

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ ПРОЦЕССОВ
РАЗДЕЛЕНИЯ. ХРОМАТОГРАФИЯ

УДК 544.726.3

ИОНООБМЕННАЯ СОРБЦИЯ ПАЛЛАДИЯ (II) В ПРИСУТСТВИИ
СЕРЕБРА (I) ИЗ СОЛЯНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ

© 2018 г. О. Н. Кононова^{а,*}, Е. В. Дуба^а, Д. В. Медовиков^а, А. С. Крылов^б

^а Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и материаловедения,
Красноярск, 660041 Россия

^б Российская академия наук, Сибирское отделение, Институт физики им. Л.В. Киренского, Красноярск, Россия
*e-mail: cm2@bk.ru

Поступила в редакцию 12.10.2017 г.

Исследовано сорбционное извлечение хлоридных комплексов палладия (II) в присутствии хлорокомплексов серебра (I) из 2 и 4 М водных растворов HCl на ряде анионитов марки Purolite с различными функциональными группами. Установлен анионообменный механизм сорбции по данным раман-спектроскопии. Выявлены кинетические свойства исследуемых ионитов, позволяющие осуществить элюирование палладия (II) и серебра (I) после их извлечения в динамическом режиме.

Ключевые слова: палладий, серебро, солянокислые растворы, сорбция

DOI: 10.1134/S0044453718100138

В связи с ежегодным ростом объемов переработки бедных или упорных руд, содержащих благородные металлы, возникает потребность в активном использовании вторичных сырьевых источников: отработанных катализаторов (автомобильных и химических производств), радиоэлектронного и конденсаторного лома, а также техногенных отходов [1–3]. В таком сырье палладий и серебро присутствуют совместно и содержатся в малых количествах, поэтому для их эффективного извлечения применяют сорбционные методы, характеризующиеся избирательностью, простотой и экологической безопасностью [1, 2, 4].

Как правило, промышленные растворы благородных металлов представляют собой хлоридные комплексы, различающиеся по составу и химической инертности [1, 2, 4–7]. Следует также отметить, что эти растворы являются многокомпонентными, т.е. наряду с комплексами благородных металлов содержат ионы железа (III) и ряда цветных металлов (никеля, кобальта, меди, цинка). Сопутствующие ионы присутствуют в количествах, значительно превышающих таковые благородных металлов, а сами промышленные растворы отличаются сложностью состава и разнообразием степеней окисления и форм нахождения компонентов [1, 2, 6, 7].

Поскольку сорбционные методы позволяют извлекать ценные компоненты даже в следовых количествах и в присутствии ряда сопутствующих элементов, становится понятным интерес к ним многих исследователей. При этом особое внима-

ние рядом авторов уделяется селективным ионитам комплексообразующего типа [5, 8–13]. Однако остается актуальным и использование сильноосновных анионитов для концентрирования благородных металлов [11, 14–16].

Следует отметить, что как ионное состояние палладия в хлоридных и солянокислых растворах, так и его сорбционное извлечение из этих растворов, рассмотрены весьма детально [1, 2, 4–6, 8–19]. Однако отсутствуют литературные данные по сорбционному извлечению палладия в присутствии хлоридных комплексов серебра, а также по сорбции этих комплексов, хотя их образование и термодинамические свойства изучены сравнительно давно [20, 21]. Ранее [22] нами исследована сорбция хлоридных комплексов серебра из солянокислых сред на анионитах различного типа (сильно- и слабоосновных, а также комплексообразующего типа) и был установлен аномальный характер ионообменных равновесий в изучаемых системах. Данная работа посвящена исследованию ионообменного извлечения хлоридных комплексов палладия (II) и серебра (I) при их совместном присутствии в растворах соляной кислоты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Были выбраны иониты с разными функциональными группами, синтезированные компанией Purolite Ltd. Их физико-химические характеристики представлены в табл. 1. Перед работой иониты были подготовлены согласно общепри-

Таблица 1. Физико-химические характеристики изучаемых ионитов на основе стирола (Ст) и дивинилбензола (ДВБ)

Ионит	Тип	Структура	ФГ	ОЕ, ммоль/г	H, %	α, %
Purolite A 500	сильноосновный анионит типа I	МП	ЧАО, I тип	1.2	57–63	20
Purolite A 300	сильноосновный анионит типа II	Г	ЧАО, II тип	1.4	40–45	10
Purogold™ S 992	комплексобразующий анионит	МП	СА	4.4	47–55	–
Purolite S 985	комплексобразующий анионит на основе ПА–ДВБ	МП	ПАГ	2.3	52–57	20
Purolite A 110	слабоосновный анионит	МП	первичные АГ	2.0	60–66	50
Purogold™ A 193	анионит смешанного типа	МП	ЧАО, I тип; ТАГ	3.8	46–56	22

Обозначения: ФГ – функциональные группы; ОЕ – обменная емкость по хлорид-иону; H – гигроскопичность; α – набухаемость; МП – макропористый; Г – гелевый; ЧАО – четвертичное аммониевое основание; СА – смешанные амины; ПА – полиакрилат; ПАГ – полиаминные группы; АГ – аминокруппы; ТАГ – третичные аминокруппы

нятым методикам и переведены в хлоридную форму. Исходный раствор палладия (II) с концентрацией 5.55 ммоль/л готовили растворением точной навески $\text{PdCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (“ч.д.а.”) в небольшом объеме концентрированной HCl и последующим доведением раствора в мерной колбе на 50 мл до метки дистиллированной водой [17, 18]. Использовали растворы палладия (II) с концентрациями 0.025 и 0.25 ммоль/л в 2 и 4 М HCl.

Исходные растворы хлоридных комплексов серебра (I) готовили путем растворения точных навесок AgNO_3 (“ч.д.а.”) в 2 или 4 М HCl. После растворения проверяли полноту образования комплексов в отдельной небольшой порции раствора путем реакции с гидроортофосфатом калия (в случае неполноты образования комплекса наблюдается желтое окрашивание) [23]. Концентрацию серебра в исследуемых исходных растворах (7.1 ммоль/л) определяли методом потенциометрического титрования с индикаторным серебряным электродом и хлоридсеребряным электродом сравнения [24]. Использовали растворы хлоридных комплексов с концентрацией по серебру 0.90–1.0 ммоль/л.

Выбор концентраций палладия и серебра сделан нами на основании приближения условий эксперимента к производственным при извлечении благородных металлов из первичных и вторичных источников. В этих условиях исходные концентрации палладия минимальны по сравнению с концентрациями серебра и других конкурирующих ионов [1, 2].

Концентрацию Pd (II) и Ag (I) в контактирующих солянокислых растворах определяли по спектрофотометрическим методикам соответственно с нитрозо-R-солью и бромпирагаллоловым красным [17, 18, 24]. Использовали свежеприготовленные растворы благородных металлов, ионное состояние которых контролировали

путем снятия спектров поглощения в интервале длин волн 190–700 нм на спектрофотометре “Specol 1300” (Carl Zeiss, Jena-Analytic).

Сорбцию ионов Pd (II) и Ag (I) из 2 и 4 М растворов HCl проводили в статических условиях при соотношении твердой и жидкой фаз 1:100 (навески ионитов составляли 0.1–0.2 г, объем контактирующего раствора – 10.0–20.0 мл) и температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Время установления равновесия составляло 24 ч (определено специальным экспериментом).

Сорбционную способность изучаемых ионитов оценивали посредством обменной емкости (ОЕ), степени извлечения палладия или серебра (R , %), коэффициентов распределения (D) и коэффициентов разделения (S):

$$S = D_{\text{Pd}}/D_{\text{Ag}}, \quad (1)$$

где D_{Pd} и D_{Ag} – соответственно коэффициенты распределения при сорбции палладия (II) и серебра (I).

Изотермы сорбции строили методом вариации молярных отношений ионитов к количеству ионов Pd (II) и Ag (I) в контактирующем растворе [25, 26]. На основании полученных изотерм рассчитывали коэффициенты равновесия (\tilde{K}) согласно закону действующих масс [27, 28]. В соответствии с этим законом, анионообменное равновесие можно записать в следующем виде:



Тогда коэффициент этого равновесия принимает вид:

$$\tilde{K} = \frac{\bar{C}_{\text{B}}^{z_{\text{A}}} C_{\text{A}}^{z_{\text{B}}}}{C_{\text{A}}^{z_{\text{B}}} \bar{C}_{\text{B}}^{z_{\text{A}}}}, \quad (3)$$

где C_A и C_B – молярные концентрации ионов в растворе; \bar{C}_A и \bar{C}_B – те же величины в ионите; z_A и z_B – заряды ионов.

Раман-спектры исследуемых ионитов снимали на раман-фурье-спектрометре RFS 100/S Bruker. Спектры получали в результате 300 сканирований в интервале $100\text{--}3500\text{ см}^{-1}$. Кинетические свойства ионитов исследовали методом “ограниченного объема” [25, 26, 29]. По результатам рассчитывали кинетические параметры (среднюю скорость процесса, время полуобмена и коэффициенты диффузии).

Кроме статических условий, изучали совместную сорбцию хлоридных комплексов Pd (II) и Ag (I), а затем их элюирование в динамическом режиме в стеклянных колонках диаметром $\sim 1\text{ см}$. Предварительно набухшие в 4 М HCl иониты помещали в колонку на высоту слоя 1.5 см, после чего пропускали 100.0 мл растворов палладия и серебра со скоростью 1 мл/мин. Высоту слоя и скорость пропускания раствора выбирали на основании специальных экспериментов. Вытекающий фильтрат собирали порциями по 5.0–10.0 мл, в каждой из которых определяли содержание ионов благородных металлов.

После насыщения ионитов сорбируемыми ионами проводили элюирование ионов палладия солянокислым раствором тиомочевина (80 г/л в 0.5 М HCl), а серебра – 1%-ным раствором аммиака. Элюаты собирали фракциями по 10.0 мл, в каждой из которых определяли концентрации извлекаемых ионов спектрофотометрическим методом: палладия в тиомочевинном растворе – по собственной окраске комплексов при длине волны 331 нм [30], а серебра – с рубановодородной кислотой [24, 30].

Все полученные результаты подвергали статистической обработке. Средняя ошибка для трех параллельных измерений не превышала 6%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как указывалось выше, комплексообразование палладия в хлоридных и солянокислых средах подробно изучено в работах [1, 17–19]. Так, в растворах с концентрацией HCl ≥ 1 моль/л доминируют комплексы $[\text{PdCl}_4]^{2-}$, которые весьма устойчивы. Их общая константа устойчивости оценивается равной $\lg\beta_4 = 11.12 - 12.24$ [1, 17]. Что же касается комплексов серебра, то согласно данным [20, 21, 31, 32], в исследуемых нами 2 и 4 М растворах HCl наиболее вероятно присутствие серебра в форме $[\text{AgCl}_2]^-$. В спектрах поглощения исходных солянокислых растворов Pd (II) и Ag (I) максимумы поглощения соответствуют приведенным комплексным формам, т.е. согласуются с литературными данными.

Предварительно исследовали сорбционные свойства изучаемых ионитов при извлечении Pd (II) и Ag (I) из индивидуальных солянокислых растворов. Выявили, что степени извлечения палладия (II) из 2 и 4 М HCl варьируются от 81 до 99%, а для серебра (I) в тех же условиях – от 57 до 99%. При этом для большинства ионитов изменение кислотности среды практически не влияет на результат сорбции. Поэтому представляло интерес исследование извлечения благородных металлов при их совместном присутствии в солянокислых растворах. Результаты приведены в табл. 2.

Как видно из представленных данных, степень извлечения палладия (II) в присутствии серебра (I) на большинстве исследуемых ионитов зависит от кислотности среды (увеличивается с уменьшением концентрации HCl). Особенно резко такие различия проявляются у комплексообразующих анионитов Purolite S 985 и Purolite™ S 992, а также у сильноосновного анионита II типа Purolite A 300. Для прочих сорбентов зависимость от концентрации HCl не столь выражена. Такое поведение ионитов можно объяснить снижением конкурирующего влияния хлорид-ионов в 2 М HCl по сравнению с 4 М раствором. Что касается сорбционного концентрирования хлоридных комплексов серебра (I) в присутствии палладия (II), то их степени извлечения остаются в целом на том же уровне, что и при сорбции из индивидуальных растворов, хотя более выражено влияние кислотности контактирующих растворов. Следует отметить, что взаимное влияние хлоридных комплексов Pd (II) и Ag (I) проявляется в снижении сорбционных параметров при извлечении палладия (II) из 4 М растворов HCl.

В табл. 2 приведены рассчитанные нами коэффициенты разделения палладия и серебра при их совместной сорбции, значения которых также подтверждают более высокую сорбционную способность исследуемых ионитов к хлоридным комплексам серебра (I) в среде 4 М HCl ($S < 1$). По-видимому, это можно объяснить как конкурирующим влиянием хлорид-ионов, так и аномальной сорбцией хлоридных комплексов серебра (I), выявленной нами в [22]. При уменьшении концентрации HCl до 2 моль/л для большинства изучаемых анионитов их сорбционная способность к хлоридным комплексам палладия возрастает, что выражается в увеличении коэффициентов распределения.

Далее были получены изотермы сорбции хлорокомплексов палладия (II) в присутствии серебра (I) на исследуемых ионитах. На рис. 1 эти кривые представлены для анионитов смешанного типа Purolite™ A 193 и сильноосновного Purolite A 500. Известно [25, 26, 29], что по виду изотерм сорбции для бинарных систем можно судить о селективности ионитов: если ионообменник погло-

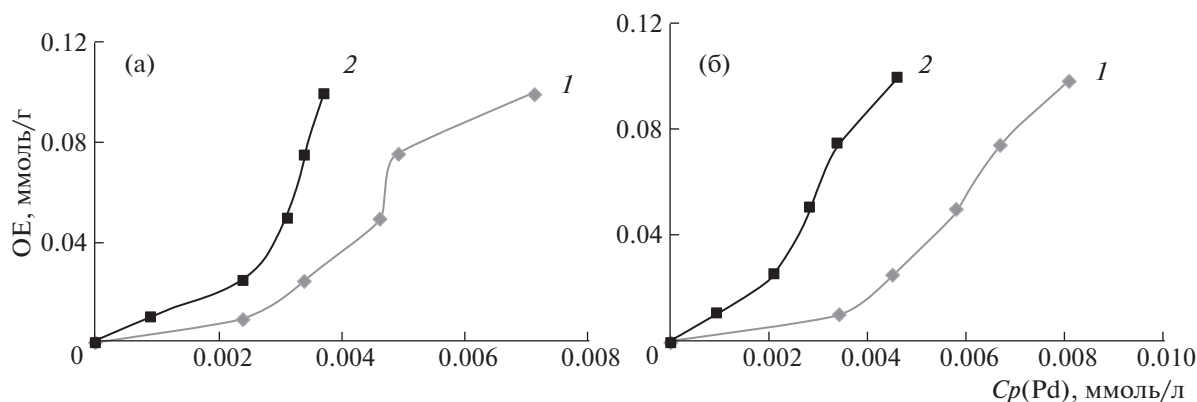
Таблица 2. Сорбционное извлечение палладия (II) и серебра (I) при совместном присутствии из солянокислых сред ($C_0(\text{Pd}) = 0.025$ ммоль/л; $C_0(\text{Ag}) = 0.90$ и 0.95 ммоль/л соответственно в 2 и 4 М HCl)

Ионит	$C_0(\text{HCl})$, моль/л	Pd (II)		Ag (I)		S
		$\lg D$	R , %	$\lg D$	R , %	
Purolite A 500	4	1.23 ± 0.074	63 ± 4	1.36 ± 0.082	70 ± 4	0.74
	2	1.20 ± 0.072	61 ± 4	1.66 ± 0.099	82 ± 5	0.35
Purolite A 300	4	0.85 ± 0.051	40 ± 2	1.11 ± 0.067	56 ± 3	0.50
	2	2.42 ± 0.15	96 ± 4	1.38 ± 0.082	71 ± 4	11
Purogold™ S 992	4	0.78 ± 0.047	39 ± 2	1.36 ± 0.082	70 ± 4	0.31
	2	2.18 ± 0.11	94 ± 5	1.11 ± 0.067	56 ± 4	12
Purolite S 985	4	0.70 ± 0.042	33 ± 2	1.51 ± 0.091	76 ± 5	0.20
	2	2.29 ± 0.12	95 ± 5	2.03 ± 0.12	91 ± 6	1.8
Purolite A 110	4	1.11 ± 0.067	56 ± 4	1.18 ± 0.071	60 ± 4	0.87
	2	1.18 ± 0.071	60 ± 4	1.11 ± 0.067	56 ± 3	1.2
Purogold™ A 193	4	0.90 ± 0.054	44 ± 3	1.34 ± 0.081	69 ± 4	0.36
	2	1.20 ± 0.072	61 ± 4	1.53 ± 0.092	77 ± 5	0.47

щает предпочтительно ионы контактирующего раствора, то кривые имеют выпуклый вид, в отличие от вогнутых изотерм в случае селективности к иону, находящемуся первоначально в фазе ионита. При равной селективности наблюдаются линейные изотермы. В нашем случае исследуемая система включает как комплексные хлориды палладия и серебра, так и хлорид-ионы. Так как концентрация последних намного превышает концентрации комплексов благородных металлов, то в начале сорбционного процесса система выглядит так, как если бы в ней находились только эти ионы, чему соответствует линейная область представленных на рис. 2 изотерм [25]. Однако по мере дальнейшего протекания процесса присутствие других ионов, несомненно, оказывает влияние на равновесие обмена хлоридных комплексов палладия (II). Такое влияние может

выражаться рядом факторов, таких как изменение доннановского потенциала и давления набухания, непосредственное влияние участников ионного обмена, проявление разной степени диссоциации полифункциональных ионитов, электроселективность [25, 33], что приводит к виду изотерм сорбции, отличающихся от их вида в бинарных системах. Следует отметить, что исследование ионообменных равновесий в многокомпонентных системах представляет собой все еще малоизученную область.

На основании полученных изотерм сорбции нами рассчитаны коэффициенты равновесия, представленные в табл. 3. Из этих данных видно, что изучаемые иониты проявляют различную степень сродства к палладию (II). Известно, что для бинарных систем селективность ионитов к извлекаемым ионам выражается в том, что значения

**Рис. 1.** Изотермы сорбции хлоридных комплексов палладия (II) в присутствии хлоридных комплексов серебра (I) на анионитах Purogold™ A 193 (а) и Purolite A 500 (б) при концентрации HCl 2 (1) и 4 моль/л (2).

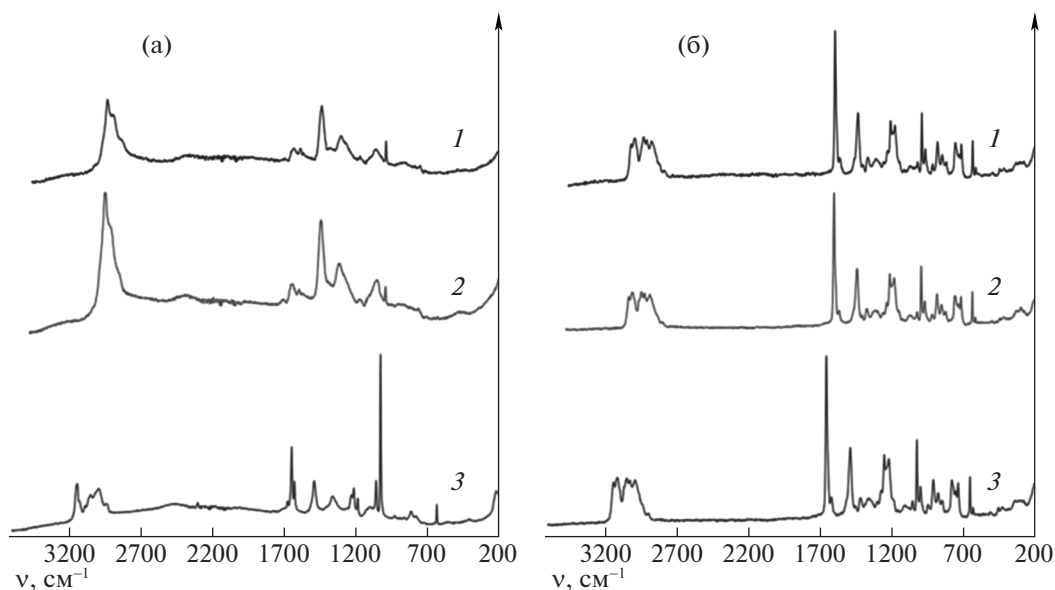


Рис. 2. Фрагменты раман-спектров анионитов Purolite S 985 (а) и Purolite A 500 (б): 1 – в исходной Cl^- -форме; 2 – насыщенные раствором Pd (II); 3 – насыщенные раствором Ag (I); $C_0(\text{HCl}) = 4$ моль/л; $C_0(\text{Pd}) = 0.25$ ммоль/л; $C_0(\text{Ag}) = 0.95$ ммоль/л.

коэффициентов равновесия меньше единицы [25, 33]. Рассчитанные нами значения \tilde{K} для исследуемых ионитов при извлечении Pd (II) из индивидуальных растворов составляют 0.37–0.68 для 2 М HCl и 0.13–0.94 для 4 М HCl. Как видно из табл. 3, значения коэффициентов равновесия в тройной системе сильно отличаются от таковых для бинарной системы. Однако, так как концентрации конкурирующих хлорид-ионов и хлорокомплексов серебра (I) намного превышают концентрацию палладия (II), то иониты все-таки проявляют сродство к палладию, о чем можно судить по данным табл. 2.

Далее методом раман-спектроскопии исследовали механизм ионообменных процессов, протекающих при сорбции хлоридных комплексов Pd (II) и Ag (I). Раман-спектры представлены на рис. 2 для сильноосновного анионита Purolite A 500 и комплексообразующего сорбента Purolite S 985. В рамановских спектрах анионита Purolite A 500 появившиеся полоса в области 275–303 cm^{-1} (рис. 2а, спектр 2) и пик при 268 cm^{-1} (спектр 3), (ср. со спектром ионита в исходной форме –

спектр 1), соответствуют колебаниям связей Me–Cl хлоридных комплексов Pd (II) и Ag (I) в фазе сорбента, что указывает на анионный обмен между противоионами анионита и хлорокомплексами благородных металлов [34, 35].

Аналогичные изменения обнаружены и в раман-спектрах анионита Purolite S 985 (рис. 2б). Следует, однако, заметить, что при сравнении спектра ионита, насыщенного хлоридными комплексами серебра (рис. 2б, спектр 3), со спектром исходного образца (спектр 1), наблюдаются изменения интенсивностей пиков и появление новых полос в областях 900–1000, 2845–2870, 2900–2915, 2860–2885 и 2950–2975 cm^{-1} , характеризующие изменения алкильных групп полимерной цепи [36]. Это указывает на то, что матрица ионита Purolite S 985 претерпевает деформацию вследствие аномальной сорбции хлоридных комплексов серебра [22].

Итак, в изучаемых системах сорбционное извлечение хлоридных комплексов Pd (II) и Ag (I) протекает по анионообменному механизму:

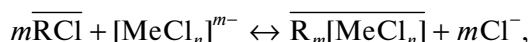
Таблица 3. Коэффициенты равновесия (\tilde{K}) при сорбционном извлечении палладия (II) в присутствии серебра (I) из солянокислых сред

Ионит	2 М HCl	4 М HCl	Ионит	2 М HCl	4 М HCl
Purolite A 500	16 ± 1	21 ± 1	Purolite S 985	8.4 ± 0.5	7.8 ± 0.4
Purolite A 300	14 ± 1	17 ± 1	Purolite A 110	6.2 ± 0.4	16 ± 1
Purogold™ S 992	14 ± 1	5.1 ± 0.3	Purogold™ A 193	5.4 ± 0.3	7.8 ± 0.4

Таблица 4. Кинетические характеристики изучаемых анионитов при сорбции палладия (II) в присутствии серебра (I) в солянокислых средах ($C_0(\text{Pd}) = 0.025$ ммоль/л; $C_0(\text{Ag}) = 0.90$ и 0.95 ммоль/л соответственно в 2 и 4 М HCl)

Ионит	2 М HCl			4 М HCl		
	$D_S \times 10^6$, см ² /с	$t_{1/2}$, с	$\bar{v} \times 10^5$, ммоль/(г с)	$D_S \times 10^6$, см ² /с	$t_{1/2}$, с	$\bar{v} \times 10^5$, ммоль/(г с)
Purolite A 500	2.3	7.0	17.3	2.4	6.6	17.7
Purolite A 300	3.8	6.0	17.7	1.6	14.3	7.9
Purogold™ S 992	51	5.4	18.0	33	8.5	4.3
Purolite S 985	2.9	5.4	17.3	1.8	8.6	13.7
Purogold™ A 193	42	6.6	18.6	40	7.0	16.4

Обозначения: D_S – коэффициент внутренней (гелевой) диффузии; $t_{1/2}$ – время полуобмена; \bar{v} – средняя скорость процесса.



где Me = Pd; Ag; $n = 4$ (для Pd) и 2 (для Ag); $m = 2$ (для Pd) и 1 (для Ag).

Нами исследованы также кинетические свойства изучаемых анионитов. Предварительно методом прерывания установлен внутридиффузионный тип кинетики согласно классической модели Бойда [25, 26, 29], после чего рассчитаны кинетические параметры, представленные в табл. 4. Из этих данных видно, что иониты обладают отличными кинетическими свойствами по отношению к палладию (II) даже в присутствии конкурирующих хлорид-ионов и хлорокомплексов серебра (I).

Поскольку в производственных условиях сорбционные процессы осуществляют в основном в динамических условиях, представляет интерес исследовать сорбционные свойства анионитов в динамическом режиме. Для этой цели выбраны сильноосновный анионит Purolite A 500 и

сорбент комплексообразующего типа Purolite S 985 ввиду их наилучших кинетических свойств (табл. 4). Для динамической сорбции выбрана концентрация HCl 4 моль/л, чтобы максимально приблизить условия эксперимента к производственным.

Выходные кривые на примере анионита Purolite A 500 приведены на рис. 3, из которого видно, что в динамическом режиме на сорбционное концентрирование хлоридных комплексов палладия (II) практически не оказывает влияния присутствие хлоридных комплексов серебра (I). Аналогичный вид выходные кривые имеют и для анионита Purolite S 985, т.е. не зависят от типа функциональных групп сорбентов. Это, вероятно, связано со значительным конкурирующим влиянием хлорид-ионов. Степени извлечения хлоридных комплексов палладия (II) за цикл сорбции в динамических условиях составляют 69 и 82% для анионитов Purolite A 500 и Purolite S 985 соответственно, что существенно превышает данные, полученные в статических условиях (табл. 2).

Известно [36], что чем более селективен ионит к извлекаемым ионам, тем сложнее осуществить десорбцию этих ионов из данного ионита. Это правило нашло подтверждение в полученных нами данных по элюированию благородных металлов. Так, десорбция серебра происходит на уровне 95 и 99% для Purolite S 985 и Purolite A 500 соответственно, в то время как палладий удается извлечь на уровне 73 и 31% соответственно для тех же ионитов. Однако, несмотря на, казалось бы, низкую степень десорбции палладия из анионита Purolite A 500, эту степень извлечения можно считать приемлемой для одного цикла сорбции – десорбции. По-видимому, для применения указанного сорбента в производственных условиях будет необходимо осуществить несколько таких циклов, что будет предметом специального исследования.

Таким образом, на основании полученных результатов анионит комплексообразующего типа

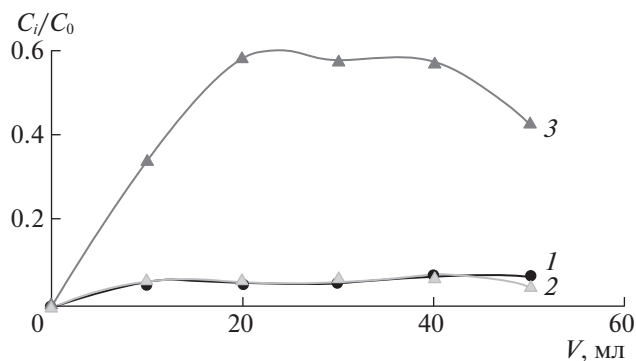


Рис. 3. Фрагменты выходных кривых при сорбции хлоридных комплексов благородных металлов на анионите Purolite A 500 из растворов с концентрацией HCl 4 моль/л: 1 – сорбция Pd (II) из индивидуальных растворов, 2 – сорбция Pd (II) в присутствии Ag (I), 3 – сорбция Ag (I) в присутствии Pd (II); $C_0(\text{Pd}) = 0.025$ ммоль/л; $C_0(\text{Ag}) = 0.95$ ммоль/л.

Purolite S 985 можно рекомендовать для использования в технологических схемах при совместном извлечении Pd (II) и Ag (I) из солянокислых растворов.

Авторы выражают глубокую благодарность Московскому представительству компании Purolite Ltd. и лично М.А. Михайленко за любезно предоставленные для исследования образцы ионитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотов Ю.А., Варшал Г.М., Иванов В.М. Аналитическая химия металлов платиновой группы. М.: Едиториал УРСС, 2003. 592 с.
2. Котляр Ю.А., Меретуков М.А., Стрижко Л.С. Металлургия благородных металлов. М.: Руда и Металлы, 2005. 432 с.
3. Минеральное сырье: от недр до рынка. Благородные металлы и алмазы. Золото, серебро, платиноиды и алмазы / Под ред. А.П. Ставского. М.: Научный мир, 2011. 400 с.
4. Nikoloski A.N., Ang K.L. // Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 2014. V. 35. P. 363.
5. Nikoloski A.N., Ang K.L. // Hydrometallurgy. 2015. V. 159. P. 20.
6. Rao C.R.M., Reddy C.S. // Trends in Anal. Chem. 2000. V. 19. P. 565.
7. Baharat M.A., Mahmoud M.H.H. // Hydrometallurgy. 2004. V. 72. P. 179.
8. Filcenca-Olteanu A., Dobre T., Radulescu R. et al. // Chem. Bull. "POLITEHNICA" Univ. (Timisoara). 2010. V. 55. P. 64.
9. Vlasankova R., Sommer L. // Chem. Papers. 1999. V. 53. P. 200.
10. Paiva A.P., Martins M.E., Ortet O. // Metals. 2015. V. 5. P. 2303.
11. Hubicki Z., Wawrzkiwicz M., Wolowicz A. // Chem. Anal. (Warsaw). 2008. V. 53. P. 759.
12. Симанова С.А., Бурмистрова Н.М., Афонин М.В. // Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. общ-ва им. Д.И. Менделеева). 2006. Т. 50. С. 19.
13. Адеева Л.Н., Миронов А.В. // Вестн. Омского ун-та. 2013. № 4. С. 128.
14. Wolowicz A., Hubicki Z. // Chem. Eng. J. 2011. V. 171. P. 206.
15. Liu P., Liu G., Chen D. et al. // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2009. V. 19. P. 1509.
16. Miroshnichenko A.A. // Proc. Eng. 2016. V. 152. P. 8.
17. Гинзбург С.И., Езерская Н.А., Прокофьева И.В. и др. Аналитическая химия платиновых металлов. М.: Наука, 1972. 617 с.
18. Бимиш Ф. Аналитическая химия благородных металлов. М.: Мир, 1969. 486 с.
19. Синицын Н.М., Буслаева Т.М. Химия галогенидных комплексов металлов платиновой группы. М.: Росвузнаука, 1992. 79 с.
20. Jonte J.H., Martin D.S. // J. Am. Chem. Soc. 1952. V. 74. No. 8. P. 2052.
21. Fritz J.J. // J. Solution Chem. 1985. V. 14. No. 12. P. 865.
22. Кононова О.Н., Дуба Е.В., Медовиков Д.В. и др. // Журн. физ. химии. 2017. Т. 91. № 12. С. 81.
23. Алексеев В.Н. Курс качественного химического полумикроанализа. М.: Химия, 1973. 584 с.
24. Пятницкий И.В., Сухан В.В. Аналитическая химия серебра. М.: Наука, 1975. 286 с.
25. Гельферих Ф. Иониты. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 490 с.
26. Кокотов Ю.А., Пасечник В.А. Равновесие и кинетика ионного обмена. Л.: Химия, 1979. 336 с.
27. Физическая химия. Теоретическое и практическое руководство / Под ред. Б.П. Никольского. Л.: Химия, 1987. 880 с.
28. Иванов В.А., Карпюк Е.А. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2015. Т. 15. № 1. С. 19.
29. Helfferich F. // Reactive Polymers. 1990. V. 13. P. 191.
30. Умланд Ф., Янсен А., Тириг Д., Вюниш Г. Комплексные соединения в аналитической химии. М.: Мир, 1975. 532 с.
31. Володько В.В., Кисель Л.Ф., Коляго А.Е. и др. // Вестн. БГУ. 2013. № 1. С. 33.
32. Таланов В.М., Житный Г.М. Ионные равновесия в водных растворах. М.: Академия естествознания, 2007. 186 с.
33. Гриссбах Р. Теория и практика ионного обмена. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 499 с.
34. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. М.: Мир, 1991. 536 с.
35. Казыцина Л.А., Куплетская Н.Б. Применение УФ-, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии. М.: Высш. школа, 1971. 264 с.
36. Салдадзе К.М., Копылова-Валова В.Д. Комплексообразующие иониты. М.: Химия, 1980. 356 с.