DOI: 10.25283/2587-9707-2026-2-55-62 УДК 621.039.73:542.61:546.42+546.36

ОПТИМИЗАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ЦЕЗИЙ-СТРОНЦИЕВОЙ ФРАКЦИИ ИЗ ЖИДКИХ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ЭКСТРАГЕНТОМ НА ОСНОВЕ КРАУН-ЭФИРОВ

А. И. Широков, Ю. А. Ворошилов, А. В. Конников, С. А. Лукин, М. В. Логунов, С. М. Чадов

ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская область

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2026 г.

Для реализации нового продуктового направления «Сбалансированный ЯТЦ» доработана и проверена экстракционная технология выделения цезий-стронциевой фракции. Использована экстракционная смесь на основе краун-эфиров — дициклогексил-18-краун-6 и дибензо-21-краун-7 в тригидрододекафторгептаноле (спирт-теломер n_3). Работа проведена на опытной установке на базе экстракторов типа «смеситель — отстойник» в «горячей» камере завода РТ-1. В качестве исходного раствора использован высокоактивный рафинат PUREX-процесса от переработки отработавшего ядерного топлива реактора ВВЭР-1000. В непрерывном динамическом режиме получено около 7 дм^3 концентрата цезия-стронция. Достигнута высокая степень очистки цезий-стронциевой (короткоживущей) фракции от долгоживущих радионуклидов.

Ключевые слова: *высокоактивные отходы, экстракция, краун-эфир, дициклогексил-18-краун-6, дибензо-21-краун-7, спирт-теломер n_3, короткоживущая фракция, цезий, стронций, радиоактивные отходы.*

С целью создания в Российской Федерации промышленной инфраструктуры для обеспечения двухкомпонентной атомной энергетики регенерированными ядерными материалами с образованием минимального количества отходов во всем ядерном топливном цикле (ЯТЦ) в ГК «Росатом» принята стратегическая концепция «Сбалансированный ЯТЦ» (СбЯТЦ).

Она предусматривает переработку отработанного ядерного топлива ОЯТ с последующим фракционированием жидких высокоактивных отходов (ВАО) — выделением так называемой короткоживущей цезий-стронциевой фракции (КФ) и трансплутониевых элементов (ТПЭ), а также вовлечение в топливный цикл регенерированного урана и плутония с изготовлением, в частности, смешанного уран-плутониевого топлива и его последующим рециклированием.

Формирование при переработке ОЯТ отвержденной КФ из ВАО, после длительного контролируемого хранения (300—400 лет) для распада радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr и снижения ее тепловыделения до определенных норм, позволит захоронить её в приповерхностных/среднеглубинных (до 100 м) пунктах захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) на территории стран потенциальных потребителей. Это будет способствовать снижению объемов радиоактивных отходов (РАО), подлежащих глубинной изоляции, и минимизации затрат на обращение с ними.

С целью обоснования технической реализуемости предоставления услуг в рамках СбЯТЦ

в части формирования при переработке ОЯТ КФ РАО проведены испытания технологии экстракционного выделения цезий-стронциевой фракции на реальном рафинате от переработки ОЯТ [1], [2]. За основу была взята экстракционная технология на основе макроциклических полиэфиров (краун-эфиров) дициклогексил-18-краун-6 и дибензо-21-краун-7, разработанная специалистами АО «ВНИИХТ» и впервые проверенная в стендовом масштабе на ФГУП «ПО «Маяк» [3], [4].

В изначальном варианте экстракционная смесь содержала один краун-эфир — ДЦГ-18-К-6, то есть технология была адаптирована только для извлечения ^{90}Sr и в таком качестве была достаточно успешно испытана в конце 1980-х годов [5]. Одной из основных проблем при ее создании являлась повышенная растворимость ДЦГ-18-К-6 в водных растворах. Зарубежные исследователи пытались решить ее путем синтеза более гидрофобных макроциклических соединений, что существенно удорожало экстрагент. Специалисты АО «ВНИИХТ» предложили обойти данное препятствие путем подбора разбавителей, удерживающих краун-эфиры в органической фазе, состав которых по ходу экспериментальных работ претерпевал изменения. В итоге в качестве наиболее подходящего с точки зрения обеспечения оптимального удержания краун-эфиров и их комплексов с извлекаемыми катионами в органической фазе при водно-органических контактах, достигаемых при этом коэффициентов распределения и собственной растворимости разбавителя в водных растворах, был выбран полифторированный спирт — 1,1,7-тригидрододекафторгептанол (спирт-теломер n_3, $HF_2C—(CF_2)_5—CH_2—OH$). Однако данное соединение имеет сложные для эксплуатации характеристики, а именно высокие значения плотности (1,75 г/см^3), вязкости ($51{,}3\cdot10^{-3}$ Па·с; для сравнения, вязкость трибутилфосфата в керосине на порядок меньше) и поверхностного натяжения, что затрудняет образование эмульсии и негативно влияет на гидродинамику процесса. В этой связи был проведен поиск модификатора, не снижающего экстракционные характеристики, но способствующего улучшению гидродинамических показателей водно-органической системы. В качестве такового был предложен промышленно выпускаемый 2,4-диэтилоктанол (изододеканол, ИДД), введение которого в экстракционную систему позволило снизить плотность, силу межфазного натяжения и улучшало реэкстракционные характеристики экстракционной системы. Позже в качестве модифицирующей добавки вместо ИДД было предложено использовать другое поверхностно-активное вещество — синтанол АЛМ-2 (эмульгатор), представляющее собой линейный оксиэтилированный спирт с двумя оксиэтиленовыми группами в парафиновой цепи.

Современный дизайн, взятый за основу при проведении экспериментов по программе СбЯТЦ, экстракционная система приобрела во второй половине 1990-х годов, когда было предложено дополнительно ввести в органическую смесь краун-эфир ДБ-21-К-7 с целью обеспечения одновременного извлечения из ВАО радионуклидов цезия и стронция. В результате в базовом варианте технологии совместного выделения цезия и стронция экстракционная система имела следующий состав: 0,1 моль/дм^3 ДБ-21-К-7 и 0,1 моль/дм^3 ДЦГ 18-К-6 в смеси 87 % об. спирта-теломера n_3 и 13 % об. синтанола АЛМ-2 [4]. Структурные формулы основных компонентов экстрагента представлены на рис .1.

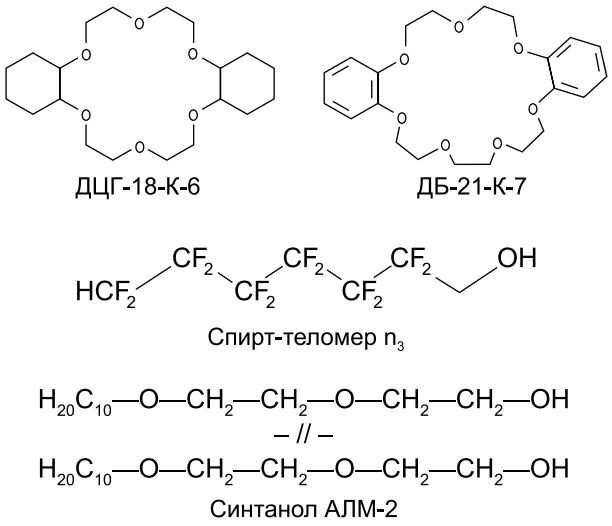


Рис. 1. Структурные формулы компонентов базовой экстракционной смеси

Экстракция ионов краун-эфирами проходит по сольватному механизму путем формирования связей катиона металла с атомами кислорода во внутренней полости кольца и образованием соединения типа «гость — хозяин» (см. рис. 2). Их специфическим свойством является высокая избирательность реакций комплексообразования, так как наиболее устойчивые

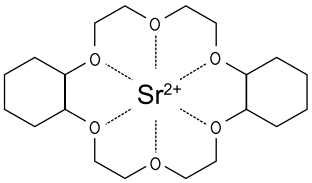


Рис. 2. Комплекс Sr *с краун-эфиром ДЦГ-18-К-6*

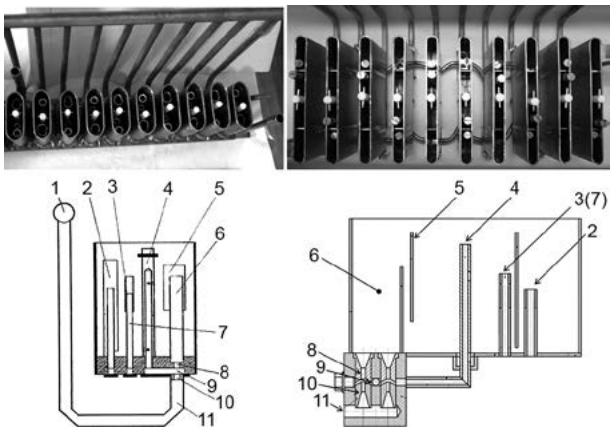
комплексы образуются с теми катионами, которые по размеру больше всего соответствуют полости макроцикла.

Данной особенностью обусловлена высокая селективность краун эфиров ДБ-21-К-7 и ДЦГ-18-К-6 к ионам цезия и стронция, соответственно, и их пониженное взаимодействие с другими ионами, присутствующими в ВАО, например натрием или кальцием. В качестве конкурирующих компонентов для стронция выступают в основном свинец и ртуть, а для цезия — барий. Другие элементы данными краун-эфирами практически не извлекаются. Значительным преимуществом экстракционной системы является возможность проведения их повторного выделения дистиллированной водой, что позволяет глубоко упаривать (концентрировать) реэкстракт и упрощает дальнейшее обращение с ним. Компоненты данной органической смеси являются относительно доступными и при необходимости могут быть синтезированы отечественным производителем в промышленном объеме.

В 2000-х гг. в ходе стендовых испытаний на заводе РТ-1 была показана принципиальная работоспособность базового состава экстракционной системы. Экспериментальным путем было установлено, что для увеличения скорости расслаивания фаз, снижения вязкости системы и обеспечения нормального режима работы экстракционных аппаратов температура на всех стадиях процесса должна составлять не менее 27 °С. Извлечение стронция и цезия в органическую фазу при испытаниях в динамическом режиме на модельных растворах составляло более 98 % и 99 % соответственно. Накопления активности в оборотном экстрагенте не происходило. Физических уносов органики с водными потоками не отмечалось [4].

В дальнейшем работы в данном направлении были приостановлены. Интерес к экстракции стронция и цезия краун-эфирами вновь появился в 2019 г. при проведении исследовательских работ в рамках СбЯТЦ.

В 2019—2021 гг. были проведены динамические испытания процессов выделения стронция и совместной фракции стронция-цезия как на модельных растворах, так и на реальных ВАО. По их итогам была подтверждена принципиальная работоспособность предложенного варианта технологии, однако отмечена необходимость доработки стадии реэкстракции и проведения дополнительных гидродинамических исследований, направленных на обеспечение условий стабильной работы экстракционных аппаратов, поскольку исследуемая система «экстрагент — вода» имела низкую скорость расслаивания эмульсии, что приводило к нарушениям при продолжительном процессе. Было показано значительное влияние конструкции используемых при этом экстракторов на эффективность создания эмульсии и стабильность гидродинамического режима. Данные показатели в основном зависят от величины пульса, который, как правило, ограничивается из-за вероятности возникновения барботажа, и количества сопел в камере смешения. В 2020 г. конструкция экстракторов была модернизирована, главными отличиями являлись камера смешения фаз с двумя соплами и эмульсионная камера измененной геометрии и объема. Данные аппараты характеризовались высокой эффективностью замешивания эмульсии при отсутствии барботажа и стабильностью работы. Образцы лабораторных экстракторов, которые были использованы в экспериментах 2001 и 2020 гг., представлены на рис. 3.



а) экстрактор с одним соплом (2001–2019 гг.) *б) экстрактор с двумя соплами (2020 г.)*

1 — коллектор пульсационного воздуха, 2 — переток тяжелой фазы с гидрозатвором, 3 — подвижный патрубок, 4 — рециркуляционное устройство, 5 — эмульсионный переток, 6 — эмульсионная камера, 7 — переток легкой фазы, 8 — диффузор, 9 — приемная камера, 10 — сопло, 11 — пульсолиния

Рис. 3. Образцы лабораторных экстракторов 2001 и 2020 гг.

По результатам работы подобраны оптимальные условия, в соответствии с которыми в базовую технологию внесены следующие изменения:

- из состава экстрагента исключен синтанол АЛМ-2 (эмульгатор),
- температура на стадии реэкстракции повышена до 40 °С.

Было показано, что даже в результате первой модификации возможно обеспечение замешивания качественной эмульсии на лабораторных

экстракторах модернизированной конструкции. Эффективность и стабильность процесса при внесенных изменениях были подтверждены в 2022 г. в ходе динамических испытаний на имитационном растворе.

Демонстрацию работоспособности усовершенствованной технологии на реальных ВАО провели в 2023 г. на исследовательской экстракционной установке, размещенной в «горячей» камере изотопного производства завода РТ-1. Ее общий вид представлен на рис. 4.

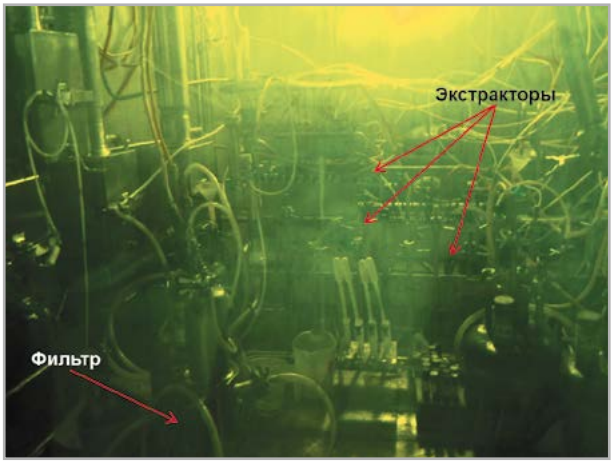


Рис. 4. Общий вид экстракционной установки в «горячей» камере

Процесс проводили в режиме непрерывной противоточной экстракции на упомянутых выше новых лабораторных экстракторах типа «смеситель — отстойник» с пульсационным перемешиванием фаз [2]. Вид 10-ступенчатого экстракционного аппарата представлен на рис .5.

Рис. 5. Лабораторный экстрактор типа «смеситель – отстойник»

Исходным раствором для выделения КФ являлся высокоактивный рафинат PUREX-процесса от переработки ОЯТ реактора ВВЭР-1000 с выгоранием 43 ГВт·сут/тU и выдержкой 21 год. В качестве оборотного экстрагента использовали органическую смесь краун-эфиров — 0,1 моль/дм^3 ДЦГ-18-К-6 и 0,1 моль/дм^3 ДБ-21-К-7 – в спирте-теломере n_3.

Технологическая схема, представленная на рис .6, включала ряд последовательных стадий: извлечение цезия и стронция из ВАО органической смесью краун-эфиров на восьми ступенях, слабокислую промывку экстракта для снижения в нем концентрации кислоты и удаления примесей, обусловленных эмульсионным уносом, на двух ступенях, реэкстракцию стронция и цезия водой на восьми ступенях, регенерацию экстрагента раствором комплексона (трилона Б) на шести ступенях и заключительную слабокислую промывку оборотного экстрагента на двух ступенях.

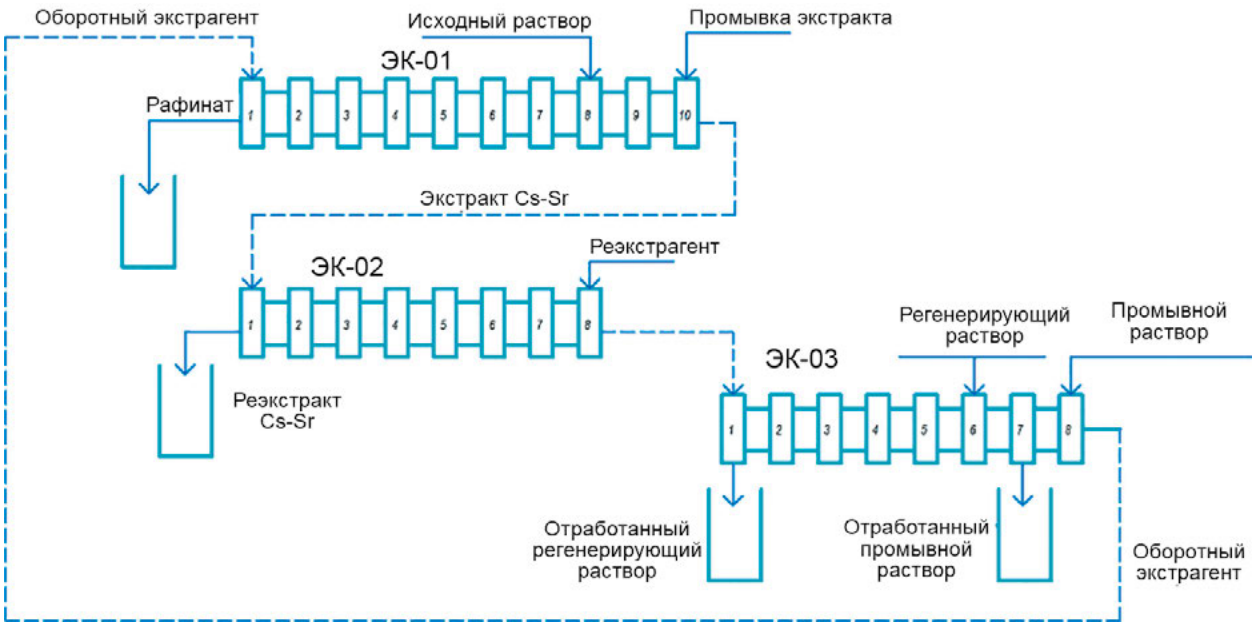


Рис. 6. Принципиально-технологическая схема процесса

Экстракцию КФ проводили в течение 120 ч в непрерывном режиме, при этом было переработано примерно 11 дм^3 исходных ВАО, и ее наработка составила получено 7 дм^3. В плане гидродинамики процесс проходил стабильно, за все время испытаний сбоев в режиме работы экстракторов не происходило. Результаты анализа проб исходного раствора и реэкстракта (КФ), полученных в ходе работы установки, приведены в табл. 1. Распределение основных компонентов по технологическим продуктам (баланс) приведено в табл. 2 и 3.

Таблица 1. Усредненные результаты α- и γ-спектрометрического анализа технологических продуктов

Номер пробы	Объемная активность радионуклидов, Бк/см^3					
	^{137}Cs	^{134}Cs	^{154}Eu	^{241}Am	^{244}Cm	Σα
Исходный раствор	$1{,}2\cdot10^9$	$7{,}7\cdot10^6$	$3{,}5\cdot10^7$	$4{,}55\cdot10^7$	$3{,}0\cdot10^7$	$7{,}0\cdot10^7$
Реэкстракт	$1{,}8\cdot10^9$	$1{,}1\cdot10^7$	н/о*	н/о	н/о	$<1{,}4\cdot10^4$

*Ниже предела обнаружения.

Таблица 2. Распределение основных макрокомпонентов по продуктам

Продукт	Содержание компонента в продукте, % от исх.										
	Sr	Ba	Cs	Ag	Al	Cr	Ni	Pd	Mo	Tc	РЗЭ
Рафинат	7	8	2	71	100	100	100	100	96	51	98
Реэкстракт	100	100	93	8	8	9	2	20	0,1	2	0,1
Регенерат	1	2	0,03	0,4	9	1	2	0,2	0,01	0,04	0,005
Промывка	0,1	1,9	0,02	0,3	2,1	1,6	1,8	0,2	0,01	0,02	0,003
Сумма	108	111	95	80	119	112	106	120	96	53	98

Таблица 3. Распределение основных радионуклидов по продуктам

Продукт	Содержание компонента в продукте, % от исх.				
	^{137}Cs	^{154}Eu	Σα	^{241}Am	^{244}Cm
Рафинат	2	98	100	100	100
Реэкстракт	94	н/о	н/о		
Регенерат	0,01		0,001	0,002	0,001
Промывка	0,01		0,001	0,002	0,001
Оборотный экстрагент	0,02		н/о		
Сумма	96	98	100	100	100

Комплексный перекрестный анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- отмечен удовлетворительный баланс, не превышающий погрешности анализа, по большинству контролируемых элементов, за исключением серебра, палладия и особенно технеция. Сброс цезия в рафинат не превышает 2% (идентичные результаты масс- и гамма-спектрометрических анализов). Сброс стронция в рафинат, согласно отнормированным на 100% данным масс-спектрометрии, составил около 5%. Реэкстракция стронция и цезия проходила полноценно, что подтверждается их незначительным содержанием в отработанных регенерирующем и промывном растворах, а также в оборотном экстрагенте. Степень концентрирования стронция и цезия составила 1,5 раза;
- редкоземельные элементы (РЗЭ) и альфа-излучатели (минорные актиниды) практически полностью сбрасываются в рафинат. Коэффициенты очистки КФ от α-излучающих радионуклидов, судя по анализам реэкстракта, составили более $7{,}5\cdot10^3$. Вместе с целевыми компонентами практически полностью извлекается и выходит в реэкстракт барий. Кроме того, в нем наблюдаются примеси алюминия, серебра, хрома, палладия;
- экстракционный аппарат на стадии реэкстракции работал стабильно, эмульсионный унос с органической фазой отсутствовал;
- за время работы установки экстрагент совершил 8 полных оборотов. Ни в органических, ни в водных продуктах не отмечалось присутствия каких-либо осадков или следов разрушения экстрагента. На стадиях регенерации и промывки происходило вымывание остаточного количества элементов из оборотного экстрагента. Таким образом, емкостные свойства экстрагента к окончанию эксперимента не изменились. Об этом, в частности, свидетельствуют сравнительные результаты определения коэффициентов распределения стронция и цезия при их экстракции из 3 моль/дм^3 раствора азотной кислоты свежеприготовленным и оборотным экстрагентом (табл. 4). Очевидно, что значения коэффициентов распределения до и после динамического эксперимента практически не изменились.

Таблица 4. Коэффициенты распределения стронция и цезия

Коэффициент распределения компонентов			
в системе со свежеприготовленным экстрагентом		в системе с отработавшим экстрагентом	
Стронций	Цезий	Стронций	Цезий
4,7	8,5	4,5	6,7

Таким образом, в ходе эксперимента продемонстрирована принципиальная работоспособность технологической схемы экстракционного

выделения короткоживущей цезий-стронциевой фракции на основе краун-эфиров на реальном высокоактивном рафинате от переработки ОЯТ реактора ВВЭР-1000. В соответствии с требованиями концепции СбЯТЦ обеспечена высокая степень очистки полученной КФ от альфа-излучающих радионуклидов.

Литература

1. *Широков А. И., Ворошилов Ю. А., Лукин С. А., Логунов М. В., Конников А. В., Бугров К. В., Миндеров А. В., Чадов С. М., Макаров О. Н.* Опытная проверка экстракционной технологии фракционирования ВАО с использованием экстрагента на основе краун-эфиров // Радиохимия-2022 : X Российская конференция с международным участием, Санкт-Петербург, 26—30 сентября 2022 г. — М .: ООО «Месол», 2022. С. 364.
2. *Широков А. И., Лукин С. А., Чадов С. М., Конников А. В., Ворошилов Ю.А., Калмыков Д. К.* Испытания экстракционной технологии выделения фракции цезия-стронция из реального раствора ВАО экстрагентом на основе краун-эфиров // Новая технологическая платформа атомной энергетики : Тезисы докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию со дня основания Сибирского химического комбината, Северск, 23—25 апреля 2024 г .— Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. С .88.
3. Патент № RU 2318258 C2 Российская Федерация. Извлечение радионуклидов экстрагентами, содержащими краун-эфиры : № RU 2004/000348 : заявл. 09.09.2004 : опубл. 27.02.2008 / Глаголенко Ю .В., Логунов М. В., Мамакин И. В., Ровный С .И., Яковлев Н .Г. ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Проектно-конструкторское и производственно-внедренческое предприятие «Деймос ЛТД», Государственное учреждение «Федеральное агентство по правовой защите результатов интеллектуальной деятельности военного, специального и двойного назначения» при Министерстве юстиции Российской Федерации. Бюл. № 6.
4. *Ворошилов Ю. А., Логунов М. В., Смольянихин К. В., Яковлев Н. Г.* Стендовые испытания технологии совместного извлечения радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr из жидких высокоактивных отходов экстрагентом на основе краун-эфиров // Вопросы радиационной безопасности. 2013. № 2. С. 23—33.
5. *Филиппов Е. А., Рузин Л. И., Мамакин И. В., Дзекун Е. Г., Яковлев Н. Г., Старченко В. А.* Разработка комплексной схемы фракционирования высокоактивных отходов экстрагентами на основе краун-эфиров и полиорганофосфазенов в тяжелом разбавителе // Химия и технология экстракции. Сб. научных трудов. Т. 2. — М. : РХТУ им .Д .И .Менделеева. 2001. С. 50—62.

Информация об авторах

Широков Андрей Игоревич, инженер-технолог, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: andreyshirokov@inbox .ru

Ворошилов Юрий Аркадьевич, кандидат технических наук, начальник группы, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: vyuriy@telecom . zersk .ru

Конников Андрей Валерьевич, кандидат технических наук, начальник исследовательской лаборатории, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Лукин Сергей Александрович, исполняющий обязанности начальника, Центральная заводская лаборатория, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: lukin235@yandex .ru

Логунов Михаил Васильевич, кандидат технических наук, советник генерального директора, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр. Ленина, д. 31), e-mail: mvlogunov@pomayak .ru

Чадов Станислав Михайлович, начальник цеха завода 235, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Библиографическое описание статьи

Широков А. И., Ворошилов Ю. А., Конников А. В., Лукин С. А., Логунов М. В., Чадов С. М. Оптимизация и испытания технологии выделения цезий-стронциевой фракции из жидких высокоактивных отходов экстрагентом на основе краун-эфиров // Радиоактивные отходы. 2026. № 2 (35). С. 55—62. DOI: 10 .25283/258 -9707-2026-2-55-62.

METHOD FOR CESIUM-STRONTIUM FRACTION EXTRACTION FROM LIQUID HIGH-LEVEL WASTE USING A CROWN ETHER-BASED EXTRACTANT: OPTIMIZATION AND TESTING

Shirokov A. I., Voroshilov Yu. A., Konnikov A. V., Lukin S. A., Logunov M. V., Chadov S. M.

FSUE "PA "Mayak", Ozersk, Chelyabinsk region, Russia

Article received on February 25, 2026

This paper elaborates on a method providing the extraction of cesium-strontium fraction that has been refined and tested to support the implementation of the new Sustainable Nuclear Fuel Cycle product line. An extraction mixture based on the dicyclohexyl-18-crown-6 and dibenzo-21-crown-7 crown ethers in trihydrododecafluoroheptanol (n_3 telomer alcohol) was applied. The test was conducted on a pilot unit using mixer-settler-type extractors fitted within a "hot" chamber at the RT-1 plant. Highly active PUREX raffinate generated from the reprocessing of spent nuclear fuel (SNF) from a WWER-1000 reactor unit was used as a feed solution. Approximately 7 dm^3 of cesium-strontium concentrate was produced in a continuous dynamic mode. The study demonstrates the high degree of the cesium-strontium (short-lived) fraction treatment from long-lived radionuclides.

Keywords: *high-level waste (HLW), extraction, crown ether, dicyclohexyl-18-crown-6, dibenzo-21-crown-7, n_3 telomer alcohol, short-lived fraction, cesium, strontium, radioactive waste.*

References

1. Shirokov A. I., Voroshilov Yu. A., Lukin S. A., Logunov M. V., Konnikov A. V., Bugrov K. V., Minderov A.V., Chadov S. M., Makarov O. N. *Opytnaya proverka ekstraktsionnoy tekhnologii fraktsionirovaniya VAO s ispol'zovaniyem ekstragenta na osnove kraun-efiro* [Pilot testing of an extraction method for HLW fractionation using an extractant based on crown ethers]. *X Rossiyskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiyem "Radiokhimiya-2022"* [X Russian conference with international participation Radiochemistry-2022], St. Petersburg, September 26—30, 2022. P. 364.

2. Shirokov A. I., Lukin S. A., Chadov S. M., Konnikov A.V., Voroshilov Yu. A., Kalmykov D. K. *Ispytaniya ekstraktsionnoy tekhnologii vydeleniya fraktsii tseziya-strontsiya iz real'nogo rastvora VAO ekstragentom na osnove kraun-efirov* [Testing of a method providing the extraction of a cesium-strontium fraction from a genuine HLW solution using a crown ether-based extractant]. *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Novaya tekhnologicheskaya platforma atomnoy energetiki", posvyashchennaya 75-letiyu so dnya osnovaniya Sibirskogo khimicheskogo kombinata* [All-Russian Scientific and Practical Conference New Technological Platform for Nuclear Energy dedicated to the 75th anniversary of the Siberian Chemical Plant]. Seversk, April 23—25, 2024. Tomsk, TPU Publishing House Publ., p. 88.

3. Patent. RU 2318258 C2. Russian Federation. Izvlecheniye radionuklidov ekstragentami, soderzhashchimi kraun-efi y [Extraction of radionuclides with extractants containing crown ethers]. No .RU 2004/000348 : appl. on 09 .09 .200 : published on 27 .02 .200 / Glagolenko Yu. V., Logunov M .V., Mamakin I. V., Rovnyy S. I., Yakovlev N .G .; Bulletin No. 6.

4. Voroshilov Yu. A., Logunov M. V., Smolyanikhin K .V., Yakovlev N. G. Stendovyye ispytaniya tekhnologii sovmestnogo izvlecheniya radionuklidov ^{137}Cs i ^{90}Sr iz zhidkikh vysokoaktivnykh otkhodov ekstragentom na osnove kraun-efir v [Benchmark Tests of ^{137}Cs and ^{90}Sr Co-Extraction from Liquid HLM with Extractant Based on Crown-Ethers]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues,* 2013, no. 2, pp. 23—33.

5. Filippov E. A., Ruzin L. I., Mamakin I. V., Dzekun E .G., Yakovlev N. G., Starchenko V. A. *Razrabotka kompleksnoy skhemy fraktsionirovaniya vysokoaktivnykh otkhodov ekstragentami na osnove kraun-efirov i poliorganofosfazenov v tyazhelom razbavitele* [Development of a comprehensive fl w chart for the fractionation of high-level waste with extractants based on crown ethers and polyorganophosphazenes in a hing-density diluent]. *Khimiya i tekhnologiya ekstraktsii* [Extraction chemistry and technology]. Vol. 2. Moscow, Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia Publ., 2001. Pp .50—63.

Information about the authors

Shirokov Andrey Igorevich, Process Engineer at the Technological Laboratory, Central Factory Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: andreyshirokov@inbox .ru

Voroshilov Yuriy Arkadyevich, Ph . ., Head of the Technological Laboratory Group, Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: vyuriy@telecom . zersk .ru

Konnikov Andrey Valerievich, Ph . ., Head of the Research Laboratory, Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Lukin Sergey Alexandrovich, Acting Head, Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: lukin235@yandex .ru

Logunov Mikhail Vasilyevich, PhD, Advisor to the General Director, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: mvlogunov@po-mayak .ru

Chadov Stanislav Mikhailovich, Shop Supervisor of Plant 235, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: cpl@po-mayak .ru

Bibliographic description

Shirokov A. I., Voroshilov Yu. A., Konnikov A. V., Lukin S. A., Logunov M. V., Chadov S. M. Method for Cesium-Strontium Fraction Extraction from Liquid High-Level Waste Using a Crown Ether-Based Extractant: Optimization and Testing. *Radioactive Waste,* 2026, no. 2 (35), pp. 55—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-2-55-62. (In Russian).