N, N, N', N'$  – тетраоктилдигликольамида (ТОДГА)

Figure 1. Structure of  $N, N, N', N'$  – tetraoctyldiglycolamide (TOGDA)

Тем не менее, у экстрагентов имеются существенный недостаток – низкая емкость из-за образования третьей фазы в растворе и физический унос экстрагента. Одним из способов исключения этих недостатков является иммобилизация экстрагента на твердом пористом носителе (грануле), что также упрощает аппаратное оформление и существенно снижает расход экстрагента. Однако в результате стабилизации поверхности раздела фаз в гранулах пористого материала и увеличении диффузионных затруднений несколько замедляется скорость экстракции металлов. Во многих случаях так называемая «гранульная» экстракция оказывается эффективной при извлечении металлов из сложных растворов благодаря возможности широкого варьирования типа матрицы, состава экстрагента в гранулах и способа его введения в твердый носитель. Эти параметры позволяют подобрать благоприятные условия экстракции металлов. Полученные результаты исследований применения ТОДГА привели к созданию твердофазных экстрагентов

(ТВЭКС), получаемых с помощью полимеризации мономеров в присутствии экстрагента. При изготовлении ТВЭКСа тип мономера и содержание экстрагента оказывают решающее влияние на размер, количество и характер расположения микроячеек, содержащих экстрагент, степень их соединенности между собой и с внешней поверхностью гранул, что определяет в конечном счете как механические, так и экстракционные свойства ТВЭКСов [19].

При этом емкость зависит как от количества импрегнированного экстрагента, так и от состава водной фазы, в которой вещества находятся в виде ионов, слабо переходящих в фазу твердофазного экстрагента. Поэтому перед использованием ТВЭКС ТОДГА ионы вещества в растворе должны быть переведены в нейтральные комплексы или другие недиссоциированные соединения. Этого можно достичь путем добавления в раствор нейтральных солей, которые снижают растворимость разделяемых элементов, смещают экстракционное распределение и значительно повышают эффективность извлечения. Этот эффект называется высаливание и часто встречается при экстракции в высокосолевых исследуемых средах. Высаливанием называется выделение вещества из раствора путем добавления в раствор другого хорошо растворимого в данном растворителе вещества: высаливателя. Высаливаемое вещество извлекается в виде новой фазы – твердого осадка, жидкой или газовой фазы, причем в случае жидкостной экстракции происходит увеличение емкости экстрагента по целевому компоненту. Высаливание происходит в результате повышения термодинамической активности высаливаемого вещества при добавлении высаливателя, независимо от того, происходит ли образование новой фазы при этом процессе или нет [20]. Поэтому добавление в водную фазу солей-высаливателей, для повышения ионной силу раствора увеличивает коэффициенты распределения извлекаемых веществ, что в свою очередь, повышает емкость сорбентов. Ранее было проведено исследование сорбции америция-241 и урана с использованием твердофазного экстрагента на основе N, N, N', N' – тетраактилдигликольамида (ТВЭКС ТОДГА) [21,22]. Однако в данных статьях не была подробно рассмотрена кинетика америция-241 и урана в процессе их сорбции с использованием опытного модифицированного образца ТВЭКС ТОДГА с различным содержанием  $\text{NaNO}_3$  в исследуемых растворах. Данная работа посвящена исследованию процесса высаливания америция-241 и урана в процессе их сорбции с целью увеличения емкости ТВЭКС ТОДГА в модельных растворах ЖРО с различным содержанием солей. Данное исследование выполнено в рамках научно-исследовательского проекта: «Расчетно-экспериментальное обоснование радиационно-эквивалентного удаления радиоактивных отходов ПЯТЦ, разработка обеспечивающих технологий и оборудования», проекта «Прорыв».

#### Постановка задачи исследования

Исследование процесса высаливания америция-241 и урана в процессе их сорбции с использованием ТВЭКС ТОДГА проводилась для наиболее перспек-

тивного опытного модифицированного образца ТВЭКС ТОДГА [19,20]. Состав базовой матрицы образца – высокопористый полистирол; шивка – дивинилбензол, содержание стирола, этилстирола и других компонентов полимеризационной смеси соответствует промышленным ТВЭКС–ТБФ и ТВЭКС–ФОР. В образце использовалась модификация базовой полистирольной матрицы с применением полиакрилонитрила, позволяющая фиксировать ТОДГА в матрице не только за счет физической адсорбции в микропорах на полистироле, но и за счет ковалентных или координационных связей с функциональными группами матрицы. Дополнительная фиксация ТОДГА в матрице может привести к уменьшению вымываемости экстрагента и улучшению эксплуатационных характеристик синтезированного ТВЭКСа. Кроме того, модификация состава матрицы и ее промежуточная обработка могут сказаться на скорости диффузии целевых компонентов и, соответственно, кинетических характеристиках ионообменных процессов. Опытный модифицированный образец представлен на рисунке 2, его состав представлен в таблице 1.



Рисунок 2. Исследуемый опытный модифицированный образец ТВЭКС ТОДГА

Figure 2. The experimental modified sample of solid-phase extractant based on TODGA under study

Таблица 1. Состав опытного модифицированного образца ТВЭКС ТОДГА

Table 1. Composition of an experimental modified sample of solid-phase extractant based on TODGA

| Модифицирующий мономер (содержание 40% масс)    | Нитрил акриловая кислота |
|---|--------------------------|
| Содержание ТОДГА, % масс                        | 40                       |
| Тип функционала                                 | катионит                 |
| Полная объемная емкость матрицы, мг-экв/г       | 0,72                     |
| Степень конверсии НАК, %                        | 25                       |
| Содержание полимера НАК, % масс                 | 30                       |
| Температура гидролиза, °С                       | 70                       |
| Пористость матрицы, %                           | 57,7                     |
| Удельная поверхность матрицы, м <sup>2</sup> /г | 11,8                     |

В исследовании в качестве соли-высаливателя использовали  $\text{NaNO}_3$ . Для исследования процесса высаливания в системе америция-241 и урана в процессе сорбции в эксперименте использовался метод ограниченного объема, т.е. обменный процесс происходит в реакторе с постоянным объемом перемешиваемого раствора. Аналитический контроль объемной активности америция-241 (59,54 кэВ) проводился с использованием гамма-спектрометрического автоматизиро-

ванного спектрометра. Погрешность каждого измерения составляла не более 12–13%. Измеренная гамма-спектрометрическим методом объемная активность америция-241 в растворе затем пересчитывалась в размерность мг/л. Определение содержания урана в модельных растворах, содержащих америций-241, проводилось с использованием метода ICP-MS (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой). Погрешность измерения составляет 5 % [23].

Для расчета содержания америция-241 и урана в ТВЭКС ТОДГА, в соответствии с материальным балансом, использовалась следующая формула (1):

$$C_{\text{ТВЭКС}} = V_{p-p} (C_{\text{исхMe}} - C_{\text{остMe}}) / V_{\text{ТВЭКС}}, \quad (1)$$

где  $V_{p-p}$  – объем раствора, мл;

$C_{\text{исхMe}}$  – исходная концентрация радионуклида в растворе, мг/л;

$C_{\text{остMe}}$  – остаточная концентрация радионуклида в растворе, мг/л;

$V_{\text{ТВЭКС}}$  – объем ТВЭКС, мл;

$C_{\text{ТВЭКС}}$  – концентрация радионуклида в ТВЭКС, мг/л.

Коэффициент распределения определялся по формуле (2):

$$K_d = C_{\text{ТВЭКС}} / C_{\text{MeP-P}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{MeP-P}}$  – концентрация радионуклида в растворе, мг/л.

### Проведение эксперимента

С применением описанных выше методик аналитического контроля и формул для расчета содержания америция-241 и урана, с учетом материального баланса (1–2), было проведено исследование их кинетики из модельных высокосолевых растворов ЖРО с различным содержанием  $\text{NaNO}_3$ .

Для этого было приготовлено три модельных низкокислотных ( $\text{pH}=3,4$ ) раствора со следующими составами:

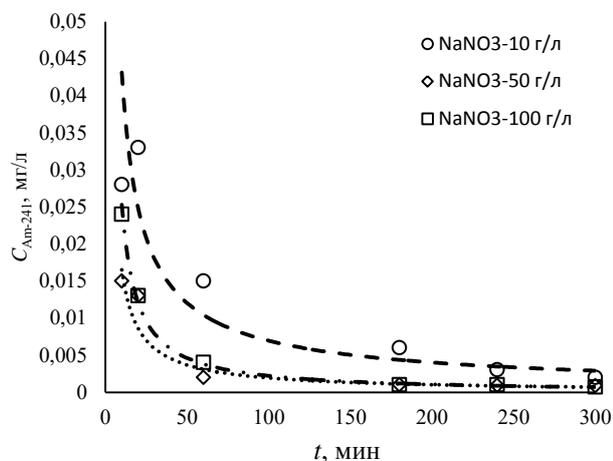


Рисунок 3. Кинетика сорбции америция-241 в модельных растворах ЖРО с различным содержанием  $\text{NaNO}_3$   
Figure 3. Kinetics of americium-241 sorption in model solutions of LRW with different  $\text{NaNO}_3$  contents

1.  $\text{NaNO}_3$  – 10 г/л: америций-241 – 0,044 мг/л; уран – 1452 мг/л;

2.  $\text{NaNO}_3$  – 50 г/л: америций-241 – 0,031 мг/л; уран – 1014 мг/л;

3.  $\text{NaNO}_3$  – 100 г/л: америций-241 – 0,040 мг/л; уран – 1000 мг/л.

Эти исследуемые модельные растворы ЖРО характеризуются высоким солевым составом и относительно низкой кислотностью среды. Объемное соотношение растворов и ТВЭКСа составляло 50:1 (мл). Исследования проводили при комнатной температуре с непрерывным перемешиванием механическими мешалками. Время контакта образца в растворах длилось в течение 300 минут. На основании полученных данных были построены кинетические кривые сорбции америция-241 (рис. 3) и урана (рис. 4) в зависимости от содержания  $\text{NaNO}_3$  в растворе.

### Обсуждение результатов

Из анализа кинетики сорбции америция-241, приведенного на рисунке 3, следует, что если сравнить равновесные концентрации америция-241 в растворе в одной той же точке (300 минут) в последовательности 10 – 50 – 100 г/л  $\text{NaNO}_3$ , то они будут иметь значения соответственно значения 0.002 – 0.001 – 0.0007 мг/л. Таким образом, можно констатировать, что в данной системе наблюдается слабый эффект высаливания. При анализе зависимости, представленной на рисунке 4, можно сделать вывод, что при содержании 100 и 50 г/л  $\text{NaNO}_3$  кинетика сорбции урана практически совпадают. Подтверждают высказанное предположение данные, приведенные в таблице 2, при сравнении коэффициентов распределения америция-241 и урана при разном солевом фоне раствора.

Анализ данных, представленных в таблице 2, показывает, что наиболее высокие коэффициенты распределения при сорбции америция-241 и урана были получены в растворе с содержанием 100 г/л  $\text{NaNO}_3$ ,

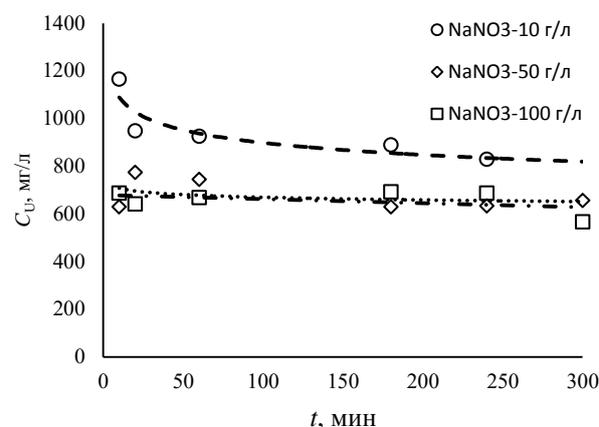


Рисунок 4. Кинетика сорбции урана в модельных растворах ЖРО с различным содержанием  $\text{NaNO}_3$   
Figure 4. Kinetics of uranium sorption in model solutions of LRW with different  $\text{NaNO}_3$  contents

Таблица 2. Сравнение величин коэффициентов распределения для америция-241 и урана из модельных растворов ЖРО с содержанием 10 – 50 – 100 г/л NaNO<sub>3</sub>Table 2. Comparison of the values of the distribution coefficients for americium-241 and uranium from model LRW solutions containing 10 – 50 – 100 g/l NaNO<sub>3</sub>

| Время контакта, мин. | $Kd_U$ для 10 г/л NaNO <sub>3</sub> | $Kd_U$ для 50 г/л NaNO <sub>3</sub> | $Kd_U$ для 100 г/л NaNO <sub>3</sub> | $Kd_{Am-241}$ для 10 г/л NaNO <sub>3</sub> | $Kd_{Am-241}$ для 50 г/л NaNO <sub>3</sub> | $Kd_{Am-241}$ для 100 г/л NaNO <sub>3</sub> |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|
| 10                   | 12                                  | 31                                  | 40                                   | 29   | 0.018                                      | 0.025                                       |
| 20                   | 27                                  | 16                                  | 47                                   | 17   | 66   | 113   |
| 60                   | 29                                  | 18                                  | 42                                   | 102  | 806  | 506   |
| 180                  | 32                                  | 31                                  | 39                                   | 334  | 1663                                       | 1920  |
| 240                  | 38                                  | 30                                  | 40                                   | 753  | 1663                                       | 2117  |
| 300                  | – <sup>a</sup>                      | 27                                  | 59                                   | 931  | 1743                                       | 3045  |

Примечание: <sup>a</sup> результат не получен

однако для урана этот эффект выражен значительно меньше, чем для америция-241. В процессе исследования кинетики сорбции америция-241 и урана был выявлен эффект высаливания, который подтверждается величинами равновесных концентраций америция-241 и урана в растворе в одной и той же точке времени, но с разной концентрацией NaNO<sub>3</sub>. Для америция-241 разница в равновесных концентрациях составила порядок в сторону ее уменьшения при увеличении концентрации NaNO<sub>3</sub> до 100 г/л. Данный эффект позволяет получить максимальную емкость по америцию-241 в системе с урановым макрокомпонентом.

#### Выводы

В работе проведено исследование процесса высаливания америция-241 и урана в процессе их сорбции с использованием опытного модифицированного образца ТВЭКС ТОДГА с различным содержанием

NaNO<sub>3</sub> в исследуемых модельных высокосолевых растворах ЖРО с урановым макрокомпонентом. Наиболее высокие коэффициенты распределения при сорбции америция-241 и урана были получены в растворе с содержанием 100 г/л NaNO<sub>3</sub>, однако для урана этот эффект выражен значительно меньше, чем для америция-241. В процессе исследования кинетики сорбции америция-241 и урана был выявлен эффект высаливания, который подтверждается величинами равновесных концентраций америция-241 и урана в растворе в одной и той же точке времени, но с разной концентрацией NaNO<sub>3</sub>. Для америция-241 разница в равновесных концентрациях составила порядок в сторону ее уменьшения при увеличении концентрации NaNO<sub>3</sub> до 100 г/л. Использование данного эффекта позволяет получить максимальную емкость по америцию-241 в системе с урановым макрокомпонентом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Adamov E.O., Mochalov Y.S., Rachkov V.I., Khomyakov Yu.S., Shadrin A.Yu. et al. Spent nuclear fuel reprocessing and nuclear materials recycling in two-component nuclear energy. *Atomic energy*. 2021;130:29–35. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-021-00769-w>
- Адамов Е.О., Каширский А.А., Муравьев Е.В., Толстоухов Д.А. Структура и параметры двухкомпонентной ядерной энергетики при переходе к замыканию ядерного топливного цикла. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2016;5:14–32. EDN: WRJCHN. Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_26931859\\_70056435.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_26931859_70056435.pdf) (дата обращения: 25.07.2023).
- Адамов Е.О., Алексахин Р.М., Большов Л.А., Дедуль А.В., Орлов В.В. и др. Проект «Прорыв» – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2015;1:5–13. EDN TLUFGN. Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_23112795\\_31777322.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_23112795_31777322.pdf) (дата обращения: 25.07.2023).
- Shadrin A.Y., Ivanov V.B., Skupov M.V., Troyanov V.M., Zherebtsov A.A. Comparison of closed nuclear fuel cycle technologies. *Atomic Energy*. 2016;(121):119–126. <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0171-2>
- Мясоедов Б.Ф., Калмыков С.Н., Шадрин А.Ю. Химические технологии замыкания ядерного топливного цикла. *Вестник Российской академии наук*. 2021;(91)5:459–469. EDN: UHXNNP. <https://doi.org/10.31857/S0869587321050170>
- Ровный С.И., Шевцев П.П. Современное состояние и пути совершенствования радиохимической технологии выделения и очистки урана и плутония. *Вопросы радиационной безопасности*. 2007;2(46):5–13. EDN: JUUSRF. Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_11643604\\_37252633.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_11643604_37252633.pdf) (дата обращения: 25.07.2023).
- Sharov V.E., Kostikova G.V. Influence of the nature of the diluent on the extraction of Eu(III), Am(III), and Cm(III) with N,N,N',N'-Tetrabutyl diglycolamide from nitric acid solutions. *Radiochemistry*. 2023;(65):45–51. <https://doi.org/10.1134/S1066362223010071>
- Potential benefits and impacts of advanced nuclear fuel cycles with actinide partitioning and transmutation. Paris: OECD Publishing, NEA. 2011. Available at: [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_14572/potential-benefits-and-impacts-of-advanced-nuclear-fuel-cycles-with-actinide-partitioning-and-transmutation?details=true](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14572/potential-benefits-and-impacts-of-advanced-nuclear-fuel-cycles-with-actinide-partitioning-and-transmutation?details=true) (accessed: 15.07.2023).
- Runde W.H., Schulz W.W. Americium. In: Morss L.R., Edelstein N.M., Fuger J. (eds) *The chemistry of the actinide and transactinide elements*. Springer, Dordrecht. 2008. P. 1265–1395. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3598-5\\_8](https://doi.org/10.1007/1-4020-3598-5_8)
- Lyzlova E.V., Glukhova A.V., Konnikov A.V., Dyug K.O. Development of a sorption technique for the selective separation of plutonium and americium from nitric acid intermediate-level wastes of chemical and metallurgical production. *Radiochemistry*. 2022;64(2):176–182. EDN: YBOFJM. <https://doi.org/10.1134/S1066362222020096>

11. Milyutin V.V., Gelis V.M., Nekrasova N.A., Firsova L.A., Kharitonov O.V., Baulin V.E. Sorption of REE(III), Th(IV), and U(VI) ions from nitric acid solutions with sorbents based on tetraoctyldiglycolamide. *Radiochemistry*. 2015;57(5):513–517. EDN VAGAEX. <https://doi.org/10.1134/S1066362215050100>
12. Виданов В.Л., Парабин П.В., Гуров Г.Л., Широков С.С., Шадрин А.Ю. «Горячий» тест разделения америция и кюрия методом вытеснительной комплексообразовательной хроматографии. *Радиохимия*. 2023;65(3):234–239. EDN: ENRFDS. <https://doi.org/10.1134/S1066362223030049>
13. Milyutin V.V., Khesina Z.B., Lakyushina A.A., Buryak A.K., Nekrasova N.A., Kononenko O.A., Pavlov Yu.S. Chemical durability and radiation resistance of sorbents based on N,N,N',N'-tetra-n-octyldiglycolamide. *Radiochemistry*. 2016;58(1):59–62. EDN: WSLYNB. <https://doi.org/10.1134/S1066362216010094>
14. Mokhodoeva O.B., Myasoedova G.V., Zakharchenko E.A. Solid-phase extractants for radionuclide preconcentration and separation. New possibilities. *Radiochemistry*. 2011;53(1):35–43. EDN: OCDEEH. <https://doi.org/10.1134/S106636221101005X>
15. Ansari S., Pathak P., Mohapatra P., Manchanda V.K. Chemistry of diglycolamides: promising extractants for actinide partitioning. *Chemical Reviews*. 2012;(3)112:1751–1772. <https://doi.org/10.1021/cr200002f>
16. Ansari S.A., Pathak P.N., Manchanda V.K., Husain M., Prasad A.K., Parmar V.S. N,N,N',N'- tetraoctyl diglycolamide (TODGA): a promising extractant for actinide partitioning from high level waste (HLW). *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2005;23(4):463–479. <https://doi.org/10.1081/SEI-200066296>
17. Sasaki Y., Tachimori S. Extraction of actinides (III), (IV), (V), (VI), and lanthanides (III) by structurally tailored diamides. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2002;20(1):21–34. <https://doi.org/10.1081/SEI-100108822>
18. Horwitz E.P., McAlister D.R., Bond A.H., Barrans Jr R.E. Novel extraction of chromatographic resins based on tetraalkyldiglycolamides: characterization and potential applications. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2005;23(3):319–344. <https://doi.org/10.1081/SEI-200049898>
19. Коровин В.Ю., Рандаревич С.Б. Синтез, свойства и применение твердых экстрагентов (обзор). *Химическая технология*. 1991;(5):3. Режим доступа: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=ru&user=wd3JTiYAAAAAJ&citation\\_for\\_view=wd3JTiYAAAAAJ:dshw04ExmUIC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=wd3JTiYAAAAAJ&citation_for_view=wd3JTiYAAAAAJ:dshw04ExmUIC) (дата обращения: 02.08.2023).
20. Аляпышев М.Ю., Бабаин В.А., Кенф Е.В. и др. Способ выделения америция из жидких радиоактивных отходов и отделения его от редкоземельных элементов. *Патент РФ № 2603405 RU. Дата публикации 27.11.2016. Бюл. №33*. Режим доступа: [https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=0002603405&TypeFile=html](https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=0002603405&TypeFile=html) (дата обращения: 02.08.2023).
21. Klochkova N.V., Savel'ev A.A., Pozdnyakova N.Y., Pisanenko S.S., Anan'ev A.V. Investigation of americium sorption from model liquid radwaste solutions using TODGA-based solid-phase extractant. *Atomic Energy*. 2019;127:40–44. <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00581-7>
22. Савельев А.А., Клочкова Н.В., Рачков В.И. Определение коэффициентов диффузии америция и урана в процессе их сорбции на твердофазном экстрагенте на основе ТОДГА. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»*. 2020;9(4):293–297. EDN: EBLTGY. <https://doi.org/10.1134/S2304487X20040070>
23. Савельев А.А., Клочкова Н.В., Рачков В.И. Методы аналитического контроля америция-241 и урана в процессе их сорбции на твердофазном экстрагенте на основе ТОДГА. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2021;12(1):16–20. EDN: GKYTQM. <https://doi.org/10.56304/S2079562920060482>

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Савельев А.А.** – изучение тематического материала, систематизация информации, выявление и исследование факторов, требующих дополнительных исследований и принятия компенсирующих мер для решения проблем, написание текста статьи;

**Рачков В.И.** – концепция и качественная разработка исследования.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без внешних источников финансирования.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

**Александр Александрович Савельев**, старший преподаватель института ядерной физики и технологий, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7975-9211>

e-mail: aasavelev@mephi.ru

**Валерий Иванович Рачков**, член корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники института ядерной физики и технологий, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Российская Федерация.

e-mail: rvi@proryv2020.ru

## AUTHORS' CONTRIBUTION:

**Savelev A.A.** – study of thematic material, systematization of information, results analysis, identification and researching factors requiring further research and the implementation of compensatory measures to address issues writing the text of the article;

**Rachkov V.I.** – conceptualization and qualitative research design.

## FUNDING:

The study had no external funding.

## CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

**Aleksandr A. Savelev**, Senior Lecturer at the Institute of Nuclear Physics and Technology, National Research Nuclear University «Mephi», Russian Federation.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7975-9211>

e-mail: aasavelev@mephi.ru

**Valeriy I. Rachkov**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Thermophysics, Institute of Nuclear Physics and Technology, National Research Nuclear University «Mephi», Russian Federation.

e-mail: rvi@proryv2020.ru

Поступила в редакцию 29.09.2023

После доработки 14.11.2023

Принята к публикации 21.11.2023

Received 29.09.2023

Revision 14.11.2023

Accepted 21.11.2023