

Научная статья
УДК 621.039.73
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.021

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СОРБЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ЦЕЗИЯ ИЗ ЩЕЛОЧНЫХ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИТАРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ «ПО «МАЯК»»

Павел Васильевич Козлов¹, Дарья Владимировна Маркова², Сергей Минуллович Шайдуллин³, Кирилл Алексеевич Феоктистов⁴, Виталий Витальевич Милютин⁵, Андрей Михайлович Егорин⁶

^{1, 2, 3, 4}Производственное объединение «Маяк», Озерск, Россия

⁵Институт физической химии и электрохимии Российской академии наук, Москва, Россия

⁶Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

Автор, ответственный за переписку: Павел Васильевич Козлов, cpl@po-mayak.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования сорбционного выделения цезия из раствора емкостей — хранилищ щелочных высокоактивных отходов (ВАО) ФГУП «ПО «Маяк» с использованием резорцинформальдегидной смолы РФС-и и неорганического сорбента «Ферсал» на основе модифицированного ферроцианида никеля. Показано, что по основным сорбционным показателям «Ферсал» превосходит РФС-и. Однако РФС-и демонстрирует устойчивую работу в повторяющихся циклах в отличие от «Ферсала». Сделан предварительный вывод о перспективности обоих сорбентов для очистки реальных щелочных ВАО предприятия.

Ключевые слова:

высокоактивные отходы, емкости-хранилища, сорбция, десорбция, цезий, неорганический сорбент, статика, резорцинформальдегидная смола, динамика, коэффициент очистки

Для цитирования:

Результаты испытаний сорбционных материалов для извлечения радионуклидов цезия из щелочных высокоактивных отходов Федерального государственного унитарного предприятия «ПО «Маяк» / П. В. Козлов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 2. С. 116–122. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.021

Original article

RESULTS OF SORPTION MATERIALS TESTING FOR REMOVAL OF CESIUM RADIONUCLIDES FROM MAYAK ALKALINE HIGH-LEVEL WASTE

Pavel V. Kozlov¹, Daria V. Markova², Sergey M. Shaydullin³, Kirill A. Feoktistov⁴, Vitaly V. Milyutin⁵, Andrey M. Egorin⁶

^{1, 2, 3, 4}FSUE Mayak Production Association, Ozersk, Russia

⁵Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁶Institute of Chemistry, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Corresponding author: Pavel Vasilievich Kozlov, cpl@po-mayak.ru

Abstract

The research results are presented of sorption extraction of cesium from alkaline high-level waste solutions stored in Mayak tanks using the resorcinol-formaldehyde resin RFS-i and modified nickel ferrocyanide-based inorganic sorbent Fersal. It is shown that the overall sorption performance of the Fersal exceeds that of the RFS-i. However, unlike the Fersal, the RFS-i remains stable during repeated cycles. A preliminary conclusion has been drawn on the prospects of use of both sorption materials for decontamination of Mayak real alkaline HLW.

Keywords:

high-level waste, storage tanks, sorption, desorption, cesium, inorganic sorbent, statics, resorcinol-formaldehyde resin, dynamics, decontamination factor

For citation:

Results of sorption materials testing for removal of cesium radionuclides from Mayak alkaline high-level waste / P. V. Kozlov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 2. P. 116–122. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.021

Введение

В настоящее время на ФГУП «ПО «Маяк»» накоплено значительное количество (более 14,5 тыс. м³) щелочных высокоактивных пульп, образовавшихся с 1968 по 1986 гг. в результате применения осадительных технологий при переработке облученного топлива ядерных реакторов. Примерно половину из указанного объема составляет высокоминерализованная осветленная фаза, активность которой более чем на 99 % определяется наличием радионуклида ¹³⁷Cs.

Для переработки данного вида ВАО специалистами ФГУП «ПО «Маяк»» и ряда других организаций предлагались различные технологические схемы, предусматривающие отдельную переработку осветленной фазы и осадков [1]. Важной составляющей предлагаемых схем являлась разработка методов выделения основного дозобразующего компонента (^{137}Cs) из осветленной части емкостей-хранилищ. Проведение этой операции позволит резко снизить радиационную нагрузку на персонал на всех дальнейших стадиях переработки, а очищенные растворы перевести в категорию САО и осуществить их иммобилизацию методом цементирования. При этом полученный компаунд по удельной активности будет относиться к РАО 3-го класса согласно [2], а упаковка РАО (контейнер НЗК) будет соответствовать требованиям [3] по МЭД на ее поверхности.

Для извлечения цезия из щелочных ВАО перспективным является сорбционный метод. Для его осуществления предлагалось использовать различные типы сорбентов: резорцинформальдегидные сорбенты (РФС) различных марок [4], неорганический сорбент зарубежного производства марки «Клевасол» [5], а также новый отечественный неорганический сорбент на основе модифицированного ферроцианида никеля марки «Ферсал» [6].

В данной работе приведены результаты исследования сорбционного выделения цезия из модельного и реального растворов емкостей — хранилищ щелочных ВАО ФГУП «ПО «Маяк»» с использованием резорцинформальдегидной смолы РФС-и и неорганического сорбента «Ферсал» в статическом и динамическом режимах с оценкой устойчивости сорбционных характеристик в повторяющихся циклах «сорбция — десорбция».

Методика и материалы

При проведении работы использовали следующие сорбенты.

«Ферсал» — неорганический композиционный сорбент на основе модифицированного ферроцианида никеля. Опытный лабораторный образец синтезирован в ИФХЭ РАН совместно с ООО «Комфинсервис». Сорбент представляет собой гранулы зеленого цвета неправильной формы с размером частиц 0,25–3,0 мм. Насыпная плотность 0,54 г/см³.

РФС-и — органический ионит на основе непористой резорцинформальдегидной смолы. Опытный лабораторный образец, синтезирован и предоставлен для испытаний ИХ ДВО РАН, город Владивосток. Сорбент представляет собой гранулы неправильной формы черного цвета с размером частиц 0,25–1,0 мм. Насыпная плотность 0,68 г/см³.

Сорбент «Ферсал» перед началом испытаний просеивали на сите с получением фракции от 0,25 до 0,50 мм и высушивали на воздухе при температуре 60 °С до постоянного веса.

Резорцинформальдегидную смолу РФС-и перед началом испытаний переводили в рабочую натриевую форму путем последовательной обработки в статических условиях раствором HNO_3 с молярной концентрацией 1 моль/дм³, водой и раствором NaOH с молярной концентрацией 1,0 моль/дм³. Затем сорбент промывали дистиллированной водой и сушили на воздухе при температуре 60 °С до постоянного веса.

Эксперименты по сорбции в статических условиях проводили из реального и модельного растворов ВАО. Химический состав реального раствора представлен в табл. 1. Радиохимический состав определяется следующими радионуклидами, Бк/дм³: ^{137}Cs — $2,8 \cdot 10^{10}$, ^{134}Cs — $5,0 \cdot 10^7$, ^{154}Eu — $2,5 \cdot 10^7$, альфа-излучающими радионуклидами — $2,6 \cdot 10^7$.

Химический состав модельного раствора приведен в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав растворной части НВАО

Концентрация компонента в растворе, г/дм ³															
NaOH	Na	Al	Cs	Cr	Ni	Ca	Si	K	Mg	Pu	U	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ²⁻
90	94	10	0,05	3	< 0,1	0,3	0,8	0,6	< 0,1	0,24	0,15	< 0,1	0,28	0,73	118

Таблица 2

Состав модельного раствора, имитирующего растворную часть НВАО

Концентрация компонента в растворе, г/дм ³									Массовая концентрация сухого остатка, г/дм ³	Плотность, г/см ³
NaOH	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	AlO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	CrO ₄ ²⁻	SiO ₃ ²⁻	K ⁺	Cs ⁺		
100	110	35	13	1,5	0,9	0,5	0,6	0,05	312	1,195

Массовое содержание Na^+ в модельном растворе составляет примерно 100 г/дм^3 .

К модельному раствору добавлялась аликвота растворной части НВАО $1 \text{ см}^3/\text{дм}^3$ до активности в растворе по ^{137}Cs 10^7 Бк/дм^3 . Раствор тщательно перемешивали. После выдержки раствора в течение 24 ч проводили отбор пробы раствора для проведения радиохимического анализа.

Для проведения экспериментов отбирали по три навески массой $0,1 \text{ г}$ каждого сорбента. Навески воздушно-сухих сорбентов помещали в 20 см^3 раствора в герметично закрывающиеся конические колбы. Затем производили непрерывное перемешивание фаз на перемешивающем устройстве ЛАБ-ПУ-01. Время контакта сорбента и раствора составило 24 ч. Соотношение массы твердой фазы сорбента к объему модельного раствора составляло $1 : 200$.

По окончании контакта фазы разделяли фильтрованием на бумажном фильтре «белая лента». Пробы полученных фильтратов были исследованы на остаточную гамма-активность цезия на полупроводниковом спектрометре энергий гамма-излучения типа СЕГ-01 КП-ИФТП. За результат испытания принимали среднее арифметическое значение, полученное после исключения грубых погрешностей.

По результатам анализов вычисляли коэффициент распределения K_d ($\text{см}^3/\text{г}$) цезия по формуле:

$$K_d = \frac{A_o - A_\phi}{A_\phi} \times \frac{V_p}{m_c}, \quad (1)$$

где A_o — удельная активность ^{137}Cs в исходном растворе, Бк/дм^3 ; A_ϕ — удельная активность ^{137}Cs в фильтрате, Бк/дм^3 ; V_p — объем раствора, дм^3 ; m_c — масса сорбента, г .

Сорбцию цезия в динамическом режиме проводили только из модельного раствора. Эксперименты проводили при температуре окружающей среды на колонках с соотношением $H : D = 4 : 1$ и объемом сорбента 2 см^3 . Растворы подавали сверху вниз.

Проводили два цикла сорбции цезия. Скорость фильтрации раствора на стадии сорбции и последующих стадиях промывки, десорбции и регенерации составляла от 3,5 до 4,0 к. о / ч. Фильтраты после сорбции собирали по фракциям, объем одной фракции в среднем составлял 10 к. о. Каждую фракцию анализировали на удельную активность радионуклида ^{137}Cs .

По результатам анализа коэффициент очистки $K_{оч}$ вычисляли по формуле:

$$K_{оч} = \frac{A_o}{A_\phi}, \quad (2)$$

где A_o — объемная активность цезия в исходном растворе, Бк/дм^3 ; A_ϕ — объемная активность цезия в фильтрате, Бк/дм^3 .

Динамическую обменную емкость DE_v (мг/см^3) вычисляли по формуле:

$$DE_v = \frac{m_{Cs}}{V_c}, \quad (3)$$

где m_{Cs} — масса сорбированного ^{137}Cs до проскока, мг ; V_c — объем сорбента в колонке, см^3 .

Извлечение цезия с сорбентов «Ферсал», РФС-и проводили десорбирующими раствором с молярной концентрацией азотной кислоты 8 и 1 моль/ дм^3 соответственно. Элюаты собирали по фракциям, объем одной фракции составлял 1,8 к. о. Каждую фракцию анализировали на удельную активность радионуклида ^{137}Cs .

Степень десорбции D (%) вычисляли по формуле:

$$D = \frac{A_\phi}{A_c} \cdot 100, \quad (4)$$

где A_ϕ — активность десорбированного ^{137}Cs в элюате, Бк ; A_c — активность ^{137}Cs на сорбенте, Бк .

Для повторного использования сорбенты регенерировали путем перевода в исходную рабочую форму. РФС-и переводили в Na-форму путем пропускания через колонку раствора NaOH с молярной концентрацией $1,0 \text{ моль/дм}^3$. Регенерацию сорбента «Ферсал» проводили раствором, содержащим $0,3 \text{ моль/дм}^3 \text{ NaNO}_2$, $0,6 \text{ моль/дм}^3 \text{ CH}_3\text{COOK}$, $\text{pH} = 8,0\text{--}8,5$. Через сорбент пропускали 10 к. о. регенерирующего раствора, анализировали на удельную активность радионуклида ^{137}Cs . Далее проводили второй цикл сорбции цезия.

Между основными стадиями сорбент промывали дистиллированной водой в количестве 10 к. о. Промывные растворы также анализировали на удельную активность радионуклида ^{137}Cs .

Результаты

Результаты сорбционного извлечения цезия из модельного и реального растворов НВАО в статических условиях представлены в табл. 3. Приведены усредненные значения по трем параллельным измерениям, относительное расхождение которых не превышает 10 %.

Таблица 3

Коэффициенты распределения ^{137}Cs (K_d , $\text{см}^3/\text{г}$) в статических экспериментах

Марка сорбента	Модельный раствор	Реальный раствор
«Ферсал»	$4,2 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$
РФС-и	$4,8 \cdot 10^2$	$7,3 \cdot 10^2$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что по порядку величины данные на модельном и реальном растворах совпадают для обоих сорбентов, хотя наблюдаемое различие по величине показателя значимо. Это объясняется, по-видимому, наличием различий в составе модельного и реального растворов, существенных с точки зрения проходящих в системе сорбционных процессов. Следует также отметить, что разница между K_d рассматриваемых сорбентов в экспериментах на реальном растворе существенно меньше, чем на модельном.

Результаты сорбционного извлечения цезия в динамическом режиме представлены на рис. 1 и в табл. 4.

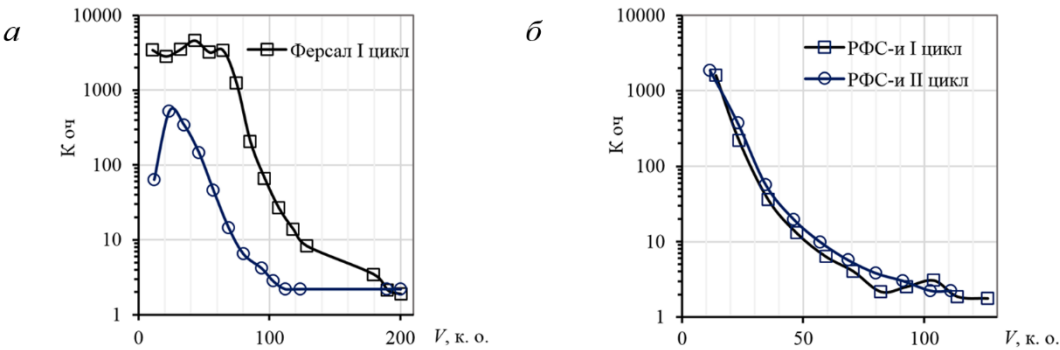


Рис. 1. Зависимость коэффициента очистки раствора от объема пропущенного модельного раствора сорбции ^{137}Cs на сорбентах «Ферсал» (а) и РФС-и (б)

Таблица 4

Динамическая обменная емкость сорбентов до проскока ^{137}Cs

Проскок, %	DE_v , $\text{мг}/\text{см}^3$			
	Первый цикл сорбции		Второй цикл сорбции	
	«Ферсал»	РФС-и	«Ферсал»	РФС-и
50	8,6	4,5	7,3	4,5
10	6,3	2,8	3,9	2,8
1	4,8	1,8	2,8	1,8

Продолжительность фильтроцикла на первом цикле сорбции сорбента «Ферсал» до наступления 1 % проскока ($K_{оч} = 100$) составляет 90 к. о., при этом максимальное значение коэффициента очистки достигает 4600. Продолжительность фильтроцикла до 50 % проскока составляет 195 к. о.

Продолжительность фильтроцикла на сорбенте РФС-и до наступления 1 % проскока составляет 27 к. о., при этом максимальное значение коэффициента очистки достигает 1600. Продолжительность фильтроцикла до 50 % проскока составляет 110 к. о.

Полученные на первом цикле сорбции результаты свидетельствуют о несомненном превосходстве сорбента «Ферсал» над РФС-и при эксплуатации в режиме однократного использования материала — важнейшие сорбционные характеристики различаются кратно, примерно в 3 раза.

На втором цикле объем пропущенного раствора до наступления 1 % проскока ($K_{оч} = 100$) на сорбенте «Ферсал» составляет 50 к. о., при этом максимальное значение коэффициента очистки достигает 500.

Таким образом, величина фильтроцикла сорбента «Ферсал» во втором цикле сорбции снизилась практически в 2 раза относительно первого. Также отмечено снижение величины реализованной динамической емкости с 4,8 до 2,8 мг/см³ при 1 % проскоке цезия, при этом динамическая емкость до 50 % проскока изменилась мало. Следовательно, рассматривать сорбент «Ферсал» для многоциклического режима работы нецелесообразно.

На сорбенте РФС-и во втором цикле сорбции объем пропущенного раствора до наступления 1 % проскока ($K_{оч} = 100$) составляет 30 к. о., при этом максимальное значение коэффициента очистки достигает 1800. Таким образом, основные сорбционные характеристики сорбента РФС-и во втором цикле сорбции не изменились относительно первого. Снижения величины реализованной динамической емкости сорбента отмечено не было, что свидетельствует о возможности многократного использования сорбента в последовательном цикле «сорбция — десорбция».

Результаты десорбции цезия с сорбентов представлены на рис. 2.

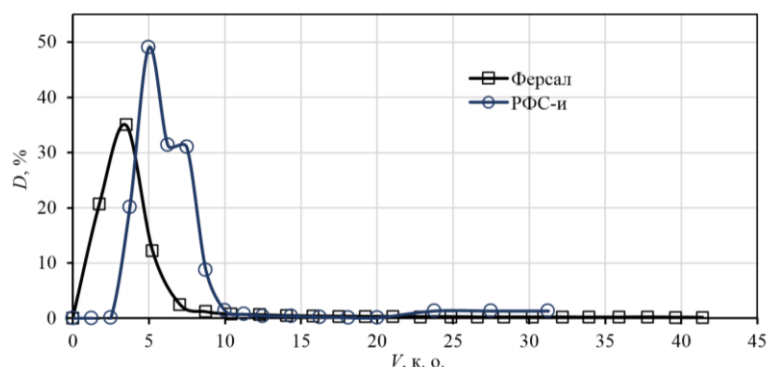


Рис. 2. Зависимость степени десорбции ¹³⁷Cs от объема пропущенного десорбирующего раствора

Данные (см. рис. 2) показывают, что основная часть цезия вымывается с сорбента «Ферсал» и РФС-и при пропускании 7–9 к. о. десорбирующего раствора. Степень десорбции ¹³⁷Cs с «Ферсала» по отношению к сорбированной активности при пропускании 9 к. о. составляет 71 %, а с РФС-и — 98 %. Дальнейшее пропускание десорбирующего раствора является нецелесообразным, так как степень десорбции повышается незначительно.

Анализ промывных и регенерирующих растворов показывает, что с сорбентов на данных стадиях смывается незначительная часть цезия — менее 2 %.

Таким образом, десорбция цезия с сорбента «Ферсал» в рассмотренных условиях проходит недостаточно эффективно, часть цезия остается на сорбенте, что снижает емкость сорбента и эффективность второго цикла сорбции. Кроме того, высокое остаточное содержание цезия в отработанном сорбенте значительно осложняет последующее обращение с ним за счет повышенного радиационного фона, и требуется проведение дополнительных мероприятий.

В ходе проведения десорбции с сорбента «Ферсал» отмечены голубое окрашивание первых фракций элюата и снижение текучести раствора до гелеобразного состояния. Данные наблюдения свидетельствуют о процессах разрушения сорбента и вымывания его компонентов в раствор во время протекания процесса десорбции. Тем не менее, визуальное изменение структуры сорбента в колонке отмечено не было.

Для подтверждения данного предположения фракцию элюата, соответствующую максимальной объемной активности, растворяли в NaOH с массовой концентрацией 250 г/дм³; не растворившийся голубой осадок растворяли в HNO₃ с молярной концентрацией 8 моль/дм³. Проведен анализ растворов на массовое содержание компонентов сорбента. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Химический анализ элюата после растворения в растворах NaOH и HNO₃

Состав раствора для растворения осадка	Массовое содержание, мг/дм ³		
	Fe	Ni	Si
250 г/дм ³ NaOH	2,2·10 ³	65	2,2·10 ⁴
8 моль/дм ³ HNO ₃	158	1,6·10 ³	424

Представленные данные подтверждают предположение о разрушении сорбента в процессе десорбции. В элюатах содержатся компоненты сорбционно-активной составляющей сорбента — ферроцианида никеля (Fe, Ni) — и связующего — кремниевой кислоты (Si).

При использовании сорбентов «Ферсал» и РФС-и объем образующихся вторичных отходов за два цикла сорбции, включающих растворы промывки, десорбирующий и регенерирующий растворы, составляет 46 % от исходного объема раствора. При проведении экспериментов отмечено, что объемы промывных растворов являются избыточными и могут быть оптимизированы. При этом следует отметить, что данные растворы (в первую очередь, в случае РФС-и) содержат, помимо цезия, преимущественно азотную кислоту, что позволит в дальнейшем весьма эффективно их утилизировать, направив на остекловывание. Азотная кислота при этом полностью удаляется, какого-либо существенного увеличения объема остеклованных ВАО не происходит в случае комплектации данного потока с другими солесодержащими ЖРО.

Выводы

В результате проведенных исследований определены сорбционные характеристики сорбентов марок «Ферсал» и РФС-и на модельном и реальном растворах емкостей — хранилищ щелочных ВАО ФГУП «ПО «Маяк»» в статическом и динамическом режимах по отношению к цезию.

Установлено, что оба сорбента в динамическом режиме работы позволяют обеспечить очистку щелочных ВАО от ^{137}Cs на 2–3 порядка, обеспечивая требуемый уровень активности растворов при последующем их цементировании.

На основании полученных результатов сделан вывод о том, что наиболее перспективным для очистки ВАО емкостей — хранилищ завода 235 ФГУП «ПО «Маяк»» является сорбент «Ферсал» при однократном его использовании. Данный неорганический сорбент превосходит рассмотренный органический аналог по основным сорбционным характеристикам в первом цикле сорбции в среднем в 3 раза. Вопрос дальнейшего обращения с отработанным сорбентом даже после проведения десорбции требует дополнительной проработки вследствие недостаточной полноты удаления цезия.

При подтверждении химической и радиационно-химической устойчивости сорбента РФС-и при работе в многоциклическом динамическом режиме он также может рассматриваться в качестве перспективного сорбента для очистки щелочных ВАО от радионуклидов цезия.

Список источников

1. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Макаровский Р. А. и др. Основные подходы, опыт и проблемы переработки накопленных в емкостях жидких радиоактивных отходов сложного химического состава // Радиоактивные отходы. 2018. № 4 (5). С. 55–66.
2. Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» (с изменениями № 95 от 04.02.2015).
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов (НП-053-16). М.: Ростехнадзор, 2017. 111 с.
4. Козлов П. В., Ремизов М. Б., Логунов М. В. и др. Сорбционное извлечение цезия из модельных щелочных ВАО на резорцинформальдегидных смолах отечественного производства // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 1. С. 34–41.
5. Слюнчев О. М., Истомина Н. М., Старовойтов Н. П. и др. Исследование возможности переработки отходов «ядерного наследия» с использованием сорбента Clevasol // Вопросы радиационной безопасности. 2020. № 3. С. 7–15.
6. Милютин В. В., Некрасова Н. А., Козлов П. В. и др. Извлечение цезия из модельных растворов щелочных высокоактивных отходов на неорганическом ферроцианидном сорбенте марки «Ферсал» // Вопросы радиационной безопасности. 2022. № 3. С. 20–27.

References

1. Kozlov P. V., Remizov M. B., Makarovskiy R. A., Dementeva I. I., Lupeha N. A., Zubrilovskiy E. N., Kustov S. V., Miroshnichenko A. A. Osnovnye podhody, opyt i problemy pererabotki nakoplennoy v jemkostyah zhidkikh radioaktivnykh othodov slozhnogo himicheskogo sostava. [Main approaches, experience and challenges of reprocessing of liquid radioactive waste of complex chemical composition accumulated in storage tanks]. *Radioaktivnye othody* [Radioactive waste], 2018, no. 4 (5), pp. 55–66. (In Russ.).
2. *Postanovlenie Pravitelstva RF ot 19 oktyabrya 2012 g. № 1069 "O kriteriyah otnesenija tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh othodov k radioaktivnykh othodam, kriteriyah otnesenija radioaktivnykh othodov k osobym radioaktivnym othodam i k udaljaemykh radioaktivnym othodam i kriteriyah klassifikacii udaljaemykh radioaktivnykh othodov"* [RF Government resolution No. 1069 of October 19, 2012 "On the criteria for attribution of solid, liquid and gaseous waste to radioactive waste, criteria for attribution of radioactive waste to special radioactive waste and to radioactive waste subject to disposal, and criteria for classification of radioactive waste subject to disposal" (with modifications No. 95 of 04.02.2015)]. (In Russ.).

3. *Federalnye normy i pravila v oblasti ispolzovaniya atomnoj jenerгии. Pravila bezopasnosti pri transportirovanii radioaktivnykh materialov (NP-053-16)* [Federal rules and regulations in the field of atomic energy use. Regulations for the safe transportation of radioactive materials (NP-053-16 (rus. НП-053-16))]. Moscow, Rostekhnadzor, 2017, 111 p. (In Russ.).
4. Kozlov P. V., Remizov M. B., Logunov M. V., Miljutin V. V., Egorin E. M., Avramenko V. A. Sorbcionnoe izvlechenie cezija iz model'nykh shhelochnykh VAO na rezorcinformaldegidnykh smolakh otechestvennogo proizvodstva [Extraction of cesium from simulated alkaline HLW using sorption with the help of domestically produced resorcinol-formaldehyde resins]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety issues], 2017, no. 1, pp. 34–41. (In Russ.).
5. Slyunchev O. M., Istomina N. M., Starovoytov N. P., Malcev A. A., Dudkin V. A., Bobrov P. A., Remizova V. A. Issledovanie vozmozhnosti pererabotki othodov “jadernogo nasledija” s ispolzovaniem sorbenta Clevasol [Study of the possibility of nuclear legacy waste reprocessing using the Clevasol sorbent]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety issues], 2020, no. 3, pp. 7–15. (In Russ.).
6. Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Kozlov P. V., Markova D. V., Feoktistov K. A. Izvlechenie cezija iz model'nykh rastvorov shhelochnykh vysokoaktivnykh othodov na neorganicheskom ferrocianidnom sorbente marki “Fersal” [Extraction of cesium from simulated solutions of alkaline high-level waste using the inorganic ferrocyanide-based sorbent “Fersal”]. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti* [Radiation safety issues], 2022, no. 3, pp. 20–27. (In Russ.).

Сведения об авторах

П. В. Козлов — кандидат технических наук, доцент, начальник исследовательской лаборатории;
Д. В. Маркова — инженер-технолог;
С. М. Шайдуллин — аспирант, инженер-технолог;
К. А. Феоктистов — инженер-технолог;
В. В. Милютин — доктор химических наук, заведующий лабораторией;
А. М. Егорин — кандидат химических наук, начальник лаборатории.

Information about the authors

P. V. Kozlov — PhD (Technical Sciences), Assistant Professor, Head of the Research Laboratory;
D. V. Markova — Process Engineer;
S. M. Shaydullin — Graduate Student, Process Engineer;
K. A. Feoktistov — Process Engineer;
V. V. Milyutin — Dr. Sc. (Chemistry), Chief of the Laboratory;
A. M. Egorin — PhD (Chemistry), Head of the Laboratory.

Статья поступила в редакцию 27.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 27.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.