



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.723

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12408

### Сорбция платиновых элементов углеродным композитом из солянокислого раствора аффинажного производства

Алиса Валерьевна Бардыш<sup>1✉</sup>, Алина Евгеньевна Высотина<sup>2</sup>,  
Родион Георгиевич Калинин<sup>3</sup>, Ирина Дмитриевна Трошкина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия, bardysh0101@mail.ru ✉

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>3</sup>ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н. Гулидова», Красноярск, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена изучению динамических сорбционных характеристик углеродного композита в сравнении с активированным углем марки ВСК, служащим основой композита, и гранулированным карбонизированным микропористым адсорбентом марки Lewatit AF-5.

Сорбционное концентрирование металлов платиновой группы из технологического раствора аффинажного производства осуществляли в динамических условиях. Перед проведением сорбционных экспериментов было проведено контактирование углеродных сорбентов с деионизированной водой в течение 3 ч, после чего сорбенты загружали в сорбционную колонку и кондиционировали соляной кислотой с концентрацией 2 М в динамическом режиме в течение 3 ч со скоростью 3 К.О./ч. После проведения кондиционирования через сорбционную колонку пропускали исходный раствор со скоростью 1 К.О./ч в течение 30 ч. Выходящий из колонки раствор отбирали с помощью коллектора фракций так, чтобы объем одной фракции был равен 2 К.О. Концентрацию элементов платиновой группы в растворах определяли с помощью атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Полные динамические емкости углеродного композита, исходного активированного угля и сорбента Lewatit AF-5 по платине составили 1.59 мг/г (0.546 мг/см<sup>3</sup>), 1.59 мг/г (0.535 мг/см<sup>3</sup>) и 0.77 мг/г (0.462 мг/см<sup>3</sup>), по палладию – 26.7 мг/г (9.16 мг/см<sup>3</sup>), 25.8 мг/г (8.68 мг/см<sup>3</sup>) и 15.4 мг/г (9.24 мг/см<sup>3</sup>), соответственно.

Была определена степень сорбции платины исходным активированным углем ВСК, углеродным композитом и адсорбентом Lewatit AF-5, которая составила: 35.7, 37.7 и 32.2 % соответственно. Степень сорбции палладия этими материалами составила 38.4, 39.4 и 40.9 % соответственно.

Для определения динамических характеристик сорбции платины и палладия использовали модели Томаса, Юна-Нельсона и BDST (модель времени работы толщины слоя). Наибольшее значение коэффициента детерминации (0.9736) наблюдается при обработке данных выходной кривой сорбции палладия углеродным композитом по модели Томаса. Константа Томаса  $K_T$  составила  $5.57 \cdot 10^{-4}$  дм<sup>3</sup>/(мг·ч).

Для элюирования платиновых элементов с углеродных материалов использовали раствор 5% тиомочевины в 0.5 М HCl и царскую водку. Десорбцию платиновых элементов тиомочевинной проводили в динамических условиях, десорбирующий раствор пропускали со скоростью 1 К.О./ч. в течение 10 ч снизу вверх при температуре 55°C. Концентрация платины в тиомочевинных элюатах не превысила 0.04 ммоль/дм<sup>3</sup>, палладия 0.27 ммоль/дм<sup>3</sup>.

Десорбцию платиновых элементов раствором царской водки проводили в статических условиях при постоянном перемешивании, температуре 100°C и соотношении фаз сорбента к элюенту 1 : 4.5. Концентрация платины в элюате составила от 0.50 до 0.75 ммоль/дм<sup>3</sup>, палладия – от 19.8 до 22.1 ммоль/дм<sup>3</sup>. Среднее значение коэффициентов концентрирования платины и палладия при десорбции их царской водкой с углеродного композита и активированного угля ВСК составило 3.0, в отличие от значений для адсорбента AF-5, при десорбции с которого значение коэффициента концентрирования платины составило 2.0, палладия – 2.9.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности сорбционного извлечения платиновых металлов выбранным углеродным композитом из сложных по составу растворов аффинажного производства с их последующим элюированием раствором царской водки.

**Ключевые слова:** сорбция, платиновые металлы, динамика, углеродный композит, углеродный сорбент, соляная кислота.



Для цитирования: Бардыш А.В., Высотина А.Е., Калинин Р.Г., Трошкина И.Д. Сорбция платиновых элементов углеродным композитом из солянокислого раствора аффинажного производства // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 4. С. 520-529. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12408>

Original article

## Sorption of platinum elements by carbon composite from hydrochloric acid solution of the refining plant

Alisa V. Bardysh<sup>1</sup>, Alina A. Vysotina<sup>2</sup>, Rodion G. Kalinin<sup>3</sup>, Irina D. Troshkina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation, bardysh0101@mail.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>3</sup>OJSC Gulidov Krasnoyarsk Non-Ferrous Metals Plant, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Abstract.** The article is dedicated to the study of the dynamic sorption characteristics of carbon composite in comparison with VSK activated carbon, acting as the basis of the composite, and granular carbonised microporous Lewatit AF-5 adsorbent.

Sorption concentration of platinum metals from the technological solution of the refining plant was performed in dynamic conditions. Before the sorption experiments, the carbon sorbents were contacted with deionised water for 3 hours, after which the sorbents were placed into a sorption column and conditioned with hydrochloric acid with a concentration of 2 M in a dynamic mode for 3 hours at a rate of 3 C.V./h. After conditioning, the initial solution was passed through the sorption column at a rate of 1 C.V./h for 30 minutes. The solution released from the column was selected using fraction collector so that the volume of one fraction was 2 C.V. (column volume). Concentrations of platinum elements in solutions were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry.

Total dynamic capacities of the carbon composite, the initial activated carbon, and the Lewatit AF-5 sorbent were 1.59 mg/g (0.546 mg/cm<sup>3</sup>), 1.59 mg/g (0.535 mg/cm<sup>3</sup>), and 0.77 mg/g (0.462 mg/cm<sup>3</sup>) for platinum, and 26.7 mg/g (9.16 mg/cm<sup>3</sup>), 25.8 mg/g (8.68 mg/cm<sup>3</sup>), and 15.4 mg/g (9.24 mg/cm<sup>3</sup>) for palladium, respectively. The degree of platinum sorption by the initial VSK activated carbon, carbon composite, and Lewatit AF-5 adsorbent was determined and amounted to 35.7, 37.7, and 32.2%, respectively. The degree of palladium sorption by these materials was 38.4, 39.4, and 40.9%, respectively.

To determine the dynamic characteristics of platinum and palladium sorption, we used the Thomas, Yoon-Nelson, and BDST (bed depth service time) models. The highest value of the determination coefficient (0.9736) was observed when processing the data of the output curve of palladium sorption by the carbon composite according to the Thomas model. Thomas constant  $K_T$  was  $5.57 \cdot 10^{-4} \text{ dm}^3/(\text{mg} \cdot \text{h})$ .

A 5% thiourea solution in 0.5 M HCl and aqua regia were used to elute platinum elements from carbon materials. Desorption of platinum elements with thiourea was conducted in dynamic conditions, and the desorbing solution was passed bottom up at a rate of 1 C.V./h for 10 hours at a temperature of 55°C. The concentration of elements in thiourea eluates did not exceed 0.04 mmol/dm<sup>3</sup> for platinum and 0.27 mmol/dm<sup>3</sup> for palladium. Desorption of platinum elements with aqua regia solution was performed in static conditions with constant stirring, a temperature of 100°C, and a sorbent to eluent phase ratio of 1 : 4.5. The concentration in the eluate ranged from 0.50 to 0.75 mmol/dm<sup>3</sup> for platinum and from 19.8 to 22.1 mmol/dm<sup>3</sup> for palladium.

The average value of the concentration ratios of platinum and palladium during their desorption with aqua regia from a carbon composite and VSK activated carbon was 3.0, which stood in contrast with the values for the AF-5 adsorbent the desorption of which resulted in the concentration ratio of 2.0 for platinum and 2.9 for palladium.

Thus, it can be concluded that it is possible to extract platinum metals by the selected carbon composite from complex solutions of the refining plant with their further elution with an aqua regia solution.

**Keywords:** sorption, platinum metals, dynamics, carbon composite, carbon sorbent, hydrochloric acid

**For citation:** Bardysh A.V., Vysotina A.E., Kalinin R.G., Troshkina I.D. Sorption of platinum elements by carbon composite from hydrochloric acid solution of the refining plant. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2024. 24(4): 520-529. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12408>

### Введение

Сорбционное концентрирование является эффективным способом извлечения

платиновых элементов из растворов сложного состава [1]. Этот метод находит применение как в качестве технологиче-

ской операции, позволяющей снизить потери платиновых элементов со сточными водами, так и в качестве подготовительной стадии для последующего аналитического определения инструментальными методами. В связи с этим поиск сорбентов, способных к количественному и селективному извлечению платиновых элементов, является актуальной задачей.

Углеродные материалы – эффективные сорбенты, которые используются благодаря пористой структуре с относительно большой площадью поверхности. Стадия модифицирования улучшает сорбционно-десорбционные характеристики при извлечении элементов из растворов различного состава [2].

Цель работы – изучение динамических характеристик углеродного композита на основе активированного угля при сорбции платины и палладия из солянокислого раствора аффинажного производства.

### Экспериментальная часть

В работе изучены динамические сорбционные характеристики углеродного композита, полученного в РХТУ им. Д.И. Менделеева, в сравнении с активированным углем марки ВСК, служащего осно-

вой композита, и гранулированным карбонизированным микропористым сорбентом марки Lewatit AF-5 (Lanxess Deutschland GmbH, Германия). Физико-химические свойства используемых для сравнения сорбентов представлены в табл. 1.

Активированный уголь марки ВСК с тонкопористой структурой изготовлен из скорлупы кокосового ореха (АО «ЭНПО Неорганика»). Углеродный композит, представляющий собой гранулы черного цвета неправильной формы с размером 3-4 мм, получен методом пропитывания этого угля раствором фторопласта.

Объектом исследования является солянокислый технологический раствор аффинажного производства, элементный состав которого приведен в табл. 2. Свободная кислотность раствора составляла 4.16 М, рН – -0.017 плотность  $\rho$  – 1.1514 г/см<sup>3</sup>, окислительно-восстановительный потенциал  $E_{ов}$  – 260.6 мВ.

Анализ элементов в растворе осуществляли с использованием атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на приборе Prodigy 7 ICP-OES (США).

Для исследования поверхности исходного активированного угля, углеродного

Таблица 1. Основные характеристики материалов  
 Table 1. Main characteristics of materials

Показатели	Активированный уголь ВСК	Адсорбент Lewatit AF-5 [3]	Углеродный композит
1. Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0.385	0.602	0.343
2. Объем пор, см <sup>3</sup> /г:	-	0.15	-
- суммарный	0.98	0.54	-
- макропор	0.05	-	-
- мезопор	0.10	0.05	-
- микропор	0.83	0.49	0.65
3. Размер (ширина) микропор, нм	1.51	-	-
4. Диаметр пор,	-	8	-
5. Адсорбционная способность, мг/г			
- по йоду	1150	-	-
- по метиленовому голубому	327	-	-
6. Размер гранул, мм	3-4	0.4-0.8	3-4

Таблица 2. Элементный состав солянокислого раствора аффинажного производства  
 Table 2. Elemental composition of hydrochloric acid solution from refining production

Элемент	Pt	Pd	Rh	Ir	Ru	Au	Ag
С, ммоль/дм <sup>3</sup>	0.25	7.07	0.75	0.05	0.60	$2.5 \cdot 10^{-3}$	5.94
Элемент	Cu	Fe	Ni	Pb	Sb	Se	Te
С, ммоль/дм <sup>3</sup>	38.5	$5.18 \cdot 10^2$	12.7	0.76	0.19	$6.3 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$

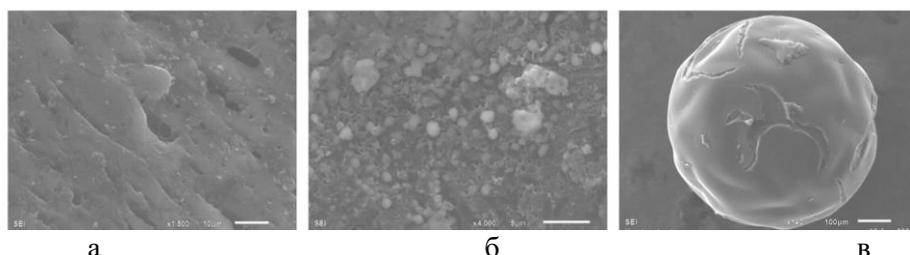


Рис.1. Микрофотографии поверхности сорбентов: а – исходный уголь ВСК, х1500, б – углеродный композит, х4000, в – Lewatit AF-5, х140  
 Fig. 1. Microphotographs of the surface of sorbents: a – initial VSK coal, x1500, b – carbon composite, x4000, c – Lewatit AF-5, x140

композиата и адсорбента Lewatit AF-5 применен метод электронной микроскопии с использованием растрового электронного микроскопа JEOL 6610 LV с энергодисперсионным микроанализом INCA (спектрометр Oxford Instruments X-MAX 20 mm<sup>2</sup>, Великобритания). В отличие от поверхности исходного угля (рис. 1а) на микрофотографии поверхности углеродного композита (рис. 1б) виден закрепленный полимер в виде глобул размером 1-5 мкм.

Истинную плотность углеродного композита (табл. 1) определяли с помощью автоматического гелиевого пикнометра AccuPyc 1340 (Micromeritics Instrument Corp., США). Объем микропор в нем (табл. 1) рассчитан обработкой данных, полученных с использованием автоматического анализатора удельной поверхности и пористости ASAP 2020MP (Micromeritics Instrument Corp., США).

Сорбцию элементов из солянокислого технологического раствора аффинажного производства изучали в динамических условиях. Навеску углеродных материалов загружали в колонку, через которую пропускали исходный раствор со скоро-

стью 1 К.О./ч в течение 30 ч. Предварительно было проведено контактирование углеродного композита с деионизированной водой в течение 3 ч, после чего материалы кондиционировали соляной кислотой с концентрацией 2 М в течение 3 ч со скоростью 3 К.О./ч.

### Обсуждение результатов

Выходные кривые сорбции платины и палладия выбранными материалами из технологического раствора приведены на рис. 2 (а, б). Восходящий характер кривой сорбции палладия для углеродного композита свидетельствует о большей емкости углеродного композита по палладию в сравнении с емкостью исходного угля. Полная динамическая емкость углеродного композита, исходного активированного угля и сорбента Lewatit AF-5 по платине составила 1.59 мг/г (0.546 мг/см<sup>3</sup>), 1.59 мг/г (0.535 мг/см<sup>3</sup>) и 0.77 мг/г (0.462 мг/см<sup>3</sup>), по палладию – 26.7 мг/г (9.16 мг/см<sup>3</sup>), 25.8 мг/г (8.68 мг/см<sup>3</sup>) и 15.4 мг/г (9.4 мг/см<sup>3</sup>), соответственно.

Сорбция платины и палладия использованными в работе углеродными материалами предположительно проходит по

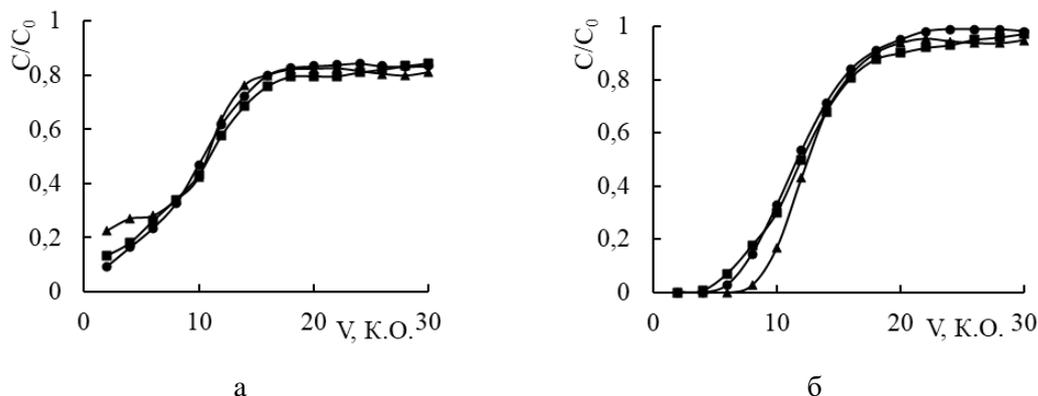
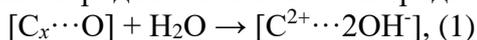


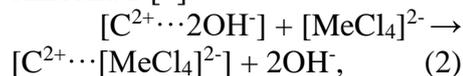
Рис. 2. Выходные динамические кривые сорбции платины (а) и палладия (б) исходным углем (●), углеродным композитом (■), Lewatit AF-5 (▲)  
Fig. 2. Output dynamic sorption curves for platinum (a) and palladium (b) original carbon (●), carbon composite (■), Lewatit AF-5 (▲)

механизму анионного обмена. В соответствии с данными [4] при контакте с атмосферой и водным раствором активированные угли (АУ) функционируют в качестве кислородного газового электрода:



где  $[C^{2+} \cdots 2OH^-]$  – положительно заряженная поверхность АУ с ионами  $OH^-$  в наружной обкладке двойного электрического слоя.

Реакция анионного обмена с образованием поверхностных комплексов металл-углерод описана в [5]:



В статье [6] описана возможность восстановления платиновых элементов на поверхности угля в случае, если равновесный потенциал реакции термодинамического восстановления платиновых элементов положительнее рабочего потенциала поверхности АУ. В этом случае при сорбции платиновых элементов из этого раствора одновременно с процессом, описанным выше, может протекать и электрохимическое восстановление.

Степень извлечения ( $\epsilon$ ) для исходного активированного угля ВСК, углеродного композита и адсорбента Lewatit AF-5 по платине составила 35.7, 37.7 и 32.2% соответственно.

Для определения динамических характеристик сорбции платины и палладия

использовали модели Томаса [7], Юна-Нельсона [8] и BDST (модель времени работы толщины слоя) [9].

Модель Томаса предполагает, что равновесные данные сорбции описываются изотермой Ленгмюра, кинетические – обратимой моделью второго порядка. Линеаризованная форма модели Томаса представлена уравнением (3)

$$\ln \left( \frac{C_0}{C} - 1 \right) = \frac{K_T q_0 m}{Q} - K_T C_0 t, \quad (3)$$

где  $C_0$  – концентрация в исходном растворе, мг/дм<sup>3</sup>;  $C$  – концентрация в элюате, мг/дм<sup>3</sup> в момент времени  $t$ , мин;  $K_T$  – константа скорости Томаса, дм<sup>3</sup>/(мин·мг),  $q_0$  – сорбционная емкость по извлекаемому компоненту, мг/г,  $Q$  – расход раствора, дм<sup>3</sup>/мин,  $m$  – масса сорбента, г.

Линеаризованные данные выходных кривых сорбции платины и палладия углеродными материалами по модели Томаса представлены на рис. 3.

Модель Юна-Нельсона учитывает вероятность проскока извлекаемого компонента и описывается уравнением (4),

$$\ln \frac{C}{C_0 - C} = K_{YN} t - \tau K_{YN}, \quad (4)$$

где  $t$  – время, мин,  $K_{YN}$  – величина константы, 1/мин,  $\tau$  – время, требуемое для проскока 50 % извлекаемого компонента, мин.

Линеаризованные кривые по модели Юна-Нельсона представлены на рис. 4.

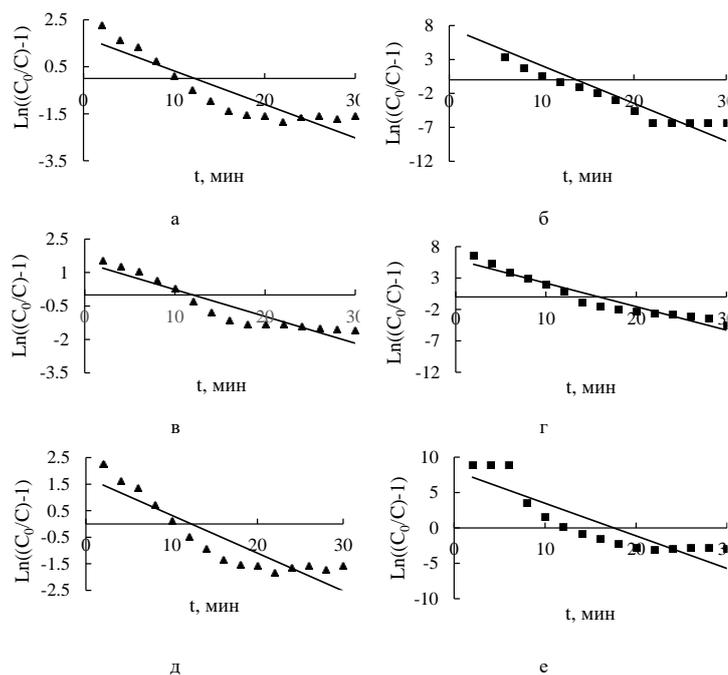


Рис. 3. Линеаризация данных выходных кривых сорбции платины (▲) и палладия (■) по модели Томаса: исходный активированный уголь (а, б), углеродный композит (в, г), адсорбент Lewatit AF-5 (д, е)

Fig. 3. Linearization of the output curves of platinum (▲) and palladium (■) sorption according to the Thomas model: initial activated carbon (a, b), carbon composite (c, d), Lewatit AF-5 adsorbent (e, f)

Модель BDST основана на предположении, что скорость адсорбции лимитируется реакцией между сорбатом и свободным участком сорбента. При этом скорость процесса не контролируется диффузией. Модель описывается уравнением (5):

$$t = \frac{N_0 Z_0}{C_0 u} - \frac{1}{K_{ads} C_0} \ln \left( \frac{C_0}{C} - 1 \right), \quad (5)$$

где  $k_{ads}$  – константа скорости адсорбции, отвечающая за массоперенос из глубины раствора к поверхности сорбента, мин/(моль·дм<sup>3</sup>),  $C_0$  – концентрация металла в исходном растворе, мг/дм<sup>3</sup>;  $C$  – концентрация металла в порции выходящего раствора, мг/дм<sup>3</sup>;  $N_0$  – динамическая емкость колонки, мг/дм<sup>3</sup>;  $Z_0$  – высота колонки, см;  $U_0$  – линейная скорость потока, см/ч.

Линеаризованные кривые по модели BDST представлены на рис. 5.

В табл. 3 приведены результаты обработки кривых сорбции платины и палладия по различным моделям. Как видно из

табл. 3, наибольшее значение коэффициента детерминации (0.9736) наблюдается при обработке данных выходной кривой сорбции палладия углеродным композитом по модели Томаса с константой  $K_T 5.57 \cdot 10^{-4}$  дм<sup>3</sup>/(мг·ч).

Для элюирования платиновых элементов с углеродных материалов использовали раствор 5% тиомочевины в 0.5 М HCl и царскую водку.

Материалы после сорбции промывали подаваемым снизу вверх раствором соляной кислоты с концентрацией 0,5 М со скоростью 3 К.О./ч. в течение 1 ч. Стадия промывки необходима для удаления исходного раствора из межгранульного пространства. Десорбцию платиновых элементов проводили в динамических условиях: после промывки десорбирующий раствор пропускали со скоростью 1 К.О./ч. в течение 10 ч снизу вверх при

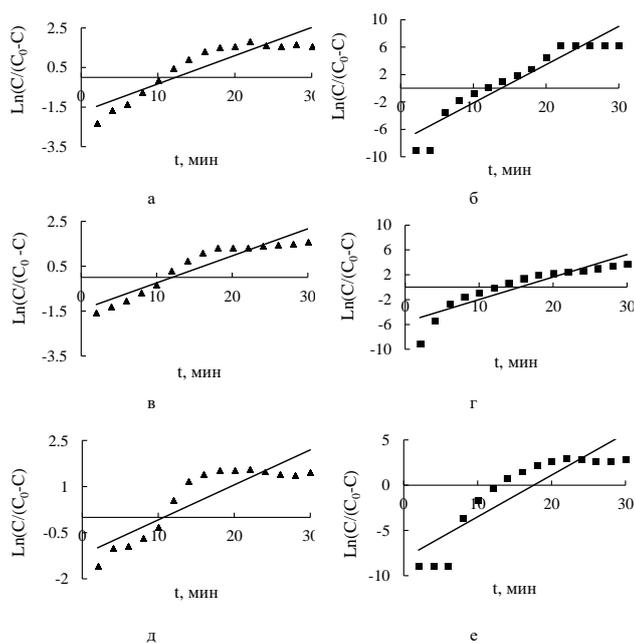


Рис. 4. Линеаризация данных выходных кривых сорбции платины (▲) и палладия (■) по модели Юна-Нельсона: исходным активированным углем (а, б), углеродным композитом (в, г), адсорбентом Lewatit AF-5 (д, е)

Fig. 4. Linearization of the output sorption curves of platinum (▲) and palladium (■) according to the Yoon-Nelson model: initial activated carbon (a, b), carbon composite (c, d), Lewatit AF-5 adsorbent (e, f)

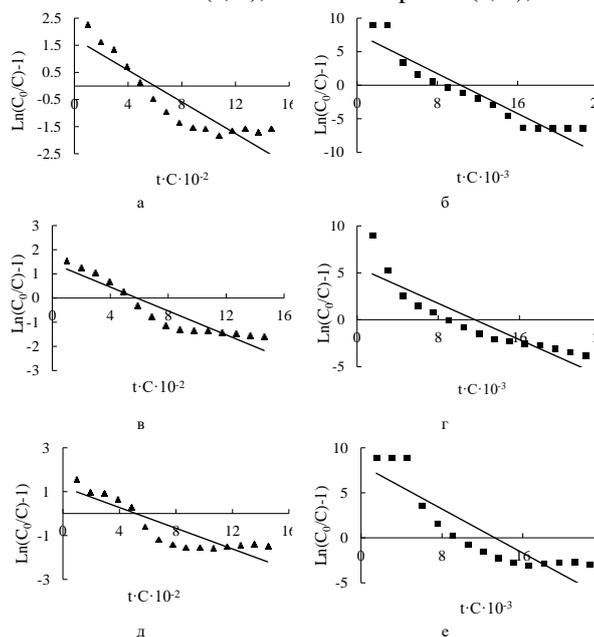


Рис. 5. Линеаризация данных выходных кривых сорбции платины (▲) и палладия (■) по модели BDST: исходным активированным углем (а, б), углеродным композитом (в, г), адсорбентом Lewatit AF-5 (д, е)

Fig. 5. Linearization of the output curves of sorption of platinum (▲) and palladium (■) according to the BDST model: with the original activated carbon (a, b), carbon composite (c, d), Lewatit AF-5 adsorbent (e, f)

температуре 55°C. Стабильность температуры контролировали с помощью электронной контактной термопары ИКА ETS-D5 (США). В качестве десорбента

использовали раствор 5% тиомочевины в 0.5 М HCl. Регенерацию сорбента после десорбции проводили раствором 0.5 М

Таблица 3. Математическое моделирование динамики сорбции платины и палладия углеродным композитом

Table 3. Mathematical processing of the dynamics of sorption of platinum and palladium by a carbon composite

Элемент	Модель Томаса			Модель Юна-Нельсона			Модель BDST		
	$K_T, \text{дм}^3/(\text{мг} \cdot \text{ч}) \cdot 10^4$	$q_0, \text{мг/г}$	$R^2$	$K_{YN}, 1/\text{ч} \cdot 10^3$	$\tau_{0.5}, \text{ч}$	$R^2$	$K_{ads}, \text{дм}^3/(\text{мг} \cdot \text{ч}) \cdot 10^3$	$N_0, \text{мг/дм}^3$	$R^2$
Углеродный композит									
Pt	40.7	1.59	0.882	77.0	15	0.882	2.63	548	0.882
Pd	5.57	26.7	0.974	50.0		0.819	0.90	8910	0.819
Активированный уголь ВСК									
Pt	55.2	1.59	0.825	64.5	15	0.825	4.78	534	0.819
Pd	8.41	25.7	0.894	69.0		0.894	1.59	8678	0.94
Адсорбент Lewatit AF-5									
Pt	54.4	0.77	0.825	78.3	15	0.785	3.61	467	0.785
Pd	11.1	15.4	0.786	49.5		0.786	11.1	9245	0.786

Таблица 4. Десорбция платины и палладия с выбранных материалов элюентами различного состава

Table 4. Desorption of platinum and palladium from selected materials by eluents of various compositions

Элемент	Концентрация элементов в элюате, ммоль/дм <sup>3</sup> при использовании элюентов состава:		Коэффициент концентрирования (для царской водки)
	5% тиомочевины в 0.5 М HCl*	Царская водка	
Углеродный композит			
Pt	0.01	0.75	3.0
Pd	0.27	19.8	2.8
Исходный активированный уголь ВСК			
Pt	0.01	0.73	2.9
Pd	0.22	22.1	3.1
Адсорбент Lewatit AF-5			
Pt	0.04	0.50	2.0
Pd	0.25	20.15	2.9

\* суммарная концентрация элементов в элюате, ммоль/дм<sup>3</sup>

HCl, подаваемым снизу вверх, со скоростью 3 К.О./ч. в течение 1 ч.

Данные, представленные в табл. 4, свидетельствуют, что десорбция раствором тиомочевины прошла неэффективно. Низкая эффективность элюирования платиновых элементов раствором тиомочевины свидетельствует о том, что сорбционное концентрирование протекает преимущественно по механизму электрохимического восстановления.

Концентрация платины в элюате не превысила 0.04 ммоль/дм<sup>3</sup>, палладия – 0.27 ммоль/дм<sup>3</sup> (табл. 4). Тем не менее сравнение концентрации элементов в

элюате показывает, что значение ее выше при использовании углеродного композита по отношению к исходному активированному углю, что может быть связано с изменением потенциала поверхности угля при использовании модификатора.

Десорбцию раствором царской водки проводили в статических условиях при постоянном перемешивании, температуре 100°C и соотношении фаз сорбента к элюенту 1 : 4.5 (20 см<sup>3</sup> сорбента : 90 см<sup>3</sup> царской водки). Результаты десорбции платины и палладия царской водкой из технологического раствора аффинажного производства представлены в табл. 4.

Концентрация платины в элюате при десорбции с углеродного композита и активированного угля ВСК ( $0.75$  и  $0.73$  ммоль/дм<sup>3</sup>) превысила ее содержание в элюате при десорбции с адсорбента AF-5 на ~48 %, палладия при концентрациях в элюате  $19.8$  и  $22.1$  ммоль/дм<sup>3</sup> на ~3.9 % (табл. 4). Таким образом, среднее значение коэффициентов концентрирования платины и палладия при десорбции с углеродного композита и активированного угля ВСК составило  $3.0$ , в отличие от значений для AF-5, при десорбции с которого значение коэффициентов составило  $2.0$  для платины и  $2.9$  для палладия.

Для оценки полноты смывания элементов царской водкой после проварки было проведено мокрое озоление навески АУ ВСК, углеродного композита и сорбента Lewatit AF-5. Остаточное содержание платины в материалах после десорбции царской водкой составило  $0.02$  ммоль/дм<sup>3</sup> для АУ ВСК и углеродного композита,  $0.19$  ммоль/дм<sup>3</sup> для Lewatit AF-5, а палладия  $0.89$ ,  $0.53$  и  $0.52$  ммоль/дм<sup>3</sup>, соответственно. Степень десорбции платины царской водкой, с учетом этих данных, для АУ ВСК и углеродного композита составила  $99.3$  %,  $91.8$  % для сорбента Lewatit AF-5, палладия с угля ВСК –  $98.8$ %, с углеродного композита и сорбента Lewatit AF-5 –  $99.4$ %.

### Заключение

Для извлечения платины и палладия из сложного по составу солянокислого раствора аффинажного производства исследована динамика их сорбции углеродными материалами: активированным углем ВСК, углеродным композитом на его

основе, содержащим фторопласт, и гранулированным карбонизированным микропористым сорбентом марки Lewatit AF-5. Методом сканирующей электронной микроскопии показано, что глобулы фторопласта располагаются на поверхности углеродного композита на основе активированного угля ВСК и имеют размер  $1-5$  мкм. Выходные кривые сорбции платины и палладия из солянокислого раствора аффинажного производства описываются по моделям Томаса, Юна-Нельсона и BDST с коэффициентом детерминации  $R^2$  более  $0.785$ . Наибольший коэффициент детерминации ( $R^2 0.974$ ) наблюдается при обработке данных выходной кривой сорбции палладия углеродным композитом по модели Томаса с константой  $K_T 5.57 \cdot 10^{-4}$  дм<sup>3</sup>/(мг·ч). Элюирование платиновых элементов с углеродных материалов возможно с использованием царской водки, причем степень десорбции палладия с углеродного композита выше, чем с активированного угля.

Высокие значения емкости углеродных сорбентов и степени элюирования царской водкой (более  $99$ %) характеризуют представленные углеродные материалы как эффективные для использования в предварительном сорбционном концентрировании при проведении количественного определения содержания платиновых элементов в технологических растворах сложного состава.

### 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.

2. Mukhin V.M., Klushin V.N., Instratov A.V. i dr. Modifitsirovanie v tekhnologii uglerodnykh adsorbentov. M.: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2022. 326 p. (In Russ.)

3. <https://lanxess.com/en-US/Products-and-Brands/Products/1/LEWATIT--AF-5>. Data obrashcheniya 12.12.2023.

### Список литературы/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>



4. Ageeva L.D., Kolpakova N.A., Kovyarkina T.V., Potsyapun N.P., Buinovskii A.S. Otsenka mekhanizma i kinetiki sorbtsii platiny, palladiya, zolota aktivnym uglom iz khloridnykh sred, obluchennykh ul'trafiolotovym izlucheniem. *Zhurn. analit. khimii.* 2001; 56(2): 157-160. (In Russ.)

5. Tarasenko Yu.A., Bagreev A.A., Yatsenko V.V. Selektivnost' vosstanovitel'noi sorbtsii blagorodnykh metallov aktivnymi ugl'yami. *Zhurn. fiz. khimii.* 1993; 67(11): 2328-2332. (In Russ.)

6. Tarasenko Yu.A., Bagreev A.A., Reznik G.V., Lysenko A.A. Vosstanovitel'naya sorbtsiya kak metod razdel'nogo vydeleniya

metallov iz rastvorov. *Zhurn. fiz. khimii.* 1993; 67(11): 2333-2335.

7. Thomas H.C. Heterogeneous ion exchange in a flowing system. *J. of the American Chemical Society.* 1944; 66(10): 1466-1664. (In Russ.)

8. Yoon Y.H., Nelson J.H. Application of gas adsorption kinetics I. A theoretical model for respirator cartridge service life. *AIHA Journal.* 1984; 45(8): 509-516.

9. Futralan C.M., Kan Ch.-Ch., Dalida M.L. et al. Fixed-bed column studies on the removal of copper using chitosan immobilized on bentonite. *Carbohydrate Polymers.* 2011; 83(2): 697-704.

### Информация об авторах / Information about the authors

**А.В. Бардыш** – студент кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

**А.Е. Высотина** – аспирант инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

**Р.Г. Калинин** – руководитель направления научно-технологического центра ОАО «Красцветмет», Красноярск, Россия

**И.Д. Трошкина** – профессор кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, д.т.н., профессор, Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

**A.V. Bardysh** – student of the chair of technology of rare elements and nanomaterials, Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation, e-mail: [bardysh0101@mail.ru](mailto:bardysh0101@mail.ru), 0000-0003-0538-4376

**A.E. Vysotina** – the postgraduate student of the School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: [ali.ishutina@gmail.com](mailto:ali.ishutina@gmail.com), 0000-0002-6288-1021

**R.G. Kalinin** – head of department Researcher at the Scientific and Technological Center of OJSC Krastsvetmet, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: [rkalinin@krastsvetmet.ru](mailto:rkalinin@krastsvetmet.ru), 0000-0003-1591-9856

**I.D. Troshkina** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chair of technology of rare elements and nanomaterials, Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation, e-mail: [troshkina.i.d@muctr.ru](mailto:troshkina.i.d@muctr.ru), 0000-0002-5524-0247

Статья поступила в редакцию 31.01.2024; одобрена после рецензирования 24.06.2024; принята к публикации 03.07.2024.

The article was submitted 31.01.2024; approved after reviewing 24.06.2024; accepted for publication 03.07.2024.