

ОСОБЕННОСТИ СОРБЦИИ РОДИЯ(III) ИЗ ХЛОРИДНЫХ РАСТВОРОВ НА ИОНИТЕ С ТИОМОЧЕВИННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ГРУППАМИ

© С. А. Егоров, А. А. Блохин, Ю. В. Мурашкин

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26
E-mail: egorovserg-92@yandex.ru

Поступила в Редакцию 10 февраля 2020 г.

После доработки 5 апреля 2020 г.

Принята к публикации 17 апреля 2020 г.

Изучена сорбция родия(III) на комплексообразующих ионитах Purolite S914 с тиомочевинными, Purolite S920 с изотиомочевинными, Purolite S924 с тиольными функциональными группами и Purolite S924/K, содержащем одновременно тиольные и карбоксильные группы (далее S914, S920, S924 и S924/K соответственно) из 4 М растворов хлороводородной кислоты, предварительно выдержанных или при комнатной температуре, или при температуре ~80°C, в присутствии (г·л⁻¹): Fe(III) — 6.0, Al(III) — 4.2, Zn(II) — 5.2, Sn(IV) — 4.1 и Ce(III) — 2.0. Установлено, что по способности к сорбции родия(III) иониты S914 и S920 существенно превосходят иониты S924 и S924/K, а предварительное выдерживание растворов при температуре ~80°C приводит к повышению емкости этих ионитов по родию(III) и возрастанию скорости сорбции родия(III) на ионите S914. Скорость сорбции родия(III) на ионите S914 независимо от способа предварительной подготовки растворов при комнатной температуре низка и заметно возрастает при повышении температуры сорбции до 60°C. Показана возможность глубокого извлечения родия(III) (до 99%) из многокомпонентных хлоридных растворов, предварительно выдержанных при температуре ~80°C, на ионите S914 с тиомочевинными функциональными группами в динамических и статических условиях при 56°C.

Ключевые слова: родий; хлоридные растворы; температурная обработка; сорбция; десорбция; иониты

DOI: 10.31857/S0044461820090078

Одним из наиболее эффективных методов извлечения палладия(II) и платины(II) и (IV) из хлоридных растворов сложного состава является сорбционный метод, основанный на использовании ионитов с тиомочевинными или изотиомочевинными функциональными группами [1–4]. Однако применение таких ионитов не обеспечивает приемлемого извлечения родия(III), остаточная концентрация которого в растворах после сорбции может достигать 10 мг·л⁻¹ и более [3, 4]. По мнению авторов [2, 4, 5], это вызвано существенно более низкой скоростью сорбции родия(III) по сравнению со скоростью сорбции палладия(II) и платины(II) и (IV) на тио- и изотиомочевинных ионитах. Действительно, хорошо известна [6, 7] кинетическая инертность аквахлоридных комплексов родия(III) $[\text{Rh}(\text{H}_2\text{O})_n\text{Cl}_{6-n}]^{n-3}$, в виде которых родий(III) присутствует в реальных хлоридных растворах, при-

чем реакции обмена молекул воды, находящихся во внутренней координационной сфере аквахлоридных комплексов родия(III), на хлорид-ион или иные лиганды протекают с весьма низкой скоростью. При этом координационно-насыщенный гексахлоридный комплекс родия(III) $[\text{RhCl}_6]^{3-}$ существенно более лабилен и, следовательно, реакционноспособен по сравнению с аквахлоридными комплексами [8]. Представлялось, что предварительный перевод основной части родия(III) в гексахлоридную форму позволит повысить полноту его сорбционного извлечения. В работе [9] на основании изучения электронных спектров поглощения родия(III) в растворах хлороводородной кислоты было показано, что повышение температуры приводит к ускорению реакций обмена молекул воды, находящихся во внутренней координационной сфере аквахлоридных комплексов родия(III), на хлорид-ион

и существенному повышению доли родия(III), присутствующего в виде гексахлоридного комплекса. Ранее авторами [10] было установлено, что предварительное выдерживание хлоридных растворов при повышенной температуре позволяет существенно повысить полноту извлечения родия(III) при сорбции его на макропористом слабоосновном анионите на стирольной матрице с первичными, вторичными и третичными аминогруппами. Поскольку для одновременного извлечения палладия(II), платины(II) и родия(III) было бы целесообразно использовать один и тот же сорбент, представлялось полезным оценить, не позволит ли этот прием улучшить показатели сорбционного извлечения родия(III) и при использовании ионитов с тиомочевинными или изотиомочевинными функциональными группами. Кроме того, определенные перспективы могут иметь и иониты с тиольными функциональными группами, которые, например, проявляют высокую избирательность к палладию(II) [11].

Цель работы — исследование сорбции родия(III) из хлоридных растворов, предварительно выдержанных как при комнатной, так и при повышенной температуре, на ионитах, содержащих в качестве функциональных групп тиомочевинные, изотиомочевинные и тиольные группы, и выявление возможности и условий применения этих ионитов для извлечения родия(III) из многокомпонентных хлоридных растворов.

Экспериментальная часть

В работе были исследованы макропористые иониты, синтезированные на стирольной матрице: Purolite S914 с тиомочевинными, Purolite S920 с изотиомочевинными, Purolite S924 с тиольными функциональными группами и Purolite S924/К, содержащий одновременно тиольные и карбоксильные группы, далее обозначенные как S914, S920, S924 и S924/К соответственно. Все иониты предварительно были переведены в протонированную форму обработкой 1 М раствором хлороводородной кислоты с последующей промывкой дистиллированной водой.

Рабочие растворы после приготовления выдерживали при комнатной температуре в течение 14 сут или при температуре $80 \pm 3^\circ\text{C}$ в стеклянной колбе, снабженной обратным холодильником, на колбонагревателе в течение 7 ч [9].

Эксперименты по изучению сорбции и десорбции родия(III) проводили в статических и динамических условиях. Эксперименты в статических условиях проводили по следующей методике: навески ионитов с фиксированной влажностью массой 0.15 г (в пересчете на сухой ионит) помещали в колбы и заливали 15 мл растворов заданного состава, предварительно

выдержанных как при комнатной, так и при повышенной температуре. Навески ионитов в контакте с растворами выдерживали при комнатной температуре ($20\text{--}22^\circ\text{C}$) в течение 14 сут при перемешивании в дневные часы на шейкере Memmert WNB 14. По истечении указанного времени растворы отделяли от ионитов и проводили их анализ на родий(III). По изменению концентрации родия(III) с учетом навески ионита и объема раствора рассчитывали значения массовой емкости ионитов [$\text{г родия(III)/г сухого ионита}$], которые затем с учетом удельного объема ионитов пересчитывали на объемную емкость [$\text{г родия(III)/л набухшего ионита}$].

Кинетику сорбции родия(III) изучали методом ограниченного объема. Использовали ионит S914 фракции 0.63–1.0 мм во влажном (набухшем) состоянии. Сорбцию вели из 4 М раствора HCl с концентрацией родия(III) $0.2 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$. Раствор после приготовления в одном случае был выдержан при комнатной температуре в течение 14 сут, в другом — при температуре $\sim 80^\circ\text{C}$ в течение 7 ч. В стакан вводили исходный раствор объемом 100 мл, стакан с раствором помещали в термостат и выдерживали до достижения заданной температуры. Затем навеску ионита 1 г (в пересчете на сухую массу) помещали в ячейку с отверстиями, конструкция которой приведена в монографии,* укрепленную на оси механической мешалки, и приводили в контакт с раствором, после чего сразу включали мешалку. Скорость вращения мешалки поддерживали равной $300 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$. Через определенные промежутки времени отбирали пробы раствора для анализа на родий(III). Суммарный объем отобранных проб не превышал 5% от общего объема раствора.

Эксперименты по извлечению родия(III) из многокомпонентных хлоридных растворов в статических условиях в двухступенчатом режиме проводили следующим образом: в колбы отбирали по 30 мл растворов, предварительно выдержанных или при комнатной температуре, или при температуре 80°C . Затем в растворы вводили ионит S914 в соотношении масса ионита (г в пересчете на сухой ионит):объем раствора (мл), равном 1:100. Ионит и раствор перемешивали механической мешалкой в колбе в термостате в течение 4 ч (время контакта ионита с раствором на одной ступени) или при температуре 20°C , или при температуре 56°C при той же скорости вращения мешалки, что и при изучении кинетики сорбции. По истечении указанного времени контакта ионит отделяли от раствора и раствор анализировали на родий(III).

* Гельферих Ф. Иониты. Основы ионного обмена. М.: ИЛ, 1962. С. 279–280.

Затем к раствору добавляли навеску свежего ионита и описанные выше операции повторяли.

Эксперименты в динамических условиях проводили в колонке, заполненной 7 мл ионита S914 фракции 0.4–0.63 мм, при соотношении высоты слоя ионита и внутреннего диаметра колонки, равном 7:1. Растворы в колонку подавали по направлению снизу вверх. Скорость пропускания растворов при сорбции и десорбции поддерживали равной $7 \text{ мл} \cdot \text{ч}^{-1}$, или $1 \text{ уд. об.} \cdot \text{ч}^{-1}$ (уд. об. — удельный объем, т. е. объем раствора, отнесенный к объему находящегося в колонке ионита). При осуществлении операции сорбции и десорбции при повышенной температуре колонку помещали в термостат. Пробы раствора отбирали на выходе из колонки и анализировали на родий(III).

Для определения концентрации родия(III) использовали фотоколориметрический метод анализа, основанный на измерении светопоглощения комплекса родия(III) с иодидом олова(II).^{*} При определении родия(III) в тиомочевинных растворах пробы предварительно обрабатывали царской водкой для разложения тиомочевины.

Обсуждение результатов

Для оценки избирательности и емкостных характеристик исследуемых ионитов по отношению к родию(III) и влияния предварительной температурной обработки растворов были изучены зависимости значений емкости ионитов по родию(III) от его концентрации в растворах после контакта с ионитами в течение заданного времени — 14 сут (рис. 1). Исходные модельные растворы имели одинаковый состав по макрокомпоненту — $4 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1} \text{ HCl}$ и сопутствующим компонентам, обычно присутствующим в реальных технологических растворах ($\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$): Fe(III) — 6.0, Al(III) — 4.2, Zn(II) — 5.2, Sn(IV) — 4.1 и Ce(III) — 2.0. Концентрация родия(III) в исходных растворах изменялась от 0.052 до $0.31 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$. В одной серии экспериментов исходные растворы после приготовления предварительно выдерживали при комнатной температуре в течение 14 сут, в другой — при температуре $\sim 80^\circ\text{C}$ в течение 7 ч. Следует отметить, что, как показали предварительные эксперименты, заданного времени контакта ионитов с растворами (14 сут) с избытком хватает для установления равновесия при сорбции из растворов, выдержанных при повышенной температуре, в то время как равновесие при сорбции из растворов, выдержанных при ком-

натной температуре, устанавливается лишь спустя 6 мес. Таким образом, в экспериментах по изучению сорбции родия(III) из растворов, не прошедших активирование путем выдерживания при повышенной температуре, равновесие не было достигнуто. Поэтому оценка влияния температуры, при которой предварительно были выдержаны рабочие растворы, на емкостные характеристики ионитов по родию(III), проведенная на основании данных, представленных на рис. 1, носит достаточно условный характер.

Из всех опробованных ионитов наибольшей селективностью к родию(III) обладают иониты S914 и S920 с тиомочевинными и изотиомочевинными группами соответственно (рис. 1). Предварительная температурная обработка родийсодержащих хлоридных растворов приводит к увеличению емкости ионитов S914 и S920 по родию(III) в 3–7 раз в зависимости от концентрации родия(III) в растворах после контакта с ионитами относительно их емкости, достигаемой при сорбции из растворов, выдержанных при комнатной температуре. Зависимости значений емкости этих ионитов по родию(III) от его концентрации в растворах, прошедших предварительную температурную обработку, которые, с учетом того что при сорбции из таких растворов равновесие было достигнуто, по сути представляют собой изотермы сорбции родия(III), имеют выпуклую форму. Иониты S924 и S924/К, в состав функциональных групп которых входят тиольные группы, родий(III) из данных растворов практически не сорбируют.

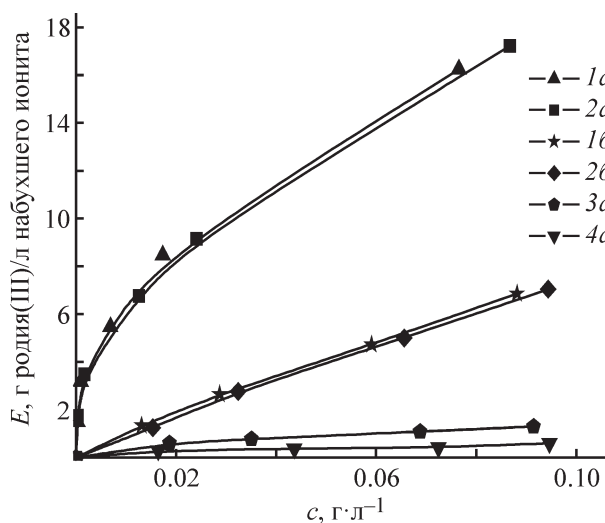


Рис. 1. Зависимости значений емкости ионитов S914 (1а, 1б), S920 (2а, 2б), S924 (3а), S924/К (4а) по родию(III) от его концентрации в растворах после контакта с ионитами в течение 14 сут из хлоридных растворов, предварительно выдержанных при температуре $\sim 80^\circ\text{C}$ в течение 7 ч (1а–4а) и при комнатной температуре в течение 14 сут (1б, 2б).

^{*} Марченко З., Бальцежак М. Методы спектрофотометрии в УФ и видимой областях в неорганическом анализе. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. С. 328–329.

В связи с тем что эффект предварительной температурной обработки может сказываться на скорости сорбции родия(III) на ионитах с тиомочевинными и изотиомочевинными группами, на примере ионита S914 были проведены сравнительные эксперименты по изучению кинетики сорбции родия(III) из 4 М раствора HCl, выдержанного при комнатной температуре и при температуре $\sim 80^\circ\text{C}$ (рис. 2).

Предварительное выдерживание родийсодержащего раствора при повышенной температуре действительно приводит к некоторому возрастанию скорости сорбции родия(III), причем эта тенденция приобретает более выраженный характер по мере увеличения времени контакта ионита с раствором (рис. 2). Кроме того, независимо от способа предварительной подготовки раствора скорость сорбции родия(III) на ионите S914 при комнатной температуре низка и существенно возрастает при повышении температуры до 60°C . В работе [12] показано, что скорость образования тиомочевинных комплексов родия(III) в растворах также низка при комнатной температуре, но заметно увеличивается при повышении температуры. Исходя из этих данных, можно предположить, что столь выраженное влияние температуры на скорость сорбции родия(III) на ионите S914 обусловлено прежде всего особенностями взаимодействия родия(III) с фиксированными в матрице ионита тиомочевинными группами. Действительно, как показано в работе [13], значения эффективной энергии активации процесса сорбции родия(III) на ионите S914 составляют $47.5\text{--}60.4\text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ (в зависимости от того, какая математическая модель использовалась для описания

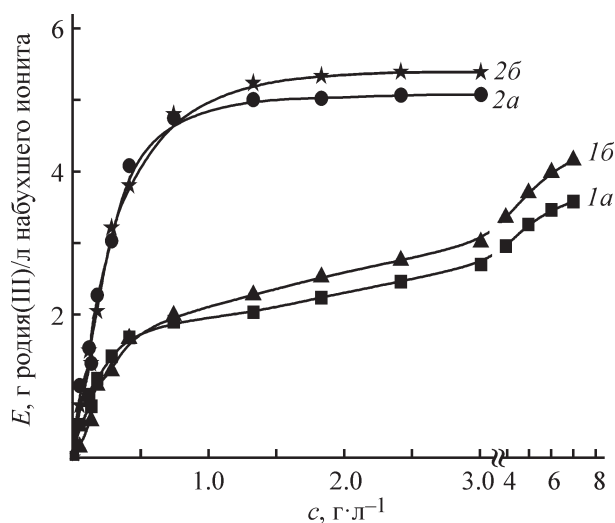


Рис. 2. Зависимости емкости ионита S914 по родию(III) от времени контакта с 4 М раствором HCl при температуре 20°C (1а, 1б) и 60°C (2а, 2б).

Раствор был предварительно выдержан при комнатной температуре (1а, 2а) и при температуре $\sim 80^\circ\text{C}$ (1б, 2б).

кинетики сорбционного процесса), что свидетельствует о существенном вкладе скорости химической реакции в общую скорость этого процесса. Уместно также отметить, что гранулы ионитов S914 и S920 после насыщения последним родием(III) окрашиваются в желтый цвет, характерный для комплексов родия(III) с тиомочевинной [кислые хлоридные растворы родия(III) имеют красный цвет]. Это дает основание полагать, что родий(III) сорбируется ионитами этого типа в основном не по анионообменному механизму, а по механизму комплексообразования с их функциональными группами, т. е. путем замещения хлорид-ионов, содержащихся во внутренней координационной сфере родия(III), на фиксированные тиомочевинные или изотиомочевинные группы.

С целью оценки влияния температуры сорбции и температуры предварительного выдерживания растворов на достигаемое извлечение родия(III) из многокомпонентных хлоридных растворов была изучена сорбция родия(III) на ионите S914 в статических условиях в двухступенчатом режиме при температурах 20 и 56°C . В качестве исходных растворов использовались модельные растворы того же состава по хлороводородной кислоте и сопутствующим компонентам, что и в экспериментах по исследованию зависимостей значений емкости ионитов по родию(III) от его концентрации в растворах, с концентрацией родия(III) в одном случае 0.237 , в другом — $0.210\text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$, один из которых был выдержан при комнатной температуре, другой — при температуре $\sim 80^\circ\text{C}$. К одному и тому же раствору на каждой ступени добавляли навеску свежего ионита. Полученные данные представлены в таблице.

Максимального значения степень извлечения родия(III), равного 99.0% , достигает за две ступени сорбции при температуре 56°C из раствора, предварительно выдержанного при повышенной температуре (см. таблицу). В этих же условиях степень извлечения родия(III) из раствора, выдержанного при комнатной температуре, составляет 91.9% . Таким образом, и при осуществлении сорбции родия(III) при повышенной температуре предварительная температурная обработка растворов дает положительный эффект.

Для более полной оценки влияния температурного режима сорбции на показатели извлечения родия(III) на ионите S914 в завершение работы были проведены эксперименты в динамических условиях (рис. 3). Сорбцию вели из растворов того же состава по сопутствующим компонентам, что и в предыдущем эксперименте. Концентрация родия(III) в первой порции исходного раствора составила 0.20 , во второй — $0.25\text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$. Оба раствора были предварительно выдержаны при температуре 80°C . В первом эксперименте

Сорбция родия(III) на ионите S914 в статических условиях в двухступенчатом режиме

Исходный раствор	Температура сорбции, °С	Число ступеней	$c_{Rh(III)}$, г·л ⁻¹		Суммарная степень извлечения родия, %
			в исходном растворе	в растворе после контакта с ионитом	
Выдержанный при температуре ~80°С	20	1	0.237	0.162	31.6
		2	0.237	0.153	35.4
	56	1	0.210	0.009	95.7
		2	0.210	0.002	99.0
Выдержанный при комнатной температуре	56	1	0.210	0.021	90.0
		2	0.210	0.017	91.9

сорбцию вели при комнатной температуре, во втором — при 56°С. После насыщения родием(III) ионит промыли 2 М раствором HCl. Десорбцию в соответствии с рекомендациями [1, 2, 12] проводили раствором тиомочевины 70 г·л⁻¹ в 0.3 М HCl при температуре 56°С.

При проведении сорбции при температуре 20°С пропуск родия(III) наблюдался уже в первых порциях пропущенного раствора, и концентрация его в растворе на выходе из колонки по мере дальнейшего пропуска раствора резко нарастала, при температуре 56°С концентрация родия(III) в первых 75 уд. об. пропущенного раствора не превысила 6–7 мг·л⁻¹ (рис. 3, а). По мере дальнейшего пропуска раствора концентрация родия(III) в растворе на выходе из колонки постепенно увеличивалась. Явный пропуск родия(III) наступил после пропуска 110 уд. об. раствора. Средняя концентрация родия(III) в первых 110 уд. об. пропущенного раствора составила 8 мг·л⁻¹, что соответствует степени его извлечения ~96%. Насыщение ионита родием(III) не было достигнуто.

Таким образом, при сорбции родия(III) на ионите S914 в динамических условиях при температуре 56°С из многокомпонентных хлоридных растворов, предварительно выдержанных при повышенной температуре, происходит существенное повышение полноты извлечения родия(III) по сравнению с достигаемой при его сорбции из тех же растворов при комнатной температуре.

Десорбция родия(III) была проведена из ионита, насыщенного при сорбции из раствора при температуре 56°С. В процессе десорбции (рис. 3, б) произошло концентрирование родия(III), его концентрация в наиболее богатой фракции элюата составила 2.1 г·л⁻¹, в усредненном элюате — 0.5 г·л⁻¹, что в 10.5 и 2.5 раза соответственно превосходит его концентрацию в растворе, подаваемом на сорбцию. При этом применение подкисленного раствора тиомочевины не обеспечило полную десорбцию родия(III) из ионита с тиомочевинными функциональными группами: степень десорбции родия(III) составила ~48%.

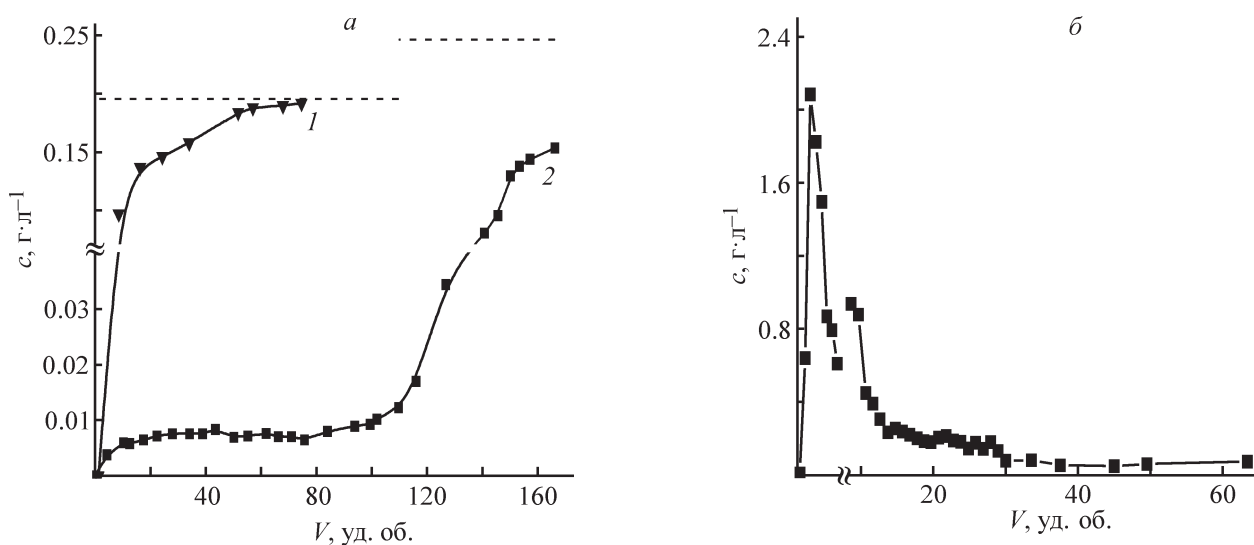


Рис. 3. Выходные кривые сорбции родия(III) на ионите S914 при температуре 20 (1) и 56°С (2) (а) и десорбции родия(III) раствором тиомочевины 70 г·л⁻¹ в 0.3 М HCl из ионита, насыщенного родием(III) при температуре 56°С (б) (при проведении десорбции после пропуска первых 8 уд. об. раствора эксперимент был прерван на 14 ч).

Выводы

Выявлена способность ионитов S914 с тиомочевинными и S920 с изотиомочевинными функциональными группами к избирательной сорбции родия(III) из 4 М растворов хлороводородной кислоты, содержащих Fe(III), Al(III), Zn(II), Sn(IV) и Ce(III) в концентрациях, более чем на порядок превосходящих концентрацию родия(III). Показано, что предварительное выдерживание родийсодержащих растворов при повышенной температуре (~80°C) способствует повышению емкости этих ионитов по родию(III) и ускорению его сорбции на ионите S914. Установлено, что в связи с низкой скоростью сорбции родия(III) на ионите S914 при комнатной температуре и существенном ее ускорении при повышении температуры до 60°C сорбционное извлечение родия(III) с помощью этого ионита следует проводить при повышенной температуре. Показано, что предварительное активирование родия(III) путем выдерживания растворов при температуре ~80°C и последующее проведение его сорбции при повышенной температуре (56°C) позволяет заметно повысить полноту извлечения родия(III) при сорбции на ионите S914 как в статических, так и динамических условиях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Егоров Сергей Александрович,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0032-3569>

Блохин Александр Андреевич, д.т.н., проф.,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4461-1087>

Мурашкин Юрий Васильевич, к.х.н., доцент,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8623-2483>

Список литературы

- [1] *Warszawsky A.* Integrated ion exchange and liquid-liquid extraction process for the separation of platinum group metals (PGM) // *Separation and Purification Methods*. 1982. V. 11. N 2. P. 95–130. <https://doi.org/10.1080/03602548208068391>
- [2] *Warszawsky A., Fieberg M., Mihalik P., Murphy T. G., B Y.* The separation of platinum group metals (PGM) in chloride media by isothionium resins // *Sep. Purif. Meth.* 1980. V. 9. N 2. P. 209–265. <https://doi.org/10.1080/03602548008066001>
- [3] *Блохин А. А., Гельман Г. Е., Клеандров В. Т., Мурашкин Ю. В.* Сорбционное извлечение платиновых металлов из отработанного электролита процесса электрорафинирования золота // *Драгоценные камни. Драгоценные металлы*. 2008. № 11. С. 170–173.
- [4] *Nikoloski A. N., Ang K-L., Li D.* Recovery of platinum, palladium and rhodium from acidic chloride leach solution using ion exchange resins // *Hydrometallurgy*. 2015. V. 152. P. 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.12.006>
- [5] *Борбам В. Ф., Яроцик И. С., Шиндлер А. А.* Термодинамика и кинетика сорбции родия(III) из солянокислых растворов хелатными смолами // *Вестн. Омск. ун-та*. 2010. № 4. С. 101–104.
- [6] *Benguereel E., Demopoulos G., Harris G. O. B.* Speciation and separation of rhodium(III) from chloride solutions: A critical review // *Hydrometallurgy*. 1996. V. 40. N 1–2. P. 135–152. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(94\)00086-1](https://doi.org/10.1016/0304-386X(94)00086-1)
- [7] *Буслаева Т. М., Симанова С. А.* Состояние платиновых металлов в солянокислых и хлоридных водных растворах. Палладий, платина, родий, иридий // *Координац. химия*. 1999. Т. 25. № 3. С. 165–176.
- [8] *Nikoloski A. N., Ang K-L.* Review of the application of ion exchange resins for the recovery of platinum-group metals from hydrochloric acid solutions // *Mineral Process. Extr. Metall. Rev.* 2014. V. 35. N 6. P. 369–389. <https://doi.org/10.1080/08827508.2013.764875>
- [9] *Егоров С. А., Блохин А. А., Мурашкин Ю. В.* Влияние температурной и ультразвуковой обработки на состояние родия(III) в солянокислых растворах // V Междунар. конф. по химии и хим. технологии: Сб. материалов. Ереван, 2017. С. 304–306.
- [10] *Tatarnikov A. V., Sokolskaya I., Shneerson Ya. M., Lapin A. Yu., Goncharov P. M.* Treatment of platinum flotation products // *Platinum Metals Rev.* 2004. V. 48. N 3. P. 125–132. <https://doi.org/10.1595/147106704x1667>
- [11] *Hubicki Z., Wolowicz A.* A comparative study of chelating and cationic ion exchange resins for the removal of palladium(II) complexes from acidic chloride media // *J. Hazard. Mater.* 2009. V. 164. N 2–3. P. 1414–1419. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.053>
- [12] *Блохин А. А., Молошинева О. В., Мурашкин Ю. В., Воронина С. Н.* Кинетика десорбции родия из комплексообразующего ионита с тиомочевинными функциональными группами раствором тиомочевинны // *Сорбцион. и хроматогр. процессы*. 2011. Т. 11. № 4. С. 467–472.
- [13] *Егоров С. А., Куразова В. А., Блохин А. А., Мурашкин Ю. В.* Кинетика сорбции родия(III) из хлоридных растворов на ионите с тиомочевинными функциональными группами // *Изв. СПбГТИ (ТУ)*. 2019. № 49 (75). С. 3–8.