

УДК 66.081:546.36:42:661.365.5:546.821

## СОРБЦИОННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ СМЕСИ КАТИОНОВ НИОБИЙ–ЦИРКОНИЙ

© 2025 г. В. В. Самонин<sup>а, \*</sup>, Ю. С. Федоров<sup>а</sup>, В. Ю. Морозова<sup>а</sup>, М. Е. Сикоева<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: samonin@lti-gti.ru

Поступила в редакцию 15.07.2024

После доработки 27.11.2024

Принята в печать 30.11.2024

В работе впервые показана возможность использования сорбционных технологий для разделения смеси радиоактивных катионов ниобия и циркония, входящих в состав отходов, образующихся в ядерном топливном цикле. Разделение этих элементов позволит значительно снизить затраты на захоронение отходов, а также даст возможность повторного использования ионов циркония. В работе детально исследован процесс разделения ионов с использованием анионообменника АВ-17-8, подобраны условия для более эффективного проведения процесса в динамических условиях и предложен его механизм.

**Ключевые слова:** радионуклиды, сорбция, цирконий, ниобий, ионный обмен

**DOI:** 10.31857/S0040357125020055 **EDN:** ndcimd

### ВВЕДЕНИЕ

При работе с отходами, образующимися в ядерном топливном цикле, обращению с конструкционными материалами отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС), относящимися ко 2-му классу радиоактивных отходов (РАО) — не тепловыделяющим высокоактивным отходам (ВАО), уделяется недостаточно внимания. Между тем на французском заводе типа UP-2/UP-3 в ходе переработки ОТВС объем металлических отходов после прессования составляет 0.33 м<sup>3</sup>/т по сравнению с объемом остеклованных ВАО (РАО 1-го класса), который составляет 0.15 м<sup>3</sup>/т U [1]. В соответствии с критериями классификации удаляемых РАО [2] РАО 1-го и 2-го классов подлежат геологическому захоронению. Возможным вариантом сокращения затрат на дорогостоящее геологическое захоронение ВАО представляется перевод основной массы РАО 2-го класса в отходы 3-го класса, которые возможно захоранивать в приповерхностных хранилищах, существенно более дешевых. Наиболее перспективными в этом направлении являются облученные тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) реакторов ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) на основе цирконий-ниобиевого сплава, например Э-110,

содержащего 1% ниобия. Оболочка ТВЭЛа сплава Э-110, наиболее используемая в реакторах ВВЭР, содержит от 300 до 380 кг циркония на тонну урана в зависимости от типа тепловыделяющей сборки (ТВС) [2, 3].

В циркониевых оболочках ТВЭЛа при облучении появляются следующие изотопы (при выгорании отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) 50 ГВт сут/тU и 30-летней выдержки): <sup>93</sup>Zr ( $T_{1/2} = 1.5$  млн лет) с активностью  $2.3 \times 10^4$  Бк/г; <sup>93m</sup>Nb ( $T_{1/2} = 16.3$  лет) с активностью  $1.4 \times 10^7$  Бк/г и <sup>94</sup>Nb ( $T_{1/2} = 20$  тыс. лет) с активностью  $1.3 \times 10^6$  Бк/г [4–5].

В соответствии с критериями классификации удаляемых РАО [2] для долгоживущих, относящихся к РАО 3-го класса по  $\beta$ -активности, верхняя граница регламентирована до  $10^4$  Бк/г. Таким образом, если удалить изотопы ниобия из основной массы циркония, то его уровень активности заметно приблизится к РАО 3-го класса.

Далее выделенный цирконий можно использовать для получения цирконий-железо-калий-фосфатной матрицы, в которой содержание циркония по отношению к другим компонентам составляет менее 8% [6], то есть активность <sup>93</sup>Zr составит примерно  $1.8 \times 10^3$  Бк/г, что соот-

ветствует РАО 3-го класса, пригодных к приповерхностному захоронению, либо для получения матрицы для иммобилизации долгоживущих  $\alpha$ -нуклидов [6].

После отделения циркония в остатке получается 1% РАО 1-го класса от исходной оболочки ТВЭЛа, содержащей  $^{93m}\text{Nb}$  и  $^{94}\text{Nb}$ .

Наиболее эффективными и часто используемыми методами для отделения ниобия от сопутствующих элементов являются экстракция и хроматография. Также разделение с помощью осаждения используется при полном систематическом анализе [7, 8].

Во многих работах [9, 10] описываются результаты успешного использования сорбентов в качестве химических поглотителей, а также для разделения смеси катионов. Кроме того, применение в данном процессе нашли ионообменные материалы [11, 12]. Метод с использованием анионитов является преимущественным, так как зарекомендовал себя с позиции несложного аппаратного оформления процесса, сравнительной дешевизны и эффективности.

Целью данной работы является подбор сорбционно-активного материала и условий проведения процесса, позволяющих селективно разделить смесь ионов Nb-Zr.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения ниобия на фотоэлектрическом колориметре КФК-2МП к  $5\text{ см}^3$  исследуемого раствора приливается  $5\text{ см}^3$  1 н раствора HCl и  $2.5\text{ см}^3$  50 мас. % раствора KSCN. Концентрация ниобия определяется по оптической плотности, измеренной на фотоколориметре при длине волны 420 нм, относительно дистиллированной воды [9]. Строится градуировочный график зависимости  $C = f(D)$ , где  $C$  — концентрация ионов ниобия в растворе (мг/л), а  $D$  — оптическая плотность раствора с известной концентрацией. Затем по градуировочному графику, определив оптическую плотность, находят концентрацию ниобия в исследуемом растворе (точность определения ниобия 2 мкг/мл).

Для определения циркония в растворе к  $10\text{ см}^3$  пробы приливается  $5\text{ см}^3$  1 н раствора серной кислоты, добавляется одна гранула сухого индикатора — ксиленолового оранжевого, затем раствор титруется 0.1 н трилоном Б. Концентрация ионов циркония определяется по количеству ушедшего на титрование раствора трилона Б (точность определения ионов циркония 10 мкг/мл) [8].

Построение изотерм адсорбции катионов ниобия и циркония как из индивидуальных рас-

творов, так и из их смеси, на ионообменных материалах в статических условиях проводилось следующим образом. Навеска исследуемого материала помещалась в раствор, содержащий различные концентрации ионов ниобия и циркония, выležивалась в растворе в течение 3 дней до достижения равновесия. После чего определялась равновесная концентрация ионов в растворе. Поглотительная емкость вычислялась по следующей формуле:

$$a = \frac{(C_0 - C_p)V}{m};$$

где  $C_0$  — начальная концентрация ионов в растворе, мг/л;  $C_p$  — равновесная концентрация ионов в растворе, мг/л;  $V$  — объем раствора, л;  $m$  — масса материала, г.

На основании полученных результатов строится изотерма адсорбции катионов на исследуемых материалах в координатах  $a = f(C_p)$ .

Выходные кривые поглощения катионов на ионообменных материалах в динамических условиях определяли следующим образом. Раствор, содержащий различные концентрации ионов ниобия и циркония, с концентрациями соляной кислоты 0.1, 0.5, 1.0 н пропускали с расходом  $\text{см}^3/\text{мин}$  через динамическую колонку диаметром  $d = 2.5\text{ см}$  и высотой слоя анионита  $h = 15\text{ см}$  с фиксированием содержания ионов циркония и ниобия в растворе на выходе из колонки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Проведение процесса адсорбции в статических условиях.** Для определения возможности разделения смеси ионов ниобия и циркония на ионообменных материалах в статическом режиме в качестве исследуемых ионитов для сорбции выбраны следующие материалы производства НПО “Токем”: катионит КУ-2-8, размер гранул 0.315 — 1.250 мм, и анионит АВ-17-8, размер гранул 0.400 — 1.250 мм.

Для катионита КУ-2-8 характерно то, что структурная формула его полимерного звена представлена сополимером стирола с дивинилбензолом с привитой сульфогруппой ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ). КУ-2-8 характеризуется гелевой структурой и является сильнокислотным катионитом. Механизм катионного обмена, происходящего на КУ-2-8, можно представить в следующем виде (рис. 1) [13].

Из рис. 1 видно, что катионит, находящийся в Н-форме, обменивает протон ( $\text{H}^+$ ) на катион металла ( $\text{M}^+$ ). Таким образом, происходит поглощение иона из раствора за счет катионного об-

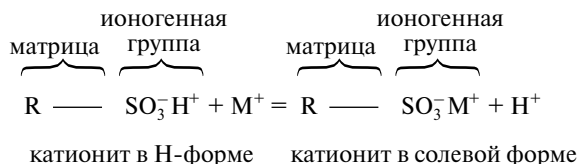
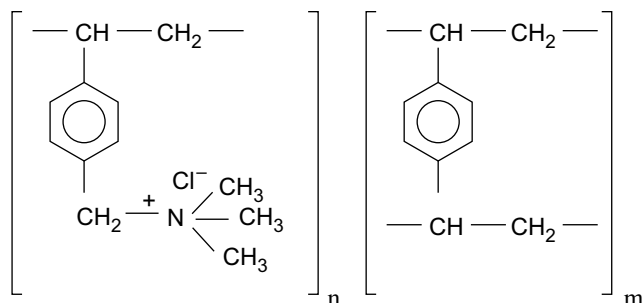
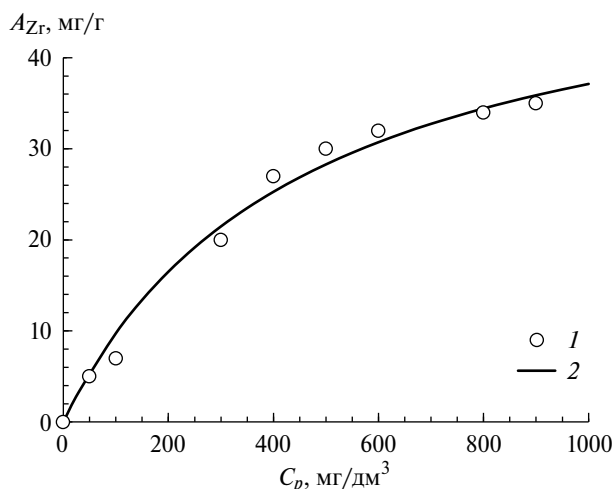


Рис. 1. Механизм катионного обмена на катионите КУ-2-8.

Рис. 2. Структурная формула анионита АВ-17-8 в Cl<sup>-</sup> форме.Рис. 3. Изотермы сорбции ионов циркония  $\text{Zr}^{4+}$  из индивидуальных растворов на КУ-2-8. 1 – эксперимент; 2 – расчет по уравнению (3).

мена. Данный ионит характеризуется легкостью вытеснения из него протона другими катионами раствора в широком интервале pH. Обменная емкость такого катионита уже при малых значениях pH (от 1.1–1.5) достигает предельной величины, оставаясь постоянной при дальнейшем повышении pH [13, 14].

Анионит АВ-17-8 представляет собой сополимеризованный сильноосновной монофункциональный анионит гелевой структуры, содержащий четвертичные бензилтриметиламмониевые функциональные группы. Структурная формула анионита АВ-17-8 представлена на рис. 2 [13].

Анализ структуры анионита АВ-17-8 показывает возможность поглощения ионов из раствора за счет обмена на ион  $\text{Cl}^-$  в случае, если ионит находится в  $\text{Cl}^-$  форме, или на ион  $\text{OH}^-$ , в случае если ионит находится в  $\text{OH}^-$  форме. Также за счет наличия четвертичной аминогруппы анионит АВ-17-8 способен к реакции комплексообразования за счет донорно-акцепторного взаимодействия.

Были проведены исследования по определению поглотительной емкости материалов при различной концентрации катионов и построены изотермы адсорбции при температуре  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Процесс проводили из раствора соляной кислоты при pH = 1. Результаты представлены на рис. 3 и 4.

Следует отметить, что все эксперименты проходили фактически при постоянной ионной силе 0.1 моль/дм<sup>3</sup>, соответствующей неизменной концентрации соляной кислоты, в то время как концентрации остальных компонентов были значительно меньше.

Из рис. 3 видно, что ионы циркония поглощаются на катионите КУ-2-8, вероятно, по реакции ионного обмена. В растворе соляной кислоты при pH = 1 цирконий находится в виде нейтрального комплекса  $\text{Zr}(\text{OH})_4$  и положительно заряженного  $\text{Zr}(\text{OH})_3^+$ , причем последний является определяющим [15–17]. При этом на анионите АВ-17-8 емкость по катионам циркония при тех же равновесных концентрациях, что и для материала КУ-2-8, практически равна нулю, так как процесс поглощения не происходит.

Реакция ионного обмена ионов циркония с катионитом КУ-2-8 может проходить по следующей реакции:



По закону действующих масс можно записать:

$$K = \frac{A_{\text{Zr}} H}{C_p (A_\infty - A_{\text{Zr}})}, \quad (2)$$

где  $A_{\text{Zr}}$  – сорбционная емкость ионита по катиону циркония (количество в твердой фазе), моль/г;  $H$  – концентрация протона в водной фазе, моль/дм<sup>3</sup>;  $C_p$  – равновесная концентрация иона циркония в водной фазе, моль/дм<sup>3</sup>;  $A_\infty$  – предельная сорбционная емкость катионита по обмениваемому иону (протону), моль/г;  $A_\infty - A_{\text{Zr}}$  – оставшееся свободным количество обмениваемого катиона (не связанного с ионитом);  $K$  – константа ионного обмена по закону действующих масс (безразмерная).

Если принять, что концентрация протона по уравнению (1) для 0.1 моль/дм<sup>3</sup> соляной кислоты

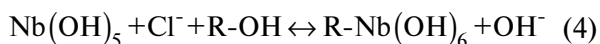
намного больше концентраций иона циркония и обмениваемого протона в катионите (больше чем в 100 раз по молям), то можно считать, что концентрация протона в водной фазе практически не меняется, и тогда после преобразований из уравнения (2) получаем уравнение для расчета изотермы сорбции ионов циркония катионитом КУ-2-8:

$$A_{Zr} = \frac{K_{Zr} A_{\infty} C_p}{1 + K_{Zr} C_p}, \quad (3)$$

где  $K_{Zr}$  — константа ионного обмена с учетом постоянства концентрации протона в водной фазе.

Расчет по уравнению (3) приведен на рис. 3 для  $A_{\infty} = 54$  мг/г и  $K_{Zr} = 0.022$  мг/дм<sup>3</sup>, для удобства концентрации использовали в мг/дм<sup>3</sup> для водной фазы и в мг/г для твердой фазы. Уравнение (3) полностью идентично уравнению Ленгмюра, хотя и получено из уравнения реакции по закону действующих масс. Коэффициент аппроксимации  $R^2 = 0.9816$ .

Из рис. 4 видно, что ионы ниобия сорбируются как на КУ-2-8, так и на АВ-17-8. Рассмотрим сорбцию ионов ниобия на анионите АВ-17-8. Известно, что ниобий при ионной силе от 0.1 до 1.0 моль/дм<sup>3</sup> в водной фазе образует по крайней мере три основных комплекса  $Nb(OH)_4^+$ ,  $Nb(OH)_5^0$  и  $Nb(OH)_6^-$  [16]. Реакцию анионного обмена на анионите АВ-17-8 можно представить следующим образом:



Поскольку процесс ионного обмена происходит в 0.1 моль/дм<sup>3</sup> HCl при большом избытке кислоты по отношению к другим компонентам,

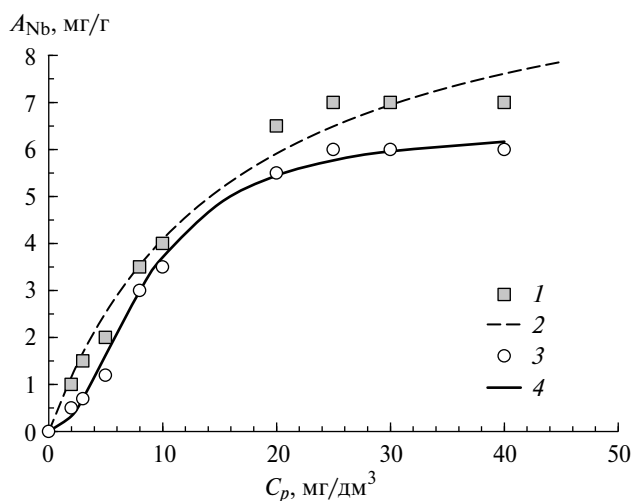


Рис. 4. Изотерма сорбции катионов ниобия  $Nb^{5+}$  из индивидуальных растворов на катионите КУ-2-8 и анионите АВ-17-8. 1 — АВ-17-8 эксперимент; 2 — расчет по уравнению (5); 3 — КУ-2-8 эксперимент; 4 — расчет по уравнению (7).

то концентрация выделившегося хлорид-иона не повлияет на его количество в водной фазе, а гидроксид-ион будет нейтрализован, то есть оба этих компонента войдут в константу. В результате на основании закона действующих масс по аналогии с реакцией (1) после преобразований получим следующее уравнение для сорбции ниобия:

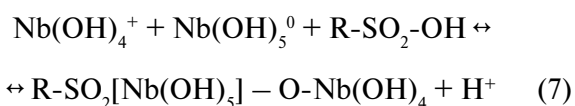
$$A_{Nb} = \frac{K_{Nb} A_{\infty} C_p}{1 + K_{Nb} C_p}. \quad (5)$$

Уравнение (5) получено с учетом реакции (4) и закона действующих масс аналогично уравнению (3) для циркония за исключением, что все параметры относятся к ниобию. На рис. 4 приведен расчет для сорбции ниобия анионитом АВ-17-8 (рис. 4, линия 2) в сравнении с экспериментальными точками (рис. 4, точки 1) для  $A_{\infty} = 10.7$  мг/г и  $K_{Nb} = 0.062$  мг/дм<sup>3</sup>. Высокий коэффициент аппроксимации  $R^2 = 0.9708$  позволяет использовать уравнение (5) для оценки извлечения ниобия анионитом с высокой точностью. При концентрациях более 20 мг/дм<sup>3</sup> расчетные данные не дают ярко выраженного плато, хотя и отличаются от экспериментальных точек менее чем на 7%. Уравнение (5) аналогично уравнению Ленгмюра, что соответствует также данным статьи по исследованию сорбции ниобия анионитом АВ-17-8 [16], в которой были получены прямые зависимости основных параметров при линеаризации уравнения Ленгмюра.

Изотерма по ионам ниобия на катионите КУ-2-8 (рис. 4, точки 3) имеет другой характер по сравнению с изотермой для АВ-17-8, особенно значительное отличие наблюдается на начальном участке. Линеаризация по уравнению Ленгмюра показала коэффициент аппроксимации  $R^2 = 0.8827$ , что указывает на недостаточную точность уравнения (3). Наиболее точно экспериментальные результаты по сорбции ниобия катионитом КУ-2-8 (рис. 4, линия 4) описывает следующее уравнение с коэффициентом аппроксимации  $R^2 = 0.9977$ :

$$A_{Nb} = \frac{0.0135 \times 6.45 C_p^2}{1 + 0.0135 C_p^2}. \quad (6)$$

Такое уравнение может быть получено из реакции, в которой участвуют две молекулы ниобия, например:



В соответствии с реакцией (8) одна молекула  $Nb(OH)_4^+$  замещает протон сульфогруппы,

а вторая  $\text{Nb}(\text{OH})_5^0$  присоединяется к кислороду сульфогруппы за счет образования донорно-акцепторной связи. Если учесть, что концентрация протона в водной фазе постоянна, так как имеется большой избыток соляной кислоты по сравнению с сульфогруппой катионита, а снижение катионообменной емкости происходит за счет одной положительно заряженной группы ниобия  $\text{Nb}(\text{OH})_4^+$ , то с использованием закона действующих масс можно получить уравнение (7).

**Проведение процесса поглощения в динамических условиях.** Для того, чтобы определить возможность проведения процесса разделения ионов в динамическом режиме, были проведены следующие эксперименты и получены выходные кривые поглощения ионов ниобия и циркония.

Очевидно, что при реализации процесса поглощения ионов на анионообменнике существенную роль будет играть концентрация соляной кислоты в растворе. Для того, чтобы определить это влияние, проводили процесс разделения смеси ионов ниобия и циркония в динамических условиях при варьировании содержания соляной кислоты.

Сорбция проводилась в динамических условиях с использованием растворов ионов ниобия и циркония с начальными  $C_0$  концентрациями  $\text{Nb}^{5+} = 100 \text{ мг/дм}^3$  и  $\text{Zr}^{4+} = 1000 \text{ мг/дм}^3$  в соляной кислоте с концентрациями 0.1, 0.5, 1.0 н для определения оптимального содержания кислоты в водном растворе, позволяющего проводить эффективное разделение компонентов. Высота слоя анионита  $h = 15 \text{ см}$ , диаметр трубки  $d = 2.5 \text{ см}$ , скорость пропускания раствора  $L = 3 \text{ см}^3/\text{мин}$ . На рис. 6 в графическом виде представлены выходные кривые поглощения ионов ниобия и циркония при использовании 0.1 н соляной кислоты.

Из графиков на рис. 5 видно, что сорбция ионов ниобия на анионите АВ-17-8 в данных условиях проходит значительно эффективнее, чем ионов циркония. Ионы циркония практически не поглощаются, происходит их мгновенный проскок. Таким образом, наблюдается полное разделение ионов при использовании раствора 0.1 н соляной кислоты. Результаты обработки полученных выходных кривых представлены в таблице.

Далее проводились эксперименты по определению возможности разделения ионов ниобия и циркония на анионите при использовании более концентрированной соляной кислоты. На рис. 6 представлены выходные кривые поглощения катионов ниобия и циркония на АВ-17-8 из 0.5 н соляной кислоты.

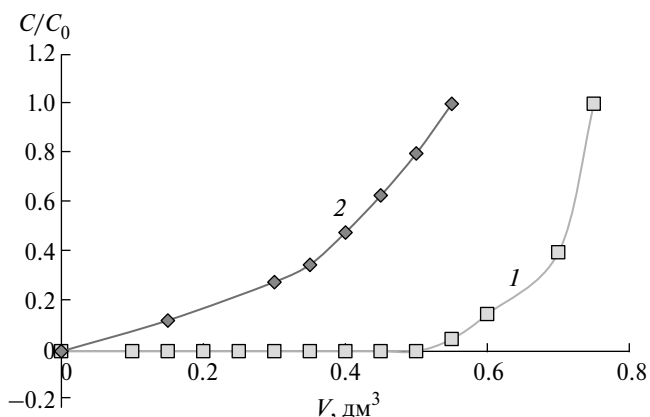


Рис. 5. Выходные кривые сорбции ионов на анионите АВ-17-8, при концентрации соляной кислоты 0.1 н: 1 – ниобия; 2 – циркония.

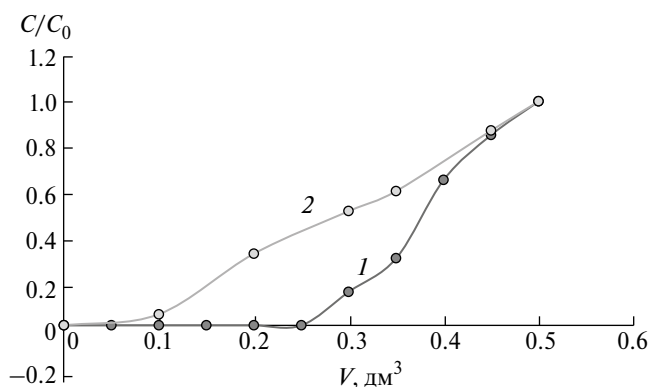


Рис. 6. Выходные кривые сорбции ионов на анионите АВ-17-8 из 0.5 н раствора соляной кислоты: 1 – ниобия; 2 – циркония.

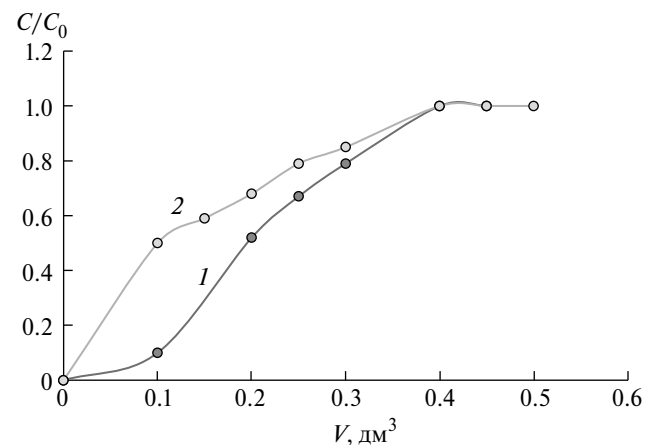


Рис. 7. Выходные кривые сорбции ионов на анионите АВ-17-8 из 1.0 н раствора соляной кислоты: 1 – ниобия; 2 – циркония.

**Таблица.** Параметры поглощения ионов ниобия на ионообменном материале в динамических условиях

Концентрация соляной кислоты, н	$\tau$ , мин	$A_d$ , мг/см <sup>3</sup>	ВЗД, мин	$A_{np}$ , мг/см <sup>3</sup>	$C_{Zr}$ , мг/л	$D$ , %
0.1	233	0.95	166	0.68	95	95
0.5	167	0.48	83	0.34	60	60
1.0	133	0.27	0	0.00	40	40

Из рис. 6 видно, что при использовании растворов с большей концентрацией соляной кислоты разделение ионов ниобия и циркония происходит менее эффективно. Вероятно, образование комплексных соединений ниобия с анионообменником проходит менее эффективно, соответственно, повышение нормальности кислоты приводит к снижению поглотительной емкости анионообменника АВ-17-8 по ионам ниобия. Далее концентрация соляной кислоты была увеличена до 1.0 н. Результаты разделения ионов ниобия и циркония в этом случае представлены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что при повышении концентрации кислоты до 1.0 н ионы ниобия перестают поглощаться на анионите АВ-17-8 и происходит практически мгновенный проскок. При этом значительно падает эффективность разделения смеси ниобия и циркония. Результаты обработки полученных выходных кривых представлены в таблице.

Сводные данные по обработке выходных кривых при различных концентрациях соляной кислоты представлены в таблице.

Полная динамическая емкость ( $A_d$ ) рассчитывалась для времени ( $\tau$ ), соответствующего достижению концентрации  $C_0$  (начальной концентрации) за слоем сорбента, и соответствовала наступлению равновесия в динамических условиях опыта между поглотителем и раствором при начальной концентрации иона в растворе.

Емкость до проскока ( $A_{np}$ ) определялась по времени защитного действия (ВЗД) для заданной проскоковой концентрации, составлявшей в данном эксперименте  $C_{np} = 0.1C_0$ , и объема сорбента  $V$ :

$$A_{np} = \frac{ВЗД \cdot L \cdot C}{V}. \quad (8)$$

Коэффициент разделения ионов ниобия и ионов циркония ( $D$ ) определялся как отношение концентрации ионов циркония к концентрации ионов ниобия на выходе из динамической колонки в момент проскока ионов ниобия:

$$D = \frac{C_{Zr}}{C_{npNb}} \times 100\%, \quad (9)$$

где  $C_{npNb}$  — проскоковая концентрация ионов ниобия, мг/л;  $C_{Zr}$  — концентрация ионов циркония в момент проскока ионов ниобия, мг/л.

Из таблицы видно, что увеличение концентрации кислоты в растворе с 0.1 до 0.5 н приводит к падению полной динамической емкости ( $A_d$ ) по ионам ниобия, а также емкости, определенной в момент проскока ( $A_{np}$ ), на анионите АВ-17-8 на 50%. Дальнейшее увеличение нормальности раствора до 1.0 н снижает полную поглотительную емкость еще на 48%, при этом емкость в момент проскока становится равна нулю. Также в таблице приводятся результаты определения ВЗД, т. е. времени появления проскоковой концентрации ионов ниобия за слоем ионита. Видно, что ВЗД падает с 166 до 83 мин при повышении концентрации с 0.1 до 0.5 н, при концентрации 1.0 н ВЗД равно нулю. Также значительно уменьшается коэффициент разделения ионов ниобия и циркония, с 95 до 40% при повышении концентрации соляной кислоты с 0.1 до 1.0 н.

На основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что оптимальными условиями для проведения процесса разделения смеси ионов ниобий-цирконий, позволяющими практически полностью (на 95%) извлечь ионы ниобия из раствора, является использование 0.1 н раствора соляной кислоты, при исходной концентрации ионов ниобия — 100 мг/дм<sup>3</sup> и исходной концентрации циркония 1000 мг/дм<sup>3</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что использование высокоосновного ионообменного материала АВ-17-8 позволяет с высокой эффективностью селективно извлекать ионы ниобия из раствора, содержащего смесь ионов ниобия и циркония.

Определены оптимальные параметры процесса разделения смеси ионов ниобия и циркония на анионообменном материале АВ-17-8 в динамических условиях. Установлено, что наиболее эффективно проводить разделение из растворов ионов в соляной кислоте с концентрацией 0.1 н, что позволяет извлекать ионы ниобия с коэффициентом

разделения  $D = 95\%$  из растворов с концентрацией ниобия 100 мг/дм<sup>3</sup> и циркония 1000 мг/дм<sup>3</sup>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anttila M., Posiva Oy. Radioactive characteristics of the spent fuel of the Finnish nuclear power plants. Helsinki.: ИЗДАТЕЛЬСТВО, 2005. 2005.
2. Критерии классификации удаляемых радиоактивных отходов (утв. постановлением Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069). С изменениями и дополнениями от: 4 февраля 2015 г.
3. Троянов В. АЭС-2006 // Журнал Росэнергоатом. 2008. № 5. С. 18.
4. Троянов В., Лавренюк П., Молчанов В. Ядерное топливо. Современное состояние и проблемы // Журнал Росэнергоатом. 2008. № 5. С. 22.
5. E.D. Collins, G.D. DelCul, B.B. Spencer, R.R. Brunson, J.A. Johnson, D.S. Terekhov, N.V. Emmanuel. Process Development Studies for Zirconium Recovery/Recycle from Used Nuclear Fuel Cladding // Procedia Chemistry. 2012. V. 7. № 2. P. 72. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2012.10.013>
6. Травников С.С., Трофимов Т.И., Винокуров С.Е. и др. Способ отверждения жидких высокоактивных отходов. Пат. 2522274 РФ. 2014.
7. Николаев А.И., Майоров В.Г. Новые подходы в технологии экстракции ниобия и тантала. // Доклады академии наук. 2007. Т. 415. № 1. С. 67.
8. Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов. Т. 2. М.: Лаборатория знаний, 2021.
9. Спиридонова Е.А., Самонин В.В., Подвязников М.Л., Морозова В.Ю. Получение и исследование модифицированного фуллеренами химического поглотителя аммиака на основе активного угля // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. № 5. С. 683.
10. Самонин В.В., Никонова В.Ю., Подвязников М.Л. Селективность модифицированных фуллеренами активных углей по отношению к смесям катионов цветных металлов в водных растворах // Журнал физической химии. 2008. Т. 82. № 8. С. 1547.
11. Нестеров Ю.В. Иониты и ионообмен. Сорбционная технология при добыче урана и других металлов методами подземного выщелачивания. М.: Атомредметзолото, 2007.
12. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. М.: Мир, 2006.
13. Николаева Л.А. Водоподготовка на тепловых электростанциях. Ионообменные технологии. / Учебное пособие / Челябинск: ЧФ ПЭИПК, 2013.
14. Нестеров Ю.В. Иониты и ионообмен. Москва: Внешторгиздат, 2007.
15. Шишкина Н.Д., Тагиров Б.Р., Бычкова Я.В., Волченкова В.А. Гидролиз и комплексообразование Zr и Hf в водных растворах HClO<sub>4</sub>, HCl и NaOH в равновесии с бадделеитом (Zr, Hf)O<sub>2</sub> (кр.) при 250 °C // Журнал физической химии. 2018. Т. 92. № 11. С. 1710.
16. C. Peiffert, C. Nguyen-Trung, D.A. Palmer, J.P. Laval, E. Giffaut Solubility of B-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and the Hydrolysis of Niobium(V) in Aqueous Solution as a Function of Temperature and Ionic Strength // J. Solution Chem. 2010. V. 39. P. 197.
17. A. Utlarkova, Z. Karshyga, N. Lokhova, A. Yessengazyev, K. Kassymzhanov, A. Mukangaliyeva Studies of Niobium Sorption from Chloride Solutions with the Use of Anion-Exchange Resins // Processes 2023. V. 11. N 4. Paper 1288. <https://doi.org/10.3390/pr11041288>.

## SORPTION SEPARATION OF NIOBIUM-ZIRCONIUM CATIONS MIXTURE

B. V. Samonin<sup>a,\*</sup>, Yu. S. Fedorov<sup>a</sup>, V. Yu. Morozova<sup>a</sup>, M. E. Sikoeva<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint Petersburg, Russia

<sup>b</sup>Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

\*e-mail: samonin@lti-gti.ru

**Abstract.** The work shows for the first time the possibility of using sorption technologies to separate a mixture of radioactive niobium and zirconium cations, which are part of the waste generated in the nuclear fuel cycle. The separation of these atoms will significantly reduce the costs of waste disposal, as well as provide an opportunity to reuse zirconium ions. In this work the process of ion separation using anion exchanger AB-17-8 is investigated in detail, conditions for more effective realization of the process under dynamic conditions are selected and its mechanism is proposed.

**Keywords:** radionuclides, sorption, zirconium, niobium, ion exchange