



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.723

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11719

Изучение сорбции ионов платины, палладия и родия на углеродном сорбенте

Алина Евгеньевна Высотина^{1,2✉}, Галина Борисовна Слепченко²

¹Красноярский завод цветных металлов им. В.Н. Гулидова, Красноярск, Россия, a.vysotina@krastsvetmet.ru✉

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Аннотация. Статья посвящена сорбционному концентрированию ионов платины (II,IV), палладия (II) и родия (III) из хлоридных сред на углеродном синтетическом сорбенте. Для изучения сорбционного концентрирования металлов платиновой группы был выбран углеродный синтетический сорбент Lewatit AF5. Данный сорбент обладает высокой механической прочностью, высокой площадью поверхности, узким распределением пор по размерам, а также низкой стоимостью по сравнению с силикатными или полимерными сорбентами.

Сорбционное концентрирование осуществлялось в статических условиях из модельных хлоридных растворов. Концентрация аналитов в исходных растворах составляла от 8 до 50 ммоль/дм³. Равновесные концентрации металлов в растворах определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Исследованы зависимости адсорбции от времени контакта, свободной кислотности и окислительно-восстановительного потенциала системы, так же определены предельные значения абсорбции для каждого из исследуемых металлов.

Изучение кинетических параметров сорбции ионов Pt (IV), Pd (II) и Rh (III) проводилось из хлоридных растворов, характеризующихся значениями свободной кислотности 0.01 моль/дм³. Было определено время установления сорбционного равновесия, которое составляет 4 часа для каждого из ионов.

При исследовании зависимости адсорбции от свободной кислотности и окислительно-восстановительного потенциала системы (ОВП) было выявлено, что с ростом свободной кислотности и ОВП наблюдается падение сорбционной активности, таким образом можно сделать вывод о том, что в сорбционном процессе участвуют аквакомплексы платиновых металлов, в которых металлы находятся не в высшей степени окисления.

Обработка экспериментальных данных показала применимость линейного уравнения изотермы Ленгмюра для описания процесса адсорбции, а также были рассчитаны предельные значения адсорбции, с помощью которых проведена оценка сорбционной емкости сорбента, которая для Pt (II, IV), Pd (II) и Rh (III) составила 1.24 ммоль/г; 1.16 ммоль/г и 0.57 ммоль/г соответственно.

Высокие значения сорбционной емкости, а также достаточно короткое время достижения сорбционного равновесия без применения средств ускорения процесса, в совокупности с механическими характеристиками сорбента позволяет сделать вывод о перспективности применения сорбента Lewatit AF5 для концентрирования металлов платиновой группы из солянокислых растворов.

Ключевые слова: сорбция, платиновые металлы, углеродные сорбенты.

Для цитирования: Высотина А.Е., Слепченко Г.Б. Изучение сорбции ионов платины, палладия и родия на углеродном сорбенте // *Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23, № 5. С. 848-857.* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11719>

Original article

Study of sorption of platinum, palladium and rhodium ions on a carbon sorbent

Alina E. Vysotina^{1,2✉}, Galina B. Slepchenko²

¹Gulidov Krasnoyarsk Non-Ferrous Metals Plant, Krasnoyarsk, Russia, a.vysotina@krastsvetmet.ru✉

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia



Abstract. The article is devoted to the sorption concentration of platinum (II,IV), palladium (II) and rhodium (III) ions from chloride media on a carbon synthetic sorbent. For the study of the sorption concentration of platinum group metals, the carbon synthetic sorbent Lewatit AF5 was chosen. This sorbent has high mechanical strength, high surface area, narrow pore size distribution, and low cost compared to silicate or polymer sorbents. Sorption concentration was carried out under static conditions from model chloride solutions. The concentration of analytes in the initial solutions ranged from 8 to 50 mmol/dm³. Equilibrium concentrations of metals in solutions were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. The dependences of adsorption on contact time, free acidity and redox potential of the system were studied, and the limiting absorption values for each of the metals studied were determined.

The study of the kinetic parameters of the sorption of Pt (IV), Pd (II) and Rh (III) ions was carried out from chloride solutions characterized by free acidity values of 0.01 mol/dm³. The time for establishing sorption equilibrium was determined, which was 4 hours for each of the ions. When studying the dependence of adsorption on free acidity and the oxidation-reduction potential of the system (ORP), it was revealed that with an increase in free acidity and redox potential, a decrease in sorption activity is observed, thus we can conclude that aquated complexes of platinum metals, in which metals present not in the highest oxidation state, involved in the sorption process.

Processing of experimental data showed the applicability of the linear equation of the Langmuir isotherm for the description of the adsorption process, the limiting adsorption values were calculated, using which the sorption capacity of the sorbent was assessed. The sorption capacity for Pt (II, IV), Pd (II) and Rh (III) was 1.24 mmol/g; 1.16 mmol/g and 0.57 mmol/g, respectively. High values of sorption capacity, as well as a fairly short time to achieve sorption equilibrium without the use of means for the acceleration of the process, in combination with the mechanical characteristics of the sorbent, allow us to conclude that the Lewatit AF5 sorbent is promising for the concentration of platinum group metals from hydrochloric acid solutions.

Keywords: sorption, platinum metals, carbon sorbents.

For citation: Vysotina A.E., Slepchenko G.B. Study of sorption of platinum, palladium and rhodium ions on a carbon sorbent. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. 2023. 23(5): 848-857. (In Russ.).* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11719>

Введение

В настоящее время потребление металлов платиновой группы намного превышает объемы их производства. В связи с этим в переработку вовлекаются базовые и упорные руды, а также различное вторичное сырье [1]. Для эффективной переработки необходимо проведение качественного и количественного анализа исходного сырья, которое подразумевает аналитическое определение низких содержаний металлов платиновой группы на фоне высоких концентраций неблагоприятных элементов.

В связи с этим возникает необходимость выделения платиновых металлов из матрицы пробы. Одним из традиционных способов концентрирования платиновых металлов является метод пробирной плавки, который характеризуется высокими трудозатратами и длительностью процесса, а также требует навески материала массой 50-100 г [2].

Другим известным эффективным способом извлечения платиновых металлов

из растворов является сорбционное концентрирование [3,4]. Сорбция успешно применяется не только для извлечения целевых ионов металлов из многокомпонентной системы, а также для извлечения компонентов, находящихся в растворе в ультранизких концентрациях на пределе обнаружения современных аналитических методик [5-7].

Метод сорбционного концентрирования платиновых металлов из растворов с их низким содержанием можно использовать в качестве подготовительной операции для последующего аналитического определения, а также как технологическую операцию, которая позволит минимизировать потери ценных металлов в виде сточных вод.

В качестве сорбентов, способных извлекать платиновые металлы, используются комплексообразующие и анионообменные сорбенты [8,9], которые являются малодоступными из-за их высокой стоимости. Альтернативой хелатным и анионообменным сорбентам являются углеродные сорбенты.

Углеродные сорбенты, активно применяются в качестве материалов, способных к эффективному извлечению благородных металлов. Они обладают меньшей избирательностью по отношению к благородным металлам, нежели хелатные сорбенты, однако их широкое применение обусловлено низкой стоимостью и высокой сорбционной емкостью [10-12]. Также данные сорбенты пригодны для модификации, которая позволяет улучшить характеристики сорбента (емкость, селективность) [13].

Сорбционное концентрирование на активированные угли и другие углеродные материалы с развитой поверхностью согласно исследованиям авторов [14-16] протекает посредством реализации ионообменных, окислительно-восстановительных и донорно-акцепторных химических реакций.

Среди углеродных сорбентов можно выделить активированные угли, среди которых синтетический, торфяной, кокосовый и березовый активированные угли. Активированные угли обладают развитой пористой структурой с площадью поверхности более 1000 м²/г. Помимо вышеуказанных углеродных сорбентов существуют синтетические углеродные сорбенты, которые отличаются высокой химической чистотой, высокой механической прочностью гранул, их гладкой поверхностью и еще более высокой площадью поверхности (до 1500 м²/г). В отличие от углеродных молекулярных сит, синтетические сорбенты характеризуются большими диаметрами пор и могут быть как микро, так и мезопористыми [17].

Для изучения сорбционного концентрирования платиновых металлов был выбран промышленно доступный синтетический углеродный сорбент на основе полистирола Lewatit AF5. Данный сорбент обладает площадью поверхности 1270 м²/г, площадь поверхности определена методом БЭТ, диаметром пор 16.9 нм и объемом микропор 0.5 см³/г. Пло-

щадь поверхности исследуемого сорбента не обладает максимальной величиной, но стоит отметить, что она близка к средним значениям для сорбентов данного типа. В работе проведены исследования по изучению возможности сорбционного концентрирования ионов платины (II, IV), палладия (II) и родия (III) на этом сорбенте.

Экспериментальная часть

Методика проведения экспериментов включала в себя следующие операции: сорбцию платины (II, IV), палладия (II) и родия (III) на Lewatit AF5 из солянокислых растворов; фильтрование; определение ионов платины, палладия и родия в фильтрате методом атомно-эмиссионной спектроскопии.

Для изучения сорбционного концентрирования ионов Pt(IV), Pd(II) и Rh(III) на Lewatit AF5 навеску сорбента массой 1.0000 г помещали в 50.00 см³ модельного раствора. Для экспериментов использовали модельные хлоридные растворы ионов Pt(IV), Pd(II) и Rh(III). Концентрация аналитов в исходных растворах составляла 8.0-50.0 ммоль/дм³.

Кинетику сорбции ионов Pt(IV), Pd(II) и Rh(III) исследовали в статических условиях. Раствор с сорбентом помещали на платформенный шейкер,двигающийся с постоянной амплитудой в течении заданного времени. По окончании опыта раствор подвергали фильтрации, фильтраты анализировали на содержание ионов Pt(IV), Pd(II) и Rh(III) методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Анализ выполнялся на приборе iCAP 7400 Radial, интервал определяемых концентраций составляет от 0.1 до 100 г/дм³.

Количество сорбированных ионов рассчитывали по формуле:

$$A_{\text{эксп}} = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

где $A_{\text{эксп}}$ – количество сорбированного вещества, ммоль/г; C_0 и C_p – соответственно исходная и равновесная концен-

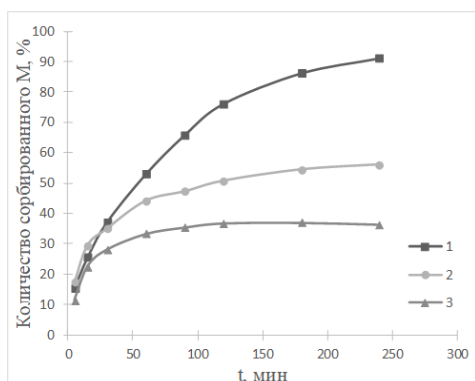


Рис. 1. Кинетика сорбции ионов платины (1), палладия (2) и родия (3) из хлоридных растворов

Fig. 1. Sorption kinetics of platinum (1), palladium (2), and rhodium (3) ions from chloride solutions

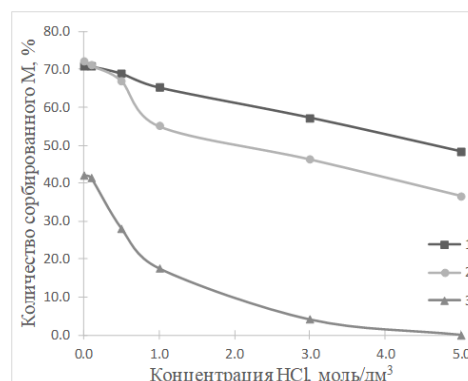


Рис. 2. Зависимость количества сорбированных ионов платины (1), палладия (2) и родия (3) от свободной кислотности раствора

Fig. 2. Dependence of the amount of adsorbed ions of platinum (1), palladium (2), and rhodium (3) on the free acidity of the solution

трации ионов металлов, ммоль/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса Lewatit AF5, г.

Свободная кислотность растворов определялась титриметрическим методом в присутствии индикатора (метиловый желтый). Окислительно-восстановительный потенциал растворов определялся инструментально с помощью прибора Mettler Toledo S7 seven2go pro.

Обсуждение результатов

Изучение кинетических параметров сорбции ионов Pt (IV), Pd (II) и Rh (III) проводилось из хлоридных растворов, характеризующихся значениями свободной кислотности 0.01 моль/дм³. Сорбционное концентрирование на Lewatit AF5 показало, что время установления сорбционного равновесия (T=293 K) составляет 4 часа для каждого из исследуемых ионов (рис. 1). В первые 15 минут скорость сорбции аналитов максимальна.

Изучено влияние свободной кислотности раствора в интервале от 0.001 до 6.00 моль/дм³ на процессы сорбционного концентрирования ионов Pt(II,IV), Pd(II) и Rh(III) на сорбенте Lewatit AF5. Для коррекции свободной кислотности использовали растворы соляной кислоты и гидроксида натрия с концентрацией 1 моль/дм³.

На графике (рис. 2) можно выделить 3 участка. В интервале свободной кислотности 0.01-0.1 моль/дм³ сорбируется максимальное количество ионов металлов. При значениях свободной кислотности от 0.5 до 1 моль/дм³ наблюдается резкое падение сорбционной активности, и при последующем увеличении свободной кислотности до значения 6 моль/дм³ сорбционная активность продолжает снижаться, однако снижение имеет более пологий характер.

Согласно литературным данным, металлы платиновой группы отличаются многообразием анионных форм при нахождении в солянокислых растворах. В зависимости от значения свободной кислотности меняется число хлоридов во внутренней координационной сфере, а также молекул воды. Чем ниже значение свободной кислотности, тем в большей степени наблюдается аквагидратация.

При значении свободной кислотности 0.1 моль/дм³ палладий преимущественно находится в форме [PdCl₄]²⁻, а при снижении свободной кислотности до 0.01 моль/дм³ происходит аквагидратация до формы [Pd(H₂O)Cl₃]⁻.

Нахождение хлорокомплексов платины в солянокислых растворах как в сте

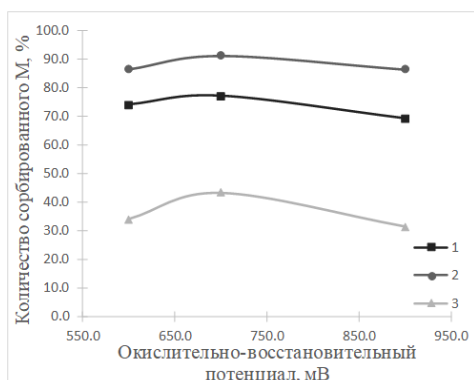


Рис. 3. Зависимость количества сорбированных ионов платины (1), палладия (2) и родия (3) от окислительно-восстановительного потенциала раствора
 Fig. 3. Dependence of the amount of adsorbed platinum (1), palladium (2), and rhodium (3) ions on the redox potential of the solution

пени окисления +2, так и в степени окисления +4 равновероятно и в диапазоне свободной кислотности равном 0.01-0.1 моль/дм³ она будет находиться в следующих формах: [PtCl₄]²⁻, [PtCl₆]²⁻, [Pt(H₂O)Cl₃]⁻, [Pt(H₂O)Cl₅]⁻ [18].

В случае родия форма нахождения в растворах с низким значением свободной кислотности представлена нейтральной молекулой [Rh(H₂O)₃Cl₃]⁰ [19].

Так как с ростом свободной кислотности наблюдается падение сорбционной активности, то можно сделать вывод о том, что в сорбционном процессе участвуют аквакомплексы платиновых металлов.

Изучено влияние окислительно-восстановительного потенциала раствора в интервале от 600 мВ до 900 мВ на процессы сорбционного концентрирования ионов Pt (IV), Pd (II) и Rh (III) на Lewatit AF5. Для коррекции окислительно-восстановительного потенциала использовали растворы сульфита натрия и хлората натрия концентрацией 1 моль/дм³.

Сорбционное концентрирование протекает наиболее эффективно при значении окислительно-восстановительного потенциала 700 мВ, это утверждение справедливо для каждого из исследуемых ионов металлов (рис. 3).

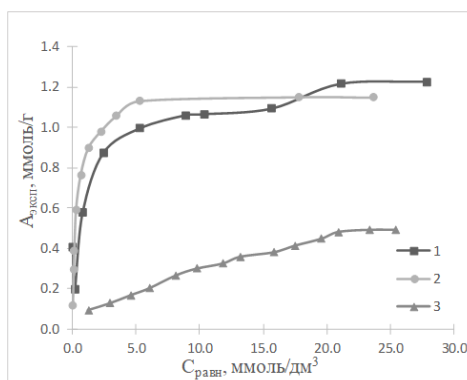


Рис. 4. Изотермы сорбции ионов [Pt(H₂O)Cl₃]⁻- [Pt(H₂O)Cl₅]⁻ (1), [Pd(H₂O)Cl₃]⁻ (2) и [Rh(H₂O)₃Cl₃]⁰ (3).
 Fig. 4. Sorption isotherms of [Pt(H₂O)Cl₃]⁻ [Pt(H₂O)Cl₅]⁻ (1), [Pd(H₂O)Cl₃]⁻ (2) and [Rh(H₂O)₃Cl₃]⁰ (3) ions.

Изотермы сорбции ионов Pt (IV), Pd (II) и Rh (III) в интервале исходных концентраций от 8.0-50.0 ммоль/дм³ представлены на рисунке 4.

Характер изотерм сорбции, приведенный на рис. 4, не позволяет однозначно определить тип адсорбционной изотермы. Поэтому экспериментальные данные были обработаны по уравнениям Ленгмюра и Фрейндлиха в линейной форме.

Уравнение Ленгмюра в линейных координатах имеет вид:

$$\frac{C_p}{A_{\text{эксп}}} = \frac{1}{A_{\infty} \cdot K} + \frac{1}{A_{\infty}} \cdot C_p, \quad (2)$$

где $A_{\text{эксп}}$ – количество сорбированного вещества (ммоль/г); C_p – равновесная концентрация ионов металлов, ммоль/дм³; A_{∞} – предельное значение абсорбции, K – константа Ленгмюра.

Уравнение Фрейндлиха в линейных координатах имеет вид:

$$\ln A_{\text{эксп}} = \ln K_f + \frac{1}{n} \cdot \ln C_p, \quad (3)$$

где $A_{\text{эксп}}$ – количество сорбированного вещества, ммоль/г; C_p – равновесная концентрация ионов металлов, ммоль/дм³; K_f и n – константы.

Для проверки применимости уравнения Фрейндлиха для описания сорбции был построен график, изображенный на

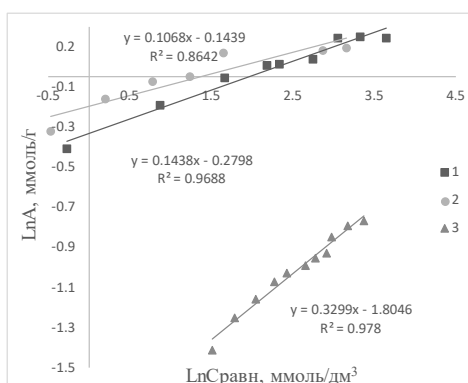


Рис. 5. Изотермы Фрейндлиха в линейных координатах для ионов $[Pt(H_2O)Cl_3]^-$, $[Pt(H_2O)Cl_5]^-$, $[Pd(H_2O)Cl_3]^-$ и $[Rh(H_2O)_3Cl_3]^0$.

Fig. 5. Freundlich isotherms in linear coordinates for the ions $[Pt(H_2O)Cl_3]^-$, $[Pt(H_2O)Cl_5]^-$, $[Pd(H_2O)Cl_3]^-$ and $[Rh(H_2O)_3Cl_3]^0$.

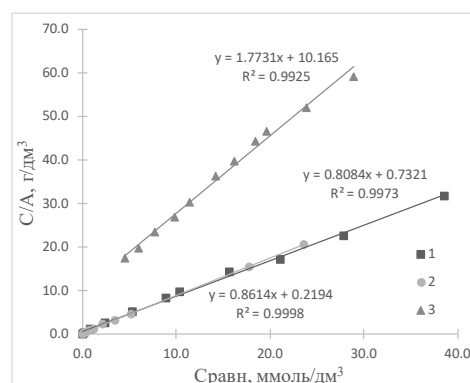


Рис. 6. Изотермы Ленгмюра в линейных координатах для ионов $[Pt(H_2O)Cl_3]^-$, $[Pt(H_2O)Cl_5]^-$, $[Pd(H_2O)Cl_3]^-$ и $[Rh(H_2O)_3Cl_3]^0$.

Fig. 6. Langmuir isotherms in linear coordinates for the ions $[Pt(H_2O)Cl_3]^-$, $[Pt(H_2O)Cl_5]^-$, $[Pd(H_2O)Cl_3]^-$ and $[Rh(H_2O)_3Cl_3]^0$.

Таблица 1. Константы уравнения Фрейндлиха
 Table 1. Constants of the Freundlich equation

	K_f	n	R
Pt	0.756	6.944	0.969
Pd	0.866	9.346	0.864
Rh	0.164	3.039	0.978

Таблица 2. Постоянные уравнения Ленгмюра.
 Table 2. Constants of the Langmuir equation

	A_∞ , ммоль/г	K_L	R
Pt	1.240	1.104	0.997
Pd	1.160	3.926	0.999
Rh	0.570	0.174	0.993

рис. 5. Константы K_f и n были определены графически по экспериментальным данным, величины приведены в таблице 1. Изотермы Ленгмюра в линейных координатах приведены на рисунке 6.

По экспериментальным данным были графически определены константы уравнения Ленгмюра и предельные значения адсорбции A_∞ (таблица 2).

Сравнение рис 5-6 показывает, что наиболее правильно описывать экспериментальные данные с помощью изотермы Ленгмюра, потому что коэффициенты корреляции для изотерм Ленгмюра для сорбции ионов $[Pt(H_2O)Cl_3]^-$, $[Pt(H_2O)Cl_5]^-$, $[Pd(H_2O)Cl_3]^-$ и $[Rh(H_2O)_3Cl_3]^0$ составили: 0.997; 0.999 и 0.993 соответственно

в отличие от коэффициентов корреляции для изотерм Френдлиха (0.969; 0.864 и 0.978).

Сорбционная емкость AF5 для ионов платины, палладия и родия составила 1.24; 1.16 и 0.57 ммоль/г соответственно. Полученные экспериментальные данные достаточно хорошо совпадают с теоретическими.

Возможность применения уравнения Ленгмюра, а также характер сорбционной изотермы позволяет сделать вывод о том, что молекулы удерживаются на поверхности сорбента за счет их взаимодействия с сорбционным центром, а также о том, что при отсутствии свободных сорбционных центров сорбция достигает своего предела.

Таблица 3. Сравнительные данные, полученные экспериментально и рассчитанные теоретически по уравнению Ленгмюра с экспериментально найденными коэффициентами, ммоль/г.

Table 3. Comparative data obtained experimentally and calculated theoretically using the Langmuir equation with experimentally found coefficients, mmol/g.

Платина			Палладий			Родий		
$A_{\text{эксп}}$	$A_{\text{теор}}$	Откл-е. %	$A_{\text{эксп}}$	$A_{\text{теор}}$	Откл-е. %	$A_{\text{эксп}}$	$A_{\text{теор}}$	Откл-е. %
0.195	0.182	6.43	0.116	0.111	4.10	0.257	0.247	3.91
0.575	0.562	2.31	0.297	0.285	4.19	0.301	0.286	5.00
0.871	0.891	-2.29	0.385	0.370	3.97	0.332	0.324	2.28
0.994	1.049	-5.53	0.589	0.558	5.28	0.361	0.356	1.5
1.059	1.116	-5.35	0.762	0.798	-4.74	0.372	0.376	0.16
1.064	1.131	-6.24	0.896	0.943	-5.27	0.390	0.403	-3.41
1.092	1.162	-6.44	0.978	1.029	-5.20	0.405	0.418	-3.34
1.215	1.179	2.94	1.055	1.074	-1.74	0.415	0.433	-4.31
1.225	1.191	2.77	1.129	1.103	2.33	0.421	0.440	-4.38
1.213	1.202	0.93	1.149	1.144	0.37	0.487	0.459	6.10

Заключение

Изучена кинетика сорбционного концентрирования ионов Pt(IV), Pd(II) и Rh(III) в хлоридных средах на AF5. Время, необходимое для достижения сорбционного равновесия составило 4 часа для каждого из металлов. Наиболее эффективно сорбционное концентрирование протекает из хлоридных растворов со значением свободной кислотности 0.01-0.1 моль/дм³ и окислительно-восстановительным потенциалом 700 мВ.

Экспериментальные данные показали применимость линейного уравнения изотермы Ленгмюра для описания процесса адсорбции, что говорит о распределении сорбированных молекулы по всей поверхности сорбента в виде монослоя. Были рассчитаны предельные значения адсорбции, с помощью которых проведена оценка сорбционной емкости AF5,

которая для Pt (II, IV), Pd (II) и Rh (III) составила 1.24 ммоль/г; 1.16 ммоль/г и 0.57 ммоль/г соответственно.

Так как достижение сорбционного равновесия происходит достаточно быстро без применения средств интенсификации процесса (ультрафиолетовой облучение, модификация сорбента, температурная обработка), а сорбент обладает высокими значениями сорбционной емкости, то можно сделать вывод о перспективности его применения для концентрирования металлов платиновой группы из солянокислых растворов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Izatt S.R., Bruening R.L., Izatt N.E. Metal separations and recovery in the mining industry // *Journal of the minerals metals & materials society*. 2012. Vol. 64. no 11. P. 1279-1284.

2. Барышников И.Ф., Попова Н.Н., Оробинская В.А. Пробоотбирание и анализ благородных металлов. М. Metallurgia. 1978. 430 с.

3. Печенюк С.И. Сорбционно-гидролитическое осаждение платиновых металлов на поверхности неорганических сорбентов. Ленинград. Наука. 1991. 246 с.



4. Малофеева Г.И., Петрухин О.М., Муринов Ю.И., Золотов Ю.А. Гетероцепные полимеры – комплексообразующие сорбенты нового типа // *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*. 1988. Т. 31, № 5. С. 3-14.
5. Васильева И.Е., Пожидаев Ю.Н., Власова Н.Н., Воронков М.Г., Филипченко Ю.А. Сорбционно-атомно-эмиссионное определение золота, платины и палладия в горных породах и рудах с использованием сорбента ПСТМ-ЗТ // *Аналитика и контроль*. 2010. Т. 14, №1. С. 16-24
6. Лосев В.Н., Буйко О.В., Величко Б.А. Сорбционно-атомно-эмиссионное определение цветных и тяжелых металлов с использованием фитосорбентов // *Journal of Siberian Federal University*. 2010. Т. 3, 1. С. 73-78.
7. Золотов Ю.А., Цизин Г.И., Дмитриенко С.Г., Моросанова Е.И. Сорбционное концентрирование микрокомпонентов из растворов. Применение в неорганическом анализе. М. Наука. 2007. 320 с.
8. Мясоедова Г.В., Комозин П.Н. Комплексообразующие сорбенты для извлечения и концентрирования платиновых металлов // *Журнал неорганической химии*. 1994. Т. 39, № 2. С. 280-288.
9. Рунов В.К., Стрепетова Т.В., Пуховская В.М., Трофимчук А.К., Кузьмин Н.М. Сорбция хлоридных комплексов платиновых металлов и золота анионообменниками на основе кремнезема // *Журнал аналитической химии*. 1993. Т. 48, № 11. С. 43-49.
10. Милютина А.Д., Колесников В.А., Колесников А.В. Сорбционные характеристики углеродных наноматериалов по отношению к ионам Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} // *Успехи в химии и химической технологии*. 2016. Т. 30, № 1. С. 42-43.
11. Дударева Г.Н., Иринчинова Н.В., Дударев В.И., Петухова Г.А. изучение сорбционного извлечения никеля(II) из водных растворов // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2019. Т. 55, № 5. С. 488-495.
12. Славинская Г.В., Ковалева О.В., Бычкова Г.И. Использование активных углей сорбции ПАВ природного происхождения // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2008. Т.8, №4. С. 626-635.
13. Головизин В.С., Левченко Л.М., Трубин С.В. Саланов А.Н., Серкова А.Н. Сорбция платинохлористоводородной кислоты модифицированными углеродными материалами // *Вестник МИТХТ*. 2012. Т. 7, № 1. С. 23-28.
14. Тарасенко Ю.А., Багреев А.А., Яценко В.В. Селективность восстановительной сорбции благородных металлов активными углями // *Журнал физической химии*. 1993. Т. 67, № 11. С. 2328-2332.
15. Van Dam H.E., Van Bekkum H. Preparation of platinum on activated carbon // *Journal of Catalysis*. 1991. Vol. 131, no 2. P. 335-349.
16. Агеева Л.Д., Буйновский А.С., Колпакова Н.А., Ковыркина Т.В. Совместное определение в рудах и концентратах золота, серебра и металлов платиновой группы. Северск. СГТИ. 2003. 99 с.
17. Романенко А. В. Симонов П. А. Углеродные материалы и их физико-химические свойства. Москва, Калвис, 2007, 128 с.
18. Nikoloski A.N., Kwang-Loon Ang. Review of the application of ionexchange resins for the recovery of platinum-group metals from hydrochloric acid solutions // *Journal of mineral processing and extractive metallurgy review*. 2014. Vol 35, no 6. P. 369-389.
19. Золотов Ю.А., Варшал Г.М., Иванов В.М. Аналитическая химия металлов платиновой группы. М. Едиториал УРСС. 2003. 592 с.

References

1. Izatt S.R., Bruening R.L., Izatt N.E. Metal separations and recovery in the mining industry. *Journal of the minerals metals & materials society*. 2012; 64(11): 1279-1284. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0452-8>



2. Baryshnikov I.F., Popova N.N., Orbinskaja V.A. Probootbiranie i analiz blagorodnykh metallov. M., Metallurgija, 1978, 430 p.
3. Pechenyuk S.I. Sorbtionno-gidroliticheskoe osazhdenie platinovykh metallov na poverkhnosti neorganicheskikh sorbentov. Leningrad, Nauka, 1991, 246 p.
4. Malofeeva G.I., Petrukhin O.M., Murinov Yu.I., Zolotov Yu.A. Geterotsepnye polimery – kompleksoobrazuyushchie sorbenty novogo tipa. *Izvestiya VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 1988; 31(5): 3-14. (In Russ.)
5. Vasil'eva I.E., Pozhidaev Yu.N., Vlasova N.N., Voronkov M.G., Filipchenko Yu.A. Sorbtionno-atomno-emissionnoe opredelenie zolota, platiny i palladiya v gornykh porodakh i rudakh s ispol'zovaniem sorbenta PSTM-ZT, *Analitika i kontrol'*, 2010; 14(1): 16-24. (In Russ.)
6. Losev V.N., Buiko O.V., Velichko B.A. Sorbtionno-atomno-emissionnoe opredelenie tsvetnykh i tyazhelykh metallov s ispol'zovaniem fitosorbentov. *Journal of Siberian Federal University*, 2010; 3: 73-78. (In Russ.)
7. Zolotov Yu.A., Tsizin G.I., Dmitrienko S.G., Morosanova E.I. Sorbtionnoe kontsentrirvanie mikrokomponentov iz rastvorov. *Primenenie v neorganicheskom analize*. M., Nauka, 2007, 320 p.
8. Myasoedova G.V., Komozin P.N. Kompleksoobrazuyushchie sorbenty dlya izvlecheniya i kontsentrirvaniya platinovykh metallov, *Zhurnal neorganicheskoi khimii*, 1994; 39(2): 280-288. (In Russ.)
9. Runov V.K., Strepetova T.V., Pukhovskaya V.M., Trofimchuk A.K., Kuz'min N.M. Sorbtisiya khlordnykh kompleksov platinovykh metallov i zolota anionoobmennikami na osnove kremnezema. *Zhurnal analiticheskoi khimii*, 1993; 48(11): 43-49. (In Russ.)
10. Milyutina A.D., Kolesnikov V.A., Kolesnikov A.V. Sorbtionnye kharakteristiki uglerodnykh nanomaterialov po otnosheniyu k ionam Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} . *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2016; 30(1): 42-43. (In Russ.)
11. Dudareva G.N., Irinchinova N.V., Dudarev V.I., Petukhova G.A. izuchenie sorbtionnogo izvlecheniya nikelya(II) iz vodnykh rastvorov. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*. 2019; 55(5): pp. 488-495.
12. Slavinskaya G.V., Kovaleva O.V., Bychkovskaya G.I. Ispol'zovanie aktivnykh uglei sorbtsii PAV prirodnoho proiskhozhdeniya. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2008; 8(4): 626-635. (In Russ.)
13. Golovizin V.S., Levchenko L.M., Trubin S.V., Salanov A.N., Serkova A.N. Sorbtisiya platinokhloristovodorodnoi kisloty modifitsirovannymi uglerodnymi materialami. *Vestnik MITKhT*. 2012; 7(1): 23-28. (In Russ.)
14. Tarasenko Yu.A., Bagreev A.A., Yatsenko V.V. Selektivnost' vosstanovitel'noi sorbtsii blagorodnykh metallov aktivnymi uglyami. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 1993; 67(11): 2328-2332.
15. Van Dam H.E., Van Bekkum H. Preparation of platinum on activated carbon. *Journal of Catalysis*. 1991; 131(2): 335-349. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(91\)90269-A](https://doi.org/10.1016/0021-9517(91)90269-A)
16. Ageeva L.D., Buinovskii A.S., Kolkakova N.A., Kovyorkina T.V. Sovmestnoe opredelenie v rudakh i kontsentratakh zolota, srebra i metallov platinovoi gruppy. Seversk, SGTI, 2003, 99 p. (In Russ.)
17. Romanenko A.V., Simonov P.A. Uglerodnye materialy i ikh fiziko-khimicheskie svoistva. M., Kalvis, 2007, 128 p. (In Russ.)
18. Nikoloski A.N., Kwang-Loon Ang. Review of the application of ionexchange resins for the recovery of platinum-group metals from hydrochloric acid solutions. *Journal of mineral processing and extractive metallurgy review*. 2014; 35(6): 369-389. <https://doi.org/10.1080/08827508.2013.764875>
19. Zolotov Yu.A., Varshal G.M., Ivanov V.M. Analiticheskaya khimiya metallov



platinovoi gruppy. M., Editorial URSS,
2003, 592 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

А.Е. Высотина – аспирант инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский томский политехнический университет, Томск. Научный сотрудник научно-технологического центра ОАО «Красцветмет», Красноярск, Россия

Г.Б. Слепченко – д.х.н., профессор отделения химической инженерии исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Национальный исследовательский томский политехнический университет, Томск, Россия

A.E. Vysotina – the postgraduate student of the School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk. Researcher at the Scientific and Technological Center of OJSC Krastsvetmet, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: a.vysotina@krastsvetmet.ru

G.B. Slepchenko – Doctor of Chemistry, Professor of the Department of Chemical Engineering, Research School of Chemical and Biomedical Technologies National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Статья поступила в редакцию 07.07.2023; одобрена после рецензирования 24.07.2023; принята к публикации 02.08.2023.

The article was submitted 07.07.2023; approved after reviewing 24.07.2023; accepted for publication 02.08.2023.