



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 669.843

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13571

Сорбционное извлечение рения углеродным композитом из растворов азотнокислого выщелачивания промпродукта переработки медно-молибденовых сульфидных руд

Алиса Валерьевна Бардыш^{1✉}, Ирина Дмитриевна Трошкина¹,
Ситорабону Нурмуродовна Расулова², Хайитали Файзуллаевич Адинаев²,
Виталий Павлович Гуро²

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

²Институт общей неорганической химии академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Россия

Аннотация. Статья посвящена изучению сорбционных характеристик углеродных композитов в сравнении с АУ марок ВСК и Татсорб, служащими основой композитов, и макропористой слабоосновной смолой Purolite A170 при сорбции рения из растворов азотнокислого выщелачивания промпродукта молибденового. Степень извлечения рения из растворов азотнокислого выщелачивания промпродукта молибденового углеродными композитами на основе углей марок Татсорб и ВСК составила 41.0 и 86.2%, а степень десорбции рения 28.1 и 55.1% соответственно. Предварительно изучено влияние нитрат-иона на сорбцию рения углеродными композитами. Нитрат-ион снижает емкость углеродных композитов на основе АУ марок Татсорб и ВСК в 3.5 раза в диапазоне концентраций аниона до 20 мг/дм³. Полученные интегральные кинетические кривые сорбции рения углеродными композитами свидетельствуют о высокой скорости сорбции рения в начальный период времени. Процесс завершения сорбции рения композитом на основе АУ угля марки Татсорб наступает за 1 ч, на основе АУ угля марки ВСК – за 2 ч. Интегральная кинетическая кривая сорбции рения углеродным композитом на основе угля марки ВСК наилучшим образом описывается по модели псевдодвухго порядка (R^2 0.9924) с константой K_2 $1.55 \cdot 10^{-2}$ г·мг⁻¹·мин⁻¹, а на основе угля марки Татсорб по модели псевдопервого порядка (R^2 0.9850) с константой K_1 $2.4 \cdot 10^{-2}$ мин⁻¹.

Ключевые слова: сорбция, рений, углеродный композит, фторполимер, статика, кинетика, сульфид молибдена, азотнокислое выщелачивание.

Для цитирования: Бардыш А.В., Трошкина И.Д., Расулова С.Н., Адинаев Х.Ф., Гуро В.П. Сорбционное извлечение рения углеродным композитом из растворов азотнокислого выщелачивания промпродукта переработки медно-молибденовых сульфидных руд // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 6. С. 868-878. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13571>

Original article

Sorption of rhenium by carbon composite from nitric acid leaching solution of product of copper-molybdenum sulfide ore processing

Alisa V. Bardysh^{1✉}, Irina D. Troshkina¹, Sitorabonu N. Rasulova²,
Khayitali F. Adinaev², Vitaly P. Guro²

¹D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation, bardysh0101@mail.ru ✉

²Institute of General Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Abstract. The article is devoted to the study of the sorption characteristics of carbon composites in comparison with the AC grades VSK and Tatsorb, which serve as the basis of the composites, and the macroporous weakly basic resin Purolite A170 during the sorption of rhenium from solutions of nitric acid leaching of middlings of molybdenum. The degree of rhenium extraction from solutions of nitric acid leaching of middlings of molybdenum by carbon composites based on carbon grades Tatsorb and VSK was 41 and 86.2%, and the degree of rhenium desorption was 28.1 and 55.1%, respectively. The effect of nitrate ion on the sorption of rhenium by carbon composites was preliminarily studied. Nitrate ion reduces the capacity of carbon composites based on AC grades Tatsorb and VSK by 3.5 times in the range of anion concentrations up to 20 mg/dm³. The obtained integral kinetic curves of rhenium sorption by carbon composites indicate a high rate of rhenium sorption in the initial period of time. The process of complete rhenium sorption by the composite based on Tatsorb grade AC coal occurs within 1 hour, and based on VSK grade AC coal within 2 hours. The integral kinetic curve of rhenium sorption by the carbon composite based on VSK grade coal is best described by the pseudo-second-order model (R^2 0.9924) with a constant K_2 $1.55 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, and based on Tatsorb grade coal by the pseudo-first-order model (R^2 0.9850) with a constant K_1 $2.4 \cdot 10^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Keywords: sorption, rhenium, carbon composite, fluoropolymer, batch experiments, kinetics, molybdenum sulfide, nitric acid leaching.

For citation: Bardysh A.V., Troshkina I.D., Rasulova S.N., Adinaev Kh.F., Guro V.P. Sorption of rhenium by carbon composite from nitric acid leaching solution of product of copper-molybdenum sulfide ore processing. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. 2025. 25(6): 868-878. (In Russ.).* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13571>

Введение

В мире рений извлекают в большом объеме из сульфидного сырья – молибденовых и медных руд, при переработке которых рений переходит в промпродукты, включая азотнокислые растворы. Рений в молибденовых рудах проявляется в виде изоморфной примеси – дисульфида (ReS_2) в кристаллической решетке молибденита (MoS_2) [1]. Молибденит – основной минерал, обладающий промышленным значением при получении рения, который является спутником молибдена не только в природных, но и техногенных системах [2].

По данным [3] около 70% рения, произведенного во всем мире, задействовано в производстве аэрокосмических суперсплавов, в том числе газотурбинных лопаток, 14% расходуется на катализаторы, в автомобильной промышленности используется 5%, а в нефтегазовой промышленности 1%.

Попутное выделение рения из растворов с его низкой концентрацией в присутствии сопутствующих элементов, таких как Mo, Cu, Fe требует использования гидрометаллургических методов извлечения, среди которых сорбция занимает ключевое место.

При осуществлении сорбционного извлечения рения в настоящее время преимущественно используются достаточно дорогие синтетические анионообменные смолы. Исследована сорбция рения анионитами П-МДА-1-2 и П-МДА-6, содержащими вторичные и третичные аминогруппы, статическая обменная емкость по рению почти в 2 раза больше в сравнении с емкостью промышленного импортируемого сорбента фирмы Purolite марки Sim 202/4408. [4, 5]. Основным недостатком этих сорбентов является меньшая избирательность в сравнении с промышленным сорбентом. Слабоосновные аниониты Purolite A170 и Purolite A172 селективно извлекают рений из растворов, в составе которых присутствует молибден [6-8]. Кислотность среды оказывает значительное влияние на избирательность ионитов к рению в присутствии молибдена. Показано, что в интервале pH 7.0-7.5 слабоосновные аниониты Purolite A170 и Purolite A172 обладают высокой емкостью по рению, а молибден в этих условиях практически не сорбируется [9]. Извлечение рения изучали из растворов, получаемых в результате сернокислотного разложения шифотходов суперсплавов, содержащих молибден [10]. Выявлено, что анионит Seplite LSC770 по

своим емкостным характеристикам и селективности к рению не уступает известному ренийселективному аниониту Puromet MTA1701.

Однако ранее для сорбции рения использовали активные угли (АУ) различного происхождения, проявившие повышенное сродство к перренат-иону. Основные недостатки АУ, такие как низкие эксплуатационные параметры, невысокая емкость, проведение десорбции рения при повышенной температуре (90°C), не позволяют им конкурировать с ионообменными смолами, несмотря на это, разработки в области усовершенствования АУ продолжают оставаться актуальными задачами.

Для повышения конкурентоспособности АУ по отношению к смолам разрабатываются методы модифицирования углей на различных этапах их получения. Кроме того, углеродные композиты не токсичны и более устойчивы к агрессивным средам в сравнении с синтетическими ионообменными смолами, представленными на рынке сорбентов [2, 11, 12].

Модифицирование углей проводят физическими (механохимическая активация, радиационные методы, приемы сухой термообработки и ультразвукового воздействия) или физико-химическими методами, которые можно разделить на химическую обработку, где возможно применение кислот, газов и других соединений, способных окислить поверхность или изменить поры материала, метод пропитки поверхности угля раствором или суспензией модификатора и метод электрохимического модифицирования углей [13].

Изучена возможность сорбционного извлечения рения гранулированным АУ производства Duksan Chemical Corp (Корея) из раствора, полученного в результате промывки водой бокового потока дыма, образующегося при обжиге сульфида молибдена, емкость по рению материала при pH 2 составила 23.5 мг/г, а десорбция рения с АУ 1 М NH_4OH наиболее эффективна при 95°C [14]. Адсорбция

молибдена и рения на механоактивированном графите исследована в среде, содержащей нитрат-ионы и сульфат-ионы. Степень адсорбции молибдена достигает более 90 % в растворах азотной и серной кислот и 65% при pH 4 в ацетатном буферном растворе. В этом случае степень адсорбции рения не превышает 20% в среде азотной кислоты и в ацетатном буферном растворе, но достигает 50% в среде серной кислоты при pH 1 [15]. Ранее в работе [16] изучена сорбция рения углеродным композитом на основе АУ марки ВСК, модифицированного фторполимером, из маточного никель-кобальтового раствора комплексной переработки отходов ренийсодержащих суперсплавов, в составе которого отсутствовал молибден со степенью извлечения рения 76.7%, степень десорбции рения с углеродного композита за третий цикл составила 97%. Полученные сорбционные характеристики композита сопоставимы с характеристиками смолы Purolite A170. Основные преимущества углеродного композита – возможность десорбции рения 8% раствором аммиака при комнатной температуре в отличие от промышленных АУ, а также более низкая стоимость по сравнению с синтетическими ионообменными смолами.

Цель работы – изучение сорбционных свойств углеродных композитов на основе активированных углей при сорбции рения из растворов азотнокислого выщелачивания промпродукта переработки медно-молибденовых сульфидных руд.

Экспериментальная часть

В работе использовали углеродные композиты на основе углей марок ВСК и Татсорб, которые изготовлены из скорлупы кокосового ореха в ОАО «ЭНПО «Неорганика» (Россия) и в ООО «НПО» ПЗС «ТАТСОРБ» соответственно. Основные характеристики углей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики АУ
Table 1. Main characteristics of activated carbons

| Показатели | Марка угля | |
|--|------------|-----------|
| | ВСК | Татсорб |
| 1. Насыпная плотность, г/дм ³ | 387 | 550 |
| 2. Объем пор, см ³ /г: | | |
| - суммарный | 0.98 | 0.80 |
| - макропор | 0.05 | - |
| - мезопор | 0.10 | - |
| - микропор | 0.83 | - |
| 3. Размер (ширина) микропор, нм | 1.51 | - |
| 4. Массовая доля золы, % | 3.30 | 4.90 |
| 5. Адсорбционная способность, мг/г | | |
| - по йоду | 1150 | 905 |
| - по метиленовому голубому | 327 | - |
| 6. Размер гранул, мм | 3-4 | 0.42-1.70 |



а



б



в

Рис.1. Внешний вид сорбентов: а – смола Purolite A170, б – углеродный композит на основе угля марки ВСК, в – углеродный композит на основе угля марки Татсорб
Fig. 1. Appearance of sorbents: a – Purolite A170 resins, b – carbon composite based on VSK brand coal, c – carbon composite based on Tatsorb brand coal

Для сравнения сорбционных характеристик выбрана наиболее часто используемая в технологии рения макропористая слабоосновная смола Purolite A170 (рис. 1а), предназначенная для сорбции анионных форм тяжелых металлов из кислых технологических растворов, представляющая собой гранулы сферической формы, размером менее одного мм. Физико-химические свойства смолы Purolite A170 представлены в таблице 2.

Углеродные композиты на основе углей марок ВСК и Татсорб, полученные методом пропитывания АУ раствором фторополимера, представляют собой гранулы черного цвета неправильной формы с размером 3-4 мм (рис.1 б, в).

Для исследования поверхности исходных АУ, а также углеродных композитов

на их основе использован метод электронной микроскопии с использованием растрового электронного микроскопа JEOL 6610 LV с энергодисперсионным микроанализом INCA (спектрометр Oxford Instruments X-MAX 20 mm², Великобритания). Модифицирование исходных углей марок ВСК и Татсорб (рис. 2 а, в) приводит к локализации глобул фторополимера (размером от одного до 8 мкм) на поверхности углеродных композитов (рис. 2 б, г).

В связи с тем, что в технологических растворах содержание нитрат-иона постоянно, эксперименты по оценке его влияния на емкость по рению углеродных композитов на основе углей марок ВСК и Татсорб проводили в широком интервале концентраций. Сорбцию рения проводили в статических условиях из растворов с

Таблица 2. Основные характеристики анионита Purolite A170

Table 2. Main characteristics of the anionite Purolite A170

| Показатели | Значение |
|---|--------------------------------------|
| 1. Функциональная группа | Вторичные слабокислотные аминогруппы |
| 2. Ионная форма | Свободное основание |
| 3. Полная обменная емкость, г-экв/дм ³ | Не менее 1.3 |
| 4. Остаточная влажность | 43-46% (Cl ⁻ форма) |
| 5. Диапазон размеров частиц, мкм | 600-1200 |
| 6. Насыпной вес, г/дм ³ | 660-700 |
| 7. Максимальная рабочая температура, °С | 60 |
| 8. Диапазон используемых pH: | |
| - для сорбции | 1-6 |
| - для десорбции | 9-14 |

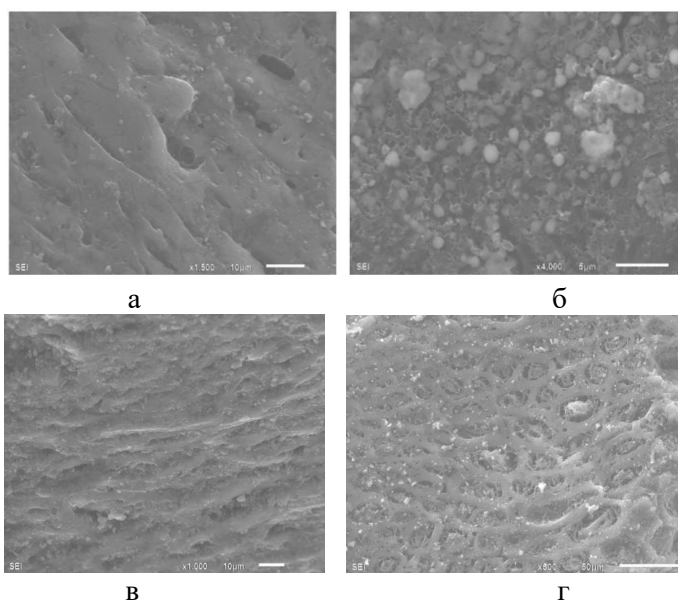


Рис. 2. Микрофотография поверхности исходных АУ марок ВСК (а) x1500, Татсорб (в) x1000, углеродных композитов на основе угля марки ВСК (б) x4000, угля марки Татсорб (г) x500

Fig. 2 Micrograph of the surface of the original carbon grades VSK (a) x1500, Tatsorb (c) x1000, carbon composites based on coal grade VSK (b) x4000, coal grade Tatsorb (d) x500

концентрацией рения $C(Re) - 20.8 \text{ мг/дм}^3$. Графически обработанные результаты экспериментов представлены на рис. 3.

Кинетику сорбции рения изучали методом ограниченного объема раствора. Навески углеродного фторполимерсодержащего композита перемещали в колбы с модельным азотнокислым раствором (рН 2) с концентрацией рения $C(Re) - 21.3 \text{ мг/дм}^3$ при соотношении фаз сорбент : раствор, равном 1:1000 (0.3 г : 300 см³). Соотношение фаз выбрано таким образом, чтобы объем раствора не изменялся

более чем на 3% при отборе проб на анализ. Полученные интегральные кинетические кривые сорбции рения углеродными композитами на основе углей ВСК и Татсорб приведены на рис. 4.

Объект исследования – раствор азотнокислого выщелачивания промпродукта молибденового АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат», состав его основных микрокомпонентов представлен в таблице 3. Промпродукт молибденовый – продукт флотационного обогащения молибденовой руды.

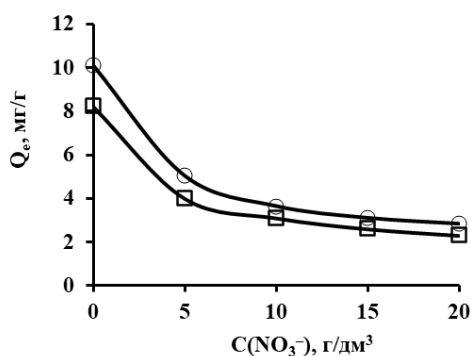


Рис. 3. Зависимость емкости углеродного композита на основе угля марки ВСК (○) и угля марки Татсорб (□) по рению от концентрации нитрат-иона
Fig. 3. Dependence of the capacity of a carbon composite based on VSK grade coal (○) and, Tatsorb grade coal (□) for rhenium on the concentration of nitrate ion

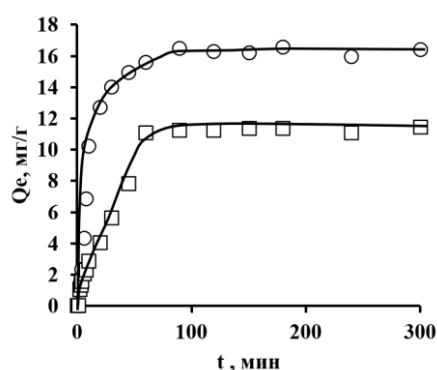


Рис. 4. Интегральные кинетические кривые сорбции рения углеродными фторполимерсодержащими композитами на основе углей марок ВСК (○) и Татсорб (□)
Fig. 4. Integral kinetic curves of rhenium sorption by carbon fluoropolymer-containing composites based on VSK (○) and Tatsorb (□) grade carbon

Таблица 4. Содержание макро и микрокомпонентов раствора азотнокислого выщелачивания молибденового промпродукта

Table 4. The content of macro/microcomponents of the solution of nitric acid leaching of molybdenum middlings

| Элементы | Mo | Re | Cu | Au | Ag |
|----------------------------------|------------------|----|-----|------|-----|
| Концентрация, мг/дм ³ | $6.3 \cdot 10^4$ | 62 | 203 | 0.92 | 3.9 |

Выщелачивание промпродукта молибденового проводили 25 % азотной кислотой при соотношении фаз Т : Ж – 1 : 7 (20 г : 140 см³) и повышенной температуре, равной 80-90°C. Значение pH раствора после двух контактов азотнокислого выщелачивания составило 0. В таблице 4 представлен состав раствора азотнокислого выщелачивания промпродукта молибденового.

Сорбцию рения из растворов азотнокислого выщелачивания промпродукта молибденового проводили в статических условиях при соотношении фаз Т : Ж – 1:30 (0.1 г : 3 см³) в течение 24 ч, предварительно скорректировав значение pH раствора до 2 добавлением по каплям концентрированного раствора гидроксида натрия. Было проведено контактирование исходных АУ, углеродных композитов и сорбента-сравнения Purolite A170 с деионизированной водой в течение 3 ч, после чего материалы кондицио-

нировали азотной кислотой (pH 2). Углеродные материалы и сорбент-сравнение промывали большим объемом деионизированной воды, после чего проводили десорбцию рения в статических условиях при соотношении фаз Т : Ж – 1:10 (0.1 г : 1 см³) аммиачным раствором (8%) в течение 24 ч. В таблице 7 приведены значения степени десорбции рения (γ , %) из углеродных материалов и сорбента-сравнения.

Обсуждение результатов

Результаты экспериментов по определению влияния нитрат-иона на сорбцию рения (рис. 3) свидетельствуют, что емкость по рению углеродного композита на основе угля марки ВСК в присутствии нитрат-иона уменьшается с 10.2 до 2.8 мг/г, а углеродного композита на основе угля марки Татсорб – с 8.2 до 2.1 мг/г. Наблюдается конкурирующая сорбция нитрат- и перренат-иона на поверхности углеродного композита по механизму анионного обмена. Известно, что в ряду

Таблица 5. Кинетические параметры сорбции рения углеродными фторполимерсодержащими композитами

Table 5. Kinetic parameters of rhenium sorption by carbon fluoropolymer-containing composites

| Модель | Показатель | Углеродный композит | |
|-----------------------|---|------------------------|----------------------------|
| | | на основе АУ марки ВСК | на основе АУ марки Татсорб |
| Псевдопервого порядка | Константа скорости k_1 , $\text{мин}^{-1} \cdot 10^2$ | 2.9 | 2.4 |
| | Коэффициент детерминации R^2 | 0.9571 | 0.9850 |
| Псевдовторого порядка | Константа скорости k_2 , $\text{г} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot 10^2$ | 15.5 | 3.61 |
| | Коэффициент детерминации R^2 | 0.9924 | 0.9819 |
| Еловича | Константа β , $\text{г} \cdot \text{мг}^{-1}$ | 4.29 | 2.04 |
| | Коэффициент детерминации R^2 | 0.9482 | 0.9023 |
| | Начальная скорость, $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$ | 0.44 | 0.55 |
| Вебера-Морриса | Константа скорости K_p , $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{мин}^{1/2}$ | 2.12 | 1.45 |
| | Коэффициент детерминации R^2 | 0.8638 | 0.9009 |

Гофмейстера нитрат-ион стоит перед перренат-ионом, поэтому он его вытесняет [17].

Ход интегральных кинетических кривых сорбции рения углеродными фторполимерсодержащими композитами (рис. 4) свидетельствует о высокой скорости поглощения рения в начальный период времени. Процесс завершенности сорбции рения композитом на основе АУ угля марки Татсорб наступает за 1 ч, на основе АУ угля марки ВСК – за 2 ч. Данные по кинетике сорбции обрабатывали с использованием кинетических и диффузионных моделей.

Модели химической кинетики псевдопервого порядка, псевдовторого порядка и Еловича представлены в виде формул 1-3 [18-20] соответственно:

$$\log(Q_e - Q_t) = \log Q_e - \frac{k_1 \cdot \tau}{2.303}, \quad (1)$$

где Q_e , Q_t – сорбционная емкость равновесная и в момент времени τ , ммоль/г; k_1 , – константа скорости псевдопервого порядка, мин^{-1} .

$$\frac{\tau}{Q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} \cdot \tau, \quad (2)$$

где k_2 – константа скорости псевдовторого порядка, $\text{г}/(\text{мг} \cdot \text{мин})$.

$$\frac{dQ}{d\tau} = \alpha e^{-\beta Q_t}, \quad (3)$$

где α – начальная скорость сорбционного процесса, $\text{г}/(\text{ммоль} \cdot \text{мин})$, β – константа Еловича, $\text{г}/\text{ммоль}$.

Диффузионное уравнение модели Вебера-Морриса [21] представлено в виде формулы:

$$Q_t = k_p \cdot \tau^{\frac{1}{2}} + B, \quad (4)$$

где k_p – константы скорости внутренней диффузии, $\text{мг}/\text{г} \cdot \text{мин}^{1/2}$, B – константа, связанная с толщиной пограничного слоя.

На рис. 5 представлены линеаризованные кинетические кривые сорбции рения углеродными композитами на основе АУ углей марок ВСК и Татсорб.

Как видно из рис. 5 г, наличие перегиба на зависимости функции Q_t от $\sqrt{\tau}$ доказывает влияние двух или нескольких стадий на скорость сорбции. Первый участок свидетельствует о переносе вещества к поверхности сорбента, а второй участок о проникновении вещества в поры. Таким образом, на первом этапе при сорбции рения композитами преобладает внешняя диффузия, а затем внутренняя. Наличие двух линейных участков на графике Вебера-Морриса, где первый участок имеет значительно больший наклон по сравнению со вторым, указывает на то, что процесс сорбции контролируется внешней диффузией [21].

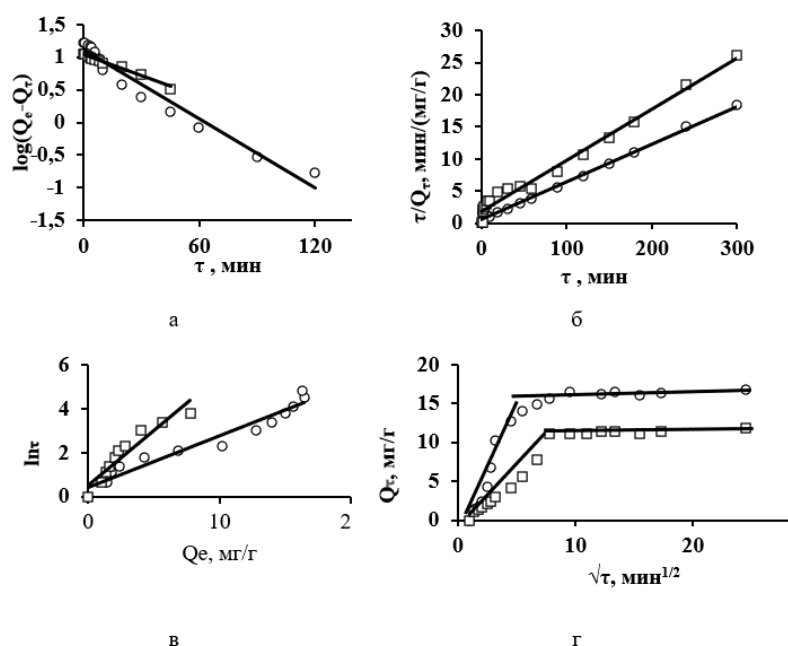


Рис. 5. Линеаризованные кинетические кривые сорбции рения композитами на основе АУ марок Татсорб (□) и ВСК (○) по моделям псевдопервого порядка (а), псевдвторого порядка (б), Еловича (в), внешней диффузии (г)

Fig. 5. Linearized kinetic curve of rhenium sorption by composites based on AU grades Tatsorb (□) and VSK (○) according to the pseudo-first order (a), pseudo-second order (b), Elovich (c), external diffusion (d) models

Высокое значение коэффициента детерминации (R^2 0.9850) позволяет судить о применимости модели псевдопервого порядка при описании стадии кинетики сорбции рения из азотнокислого раствора композитом на основе угля марки Татсорб (таблица 5). Модель псевдопервого порядка описывает кинетику на начальном этапе сорбции, когда начальная концентрация элемента еще высока. Эта модель доказывает наличие активных центров в небольшом количестве на поверхности углеродного композита [22]. Наибольший коэффициент детерминации наблюдается при обработке данных сорбции рения углеродным композитом на основе угля марки Татсорб по модели псевдопервого порядка (R^2 0.9850) с кинетическим коэффициентом k_1 $2.4 \cdot 10^{-2} \text{ мин}^{-1}$ (таблица 5).

Наибольшее значение коэффициента детерминации (R^2 0.9924) при описании кинетических данных адсорбции рения из азотнокислого раствора композитом на основе угля марки ВСК по модели

псевдвторого порядка может свидетельствовать о многостадийности процесса и наличии большого количества активных центров на поверхности углеродного композита [23], константа K_2 равна $1.55 \cdot 10^{-2} \text{ г} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$ (таблица 5).

В таблице 6 приведены значения емкости (Q_e , мг/г; г/г), коэффициента распределения между фазами (K_d , см³/г) и степени извлечения (α , %) рения из раствора азотнокислого выщелачивания промпродукта молибденового углеродными материалами в сравнении с анионитом Purolite A170, которые были рассчитаны по формулам 5-7:

$$Q_e = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}}) \cdot V_{\text{р-ра}}}{m_{\text{сорбента}}}, \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{Q_e \cdot m_{\text{сорбента}}}{C_{\text{исх}} \cdot V_{\text{р-ра}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

$$K_d = \frac{Q_e}{C_{\text{равн}}} \cdot 1000, \quad (7)$$

где $C_{\text{исх}}$ и $C_{\text{равн}}$ – концентрации рения в исходном и равновесном растворах, мг/дм³; $V_{\text{р-ра}}$ – объем раствора, дм³; $m_{\text{сорбента}}$ – масса сорбента, г.

Таблица 6. Равновесные сорбционные характеристики материалов

Table 6. Batch sorption characteristics of materials

| Сорбент | Q_e , мг/г | K_d , см ³ /г | α , % |
|-------------------------------------|--------------|----------------------------|--------------|
| АУ марки ВСК | 0.79 | 22.2 | 42.5 |
| АУ марки Татсорб | 1.40 | 91.9 | 75.4 |
| Композит на основе АУ марки ВСК | 0.77 | 21.1 | 41.0 |
| Композит на основе АУ марки Татсорб | 1.6 | 186.7 | 86.2 |
| Смола Purolite A170 | 1.44 | 103.6 | 77.5 |

Таблица 7. Степень десорбции рения из углеродных материалов и сорбента-сравнения

Table 7. Degrees of desorption of rhenium from carbon materials and sorbent-comparison

| Сорбент | АУ марки ВСК | АУ марки Татсорб | Композит на основе АУ марки ВСК | Композит на основе АУ марки Татсорб | Смола Purolite A170 |
|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Степень десорбции (Re), % | 40.5 | 7.14 | 55.1 | 28.1 | 90.2 |

Наибольшая степень извлечения рения из раствора азотнокислого выщелачивания промпродукта молибденового наблюдается при использовании углеродного композита на основе угля марки Татсорб. Степень извлечения этим углеродным материалом на 8.7% выше, чем степень извлечения рения анионитом Purolite A170 (табл. 6).

Введение фторполимера способствует увеличению степени десорбции рения, повышая ее в 1.36 и 4 (табл. 7) раза при использовании композита на основе угля марки ВСК и на основе угля марки Татсорб соответственно, хотя наибольшая степень десорбции отмечается в случае применения анионита Purolite A170 (90.2%).

Заключение

Для извлечения рения из сложного по составу раствора азотнокислого выщелачивания промпродукта молибденового исследована сорбция его углеродными материалами: АУ ВСК и Татсорб и фторполимерсодержащими углеродными композитами на их основе в сравнении с макропористой слабоосновной смолой Purolite A170. С использованием метода растровой электронной микроскопии выявлено, что глобулы фторполимера, рас-

полагающиеся на поверхности углеродных композитов на основе АУ ВСК и Татсорб, имеют размер 1-8 мкм.

Нитрат-ион оказывает депрессирующее влияние на емкостные характеристики углеродных композитов на основе углей марок ВСК и Татсорб по отношению к рению.

Кинетические данные по сорбции рения углеродным композитом на основе АУ марки ВСК наилучшим образом описываются по модели псевдвторого порядка, что доказывает наличие большого количества активных центров в сравнении с углеродным композитом на основе АУ марки Татсорб, сорбция рения которым описывается по модели псевдопервого порядка. Лимитирующей стадией процесса является внешняя диффузия при сорбции рения углеродными композитами на основе АУ марок ВСК и Татсорб.

Степень извлечения рения из раствора азотнокислого выщелачивания промпродукта молибденового углеродными композитами на основе углей марок Татсорб и ВСК составила 41.0 и 86.2%, соответственно. Степень десорбции рения повышается при модифицировании АУ углей марок ВСК и Татсорб раствором фторполимера в 1.36 и 4.00, соответственно, в сравнении с исходными углями, взятыми

в качестве основы для получения углеродных композитов.

Высокие значения сорбционных параметров углеродных композитов характеризуют представленные материалы как эффективные для использования на стадии предварительного сорбционного концентрирования рения из технологических растворов сложного состава.

Список литературы/References

1. Torshonov D.B., Gulyashinov A.N., Antropova I.G. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2005; 9: 30. (In Russ.)
2. Palant A.A., Troshkina I.D., Chekmarev A.M., Kostylev A.I. *Tekhnologiya reniya*. M.: Galleya-Print, 2015. 329 p. (In Russ.)
3. Shodiev A.N.U., Khuzhakulov A.M. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2023; 2-3(117): 14-18. (In Russ.)
4. Shodiev A.N., Khamidov S.B., Turobov Sh.N. *Scientific Review of the Technical Sciences, Mathematics and Computer Science*. 2019: 22-28. (In Russ.)
5. Shodiev A.N.U., Khamidov S.B., *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2020; 11-1(80): 86-90. (In Russ.)
6. Abisheva Z.S., Zagorodnyaya A.N., Bekturganov N.S., Ospanov E.A.Z., Ospanov N.A. *Tsvetnye metally*. 2012; 7: 57-61. (In Russ.)
7. Maltseva E.E., Blokhin A.A., Pleshkov M.A., Murashkin Yu.V., Mikhaylenko M.A. *Tsvetnye metally*. 2014; 6: 52-58. (In Russ.)
8. Blokhin A.A., Maltseva E.E., Panchishina L.B., Murashkin Yu.V. *Tsvetnye metally*. 2009; 7: 53-56.
9. Maltseva E.E., Blokhin A.A., Murashkin Yu.V., Mikhaylenko M.A. *Tsvetnaya metallurgiya*. 2017; 4: 30-38. (In Russ.)
10. Blokhin A.A., Kasikov A.G., Baburin D.V., Maltseva E.E., Dvornikova A.M., Murashkin Yu.V. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*. 2024; 71(97): 14-18. (In Russ.)
11. Kasikov A.G., Areshina N.S. *Utilizatsiya i kompleksnaya pererabotka produktov i ot-*

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.

khodov gazoochistki medno-nikelevogo proizvodstva. Apatity: FITs KNTs RAN, 2019. 196 p. (In Russ.)

12. Kasikov A.G., Petrova A.M. *Retsikling reniya*. Moscow: RIOR: INFRA-M, 2014. P. 60-79.

13. Mukhin V.M., Klushin V.N., Nistratov A.V. *Modifitsirovanie v tekhnologii uglerodnykh adsorbentov*. Moscow: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2022. 326 p. (In Russ.)

14. Sangyun Seo, Wan Seop Choi, Tae Jin Yang, Myong Jun Kim, Tam Tran. *Hydrometallurgy*. 2012; 129-130: 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.06.007>

15. Korobitsyna A.D., Pechishcheva N.V., Konyshcheva E.Yu., Shunyaev K.Yu. *Rossiyskiy zhurnal fizicheskoy khimii*. 2025; 99: 570-580. (In Russ.)

16. Targanov I.E., Bardysh A.V., Troshkina I.D. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2022; 95(11-12): 1439-1447. (In Russ.)

17. Lebedev K.B., Kazantsev E.I., Rozmanov V.M. *Ionity v tsvetnoy metallurgii*. M.: Metallurgiya, 1975. 352 p. (In Russ.)

18. Matovic L.L., Vukelic N.S., Jovanovic U.D., Kumric K.R., Krstic J.B., Babic B.M., Dukic A.B. *Arabian Journal of Chemistry*. 2016; 12(8): 4446-4457.

19. Ho Y.S., McKay G.A. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. 1998; 76(2): 332-340. <https://doi.org/10.1205/095758298529696>

20. Zeldowitsch J. *Acta Physicochim. URSS*. 1934; 1: 364-449.

21. Weber Jr. W.J., Morris J.C. *Journal of the Sanitary Engineering Division*. 1963; 89: 31-60.

22. Jianlong Wang, Xuan Guo. *Journal of Hazardous Materials*. 2020; 390: 71. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>

23. Reichenberg D. *Journal of the American Chemical Society*. 1953; 75: 589-597.

Информация об авторах / Information about the authors

А.В. Бардыш – аспирант Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия, ORCID iD 0000-0003-0538-4376, e-mail: bardysh0101@mail.ru

И.Д. Трошкина – профессор кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, д.т.н., Москва, Россия, ORCID iD 0000-0002-5523-0247, e-mail: troshkina.i.d@muctr.ru

С.Н. Расулова – главный научный сотрудник Лаборатории Metallургических процессов и техногенного сырья Института общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан, доктор химических наук, Ташкент, Узбекистан, ORCID iD 0000-0001-6592-9492, e-mail: sitora_r91@gmail.ru

Х.Ф. Адинаев – старший научный сотрудник Лаборатории Metallургических процессов и техногенного сырья Института общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан, PhD, Ташкент, Узбекистан, ORCID iD 0000-0002-9794-4053, e-mail: adinaev.x.f@mail.ru

В.П. Гуро – Заведующий Лабораторией Metallургических процессов и техногенного сырья Института общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан, доктор химических наук, профессор, Ташкент, Узбекистан, ORCID iD 0000-0001-5765-0408, e-mail: vpguro@gmail.com

A.V. Bardysh – graduate student Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation, ORCID iD 0000-0003-0538-4376, e-mail: bardysh0101@mail.ru

I.D. Troshkina – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chair of technology of rare elements and nanomaterials, Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russian Federation, ORCID iD 0000-0002-5523-0247, e-mail: troshkina.i.d@muctr.ru

S.N. Rasulova – Chief Researcher, Laboratory of Metallurgical Processes and Technogenic Raw Materials, Institute of General and Inorganic Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Doctor of Chemical Sciences, Russian Federation, ORCID iD 0000-0001-6592-9492, e-mail: sitora_r91@gmail.ru

Kh.F. Adinaev – Senior Researcher, Laboratory of Metallurgical Processes and Technogenic Raw Materials, Institute of General and Inorganic Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, PhD, Tashkent, Republic of Uzbekistan, ORCID iD 0000-0002-9794-4053, e-mail: adinaev.x.f@mail.ru

V.P. Guro – Head of the Laboratory of Metallurgical Processes and Technogenic Raw Materials, Institute of General and Inorganic Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Tashkent, Republic of Uzbekistan, ORCID iD 0000-0001-5765-0408, e-mail: vpguro@gmail.com

Статья поступила в редакцию 08.04.2025; одобрена после рецензирования 05.11.2025; принята к публикации 19.11.2025.

The article was submitted 08.04.2025; approved after reviewing 05.11.2025; accepted for publication 19.11.2025.