

СОРБЦИЯ РЕНИЯ ИЗ МАТОЧНЫХ КОБАЛЬТ-НИКЕЛЕВЫХ РАСТВОРОВ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ РЕНИЙСОДЕРЖАЩИХ СУПЕРСПЛАВОВ

© И. Е. Тарганов, А. В. Бардыш, И. Д. Трошкина

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9
E-mail: targanov.igor@yandex.ru

Поступила в Редакцию 25 сентября 2022 г.
После доработки 25 декабря 2022 г.
Принята к публикации 25 декабря 2022 г.

В статических условиях исследована возможность сорбционного извлечения рения углеродным фторопласт-содержащим композитом из маточного (технологического) раствора осаждения кобальт-никелевого концентрата, получаемого при комплексной переработке отходов ренийсодержащего суперсплава на основе никеля. Методом переменных объемов получены изотермы сорбции рения из модельного и маточного растворов. Константа Генри при сорбции рения из маточного раствора составила $2100 \pm 600 \text{ мл} \cdot \text{г}^{-1}$. Методом ограниченного объема раствора изучена кинетика сорбции рения. Математическая обработка данных интегральных кинетических кривых по кинетическим и диффузионным моделям показала, что наиболее высокий коэффициент детерминации ($R^2 = 0.999$) наблюдается при использовании модели псевдвторого порядка, формально подтверждающей некоторый вклад химической реакции в процесс. Константы скорости, рассчитанные по модели псевдвторого порядка, составляют $(1.7\text{--}2.8) \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{мл}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$. Использование моделей внешней и внутренней диффузии позволило выявить, что процесс сорбции рения углеродным фторопласт-содержащим композитом протекает по смешанно-диффузионному механизму с возрастающей долей внутренней диффузии по мере увеличения концентрации ионов ReO_4^- на поверхности пор композита. Показана стабильность сорбционных свойств углеродного композита в трех циклах сорбции–десорбции рения из маточного (технологического) раствора.

Ключевые слова: сорбция; рений; углеродный фторопласт-содержащий композит; отходы суперсплавов; маточный раствор; комплексная переработка; кобальт; никель

DOI: 10.31857/S0044461822110081; EDN: GQZVJH

Рений находит широкое применение в наукоемких технологиях, более 80% его мирового потребления приходится на изготовление сплавов для авиационной и космической отраслей и около 15% для изготовления катализаторов в нефтехимической промышленности. В настоящий момент на территории Российской Федерации отсутствуют освоенные промышленные источники рения, в то время как потребность в этом рассеянном элементе растет [1].

Потенциальными источниками рения в нашей стране могут стать месторождения молибденовых, медных и урановых руд, при переработке которых рений извлекается исключительно попутно [1]; фумарольные газы и их конденсаты, образующиеся вблизи

действующего вулкана Кудрявый на острове Итуруп, где был открыт минерал рениит (ReS_2) в 1992 г. [2], а также вторичное сырье, по большей части представленное отходами жаропрочных сплавов [3]. По оценке Геологической службы США (United States Geological Survey, USGS), в 2022 г. мировое производство рения из вторсырья составило около 25 т.*

Жаропрочные сплавы на основе Ni, предназначенные для работы при высоких (более 1000°C) температурах и обладающие стойкостью к окислению (суперсплавы), в большом объеме использу-

* Mineral commodity summaries 2023. U.S. Geological Survey. P. 144–145.

ют в качестве высокотемпературных конструкционных материалов [4]. Легирование таких сплавов рением увеличивает жаростойкость и их длительную прочность [5]. Разработка новых технологий переработки вторичного редкометалльного сырья может привести к возврату дефицитных и дорогостоящих металлов в производство, поэтому является актуальной задачей.

Электрохимическая переработка отходов ренийсодержащих жаропрочных сплавов на основе никеля более эффективна, чем пирохимические методы и методы, основанные на разложении отходов растворами кислот. Этот метод более экономичен с точки зрения расхода как энергии, так и реагентов. Получаемый методом анодного растворения кусковых отходов раствор электролита, насыщенный рением, перерабатывают экстракционными методами, а из рафината экстракции рения осаждают (при pH 7–8) выделяют никель-кобальтовый концентрат [6, 7].

Состав образующегося маточного раствора осаждения никель-кобальтового концентрата включает рений наряду с растворенными органическими соединениями (экстрагентом, разбавителем и другими) и ионами неорганических соединений, не перешедшими в никель-кобальтовый концентрат. Концентрация рения в маточных растворах осаждения никель-кобальтового концентрата определяется содержанием рения в исходных отходах, режимом анодного растворения и условиями осуществления процесса экстракции, в том числе количеством необходимых ступеней извлечения. В случаях низкого содержания целевого продукта в перерабатываемом сырье извлечение осуществляют с использованием сорбционных методов [8, 9].

Цель работы — определение сорбционных характеристик углеродного фторопласт-содержащего композита, используемого при извлечении рения из маточного раствора осаждения никель-кобальтового концентрата, получаемого при комплексной переработке отходов ренийсодержащего жаропрочного сплава второго поколения.

Экспериментальная часть

При проведении экспериментов использовали H_2SO_4 (х.ч., ООО ТД «ХИММЕД»), NH_4OH , 25% (ч.д.а. «СИГМАТЕК»), NH_4ReO_4 (AP-0, АО «Жезказганредмет»). Для проведения фотометрического анализа растворов на содержание рения применяли HCl (ос.ч., ООО «Лабтех»), $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ч.д.а., ООО «Баум-Люкс»), $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ч., ООО «Баум-Люкс»), NH_4SCN (ч., Stanchem Sp. J.).

В работе были использованы сорбенты: углеродный композит на основе активированного угля марки ВСК (ОАО «ЭНПО «Неорганика»), модифицированный фторопластом-42 (ООО «Ин-Полимер»), и макропористый слабоосновный анионит Purolite A170 (Purolite, Ltd). Модифицирование активированного угля проводили путем его пропитывания раствором фторопласта в диметилформамиде (х.ч., АО «ЛенРеактив») с последующей отгонкой растворителя. Массовая доля фторполимера в модифицированном композите составила 2.5 мас%.

Для изучения поверхности образцов методом сканирующей электронной микроскопии использовали микроскоп TESCAN VEGA 3 (TESCAN) с ускоряющим напряжением 5 кВ. Детектирование вторичных электронов проводили с помощью внутрикамерного детектора вторичных электронов.

Исходный активированный уголь представляет собой пористый гранулированный материал черного цвета (рис. 1, а), модификация фторполимером не приводит к изменению внешнего вида. При большем увеличении в модифицированном образце регистрируются глобулы полимера (рис. 1, б).

Маточный (технологический) раствор был получен осаждением никель-кобальтового концентрата раствором Na_2CO_3 при pH ~ 8.0 из раствора после экстракции рения (рафината), предоставленного АО ТД «Галион». Эксперименты по сорбции рения из сернокислых модельного ($c_{\text{Re}} = 20 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$) и маточного (технологического) растворов проводили в статических условиях при кислотности, соответствующей pH 2. Такое значение кислотности было выбрано исходя из данных [1], согласно которым максимальную сорбционную активность угли проявляют при pH 2. Исходный маточный (технологический) раствор имел следующий состав по основным элементам ($\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$): Re — 8.36, Ni — 1.06, Co — 0.1, W — 0.1, pH раствора ~8.0. Количественное содержание элементов в растворе определено методом масс-спектрометрии с использованием индуктивно связанной плазмы (XSeries2 ICP-MS, Thermo Fisher Scientific). Для построения градуировочных зависимостей использовали стандартные многоэлементные растворы МЭС-2 и МЭС-4 (ООО НПП «Скат»). Относительное стандартное отклонение (RSD) при количественном анализе маточного (технологического) раствора не превышало 9%.

Перед сорбцией кислотность раствора повышали добавлением концентрированной H_2SO_4 до pH 2. Для предотвращения ошибок, связанных с высокой концентрацией добавляемой кислоты, объем маточного (технологического) раствора при подкислении составлял не менее 2 л.

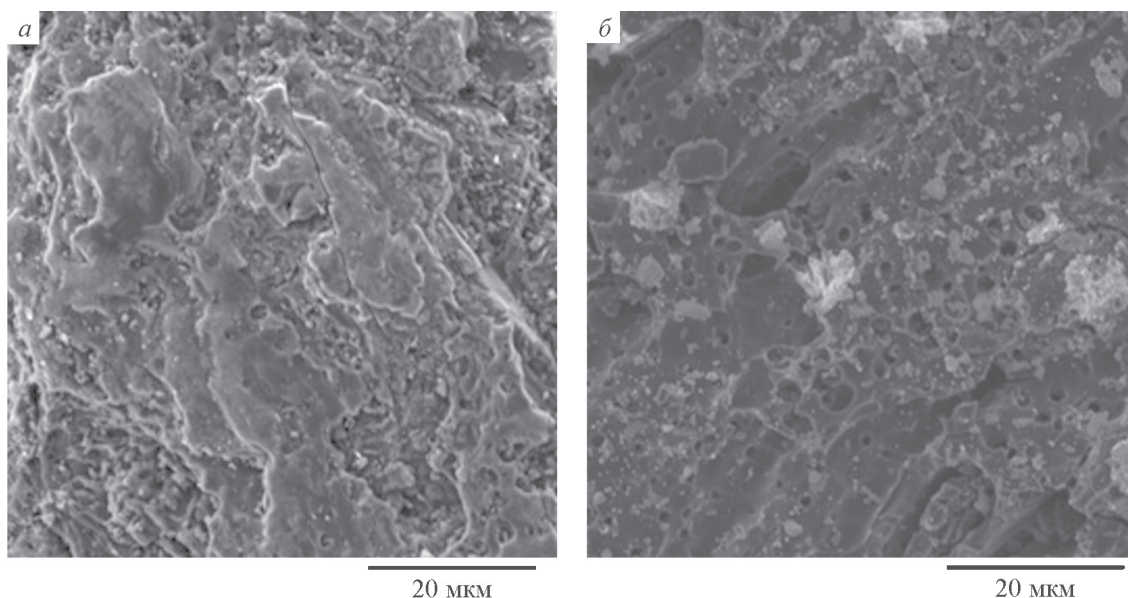


Рис. 1. Активированный уголь марки ВСК, исходный (а), модифицированный фторопластом (б).

Навески сорбентов предварительно обрабатывали раствором H_2SO_4 $0.5 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$ (рН 2) при перемешивании на орбитальном шейкере LOIP LS-210 (АО «Лабораторное Оборудование и Приборы») со скоростью 200 мин^{-1} в течение 24 ч при соотношении фаз сорбент:раствор, равном 1 г:500 мл. По истечении вышеуказанного времени сорбент отделяли от раствора и перемешивали с маточным (технологическим) и модельным растворами при соотношениях фаз сорбент:раствор, равном 1 г:50÷1000 мл. Водную фазу после сорбции в течение 24 ч анализировали на содержание рения и определяли рН.

Кинетику сорбции рения изучали методом ограниченного объема раствора. После предварительной обработки навески углеродного фторопласт-содержащего композита перемещали в колбы с маточным (технологическим) или модельным растворами при соотношении фаз сорбент:раствор, равном 1 г:1000 мл. Объемы растворов составляли 500 мл. Соотношение фаз было подобрано таким образом, чтобы изменение объема раствора при отборе проб на анализ не превышало 3%.

Массовую емкость сорбентов (Q_e , $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$), степень извлечения рения (α , %), коэффициент распределения рения между фазами (K_d , $\text{л} \cdot \text{г}^{-1}$) рассчитывали по уравнениям

$$Q_e = \frac{(c_{\text{исх}} - c_{\text{равн}})V_{\text{р-ра}}}{m_{\text{сорбента}}}, \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{Q_e m_{\text{сорбента}}}{c_{\text{исх}} V_{\text{р-ра}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

$$K_d = \frac{Q_e}{c_{\text{равн}}} \cdot 1000, \quad (3)$$

где $c_{\text{исх}}$ и $c_{\text{равн}}$ — концентрации рения в исходном и равновесном растворах ($\text{мг} \cdot \text{л}^{-1}$); $V_{\text{р-ра}}$ — объем раствора (л), $m_{\text{сорбента}}$ — масса сорбента (г).

Перед десорбцией сорбенты промывали дистиллированной водой (дистиллятор ДЭ-25М, ООО «Завод «ЭМО») при соотношении фаз сорбент:вода, равном 1 г:15 мл. Десорбцию рения осуществляли 8%-ным раствором NH_4OH при соотношении фаз сорбент:элюент, равном 1 г:10 мл, при перемешивании в течение 24 ч.

Стабильность свойств сорбентов при многократном использовании изучали следующим образом. Навески сорбентов насыщали рением из маточного (технологического) раствора до состояния равновесия в статических условиях. Время достижения равновесия было определено как время, при котором интегральная кинетическая кривая выходит на плато (рис. 2, б), оно составило 20 ч. Затем сорбенты отделяли от растворов и определяли в них содержание рения. После чего сорбенты промывали дистиллированной водой и проводили десорбцию в условиях, аналогичных тем, что были описаны ранее. Десорбцию осуществляли трехкратным последовательным контактированием сорбентов с новой порцией элюента в течение 24 ч для каждого контакта, что в сумме составило 3 сут. По истечении времени выдерживания сорбенты отделяли от элюатов, в элюатах определяли содержание рения и оценивали степень его десорбции за три контакта. Затем наве-

ски сорбентов промывали дистиллированной водой и перемещали в колбу с раствором H_2SO_4 $0.5 \text{ г}\cdot\text{л}^{-1}$ (рН 2) при соотношении фаз сорбент:раствор, равном 1 г:500 мл, с перемешиванием в течение 24 ч, после чего отделяли от раствора и снова проводили сорбцию из исходного маточного (технологического) раствора до состояния равновесия. Таким образом было осуществлено 3 цикла сорбции и десорбции.

Концентрацию рения в растворах до и после сорбции определяли колориметрическим методом с использованием в качестве комплексообразователя NH_4SCN^* на фотоэлектрическом фотометре КФК-3 (АО «ЗОМЗ»). Значение рН растворов определяли с помощью комбинированного рН электрода Эком-рН-ком (НПП «Эконикс») на иономере Экотест-2000 (НПП «Эконикс»).

Адсорбция — многостадийный процесс, на который оказывают влияние:

— внешняя (пленочная) диффузия — диффузия ионов в нернстовском слое, прилегающем к зерну (в пленке на поверхности сорбента, которая не разрушается при перемешивании или протекании раствора);

— внутренняя (гелевая) диффузия — диффузия ионов в порах сорбента;

— адсорбция ионов на поверхности сорбента.

Адсорбция ионов на поверхности протекает практически мгновенно, поэтому не может быть скоростьюопределяющей стадией процесса. На практике в скорость процесса может вносить вклад как внешняя, так и внутренняя диффузия, а также промежуточная стадия, которая характеризуется одновременным вкладом и внешней, и внутренней диффузии (смешанная диффузия) [10]. Поскольку угли содержат функциональные группы, при сорбции возможно химическое взаимодействие извлекаемых соединений с ними [11]. Данные по кинетике сорбции обрабатывали с привлечением кинетических и диффузионных моделей.

Модель химической кинетики псевдопервого порядка. В модели псевдопервого порядка сорбция рассматривается как гетерогенная квазихимическая реакция, протекающая в условиях значительного избытка одного из компонентов дисперсной среды [11].

$$\lg(Q_e - Q_\tau) = \lg Q_e - \frac{k_1 \tau}{2.303}, \quad (4)$$

где Q_e , Q_τ — равновесная сорбционная емкость и сорбционная емкость в момент времени τ ($\text{мг}\cdot\text{г}^{-1}$); k_1 — константа скорости псевдопервого порядка (мин^{-1}).

* Малютина Т. М., Конькова О. В. Аналитический контроль в металлургии цветных и редких металлов. М.: Металлургия, 1988. С. 183–184.

Модель химической кинетики псевдovторого порядка. Эту модель можно рассматривать как усовершенствованную версию модели Лагергрена. В модели псевдovторого порядка сорбция рассматривается как гетерогенная химическая реакция второго порядка, учитывается как концентрация активных поверхностных центров, так и концентрация сорбтива [12].

$$\frac{\tau}{Q_\tau} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} \tau, \quad (5)$$

где k_2 — константа скорости псевдovторого порядка ($\text{г}\cdot\text{мг}^{-1}\cdot\text{мин}^{-1}$).

Модель химической кинетики Еловича. Модель Еловича применяется для обработки кинетических данных процесса сорбции в гетерогенных системах с учетом сорбционной емкости с использованием уравнения (6) [13]. Для упрощения этой модели S. H. Chien, W. R. Clayton [14] приняли, что произведение начальной скорости сорбционного процесса (a), константы Еловича (β) и времени процесса (τ) $\gg 1$. Применение граничных условий $Q_\tau = 0$ при $\tau = 0$ и $Q_\tau = Q_e$ при $\tau = \tau$ позволяет привести уравнение (6) к виду (7):

$$\frac{dQ}{d\tau} = a e^{-\beta Q_\tau}, \quad (6)$$

$$Q_\tau = \frac{1}{\beta} \ln(1 + a\beta\tau). \quad (7)$$

Модель внутренней диффузии (Вебера–Морриса). Модель внутренней диффузии (Вебера–Морриса) [15] является эмпирической моделью, обработка кинетических данных по которой позволяет подтвердить предположение о характере диффузии и оценить количество стадий, оказывающих воздействие на общую скорость процесса.

$$Q_\tau = k_p \tau^{\frac{1}{2}} + B, \quad (8)$$

где k_p — константа скорости внутренней диффузии ($\text{мг}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{мин}^{-1/2}$); B — константа, связанная с толщиной пограничного слоя ($\text{мг}\cdot\text{г}^{-1}$).

Модель внешнeдиффузионной кинетики. При пленочной (внешней) диффузии скорость процесса определяется уравнением первого закона Фика [16]:

$$-\ln(1 - F) = k\tau, \quad (9)$$

где F — относительная доля количества сорбированного вещества от максимально возможного (равновесного) значения.

Обсуждение результатов

Изотермы сорбции рения из модельного и маточного (технологического) растворов при pH 2 (рис. 2, *a*) имеют линейный характер и описываются уравнением Генри со значениями констант 7600 ± 800 и 2100 ± 600 мл·г⁻¹ (коэффициенты детерминации R^2 0.931 и 0.911 соответственно). Меньшая сорбционная емкость углеродного фторопласт-содержащего композита при сорбции рения из маточного (технологического) раствора осаждения кобальт-никелевого концентрата из рафинатов экстракции рения, образующегося при комплексной переработке отходов ренийсодержащих суперсплавов, по сравнению с емкостью при сорбции из модельного сернокислого раствора может быть объяснена влиянием примесных растворенных органических соединений (экстрагента, разбавителя и другими) и ионов неорганических соединений, не перешедших в никель-кобальтовый концентрат. Эти сопутствующие компоненты раствора могут адсорбироваться углеродным фторопласт-содержащим композитом, конкурируя с адсорбцией ионов ReO_4^- .

Ход интегральных кинетических кривых сорбции рения углеродным фторопласт-содержащим композитом (рис. 2, *б*) свидетельствует о высокой скорости поглощения рения в начальный период времени, за 180 мин степень завершенности процесса сорбции (параметр F) достигает значений 0.941 и 0.785 при сорбции из модельного и маточного (технологического) растворов соответственно. Наибольшие значения коэффициентов детерминации $R^2 \geq 0.999$ при обра-

ботке кинетических данных по модели псевдвторого порядка (табл. 1) могут свидетельствовать о многостадийности процесса, включающего в том числе химическое взаимодействие между ионами ReO_4^- и функциональными группами активированного угля, входящего в состав углеродного фторопласт-содержащего композита.

Данные сорбции рения не линейризуются функцией, описывающей закономерности внешнедиффузионной кинетики, таким образом пленочная (внешняя) диффузия не является скоростью определяющей стадией сорбционного процесса рения. Зависимость, представленная в координатах $Q_t - \tau^{1/2}$, не проходит через начало координат (рис. 3, *з*), что указывает на влияние толщины пограничного слоя, т. е. внешней диффузии, на скорость процесса сорбции. По-видимому, процесс сорбции рения углеродным фторопласт-содержащим композитом протекает по смешанно-диффузионному механизму с возрастающей по мере увеличения концентрации ионов ReO_4^- на поверхности пор композита долей внутренней диффузии.

При проведении экспериментов по оценке стабильности сорбционных свойств углеродного фторопласт-содержащего композита в сорбционно-десорбционных циклах и сравнении со стабильностью свойств слабоосновного анионита Purolite A 170 — селективного сорбента, широко используемого для извлечения рения [10], отмечено увеличение степени сорбции на втором цикле (76.7%) (табл. 2), что может быть связано с обновлением поверхности пор сорбента и освобождением активных центров от остатков незакрепленного полимера после промывки углерод-

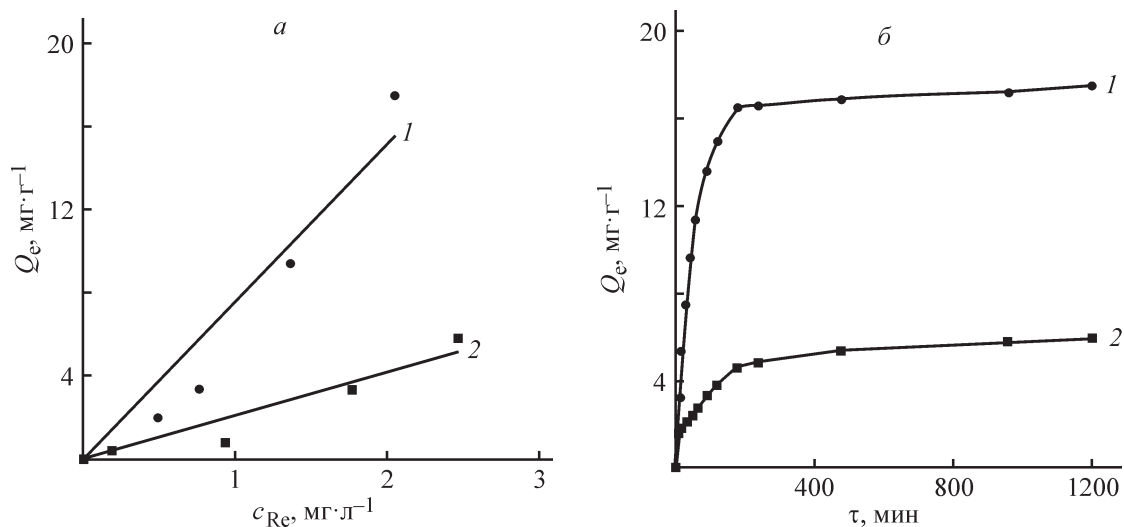


Рис. 2. Изотермы (*a*) и интегральные кинетические кривые (*б*) сорбции рения углеродным фторопласт-содержащим композитом из модельного ($c_{\text{Re}} = 20$ мг·л⁻¹) (1) и маточного (технологического) ($c_{\text{Re}} = 8.36$ мг·л⁻¹) (2) сернокислых (pH 2) растворов.

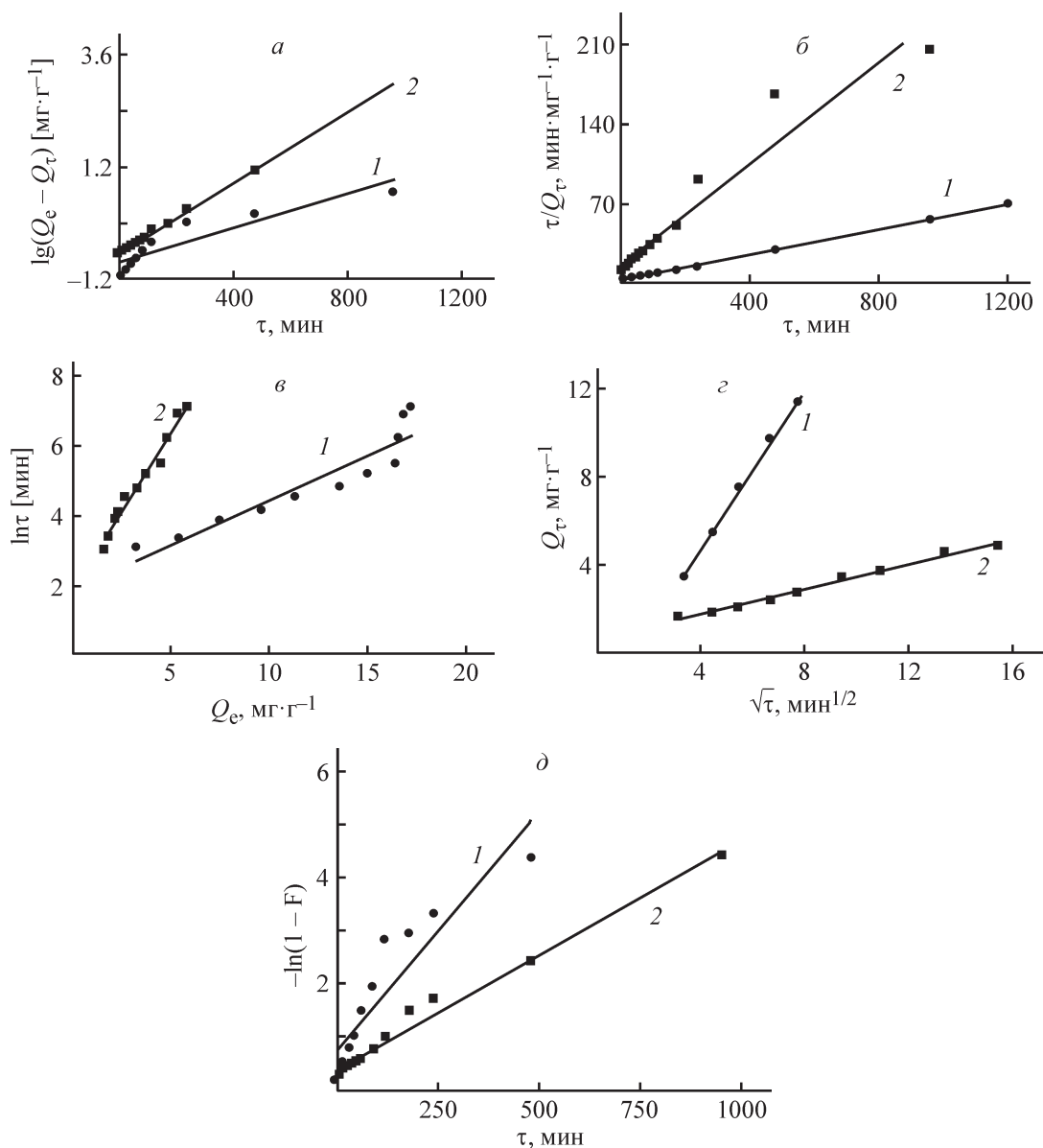


Рис. 3. Кинетические кривые сорбции рения из модельного ($c_{Re} = 20 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) (1) и маточного (технологического) ($c_{Re} = 8.36 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) (2) серноокислых (рН 2) растворов углеродным фторопласт-содержащим композитом, линейаризованные по кинетическим (а — псевдопервого порядка, б — псевдвторого порядка, в — Еловича) и диффузионным (г — внутренней диффузии, д — внешней диффузии) моделям.

ного фторопласт-содержащего композита и десорбции рения на первом цикле. Снижение сорбционной емкости и степени сорбции рения углеродным фторопласт-содержащим композитом на третьем цикле, вероятно, связано с наличием органических примесей, оставшихся в маточном (технологическом) растворе, сорбирующихся на композите, так как осаждению кобальт-никелевого концентрата предшествовала операция экстракции рения. Этот фактор, видимо, имеет меньшее влияние при сорбции рения композитом на

втором цикле: освобождение активных центров угля от остатков гидрофобного полимера способствует и удалению части адсорбированных ими органических соединений.

Суммарная степень десорбции рения с углеродного фторопласт-содержащего композита за три последовательных контакта после первого цикла сорбции составила более 80%, после третьего цикла — ~97%, что сопоставимо с таковой при использовании анионита Purolite A170 (табл. 3).

Таблица 1
Кинетические параметры сорбции рения углеродным фторопласт-содержащим композитом

Модель псевдопервого порядка		Модель псевдоторгового порядка		Модель внутренней диффузии		Модель Еловича		Модель внешнелифузионной кинетики	
константа скорости псевдопервого порядка k_1 , мин ⁻¹ ·10 ³	коэффициент детерминации R^2	константа скорости псевдоторгового порядка k_2 , Г·мг ⁻¹ ·мин ⁻¹ ·10 ³	коэффициент детерминации R^2	константа скорости внутренней диффузии k_p , мг·Г ⁻¹ ·мин ^{-1/2}	коэффициент детерминации R^2	константа Еловича β , Г·мг ⁻¹	коэффициент детерминации R^2	константа, связанная с толщиной пограничного слоя, B , мг·Г ⁻¹ ·10 ⁵	коэффициент детерминации R^2
1.80	0.741	1.73	0.999	2.10	0.999	0.53	0.877	3.13	0.982
1.60	0.964	2.80	0.999	1.70	0.989	0.55	0.975	1.14	0.767

Маточный (технологический) раствор

Таблица 2
Сорбционные свойства сорбентов при извлечении рения из маточного (технологического) раствора в последовательных циклах сорбции-десорбции

Сорбент	Цикл	Сорбционная емкость, мг·Г ⁻¹	Коэффициент распределения, мл·Г ⁻¹	Степень извлечения, %
Углеродный фторопласт-содержащий композит	1-й	2.30	647	55.5
	2-й	3.18	967	76.7
	3-й	1.95	451	46.9
Purolite A170	1-й	3.17	1620	76.5
	2-й	3.55	2960	85.6
	3-й	2.64	868	63.6

Таблица 3
Показатели десорбции рения при многократном использовании

Сорбент	Номер контакта десорбции	Степень десорбции, %	
		1-й цикл	3-й цикл
Углеродный фторопласт-содержащий композит	1	65.7	79.7
	2	14.1	16.6
	3	3.79	0.71
	Σ	83.5	97.0
Purolite A170	1	90.1	89.4
	2	0.13	3.35
	3	3.43	1.93
	Σ	93.6	94.7

Выводы

При комплексной переработке отходов ренийсодержащего жаропрочного сплава сорбцию рения из маточного (технологического) раствора осаждения никель-кобальтового концентрата из кислых растворов (рН 2) можно осуществлять с использованием углеродного фторопласт-содержащего композита. Процесс протекает с высоким коэффициентом распределения — $2100 \pm 350 \text{ мл} \cdot \text{г}^{-1}$ по смешанно-диффузионному механизму с возрастающей по мере увеличения концентрации ионов ReO_4^- на поверхности пор композита долей внутренней диффузии.

Сорбционные характеристики углеродного фторопласт-содержащего композита при сорбции рения сопоставимы с таковыми при использовании слабоосновного анионита Purolite A170, широко применяемого для извлечения рения. Выбранный композит отличается значительным постоянством сорбционно-десорбционных характеристик в циклах. Он может быть востребован в качестве сорбента для извлечения рения из растворов переработки как первичного, так и вторичного рениевого сырья.

Благодарности

Выражаем благодарность директору Центра коллективного пользования им. Д. И. Менделеева к.х.н. А. В. Хорошилову за оказание услуги по проведению анализа технологического раствора и участие в обсуждении результатов.

Конфликт интересов

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

Информация об авторах

Тарганов Игорь Евгеньевич

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8354-0018>

Бардыш Алиса Валерьевна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0538-4376>

Трошкина Ирина Дмитриевна, д.т.н., проф.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5523-0247>

Список литературы

- [1] Палант А. А., Трошкина И. Д., Чекмарев А. М., Костылев А. И. Технология рения. М.: ООО «Галлея-Принт», 2015. С. 196–203.
- [2] Знаменский В. С., Коржинский М. А., Штейнберг Г. С., Ткаченко С. И., Якушев А. И., Ланутина И. П., Брызгалов И. А., Самотонин Н. Д., Магазина Л. О., Кузьмина О. В., Органова Н. И., Рассулов В. А., Чаплыгин И. В. Рений, ReS_2 — природный дисульфид рения из фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) // Зап. РМО. 2005. Т. 134. № 5. С. 32–39. EDN: HSFVUN
- [3] Mamo S., Elie M., Baron M., Simons A., Gonzalez-Rodriguez J. Leaching kinetics, separation, and recovery of rhenium and component metals from CMSX-4 superalloys using hydrometallurgical processes // Sep. Purif. Technol. 2019. V. 212. P. 150–160. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2018.11.023>
- [4] Yagi R., Okabe T. Current status of recycling of rhenium and process technologies // J. MMIJ. 2016. V. 32. N 7. P. 114–122. <https://doi.org/10.2473/journalofimmj.132.114>
- [5] Pat. EP 0362661 B1 (publ. 1995). Cast columnar grain hollow nickel base alloy article and alloy heat treatment for making.
- [6] Агапова Л. Я., Абишева З. С., Килибаева С. К., Яхияева Ж. Е. Электрохимическая переработка техногенных отходов ренийсодержащих жаропрочных

- никелевых сплавов в сернокислых растворах // Цв. металлы. 2017. № 10. С. 69–73.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2017.10.08>
- [7] Касиков А. Г., Петрова А. М. Рециклинг рения. М.: РИОР: ИНФРА–М, 2014. С. 60–79.
- [8] Anderson C. D., Taylor P. R., Anderson C. G. Extractive metallurgy of rhenium: A Review // Miner. Metall. Process. 2013. V. 30. N 1. P. 59–73.
<https://doi.org/10.1007/BF03402342>
- [9] Блохин А. А., Михайленко М. А. Процессы ионообменной сорбции в гидрометаллургии рения // Цв. металлы. 2019. № 10. С. 18–27.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.03>
- [10] Скобло А. И., Молоканов Ю. К., Владимиров А. И., Щелкунов В. А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефехимии. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. С. 278–279.
- [11] Matović L. L., Vukelić N. S., Jovanović U. D., Kumrić K. R., Krstić J. B., Babić B. M., Đukić A. B. Mechanochemically improved surface properties of activated carbon cloth for the removal of As(V) from aqueous solutions // Arab. J. Chem. 2016. V. 12. N 8. P. 4446–4457.
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.07.004>
- [12] Ho Y. S., McKay G. A Comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents // Trans. Inst. Chem. Eng. 1998. V. 76. P. 332–340. <http://doi.org/10.1205/095758298529696>
- [13] Зельдович Я. Б. К вопросу о механизме каталитического окисления окиси углерода на двуокиси марганца // ЖПХ. 1935. Т. 6. С. 234–242.
- [14] Chien S. H., Clayton W. R. Application of Elovich equation to the kinetics of phosphate release and sorption in soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1980. V. 44. P. 265–268. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400020013x>
- [15] Weber J. G., Asce J. M., Morris J. C. Kinetics of adsorption on carbon from solution // J. Sanit. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Engrs. 1963. V. 89. P. 31–59.
- [16] Вольдман Г. М., Зеликман А. Н. Теория гидрометаллургических процессов. М.: Интермет Инжиниринг, 2003. С. 277–278.
-