

СОРБЕНТЫ НА ОСНОВЕ ФОСФАТОВ И СЛОЖНЫХ ОКСИДОВ ТИТАНА(IV) ДЛЯ ДЕЗАКТИВАЦИИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Р.И. Корнейков, В.И. Иваненко, С.В. Владимирова, Н.В. Жаров

**Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева, г. Апатиты**

Показана перспективность использования сорбентов на основе оксогидроксофосфатов титана(IV) для извлечения ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{90}Sr из растворов, близких по составу к морской воде. Определены оптимальные условия применения сорбентов, обеспечивающие эффективное совместное извлечение ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{90}Sr в присутствии фоновых макрокомпонентов. Модифицирование сорбентов способствует повышению их сорбционных свойств. Установлено, что титанатные иониты представляют интерес для избирательного извлечения ^{90}Sr . Определены оптимальные условия их применения. Термическая обработка отработанных сорбентов обеспечивает надежную иммобилизацию радиоактивного сорбата. Проведена апробация титанофосфатных сорбентов при дезактивации жидких радиоактивных отходов. Показана эффективность их использования.

Ключевые слова: ионный обмен, гидрофосфаты оксотитана(IV), титанаты натрия, радионуклиды, дезактивация

Sorbents Based on the Phosphates and Complex Oxides of Titanium(IV) for Decontamination of Liquid Radioactive Waste

R.I. Korneikov, V.I. Ivanenko, S.V. Vladimirova, N.V. Zharov

Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences" Science Centre of Russian Academy of Sciences 184209 Apatity, Russia

The prospects of using of sorbents based on oxohydroxophosphate titanium(IV) to extract ^{134}Cs , ^{137}Cs and ^{90}Sr from solutions close in composition to sea water have shown. The optimal conditions for the use of sorbents providing effective joint extraction of ^{134}Cs , ^{137}Cs and ^{90}Sr in the presence of background macro components were determined. Modification of sorbents improves their sorption properties. It was established that the titanate ion exchangers are of interest for selective extraction of ^{90}Sr . Optimum conditions of their application was defined. Heat treatment of waste sorbents provides reliable immobilization of radioactive sorbate. The titanium orthophosphate sorbents was tested for decontamination of liquid radioactive waste. The efficiency of their use is shown.

Key words: ion exchange, hydrophosphates of oxotitanium(IV), titanate of sodium, radionuclides, decontamination

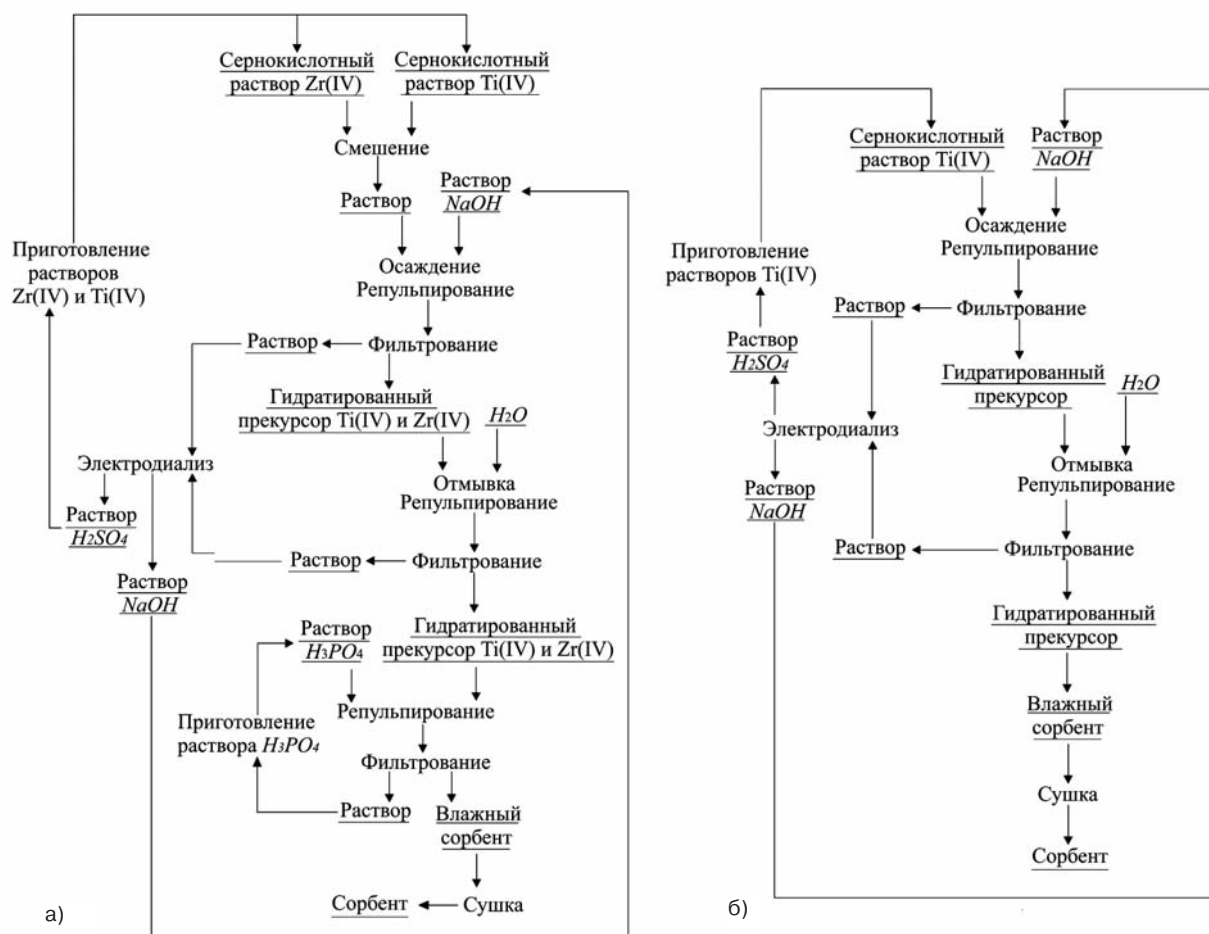
DOI: 10.18412/1816-0395-2019-11-20-25

Постоянно образующиеся и накапливающиеся в результате эксплуатации атомных объектов жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) оказывают серьезную техногенную нагрузку на окружающую среду там, где находятся эти объекты. Так, например, при эксплуатации атомных энергетических установок гражданских судов и судов военного морского флота в большом количестве образуются сложные по химическому составу ЖРО. Нередко такие ЖРО близки по составу к морской воде — их соледержание составляет до

30 г·л⁻¹ [1]. Основная активность ЖРО приходится на радионуклиды ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{90}Sr [2, 3], периоды полураспада которых составляют 2,06, 30 и 29,1 года соответственно [4]. Поэтому такие технологические растворы требуют незамедлительной утилизации. Однако сложность переработки ЖРО обусловлена присутствием существенно превосходящих по содержанию радионуклидов концентраций катионов металлов, близких по химическим свойствам к цезию и стронцию.

Для концентрирования катионных микропримесей из тех-

нологических растворов наиболее распространены методы экстракции, осаждения и мембранные методы. Экстракция является одним из наиболее известных способов переработки жидких радиоактивных отходов [5]. Основные недостатки этого метода связаны, как правило, с большим объемом вторичных водных растворов и проблемами обращения с отработанным экстрагентом. Осадительный метод — универсальный способ извлечения радионуклидов как в ионном, так и в коллоидном состоянии. Главный недостаток метода — невысокая степень



Принципиальные схемы получения сорбентов различного состава:

а – сорбента на основе гидрофосфата Ti(IV) и на основе гидрофосфата Ti(IV), модифицированного Zr(IV); б – сорбента на основе сложного двойного оксида Ti(IV) и Na

Schematic diagrams of the production of sorbents of various composition:

а – sorbent based on Ti(IV) hydrophosphate and based on Ti(IV) hydrophosphate modified with Zr(IV); б – sorbent based on a complex double oxide Ti(IV) and Na

очистки растворов и образование больших количеств вторичных отходов [6]. Использование мембранных методов существенно удешевляет процесс переработки ЖРО и позволяет минимизировать количество вторичных отходов [7, 8]. Однако эти методы имеют существенные ограничения — относительно невысокая степень очистки, не позволяющая добиться за одну стадию требуемых показателей, и ограничение по соленосодержанию в перерабатываемом растворе. Таким образом, ЖРО ядерных энергетических установок с повышенным (до 30 г·л⁻¹) содержанием солей не перерабатываются и накапливаются в хранилищах, что создает все возрастающую опасность радиоактивного загрязнения близлежащих территорий и акваторий.

Для дезактивации ЖРО перспективно применять сорбционные методы, а среди сорбентов можно использовать иониты на основе соединений оксогидрофосфатов Ti(IV) и сложных двойных оксидов Ti(IV) и щелочного металла [9–13], которые способны извлекать катионы высокотоксичных металлов из технологических растворов, обеспечивать компактность при захоронении и безопасность при длительном хранении. Однако условия эффективного применения указанных соединений при извлечении катионов Cs и Sr из высокосолевых систем изучены не в полной мере. Цель работы — определение условий эффективного применения соединений на основе оксогидрофосфатов Ti(IV) и щелочного ме-

талла (в частности натрия) при извлечении катионов Cs⁺ и Sr²⁺ из сложных растворов, близких по химическому составу к технологическим объектам.

Материалы и методы исследования

Получение титанофосфатных сорбентов осуществляли предварительным осаждением гидроксидом натрия из титаносодержащего раствора высокогидратированного прекурсора оксогидроксида Ti(IV), проводили отмывку от маточного электролита с последующей обработкой прекурсора ортофосфорной кислотой. Дальнейшая сушка способствует формированию воздушно-сухого продукта. Модифицирование цирконием титанофосфатных матриц осуществляли введением раствора Zr(IV) к раствору Ti(IV) перед

Таблица 1. Степень извлечения и коэффициенты распределения Cs⁺ и Sr²⁺ на образцах составов TiOHPO₄·3,50H₂O и Zr_{0,1}(TiO)(OH)_{0,4}(HPO₄)·1,76H₂O для различных значений pH сорбции (T = 20 °C, Ж:Т=100)

Table 1. The degree of extraction and distribution coefficients of Cs⁺ and Sr²⁺ on samples of the compositions TiOHPO₄·3.50H₂O and Zr_{0,1}(TiO)(OH)_{0,4}(HPO₄)·1.76H₂O for various sorption pH values (T = 20 °C, L: T = 100)

pH	Остаточное содержание, мг·л ⁻¹		Степень извлечения, %		K _d , мл·г ⁻¹	
	Cs ⁺	Sr ²⁺	Cs ⁺	Sr ²⁺	Cs ⁺	Sr ²⁺
TiOHPO ₄ ·3,50H ₂ O						
2	0,090	7,956	91	22	1067	28
4	0,179	5,100	83	50	487	100
5	0,210	1,632	80	84	400	525
6	0,515	0,816	51	92	104	1150
8	0,546	0,051	48	99,5	92	19900
Zr _{0,1} (TiO)(OH) _{0,4} (HPO ₄)·1,76H ₂ O						
2	0,021	7,344	98	28	4900	39
4	0,105	4,182	90	59	900	144
5	0,126	0,714	88	93	733	1329
6	0,399	0,204	62	98	163	4900
8	0,441	0,020	58	99,8	138	50900

стадий осаждения прекурсора. Легирование катионами металлов, отличающихся от Ti(IV) по кислотно-основным свойствам, в частности Zr(IV), способствует повышению сорбционных свойств фосфатотитановых материалов [14]. Получение титанатной матрицы проводили осаждением гидроксидом натрия из титансодержащего раствора высокогидратированного прекурсора титаната натрия. Дальнейшие отмывка и сушка приводили к получению целевого продукта. На рисунке представлены принципиальные схемы синтеза ионообменных материалов на основе вышеуказанных соединений Ti(IV).

Содержание циркония в синтезированных сорбентах определяли объемным методом с использованием трилона Б и индикатора ксиленоловый оранжевый, титана — атомно-абсорбционным и фотоколориметрическим (с пероксидом водорода) методами, фосфора — фотоколориметрически с молибдатом аммония, а катионов натрия — методом пламенной фотометрии и атомно-абсорбционным методом. Содержание воды, гидроксо- и гидрофосфатных групп устанавливали, сопоставляя результаты химического, дифференциально-термического и термогравиметрического анализов. Состав растворов до и после сорбции анализировали

масс-спектрометрически с индуктивно связанной плазмой.

Процесс ионного обмена на синтезированных сорбентах проводили в статических условиях при различных равновесных значениях pH, температуре, отношении жидкой и твердой фаз (Ж:Т) в соответствии с уравнением

$$RK + 1/zM^{z+} \leftrightarrow K^+ + 1/zMR_z \quad (1)$$

где *R* — гидратированная матрица сорбента; *K*⁺ — протоны функциональных групп (в случае фосфатотитановых сорбентов) или катионы натрия (в случае титанатных сорбентов), замещаемые катионом сорбируемого металла *M*^{z+}. В качестве равновесных значений pH принимали стационарные во времени значения.

Коэффициенты распределения (*K_d*) рассчитывали по уравнению

$$K_d = A\alpha / (100 - A), \quad (2)$$

где *A* — процентное содержание сорбированного катиона металла, α — отношение объема жидкой фазы к массе сорбента.

Результаты и их обсуждение

Синтезированные образцы имели следующие составы: немодифицированные гидрофосфаты оксотитана TiO_(2-x-y)·(OH)_{2y}(HPO₄)_x·nH₂O (где *x* = 0,3÷1,0; *y* = 0÷0,5; *n* = 1,3÷6,3); модифицированные Zr(IV) сорбенты — Zr_xTiO_(1+2x-y)(OH)_{2y}·(HPO₄)_x·nH₂O (где *x* = 0,1÷0,25,

y = 0÷2*x*); титанаты натрия — Na_{2x}Ti_yO_(2y+x)·nH₂O (*x* = 1; *y* = 3÷5; *n* = 0,47÷1,11).

Сорбционное извлечение микроколичеств цезия и стронция проводили в статическом режиме при одновременном присутствии катионов металлов в растворе, моделирующем по макрокомпонентам состав морской воды, г·л⁻¹: 30 NaCl; 1,05·10⁻³ Cs⁺; 10,2·10⁻³ Sr²⁺. Извлечение проводили сорбентами различного состава в зависимости от условий — равновесное значение pH сорбции, температура и отношение жидкой и твердой фаз (Ж:Т) при замещении ионов функциональных центров сорбентов на катионы металлов.

В табл. 1 представлены результаты сорбции катионов цезия и стронция из растворов немодифицированными и модифицированными составами фосфатотитановых сорбентов в зависимости от равновесного значения pH. Видно, что для обоих сорбентов при значении pH = 2 эффективно извлекаются катионы цезия, в то время как катионы стронция практически не сорбируются. Возможно, это связано с конкуренцией со стороны протонов раствора. При повышении значений pH сорбции до 8 извлечение цезия понижается, а стронция — существенно возрастает. Это связано, с одной стороны, с отсутствием конкуренции со стороны ионов водорода раствора, с другой — с усилением подвижности протонов ионообменных групп сорбента и, как следствие, повышением степени извлечения более гидратированных катионов металлов, в частности стронция и натрия [15]. Видно, что для обоих составов образцов оптимальным значением pH сорбции цезия и стронция является 5. Именно при этом значении pH одновременно максимально извлекаются и катионы Cs⁺, и катионы Sr²⁺.

В работе представлены результаты исследования по изучению влияния отношения жид-

кой и твердой фаз, а также температурного фактора на извлечение из растворов катионов цезия и стронция при равновесном значении рН, равном 5. В табл. 2 приведены результаты сорбции катионов металлов образцом состава $\text{TiOHPO}_4 \cdot 3,50\text{H}_2\text{O}$.

Видно, что при увеличении отношения фаз Ж:Т с 50 до 2000 происходит существенное уменьшение степени извлечения катионов цезия и стронция (с 89 до 21 % для катионов Cs^+ и с 91 до 28 % для катионов Sr^{2+}), что, возможно, связано, с одной стороны, с усилением "экранирования" функциональных центров ионов сорбированными катионами металлов. С увеличением количества сорбента и, соответственно, ионообменных центров, эти факторы оказывают меньшее влияние. С другой стороны — сорбцией катионов металлов макрокомпонента раствора. Повышение температуры при сорбции катионов металлов с 20 до 70 °С практически не влияет на степень извлечения цезия и стронция (см. табл. 2). По-видимому, это связано с несущественным изменением эффективных радиусов катионов металлов в результате их дегидратации.

Таким образом, оптимальным соотношением жидкой и твердой фаз с точки зрения расхода сорбционного материала и эффективности его использования является Ж:Т=100. Подобные закономерности следует ожидать и для сорбента, модифицированного Zr(IV).

Исследования по изучению ионообменной активности сорбентов на основе титанатов натрия показали, что при введении их в раствор происходит частичная гидролитическая деструкция по уравнению реакции $\text{Na}_{2x}\text{Ti}_y\text{O}_{(2y+x)} + 2x\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2x\text{NaOH} + \text{H}_{2x}\text{Ti}_y\text{O}_{(2y+x)}$, в результате чего повышается рН раствора в диапазоне значений 8–9 в зависимости от соотношения жидкой и твердой фаз (табл. 3). Из анализа полученных данных следует, что в этой области значений рН эффек-

Таблица 2. Сорбционное извлечение Cs^+ и Sr^{2+} образцом состава $\text{TiOHPO}_4 \cdot 3,50\text{H}_2\text{O}$ для различных соотношений фаз Ж:Т и температуры
Table 2. Sorption extraction of Cs^+ and Sr^{2+} with a sample of the composition $\text{TiOHPO}_4 \cdot 3.50\text{H}_2\text{O}$ for various ratios of the phases L: T and temperature

Условия		Остаточное содержание, мг·л ⁻¹		Степень извлечения, %		K_d , мл·г ⁻¹	
Ж:Т	T, °C	Cs^+	Sr^{2+}	Cs^+	Sr^{2+}	Cs^+	Sr^{2+}
50	20	0,116	0,918	89	91	805	1011
100	20	0,210	1,632	80	84	400	525
1000	20	0,494	3,978	42	51	724	1041
2000	20	0,830	0,830	21	28	530	778
100	70	0,168	1,122	84	89	530	809

Примечание. рН сорбции = 5.

Таблица 3. Сорбционное извлечение Cs^+ и Sr^{2+} для различных соотношений фаз Ж:Т образцом состава $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7 \cdot 1,03\text{H}_2\text{O}$ из раствора
Table 3. Sorption extraction of Cs^+ and Sr^{2+} for various ratios of L:T with a sample of the composition $\text{Na}_2\text{Ti}_3\text{O}_7 \cdot 1.03\text{H}_2\text{O}$ from solution

Условия		Остаточное содержание, мг·л ⁻¹		Степень извлечения, %		K_d , мл·г ⁻¹	
Ж:Т	рН	Cs^+	Sr^{2+}	Cs^+	Sr^{2+}	Cs^+	Sr^{2+}
100	8	0,83	0,0071	21	99,9	26,5	143562
1000	9	0,99	0,53	5,7	84,8	60	18245

тивно сорбируются катионы Sr^{2+} (свыше 99 %), в то время как катионы Cs^+ практически не извлекаются. При десятикратном увеличении отношения жидкой и твердой фаз происходит снижение степени извлечения катионов стронция. Таким образом, оптимальным соотношением жидкой и твердой фаз для эффективного использования титанатных матриц является Ж:Т=100 (табл. 3).

Воздушно-сухие титанатные и фосфаттитановые матрицы являются рентгеноаморфными. У насыщенных катионами металлов ионов рентгеноаморфность сохраняется. Термическая обработка в интервале от 600 до 650 °С отработанных образцов на основе оксигидрофосфатов Ti(IV) и титанатов натрия приводит к образованию малорастворимых кристаллических структур, обеспечивающих надежную иммобилизацию радиоактивного сорбата в течение длительного времени.

В работе приведены результаты исследования сорбционного извлечения катионов Cs^+ и Sr^{2+} из модельного раствора, соответствующего составу морской воды [16], при различных значениях рН (табл. 4).

Показано, что извлечение катионов Cs^+ и Sr^{2+} немодифи-

цированным и модифицированным фосфаттитановыми ионитами несущественно снижается в присутствии значительно превосходящих по содержанию конкурентных катионов металлов с сопоставимыми размерами ионных радиусов (Cs^+ — 1,65Е; K^+ — 1,33Е; Sr^{2+} — 1,27 Е; Ca^{2+} — 1,06Е; Mg^{2+} — 0,78Е [17]). Оптимальным значением рН при совместном извлечении Cs^+ и Sr^{2+} из модельного раствора близкого по химическому составу к морской воде, как и в предыдущих экспериментах, является рН=5. Проведение последующих двух стадий доочистки обеспечит полное извлечение катионов цезия и стронция из раствора. Эффективность извлечения катионов стронция сорбентами на основе сложных оксидов Ti(IV) и натрия заметно снижается в присутствии конкурентных для стронция катионов кальция и магния (более чем в 200 раз снижается значение K_d).

Таким образом, сорбционные материалы на основе титанатов натрия могут представлять интерес лишь для избирательного извлечения радионуклидов стронция, в то время как фосфаттитановые иониты — для коллективной сорбции радионуклидов цезия и стронция.

Таблица 4. Сорбция Cs⁺ и Sr²⁺ из модельного раствора* для различных значений pH (Ж:Т = 100, Т = 20 °С)

Table 4. Sorption of Cs⁺ and Sr²⁺ from the model solution* for various pH values (L:T = 100, T = 20 °C)

pH сорбции	Остаточное содержание, мг·л ⁻¹		Степень извлечения, %		K _d , мл·г ⁻¹	
	Cs ⁺	Sr ²⁺	Cs ⁺	Sr ²⁺	Cs ⁺	Sr ²⁺
TiOHPO ₄ ·3,50H ₂ O						
2	0,17	9,81	80,0	–	400	–
5	0,24	2,71	71,8	72,9	254	269
8	0,42	0,59	50,6	94,1	102	1595
Zr _{0,1} (TiO)(OH) _{0,4} (HPO ₄)·1,76H ₂ O						
2	0,07	9,53	91,8	–	1114	–
5	0,14	1,49	83,5	85,1	507	571
8	0,34	0,20	60,0	98,0	150	4990
Na ₂ Ti ₂ O ₇ ·1,03H ₂ O						
9	0,75	1,26	12	87,4	13	690

* Состав раствора, г·л⁻¹: Na⁺ – 10,7; Cl⁻ – 19,35; K⁺ – 0,42; Ca²⁺ – 0,41; Mg²⁺ – 1,35; Cs⁺ – 0,85·10⁻³; Sr²⁺ – 10·10⁻³.

Таблица 5. Результаты испытания по дезактивации ЖРО

Table 5. LRW decontamination test results

Стадия	Объект	Активность, Бк·л ⁻¹		
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	Общая
0	Раствор ЖРО	5,525·10 ⁵	6,089·10 ⁵	1,161·10 ⁶
1	Фильтрат 1	4,343·10 ³	928	5,271·10 ³
	Сорбент 1	9,794·10 ⁶	1,917·10 ⁷	2,896·10 ⁷
2	Фильтрат 2	70,82	< 0,7	70,82
	Сорбент 2	1,352·10 ⁵	5,070·10 ⁵	6,442·10 ⁵
3	Фильтрат 3	< 4	< 0,7	< 4
	Сорбент 3	Не определено		

С использованием немодифицированного сорбента состава TiOHPO₄·3,50H₂O были проведены испытания по очистке технологических ЖРО на производственной площадке филиала ЗФ ФГУП "Северное федеральное предприятие по обращению с радиоактивными отходами" "Севрао" (Андреева губа, Заозерск, Мурманская область) (табл. 5). Технологический раствор содержал радионуклиды ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ⁹⁰Y, солей — 30 г·л⁻¹, нефтепродуктов — 0,3–0,4 г·л⁻¹. Сорбционный процесс осуществляли при определенных ранее условиях (pH=5, Ж:Т=100), обеспечивающих эффективное совместное извлечение радионуклидов. Дезактивацию проводили в три стадии. На каждой стадии вводилась новая порция сорбента в раствор, после установления равновесия сорбент отделяли фильтрованием. Отработанный сорбент (1–3) и фильтрат (1–3) исследовали на наличие радионуклидов.

довали на наличие радионуклидов.

Испытания показали высокую степень очистки ЖРО в присутствии высоких концентраций солей и наличии нефтепродуктов в растворе. Очищенный после третьей стадии раствор (фильтрат 3) соответствует требованиям НРБ-99/2009 по содержанию радионуклидов в питьевой воде "Значение дозовых коэффициентов ε (мЗв·Бк⁻¹) при поступлении радионуклидов в организм взрослых людей с водой и уровню вмешательства УВ (Бк·кг⁻¹) по содержанию отдельных радионуклидов в питьевой воде (НРБ-99/2009, приложение 2а)". Применение модифицированных составов фосфатотитановых сорбентов будет способствовать более эффективному извлечению радионуклидов из технологических растворов.

Таким образом, результаты испытаний позволяют рекомендовать сорбенты на основе

гидрофосфатов оксотитана для дезактивации жидких отходов с повышенным солевым фоном, содержащих дополнительно примеси в виде минеральных масел. Последние не оказывают существенного влияния на дезактивацию жидких отходов и отделяются от очищаемого раствора вместе с отработанным сорбентом.

Заключение

Определены условия эффективного применения сорбционных материалов на основе соединений Ti(IV). Установлено, что титанатные матрицы представляют интерес для избирательного извлечения из высокосолевых растворов только катионов стронция (оптимальные соотношения Ж:Т=100). Показана перспективность использования сорбентов на основе гидрофосфатов оксотитана(IV) для коллективного извлечения цезия и стронция из высокосолевых растворов, близких по составу к морской воде. Определены оптимальные условия использования фосфатотитановых матриц (pH = 5, Ж:Т = 100, Т = 20 °С), которые обеспечивают эффективное совместное извлечение катионов Cs⁺ и Sr²⁺. Модифицированные составы сорбентов обладают большим сродством к катионам цезия и стронция на фоне высоких концентраций близких по химическим свойствам катионов металлов. Термическая обработка насыщенных радионуклидами сорбентов обеспечивает надежную иммобилизацию радиоактивного сорбата и безопасность при хранении в течение длительного времени.

Проведена апробация фосфатотитановых матриц при дезактивации реальных высокосолевых жидких радиоактивных отходов, содержащих нефтепродукты. Показана эффективность применения сорбентов на основе гидрофосфатов оксотитана(IV). Очищенные растворы соответствуют требованиям по содержанию радионуклидов в питьевой воде.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках научного проекта №17-19-01522.

Литература

1. Вишняков Ю.М., Малышев С.П., Пчелинцев В.М., Хорошев В.Г. Малогабаритная станция комплексной переработки жидких радиоактивных отходов. Судостроение. 1999. № 3. С. 44–48.
2. Abdel-Karima A.M., Zaki A.A., Elwana W. et al. Experimental and modeling investigations of cesium and strontium adsorption onto clay of radioactive waste disposal. Applied Clay Science. 2016. № 132. 133. P. 391–401.
3. Mansy M.S., Hassana R.S., Selima Y.T. et al. Evaluation of synthetic aluminum silicate modified by magnesia for the removal of ^{137}Cs , ^{60}Co and $^{152+154}\text{Eu}$ from low-level radioactive waste. Applied Radiation and Isotopes. 2017. № 130. P. 198–205.
4. Рябчиков Б.Е. Очистка жидких радиоактивных отходов. М., ДеЛи принт, 2008. 516 с.
5. Розен А.М., Захаркин Б.С., Николотова З.И. и др. Бидентатные экстрагенты для глубокого извлечения актиноидов из высокоактивных отходов. Тр. 15 Менделеевского съезда по общей и приклад. химии. 1993. Т. 3. С. 124–125.
6. Милютин В.В. Физико-химические методы извлечения радионуклидов из жидких радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности. Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М., 2008. 49 с.
7. Awwal Md.R., Yaita T., Shiwaku H. Design a novel optical adsorbent for simultaneous ultra-trace cerium(III) detection, sorption and recovery. Chemical Engineering Journal. 2013. № 228. P. 327–335.
8. Sen Gupta S.K., Rimpelainen S. Liquid Radwaste Processing with Spiral-Wound Reverse Osmosis. Ultrapure Water. 1997. V. 14. № 1. P. 32–39.
9. Elghniji K., Saad M.E.K., Araissi M., Elaloui E., Mousaoui Y. Chemical modification of TiO_2 by $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$ anions using the sol-gel route with controlled precipitation and hydrolysis: enhancing thermal stability. Materials Science-Poland. 2014. V. 32. № 4. P. 617–625.
10. Ortiz-Oliveros H.B., Flores-Espinosa R.M., Ordóñez-Regil E., Fernández-Valverde S.M. Synthesis of $\alpha\text{-Ti}(\text{HPO}_4)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ and sorption of Eu (III). Chemical Engineering Journal. 2014. V. 236. P. 398–405.
11. García-Glez J., Trobajo C., Khainakov S.A., Amghouz Z. α -Titanium phosphate intercalated with propylamine: An alternative pathway for efficient europium(III) uptake into layered tetravalent metal phosphates. Arabian Journal of Chemistry. 2017. № 10. P. 885–894.
12. Baig U., Khan Rao R.A., Khan A.A., Sanagi M.M., Gondal M.A. Removal of carcinogenic hexavalent chromium from aqueous solutions using newly synthesized and characterized polypyrrole – titanium(IV) phosphate nanocomposite. Chemical Engineering Journal. 2015. V. 280. P. 494–504.
13. Khainakova O.A., Espina A., Trobajo C., Khainakov S.A., Garcia J.R., Bortun A.I. Ion-exchange properties of a novel layered titanium(IV) phosphate. Studies in Surface Science and Catalysis. 2002. V. 144. P. 701–708.
14. Иваненко В.И., Локшин Э.П., Корнейков Р.И., Калинин В.Т. Повышение эффективности титанофосфатных сорбентов модифицированием катионами переходных металлов. ДАН. 2011. Т. 439. № 4. С. 493–495.
15. Клугман И.Ю. Эквивалентная электропроводность водных растворов электролитов типа 1:1. Предпосылки к новой теории. Электрохимия. 1999. Т. 35. № 1. С. 85–92.
16. Хорн Р. Морская химия (структура воды и химия гидросферы). М., Мир, 1972. 400 с.
17. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М., Химия, 1967. 390 с.

References

1. Vishnyakov Yu.M., Malyshev S.P., Pchelintsev V.M., Khoroshev V.G. Malogabaritnaya stantsiya kompleksnoi pererabotki zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. Sudostroenie. 1999. № 3. S. 44–48.
2. Abdel-Karima A.M., Zaki A.A., Elwana W. et al. Experimental and modeling investigations of cesium and strontium adsorption onto clay of radioactive waste disposal. Applied Clay Science. 2016. № 132. 133. P. 391–401.
3. Mansy M.S., Hassana R.S., Selima Y.T. et al. Evaluation of synthetic aluminum silicate modified by magnesia for the removal of ^{137}Cs , ^{60}Co and $^{152+154}\text{Eu}$ from low-level radioactive waste. Applied Radiation and Isotopes. 2017. № 130. P. 198–205.
4. Ryabchikov B.E. Ochistka zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. M., DeLi print, 2008. 516 s.
5. Rozen A.M., Zakharkin B.S., Nikolotova Z.I. i dr. Bidentatnye ekstragenty dlya glubokogo izvlecheniya aktinoidov iz vysokoaktivnykh otkhodov. Tr. 15 Mendeleevskogo s"ezda po obshchei i priklad. khimii. 1993. T. 3. S. 124–125.
6. Milyutin V.V. Fiziko-khimicheskie metody izvlecheniya radionuklidov iz zhidkikh radioaktivnykh otkhodov nizkogo i srednego urovnya aktivnosti. Avtoref. dis. ... dokt. khim. nauk. M., 2008. 49 s.
7. Awwal Md.R., Yaita T., Shiwaku H. Design a novel optical adsorbent for simultaneous ultra-trace cerium(III) detection, sorption and recovery. Chemical Engineering Journal. 2013. № 228. P. 327–335.
8. Sen Gupta S.K., Rimpelainen S. Liquid Radwaste Processing with Spiral-Wound Reverse Osmosis. Ultrapure Water. 1997. V. 14. № 1. P. 32–39.
9. Elghniji K., Saad M.E.K., Araissi M., Elaloui E., Mousaoui Y. Chemical modification of TiO_2 by $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$ anions using the sol-gel route with controlled precipitation and hydrolysis: enhancing thermal stability. Materials Science-Poland. 2014. V. 32. № 4. P. 617–625.
10. Ortiz-Oliveros H.B., Flores-Espinosa R.M., Ordóñez-Regil E., Fernández-Valverde S.M. Synthesis of $\alpha\text{-Ti}(\text{HPO}_4)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ and sorption of Eu (III). Chemical Engineering Journal. 2014. V. 236. P. 398–405.
11. García-Glez J., Trobajo C., Khainakov S.A., Amghouz Z. α -Titanium phosphate intercalated with propylamine: An alternative pathway for efficient europium(III) uptake into layered tetravalent metal phosphates. Arabian Journal of Chemistry. 2017. № 10. P. 885–894.
12. Baig U., Khan Rao R.A., Khan A.A., Sanagi M.M., Gondal M.A. Removal of carcinogenic hexavalent chromium from aqueous solutions using newly synthesized and characterized polypyrrole – titanium(IV) phosphate nanocomposite. Chemical Engineering Journal. 2015. V. 280. P. 494–504.
13. Khainakova O.A., Espina A., Trobajo C., Khainakov S.A., Garcia J.R., Bortun A.I. Ion-exchange properties of a novel layered titanium(IV) phosphate. Studies in Surface Science and Catalysis. 2002. V. 144. P. 701–708.
14. Ivanenko V.I., Lokshin E.P., Korneikov R.I., Kalinnikov V.T. Povyshenie effektivnosti titanofosfatnykh sorbentov modifitsirovaniem kationami perekhodnykh metallov. DAN. 2011. T. 439. № 4. S. 493–495.
15. Klugman I.Yu. Ekvivalentnaya elektroprovodnost' vodnykh rastvorov elektrolitov tipa 1:1. Predposylki k novoi teorii. Elektrokhiimiya. 1999. T. 35. № 1. S. 85–92.
16. Khorn R. Morskaya khimiya (struktura vody i khimiya gidrosfery). M., Mir, 1972. 400 s.
17. Lur'e Yu.Yu. Spravochnik po analiticheskoi khimii. M., Khimiya, 1967. 390 s.

Р.И. Корнейков – канд. техн. наук, науч. сотрудник, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева, 184209, Россия, г. Апатиты, ул. Академгородок, д. 26а, e-mail: korneikov@chemistry.kolasc.net.ru • В.И. Иваненко – д-р техн. наук, зав. лабораторией, e-mail: ivanenko@chemistry.kolasc.net.ru • С.В. Владимиров – вед. инженер, e-mail: vladi_sv@chemistry.kolasc.net.ru • Н.В. Жаров – аспирант, e-mail: nikzh-85@mail.ru

R.I. Korneikov – Cand. Sci. (Eng.), Research Scientist, Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences" Science Centre of Russian Academy of Sciences 184209 Russia, Apatity, Academic town Str. 26a, e-mail: korneikov@chemistry.kolasc.net.ru • V.I. Ivanenko – Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, e-mail: ivanenko@chemistry.kolasc.net.ru • S.V. Vladimirova – Leading Engineer, e-mail: vladi_sv@chemistry.kolasc.net.ru • N.V. Zharov – Post-graduate Student, e-mail: nikzh-85@mail.ru