

**ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПАЛЛАДИЯ(II) И ПЛАТИНЫ(IV)
ГЕТЕРОЦЕПНЫМИ КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩИМИ СОРБЕНТАМИ
ИЗ МОДЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
ОТРАБОТАННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ
И ОТРАБОТАННОГО РАСТВОРА АФФИНАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

© Г. Р. Анпилогова, Ю. И. Муринов

Уфимский институт химии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
450054, г. Уфа, пр. Октября, д. 69
E-mail: hisam@anrb.ru

Поступила в Редакцию 28 мая 2020 г.
После доработки 29 декабря 2020 г.
Принята к публикации 15 января 2021 г.

В статических условиях изучена возможность селективного извлечения палладия(II) и платины(IV) гетероцепными комплексобразующими сорбентами поликонденсационного типа из солянокислых модельных растворов выщелачивания отработанных промышленных катализаторов и модельного маточного раствора после осаждения гексахлороплатината аммония. Показано, что при температуре 19°C и времени контакта фаз 2 ч сорбент с 1-(2-аминоэтил)пиперазиновыми и диметиленсульфидными функциональными группами извлекает более 99.9% палладия(II) из модельного раствора выщелачивания катализатора АПК-2 (сорбционная емкость $E_{Pd} = 501 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$) и 97–98% платины(IV) из раствора выщелачивания платино-никелевого катализатора ($E_{Pt} = 86 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$) с селективным отделением палладия(II) от Al(III) и платины(IV) от Al(III) и Ni(II). Полиметиленимоносульфид при 80°C и времени контакта фаз 3 ч практически нацело извлекает палладий(II) ($E_{Pd} = 34 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$) и 95% платины(IV) ($E_{Pt} = 6 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$) из модельного маточного раствора с селективным отделением платиновых металлов от сопутствующих элементов Cu(II), Zn(II), Fe(III) и Sn(IV).

Ключевые слова: полиметиленимоносульфид; полимерный аминотиоэфир; палладий(II); платина(IV); сорбция

DOI: 10.31857/S0044461821030063

Потребление палладия и платины ежегодно возрастает и в настоящее время превышает объем их добычи из первичного сырья, в связи с чем в переработку вовлекаются бедные и упорные руды, разнообразные промышленные и техногенные отходы. Значимыми вторичными источниками Pd и Pt являются отработанные промышленные и автомобильные

катализаторы.*** Растворы, получаемые при выщелачивании бедного сырья, характеризуются слож-

* Cowley A. Pgm Market Report February 2020. Johnson Matthey PLC, 2020. P. 1–19.

** Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 14-2016. Производство драгоценных металлов. М.: Бюро НДТ, 2016. С. 3–8, 29.

ным составом и низким содержанием благородных металлов. В аффинажном производстве существует проблема глубокого доизвлечения малых количеств благородных металлов из больших объемов отработанных растворов [1–3]. На отечественных и зарубежных предприятиях извлечение благородных металлов из бедных растворов осуществляется обычно осаждением в виде труднорастворимых соединений или цементаций [1, 3], при этом не всегда обеспечивается достаточно полное извлечение целевых металлов, растворы дополнительно загрязняются реагентом-осадителем или ионами цементирующего металла, образуется значительное количество бедных промпродуктов, требующих дальнейшей переработки или утилизации. Перспективным, более технологичным и эффективным гидрометаллургическим методом селективного извлечения и концентрирования малых количеств благородных металлов из сложных растворов является сорбция [2–4].*

Сорбционная технология пока не находит широкого применения в гидрометаллургии платиновых металлов, что, в частности, обусловлено высокой стоимостью селективных промышленных сорбентов и трудностью подбора эффективных и технологически подходящих элюентов. Однако высокая стоимость драгоценных металлов, эффективность и стоимость сорбента определяют целесообразность сжигания сорбтива для получения зольного концентрата извлеченных металлов [2, 3, 5–7].

Высокоэффективные и селективные комплексообразующие гетероцепные S- и S,N-содержащие сорбенты поликонденсационного типа — полимерный тиоэфир полиметиленимонисульфид и полимерные аминотиоэфиры — используются для предварительного концентрирования благородных металлов при определении их содержания в разнообразных технологических и геологических объектах гибридными методами анализа [8].** Сорбенты получают простыми одностадийными методами синтеза с применением относительно недорогих и доступных реагентов [9, 10], что определяет их существенно меньшую стоимость по сравнению с промышленными селективными сорбентами, получаемыми сложными многостадийными методами. Гетероцепные сорбенты

* Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 14–2016. Производство драгоценных металлов. М.: Бюро НДТ, 2016. С. 19–21, 49.

** Золотов Ю. А., Цизин Г. И., Дмитриенко С. Г., Моросанова Е. И. Сорбционное концентрирование микроэлементов из растворов: применение в неорганическом анализе. М.: Наука, 2007. С. 109–115.

представляют интерес для извлечения малых количеств благородных металлов из сложных технологических и отработанных растворов с получением зольных концентратов [9].

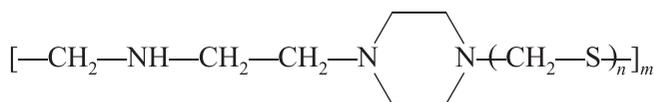
Цель работы — изучение возможности применения полиметиленимонисульфида и полимерного аминотиоэфира, содержащего 1-(2-аминоэтил)пиперазиновые и диметиленисульфидные группы, для глубокого селективного сорбционного извлечения палладия(II) и платины(IV) из модельных солянокислых растворов выщелачивания отработанных промышленных катализаторов на основе оксида алюминия и модельного маточного раствора после осаждения гексахлороплатината аммония.

Экспериментальная часть

В работе использовали гетероцепные комплексообразующие сорбенты поликонденсационного типа полиметиленимонисульфид и полимерный аминотиоэфир, представляющие собой мелкодисперсные порошки белого цвета:



Полиметиленимонисульфид



Полимерный аминотиоэфир

Полиметиленимонисульфид синтезирован методом поликонденсации формальдегида с сероводородом в щелочной среде [11].

Найдено (%): С 25.6, Н 4.3, S 69.2.

CH₂S. Вычислено (%): С 26.1, Н 4.4, S 69.6.

Размер частиц сорбента составлял 0.10–0.20 мм, насыпная масса — 0.12 г·см⁻³, содержание концевых кислотных групп (СОЕ_{0.1 н NaOH}, определенная в статических условиях сорбции стандартным методом [12]) — 1.00 мг-экв·г⁻¹. Среднечисловая молекулярная масса сорбента, рассчитанная по концентрации концевых групп, составляла 2000. Величина полной статической сорбционной емкости по серебру $E_{\text{Ag}} = 21.6$ ммоль·г⁻¹ соответствовала концентрации серосодержащих групп в сорбенте $E_{\text{S}} = 21.7$ мг-атом S/г.

Полимерный аминотиоэфир получен взаимодействием 1-(2-аминоэтил)пиперазина (99%, Acros, каталожный номер 40076) с формальдегидом (1:3) и сероводородом в среде диметилформамида (х.ч.,

АО «ЭКОС-1») при пропускании тока H_2S , температуре 20°C и перемешивании в течение 3 ч [13]. Элементный состав сорбента (%): С 36.7, Н 6.2, N 11.1, S 46.8; средний размер частиц 0.056 мм; насыпная масса $0.50 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$.

В работе использовали водный раствор формальдегида (37 мас%) — формалин технический высшего сорта марки ФМ (ОАО «НЗСП»).

Для приготовления водных растворов использовали PdCl_2 и $\text{H}_2\text{PtCl}_6\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ч., ОАО «Красцветмет»), $\text{AlCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ч., Донецкий завод химреактивов), $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ч., ООО «Компонент-Ректив»), ZnCl_2 (ч.д.а., ОАО «Алмалыкский ГМК»), $\text{CuCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ч.д.а., Донецкий завод химреактивов), AgNO_3 (ч.д.а., Уральский завод химреактивов), $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (х.ч., Черкасский завод химреактивов), SnCl_4 (99.995%, Sigma-Aldrich 217913), NH_4Cl (х.ч., ОАО «Лисичанская сода»), HNO_3 (ч.д.а., АО НАК «Азот») и HCl (х.ч., АО «БСК»).

В табл. 1 приведены литературные данные по составу солянокислых растворов, принятых в качестве модельных: усредненный состав отработанного раствора аффинажного цеха одного из отечественных предприятий (маточный раствор после осаждения гексахлороплатината аммония) и состав растворов, которые могут быть получены при выщелачивании отработанных промышленных катализаторов на основе оксида алюминия.

Концентрацию палладия(II) и платины(IV) в растворах определяли спектрофотометрическими методами с хлоридом олова(II)* на спектрофотометре Specord M40. Определению платины(IV) в исходных сложных растворах, моделирующих состав отработанного аффинажного раствора, мешало присутствие палладия(II), концентрация которого девятикратно превышала концентрацию платины(IV) (табл. 1), поэтому исходную концентрацию платины(IV) рассчитывали по концентрации стандартизованного раствора платины(IV), используемого для приготовления таких растворов. Присутствие платины(IV) не мешало анализу палладия(II) в растворах типа № 1 до и после сорбции палладия(II) и платины(IV) полиметиленимоносульфидом, так как отсутствовало заметное поглощение окрашенных соединений платины с хлоридом олова(II) при длине волны 635 нм. Следовые концентрации палладия(II), не превышающие предел его обнаружения ($\sim 1 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$), не оказывали влияния на

спектрофотометрическое определение платины(IV) в таких растворах после сорбции палладия(II) и платины(IV). Низкие значения концентрации палладия(II) (не более $0.5 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) в сложных растворах после совместной сорбции палладия(II) и платины(IV) были подтверждены методом атомно-абсорбционной спектроскопии (спектрофотометр Hitachi 508, пламя ацетилен-воздух, аналитическая длина волны определения палладия 247.6 нм).

Концентрацию неблагородных металлов в индивидуальных растворах их солей определяли комплексометрическими методами: Zn(II) — с индикатором эриохром черный Т, Cu(II) и Ni(II) — мурексид [16], Fe(III) — сульфосалициловая кислота;** Al(III) и Sn(IV) — с индикатором ксиленоловый оранжевый методами обратного титрования раствором ZnSO_4 *** и [17] соответственно. Концентрацию Ag(I) в азотно-кислых растворах определяли методом Фольгарда****

Сорбцию ионов металлов изучали статическим методом отдельных навесок при соотношении массы сорбента (г) и объема раствора (см^3) $m:V = 1:200$ при перемешивании со скоростью $800 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$ (магнитная мешалка типа ММ-2А) при комнатной ($20 \pm 1^\circ\text{C}$) или повышенной температуре. Сорбцию при повышенной температуре проводили в термостатированных ячейках, температура поддерживалась с точностью $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (термостат типа УН 4). Сорбцию Zn(II) , Cu(II) , Ni(II) , Fe(III) , Al(III) и Sn(IV) из индивидуальных солянокислых растворов изучали при исходной концентрации ионов металла $0.05 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$. Полную сорбционную емкость полиметиленимоносульфида по Ag(I) определяли при исходной концентрации $0.95 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$ AgNO_3 в растворе $1 \text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$ HNO_3 , при комнатной температуре, $m:V = 1:100$ и времени контакта фаз 24 ч. Погрешность определения сорбционной емкости по ионам металлов не превышала 5%.

Обсуждение результатов

Зависимость сорбционной емкости гетероцепных сорбентов по платине(IV) и палладию(II) от исходной концентрации соляной кислоты в индивидуальных растворах соединений платиновых металлов (рис. 1) получена при времени контакта

** Марков В. К., Верный Е. А., Виноградов А. В., Елисон С. В., Клыгин А. Е., Моисеев И. В. Уран. Методы его определения. М.: Атомиздат, 1964. С. 360–361.

*** Тихонов В. Н. Аналитическая химия алюминия. М.: Наука, 1971. С. 67–69.

**** Васильев В. П. Аналитическая химия. В 2 кн. Кн. 1. Гравиметрический и титриметрический методы анализа. М.: Высш. шк., 1989. С. 259.

* Гинзбург С. И., Езерская Н. А., Прокофьева И. В., Федоренко Н. В., Шленская В. И., Бельский Н. К. Аналитическая химия платиновых металлов. М.: Наука, 1972. С. 321, 328.

Таблица 1

Состав модельного маточного раствора после осаждения гексахлороплатината аммония и модельных растворов выщелачивания отработанных промышленных катализаторов на основе оксида алюминия

№ раствора	Раствор	Состав, моль·л ⁻¹	Литературный источник
1	Маточный раствор после осаждения гексахлороплатината аммония	HCl 3 NH ₄ Cl 1 Pd(II) 0.0014 Pt(IV) 0.00015 Zn(II), Cu(II), Fe(III), Sn(IV) по 0.05	[2, 14]
2	Раствор выщелачивания платино-никелевого катализатора изомеризации и гидрирования углеводов	HCl 3–5 Pt(IV) 0.0015–0.0022 Ni(II) 0.012–0.058 Al(III) 0.15–0.53	[15]
3	Раствор выщелачивания алюмопалладиевого катализатора АПК-2	HCl 3–4 Pd(II) 0.014–0.016 Al(III) 0.20–0.64	[15]

фаз 6 ч, достаточном для достижения равновесия сорбции палладия(II) из солянокислых растворов полимерным аминотиоэфиром [18] и полиметилениосульфидом (рис. 2) при комнатной температуре. В изученном диапазоне концентраций кислоты (рис. 1) палладий(II) сорбируется полиметилениосульфидом с более высокими коэффициентами распределения ($K_d = 74\text{--}225\text{ см}^3\cdot\text{г}^{-1}$), чем платина(IV)

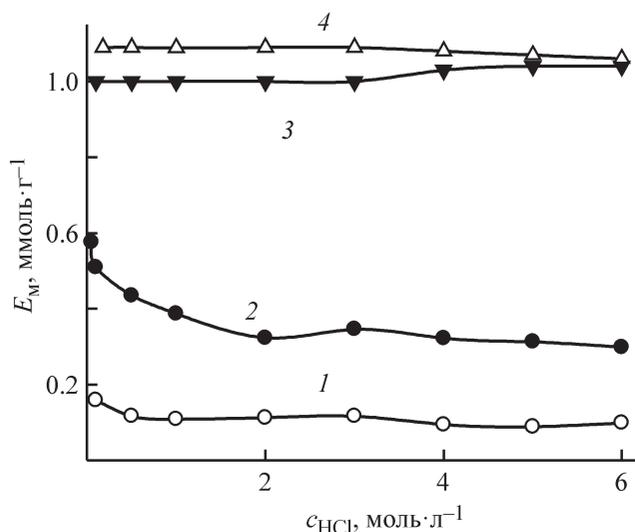


Рис. 1. Зависимость сорбционной емкости полиметилениосульфида (1, 2) и полимерного аминотиоэфира (3, 4) по платине(IV) (1, 4) и палладию(II) (2, 3) от концентрации соляной кислоты.

$T = 20^\circ\text{C}$, время контакта фаз 6 ч.

1, 4 — $c_{\text{Pt}} = 0.0056\text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$, 2 — $c_{\text{Pd}} = 0.0056\text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$;
3 — $c_{\text{Pd}} = 0.0051\text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$.

($K_d = 19\text{--}34\text{ см}^3\cdot\text{г}^{-1}$). В представляющей интерес области концентраций $3\text{--}5\text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$ HCl сорбционная емкость данного сорбента по платине(IV) и палладию(II) незначительно зависит от кислотности раствора. Полимерный аминотиоэфир существенно эффективнее извлекает платину(IV) и палладий(II), чем полиметилениосульфид. Сорбция платиновых металлов этим сорбентом в изученном диапазоне концентраций кислоты характеризуется высокой степенью извлечения ($>99\%$) и высокими значениями коэффициентов распределения ($K_d \sim 10^4\text{ см}^3\cdot\text{г}^{-1}$) данных металлов.

Полимерный аминотиоэфир с высокой эффективностью сорбирует медь(II) из растворов $1\text{--}5\text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$ HCl [18], что не позволяет использовать его для селективного извлечения платиновых

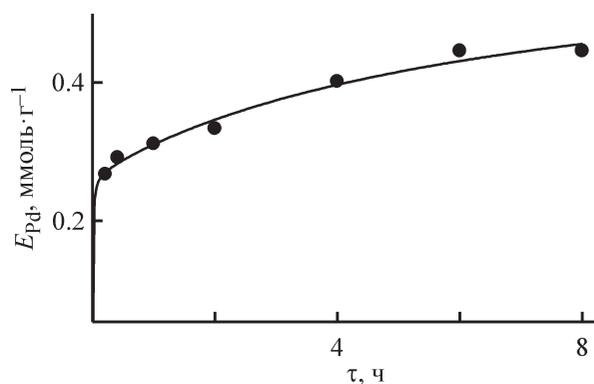


Рис. 2. Кинетическая кривая сорбции палладия(II) полиметилениосульфидом из раствора $1\text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$ HCl. $c_{\text{Pd}} = 0.0059\text{ моль}\cdot\text{л}^{-1}$, $T = 20^\circ\text{C}$.

металлов из отработанного аффинажного раствора № 1. Полиметиленимоносульфид является одним из наиболее селективных сорбентов платиновых металлов. При температуре кипения раствора желез(III) не извлекается сорбентом при кислотности водной фазы 1–10 моль·л⁻¹ HCl, а сорбция меди(II) из растворов 3–10 моль·л⁻¹ HCl незначительна [19]. Данный сорбент был выбран для изучения возможности глубокого селективного извлечения платиновых металлов из отработанного аффинажного раствора № 1. Установлено, что оба сорбента не извлекают Ni(II) и Al(III) из индивидуальных растворов ионов металлов, содержащих 3–5 моль·л⁻¹ HCl, при комнатной температуре, а полиметиленимоносульфид — также и при 60 и 80°C. Следовательно, они представляют интерес для изучения возможности селективной сорбции платиновых металлов из растворов выщелачивания отработанных катализаторов № 2, 3.

Изучение сорбции платиновых металлов полиметиленимоносульфидом из индивидуальных растворов, моделирующих состав раствора № 1 по содержанию HCl (3 моль·л⁻¹) и NH₄Cl (1 моль·л⁻¹) и содержащих 0.0014 моль·л⁻¹ палладия(II) или 0.00015 моль·л⁻¹ платины(IV), показало, что степень извлечения палладия(II) при времени контакта фаз 6 ч возрастает от 75.7 до >99% с увеличением температуры от 20 до 60°C. Время контакта фаз, необходимое для практически полного извлечения (>99%) палладия(II) и платины(IV) из их индивидуальных растворов при 60°C составляет 2 и 1.5 ч соответственно. Однако при совместном присутствии платиновых металлов в рас-

творе глубокое извлечение платины(IV) при данной температуре не достигается даже при увеличении времени контакта фаз до 6 ч (табл. 2). Повышение температуры до 80°C и времени контакта фаз до 3 ч позволяет практически полностью извлечь платиновые металлы при их совместном присутствии в растворе (табл. 2). Установлено отсутствие сорбции Zn(II), Cu(II), Fe(III) и Sn(IV) из индивидуальных растворов, содержащих 3 моль·л⁻¹ HCl и 1 моль·л⁻¹ NH₄Cl, при температуре 20, 60 и 80°C и времени контакта фаз 2 ч (в пределах ошибки определения концентрации ионов металлов). Следовательно, данный сорбент позволяет селективно отделять платиновые металлы от сопутствующих. В оптимальных условиях сорбции из модельного раствора, содержащего сопутствующие элементы, полиметиленимоносульфидом глубоко извлекаются палладий(II) (остаточная концентрация не более 1 мг·л⁻¹, $E_{Pd} = 34.3$ мг·г⁻¹) и платина(IV) (остаточная концентрация 1.6 мг·л⁻¹, $E_{Pt} = 5.7$ мг·г⁻¹) (табл. 2).

Изучение сорбции палладия(II) и платины(IV) из модельных растворов выщелачивания промышленных катализаторов показало, что даже при повышенных температурах полиметиленимоносульфид не обеспечивает полноты извлечения более высоких, чем в растворе № 1, количеств платиновых металлов (табл. 3). Достоинством полимерного аминотиоэфира является высокая скорость сорбции палладия(II) при кислотности водной фазы более 1 моль·л⁻¹ HCl [18]. Установлено, что данный сорбент с высокой степенью извлечения сорбирует платину(IV) из раствора

Таблица 2

Влияние температуры и времени контакта фаз на степень извлечения палладия(II) и платины(IV) полиметиленимоносульфидом из растворов, моделирующих состав отработанного аффинажного раствора № 1
Концентрация HCl — 3 и NH₄Cl — 1 моль·л⁻¹

с _м , моль·л ⁻¹	T, °C	Время контакта фаз, ч	Степень извлечения, %	
			Pd(II)	Pt(IV)
Pd 0.00139 Pt 0.00015	60	2	>99	66.9
Pd 0.00139 Pt 0.00015	60	6	>99	72.2
Pd 0.00141 Pt 0.00015	80	2	>99	90.9
Pd 0.00141 Pt 0.00015	80	3	>99	>99
Pd 0.00161 Pt 0.00015	80	3	>99	95.0
Zn, Cu, Fe, Sn по 0.05				

Таблица 3

Сорбция палладия(II) и платины(IV) гетероцепными сорбентами из модельных растворов выщелачивания отработанных промышленных катализаторов

№ раствора	Состав, моль·л ⁻¹	Сорбент	T, °C	Время контакта фаз, ч	Степень извлечения, %	
					Pd(II)	Pt(IV)
2	HCl 4, Pt(IV) 0.0023, Ni(II) 0.058, Al(III) 0.53	Полиметиленмоносульфид	60	2		28.2
2	HCl 4, Pt(IV) 0.0023, Ni(II) 0.058, Al(III) 0.53	Полиметиленмоносульфид	80	3		66.4
2	HCl 3–5, Pt(IV) 0.0023, Ni(II) 0.058, Al(III) 0.17; 0.54	Полимерный аминотиоэфир	20	2		97–98
3	HCl 3.5, Pd(II) 0.015, Al(III) 0.32	Полиметиленмоносульфид	60	3	46.0	
3	HCl 3–4, Pd(II) 0.015, Al(III) 0.32; 0.64	Полимерный аминотиоэфир	19	1	>99.9	

№ 2 и практически полностью — палладий(II) из раствора № 3 при комнатной температуре и времени контакта фаз 2 и 1 ч соответственно (табл. 3). При этом сорбционная емкость полимерного аминотиоэфира по платине(IV) и палладию(II) составляет 85–88 и 319 мг·г⁻¹ соответственно. Высокая эффективность этого сорбента позволяет практически нацело извлекать палладий(II) из раствора № 3, содержащего HCl — 3.5, Al(III) — 0.32, Pd(II) — 0.016 моль·л⁻¹, при $m:V = 1:300$ и времени контакта фаз 1 ч с высоким значением $E_{Pd} = 501$ мг·г⁻¹ [остаточная концентрация палладия(II) не более 1 мг·л⁻¹].

Поскольку сорбция палладия(II) и платины(IV) изученными гетероцепными сорбентами необратима [18, 20], сорбтивы платиновых металлов можно перерабатывать сжиганием с получением зольных концентратов, что целесообразно при относительно небольшой стоимости сорбентов и высокой сорбционной емкости полимерного аминотиоэфира.

Выводы

Высокоселективный гетероцепный комплексообразующий сорбент полиметиленмоносульфид может быть рекомендован для глубокого доизвлечения

и концентрирования палладия(II) и платины(IV) из маточного раствора после осаждения гексахлороплатината аммония с селективным отделением платиновых металлов от Zn(II), Cu(II), Fe(III) и Sn(IV) в оптимальных условиях сорбции: $m:V = 1:200$, $T = 80^\circ\text{C}$, время контакта фаз — 3 ч. Гетероцепный сорбент полимерный аминотиоэфир может быть предложен для эффективного и селективного извлечения и концентрирования палладия(II) и платины(IV) из солянокислых растворов выщелачивания отработанных промышленных катализаторов на основе оксида алюминия (АПК-2 и платино-никелевый катализатор) при комнатной температуре.

Благодарности

Авторы благодарят Центр коллективного пользования «Химия» УФИХ УФИЦ РАН и Региональный центр коллективного пользования «Агидель» УФИЦ РАН за проведение элементного анализа сорбентов.

Финансирование работы

Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А20-120012090027-6.

Конфликт интересов

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

Информация об авторах

Антилогова Галина Рудольфовна, к.х.н.,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6541-3285>

Муринов Юрий Ильич, д.х.н., проф.,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8199-1912>

Список литературы

- [1] *Ильяшевич В. Д., Павлова Е. И., Жеребцова О. В., Сиротина Д. Ю., Лукина К. В., Кривошеев Н. О.* Новый подход к обезблагораживанию производственных растворов в Красцветмете // XXII Междунар. Черняевская конф. по химии, аналитике и технологии платиновых металлов. Сб. тез. М., 2019. С. 85.
- [2] *Блохин А. А., Абовский Н. Д., Мурашкин Ю. В., Михайленко М. А.* Сорбционное извлечение платины и палладия из отработанных аффинажных растворов с их низким содержанием // Цветные металлы Сибири-2009: Сб. докладов Первого междунар. конгресса. Красноярск: ООО «Версо», 2009. С. 587–592.
- [3] *Yahorava V., Kotze M.* Ion exchange technology for the efficient recovery of precious metals from waste and low-grade streams // *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 2014. V. 114. N 2. P. 173–181.
- [4] *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 Processing and Extractive Metallurgy Rev.* 2014. V. 35. N 6. P. 369–389.
<https://doi.org/10.1080/08827508.2013.764875>
- [5] *Ehrlich H. V., Buslaeva T. M., Maryutina T. A.* Trends in sorption of platinum metals: A critical survey // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2017. V. 62. N 14. P. 1797–1818. <https://doi.org/10.1134/S0036023617140030>
- [6] *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>
- [7] *Богданов В. И., Барабошкин В. Е., Гроховский С. В.* Аффинажное производство // Драг. металлы. Драг. камни. 2005. № 8. С. 86–113.
- [8] *Дальнова О. А., Барановская В. Б., Дальнова Ю. С., Карпов Ю. А.* Новые комплексообразующие полимерные аминотиоэфирные сорбенты в аналитическом контроле возвратного металлосодержащего сырья редких и благородных металлов // *ЖАХ.* 2018. Т. 73. № 3. С. 181–188.
<https://doi.org/10.7868/S0044450218030027>
- [9] *[Dal'nova O. A., Baranovskaya V. B., Dal'nova Yu. S., Karpov Yu. A.* New complexing polymer aminothioether sorbents in the analytical control of recyclable metal-containing raw material of rare and noble metals // *J. Anal. Chem.* 2018. V. 73. N 3. P. 221–227.
<https://doi.org/10.1134/S1061934818030036>.
- [10] *Семенов Д. Г., Афонин В. М., де Векки Д. А., Симанова С. А.* Хемосорбция хлоридных комплексов Rh(III) и Ir(III и IV) полиметилсульфидом // *Изв. СПбГТИ (ТУ).* 2019. № 50 (76). С. 3–15.
- [11] *Рафиков С. Р., Алеев Р. С., Масагутов Р. М., Данилов В. Т., Дальнова Ю. С.* Реакция формальдегида с сероводородом // *Изв. АН СССР. Сер. хим.* 1982. № 7. С. 1631–1633 [*Rafikov S. R., Aleev R. S., Masagutov R. M., Danilov V. T., Dal'nova Yu. S.* Reaction of formaldehyde with hydrogen sulfide // *Russ. Chem. Bull.* 1982. V. 31. P. 1452–1453.
<https://doi.org/10.1007/BF00954173>].
- [12] *Салдадзе К. И., Копылова-Валова В. Д.* Комплексообразующие иониты (комплекситы). М.: Химия, 1980. С. 104–105.
- [13] *Антилогова Г. Р.* Сорбционные свойства S- и N-содержащих гетероцепных сорбентов по отношению к благородным металлам: Автореф. канд. дис. Уфа, 1997. 24 с.
- [14] *Блохин А. А., Абовский Н. Д., Мурашкин Ю. В.* Ионообменное извлечение палладия(II) из хлоридных растворов сложного состава // *ЖПХ.* 2007. Т. 80. № 7. С. 1089–1093 [*Blokhin A. A., Abovskii N. D., Murashkin Yu. V.* Ion-exchange recovery of palladium(II) from multicomponent chloride solutions // *Russ. J. Appl. Chem.* 2007. V. 80. N 7. P. 1058–1062.
<https://doi.org/10.1134/S1070427207070087>].
- [15] *Антилогова Г. Р., Хисамутдинов Р. А., Голубятникова Л. Г., Муринов Ю. И.* Пропиконазол и пенконазол — эффективные экстрагенты для селективного извлечения и концентрирования платины(IV) и палладия(II) из солянокислых растворов выщелачивания алюмоплатиновых и алюмопалладиевого отработанных катализаторов // *ЖПХ.* 2016. Т. 89. № 2. С. 195–201 [*Anpilogova G. R., Khisamutdinov R. A., Golubyatnikova L. G., Murinov Yu. I.* Propiconazole and penconazole as effective extractants for selective recovery and concentration of platinum(IV) and palladium(II) from hydrochloric acid solutions formed in leaching of spent aluminoplatinum and aluminopalladium catalysts // *Russ. J. Appl. Chem.* 2016. V. 89. N 2. P. 206–211.
<https://doi.org/10.1134/S1070427216020075>].
- [16] *Калинина Л. С., Моторина М. А., Никитина Н. И., Хачатуридзе Н. А.* Анализ конденсационных полимеров. М.: Химия, 1984. С. 86.

- [17] Мышляева Л. В., Максимова Т. Г. Комплексонометрический метод в анализе элементокремний-органических и элементоорганических соединений // ЖАХ. 1968. Т. 23. № 10. С. 1584–1586.
- [18] Антилогова Г. Р., Алеев Р. С., Афзалетдинова Н. Г., Хисамутдинов Р. А., Шишилов Н. С., Муринов Ю. И. Новый гетероцепный сероазотсодержащий комплексит для благородных металлов // ЖНХ. 1995. Т. 40. № 3. С. 466–471.
- [19] Шестаков В. А., Малофеева Г. И., Петрухин О. М., Ширяева О. А., Колонина Л. Н., Марчева Е. В., Муринов Ю. И., Бикбаева Г. Г., Никитин Ю. Е., Золотов Ю. А. Сорбционно-рентгенофлуоресцентное определение платиновых металлов с использованием полимерного тиоэфира // ЖАХ. 1981. Т. 36. № 9. С. 1784–1792 [Shestakov V. A., Malofeeva G. I., Petrukhin O. M., Shiryayeva O. A., Kolonina L. N., Marcheva E. V., Murinov Y. I., Bikbaeva G. G., Nikitin Y. E., Zolotov Y. A. Sorption-x-ray fluorescence determination of the platinum metals by means of a thioether polymer // J. Anal. Chem. USSR. 1981. V. 36. N 9. P. 1250–1256].
- [20] Петрухин О. М., Малофеева Г. И., Нефедов В. И., Салынь Я. В., Марчева Е. В., Шестаков В. А., Ширяева О. А., Муринов Ю. И., Никитин Ю. Е., Золотов Ю. А. Сорбция платиновых металлов полимерным тиоэфиром // ЖАХ. 1983. Т. 38. № 2. С. 250–255 [Petrukhin O. M., Malofeeva G. I., Nefedov V. I., Salyn Y. V., Marcheva E. V., Shestakov V. A., Shiryayeva O. A., Murinov Y. I., Nikitin Y. E., Zolotov Y. A. Sorption of platinum metals by a polymer thioether // J. Anal. Chem. USSR. 1983. V. 38. N 2. P. 196–201].
-