

УДК 546.74 : 66.081

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-3-25-33>

Научная статья

Research article



Гидрометаллургическое извлечение никеля из окисленных руд

В.И. Дударев, Г.Н. Дударева, А.А. Яковлева

Иркутский национальный исследовательский технический университет
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

✉ Владимир Иванович Дударев (vdudarev@mail.ru)

Аннотация: Большая часть мировых запасов Ni-содержащего сырья (40–66 %) сосредоточена в окисленных никелевых рудах. Одной из альтернативных высокочастотным пирометаллургическому и аммиачно-карбонатному методам переработки таких руд может быть хлораммонийное извлечение никеля из относительно бедных по содержанию металла руд. Технология галогенидно-аммиачного разложения и извлечения никеля из окисленных никелевых руд, дополненная сорбционным процессом, является менее длительной по стадийности и проще в практическом исполнении. Адсорбционное извлечение никеля возможно углеродными сорбентами, обладающими высокой химической устойчивостью, выдерживающими высокотемпературное воздействие и сильнокислотную обработку. Сорбенты получены путем парогазовой активации выделенных карбонизатов ископаемых углей. Изучена сорбционная способность ионов Ni(II), выявлены закономерности и характеристические параметры процесса на углеродных сорбентах с помощью изотерм адсорбции при варьировании условий проведения экспериментов. Обработку экспериментальных результатов выполняли с использованием уравнений Фрейндлиха и Ленгмюра. Сорбенты имеют ряд особенностей, определяемых преобладающей микропористой структурой и полифункциональной поверхностью с активными комплексообразующими группировками атомов, характерными для амфолитов с катионо- и анионообменными свойствами. Процесс адсорбции описан уравнением псевдопервого порядка с константами скорости от 0,204 до 0,287 с⁻¹. Для адсорбционного извлечения Ni(II) предложена схема с двумя адсорберами и псевдооживленным слоем сорбента. Десорбция никеля и регенерация сорбента проведены 2,3 %-ным раствором серной кислоты. При этом десорбируется от 95 до 98 % никеля. В процессах рекомендуются стандартные химические машины и аппараты.

Ключевые слова: окисленные руды, углеродные сорбенты, извлечение никеля.

Для цитирования: Дударев В.И., Дударева Г.Н., Яковлева А.А. Гидрометаллургическое извлечение никеля из окисленных руд. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(3):25–33. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-3-25-33>

Hydrometallurgical recovery of nickel from oxidized ores

V.I. Dudarev, G.N. Dudareva, A.A. Yakovleva

Irkutsk National Research Technical University
83 Lermontova Str., Irkutsk 664074, Russia

✉ Vladimir I. Dudarev (vdudarev@mail.ru)

Abstract: A significant portion of the world's reserves of Ni-containing raw materials (40–66 %) is concentrated in oxidized nickel ores. One of the alternatives to the high-cost pyrometallurgical and ammonia-carbonate methods for processing such ores could be the chlorammonium recovery of nickel from relatively low-grade ores. The halide-ammonia decomposition and recovery technology of nickel from oxidized nickel ores, supplemented by a sorption process, is less stage-intensive and simpler in practical implementation. Nickel adsorption recovery is feasible using carbon sorbents that exhibit high chemical stability, withstand high-temperature exposure, and strong acidic treatment. Sorbents were obtained through steam-gas activation of extracted carbonizates from fossil coals. The sorption capacity for Ni(II) ions was studied, and the patterns and characteristic parameters of the process on carbon sorbents were identified using adsorption isotherms while varying experimental conditions. The experimental results were processed using the Freundlich and Langmuir equations. The sorbents have several distinctive features determined by their predominant microporous structure and multifunctional surface with active complex-forming atomic groups,

characteristic of ampholytes with cation- and anion-exchange properties. The adsorption process is described by a pseudo-first-order equation with rate constants ranging from 0.204 to 0.287 s⁻¹. For the adsorption recovery of Ni(II), a scheme with two adsorbers and a pseudo-fluidized sorbent bed is proposed. Nickel desorption and sorbent regeneration were carried out with a 2.3 % sulfuric acid solution, desorbing 95 to 98 % of nickel. Standard chemical machinery and equipment are recommended for these processes.

Keywords: oxidized ores, carbon sorbents, nickel recovery.

For citation: Dudarev V.I., Dudareva G.N., Yakovleva A.A. Hydrometallurgical recovery of nickel from oxidized ores. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2024;30(3):25–33. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-3-25-33>

Введение

В мировых запасах Ni-содержащего сырья большую часть (от 40 до 66 %) составляют окисленные никелевые руды (ОНР) [1–3], в которых среднее содержание Ni составляет всего 0,7–1,2 %, поэтому их целевая переработка пирометаллургическими методами является высокочрезвычайно затратной и, как правило, нерентабельной [2–4]. Разработанная учеными Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург) [5] комбинированная схема переработки ОНР (термохимическая обработка — водное выщелачивание — осаждение гидроксидов) позволяет получить никелевый концентрат, что повышает экономическую целесообразность применения пирометаллургической технологии. Однако в схеме присутствует термохимическая обработка всей массы руды, в том числе и пустой породы, также требуются предварительная обработка ОНР значительными объемами соляной кислоты и прокаливание до получения нерастворимых форм мешающих компонентов. Все это значительно осложняет процесс выделения никеля.

В работах ученых Томского политехнического университета [6; 7] предлагается использовать для начальной переработки ОНР один единственный реагент — хлорид аммония. Основная масса породы, включающая оксиды SiO₂ (51 %) и Al₂O₃ (5 %), с реагентом не взаимодействует, а оксиды других сопутствующих металлов начинают взаимодействовать при температуре 473 К. Оксид никеля через промежуточный продукт NiCl₂·nNH₄Cl при T = 600 К переходит в водорастворимый хлорид никеля. Последующее водное выщелачивание термообработанной руды и аммиачное осаждение гидроксидов позволяют осуществлять последовательное разделение ОНР на индивидуальные целевые компоненты [6]. Включение сорбционного процесса в такую инновационную технологию позволит существенно повысить эффективность выделения никеля из ОНР [8; 9].

Адсорбционное извлечение никеля возможно сорбентами из различного сырья, в том числе и

углеродными, которые имеют развитую пористую структуру с удельной поверхностью более 500 м²/г [10–21]. Углеродные сорбенты типа АД, синтезированные в ИРНТУ, обладают высокой химической устойчивостью, выдерживают высокотемпературное воздействие, противостоят сильноокислотной обработке [22; 23]. Они имеют ряд особенностей, определяемых микропористой структурой и полифункциональной поверхностью с активными комплексообразующими группировками атомов, характерными для амфолитов, с катионо- и анионообменными свойствами [24].

Сорбенты, полученные путем парогазовой активации выделенных карбонизатов ископаемых углей, представляют собой темные гранулы неправильной формы со средним размером частиц от 1 до 2 мм, удельной поверхностью 550 м²/г, механической прочностью на истирание 82 %, суммарным объемом пор (по воде) 0,61 см³/г, сорбционной активностью по йоду 84 % и насыпной плотностью 560 г/дм³ [23].

Целью настоящей работы являлись изучение адсорбционных характеристик углеродного сорбента АД и разработка рекомендаций для гидрометаллургического извлечения никеля из окисленных руд.

Методика исследований

Анализ сорбционной способности ионов никеля, установление закономерностей и характеристических параметров процесса осуществляли с помощью изотерм адсорбции при варьировании режимов проведения экспериментов в статических и динамических условиях. Структуру, пористость и свойства поверхностных соединений сорбентов изучали с использованием различных физико-химических методов с привлечением современной приборной базы [24–26].

Сорбент АД обладает амфотерными ионообменными свойствами. Ионообменная емкость установлена методами обратного титрования 0,1 N

растворами HCl и NaOH. Катионообменная емкость по H^+ составила 0,92 мг-экв/г, анионообменная емкость по OH^- — 7,52 мг-экв/г. Эти данные показывают, что на поверхности сорбента имеются функциональные группировки, содержащие обменные ионы H^+ и OH^- , способные к замещению их ионами металла. Оптимизацию сорбционного извлечения никеля осуществляли изменением кислотности и температуры растворов, а также учетом характера непосредственно адсорбции на поверхности пористого материала.

Влияние кислотности среды на сорбционную емкость оценивали в статических условиях. Навеску адсорбента 0,5 г помещали в 100 см³ раствора, приготовленного из хлорида никеля квалификации ХЧ. Объем реакционной колбы составлял 250 см³, исходная концентрация металла в растворе — 0,51 ммоль/дм³. Значение pH в диапазоне от 3 до 11 регулировали аммиачно-ацетатными буферными растворами. Для перемешивания использовали магнитную мешалку до установления адсорбционного равновесия.

Количественный анализ никеля проводили по спектрофотометрической методике с аналитическими реагентами — диметилглиоксимом или N-ацил-ацетгидразином [26]. Периодически дополнительно контролировали атомно-абсорбционным анализом по стандартной методике концентрацию ионов никеля в растворах и содержание металла в сорбенте после термокислотного разложения высушенного сорбента [27]. Величину адсорбции (A , ммоль/г) рассчитывали по формуле

$$A = (C_0 - C_p)V/m, \quad (1)$$

где C_0 и C_p начальная и равновесная концентрации адсорбата, ммоль/дм³; m — масса адсорбента, г; V — объем рабочего раствора, дм³.

Исследования при повышенных температурах проводили в термостатированных ячейках.

Результаты и их обсуждение

Характер сорбционного взаимодействия, зафиксированного при температурах 298, 318 и 338 К, показывают изотермы адсорбции ионов Ni(II) на углеродном сорбенте (рис. 1).

Обработку экспериментальных результатов в области малых концентраций никеля в растворах выполняли с использованием классического уравнения Фрейндлиха:

$$A = K_F C_p^{1/n}. \quad (2)$$

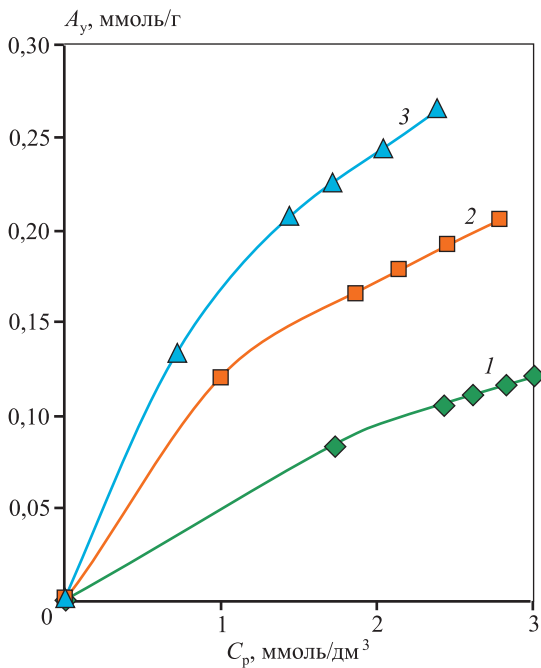


Рис. 1. Изотермы адсорбции ионов Ni(II) при температурах 298 К (1), 318 К (2) и 338 К (3)
 A_y — концентрация металла на сорбенте

Fig. 1. Adsorption isotherms of Ni (II) ions at temperatures 298 K (1), 318 K (2), and 338 K (3)
 A_y — concentration of metal on the sorbent

После арифметического преобразования и построения линейной зависимости логарифмической формы уравнения

$$\lg A = \lg K_F + 1/n \lg C_p \quad (3)$$

графическим путем были определены оба постоянных параметра K_F и n . Константа K_F представляет собой миллимолярный коэффициент адсорбции, поскольку соответствует значению адсорбции при концентрации адсорбата $C = 1$ ммоль/дм³. Показатель $1/n$ является правильной дробью и в целом характеризует степень приближения изотермы адсорбции к оси абсцисс. Из представленных в табл. 1 данных следует, что с повышением температуры обе постоянные урав-

Таблица 1. Константы уравнения Фрейндлиха ($R^2 = 0,92$)

Table 1. Constants of the Freundlich equation ($R^2 = 0.92$)

Константы	Температура, К		
	298	318	338
K_F	0,19	0,25	0,29
n	1,73	1,84	1,94

нения Фрейндлиха (2) возрастают. По значению коэффициента K_F можно сделать вывод, что адсорбция ионов Ni(II) в начальный период времени протекает с высокой эффективностью.

Для описания процесса с достижением предельного уровня адсорбции использовали уравнение Ленгмюра. В линейной форме оно представляет собой уравнение прямой:

$$1/A = 1/A_{\infty} + 1/A_{\infty}K_p C, \quad (4)$$

где C — концентрация металла в растворе, ммоль/дм³; A_{∞} — предельные величины адсорбции, ммоль/г; K_p — константа адсорбционного равновесия.

Построив зависимость в координатах $1/A = f(1/C)$, графическим способом находили постоянные A_{∞} и K_p в уравнении Ленгмюра. Результаты приведены в табл. 2. Видно, что температура влияет и на предельную величину адсорбции, константы адсорбционного равновесия при этом также увеличиваются.

Анализ результатов показывает, что процесс адсорбции никеля на углеродном сорбенте не относится к чисто физической адсорбции. Для расчета стандартного термодинамического параметра — энергии Гиббса (ΔG), использовали классическое уравнение химического сродства:

$$\Delta G = -RT \ln K_p, \quad (5)$$

где $R = 8,314$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная; T — температура процесса, К.

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что с увеличением температуры вероятность самопроизвольного течения процесса адсорбции увеличивается.

Для графического определения энтальпии адсорбции Ni(II) использовали уравнение изобары, записанное в дифференциальной форме:

$$\ln K_p = \frac{\Delta H}{RT}. \quad (6)$$

В результате ее значение составило $-8,96$ кДж/моль (см. табл. 2).

Оценку кинетических закономерностей проводили классическим методом подбора осей кинетических уравнений. Прямолинейные при всех температурах зависимости $\ln C = f(t)$ (рис. 2) подтверждают, что процесс адсорбции описывается уравнением псевдопервого порядка. Значения полученных при этом констант скорости (k_c) приведены в табл. 2.

Вопреки правилу Ван-Гоффа для гомогенных химических реакций константа скорости адсорб-

Таблица 2. Термодинамические константы адсорбции ($R^2 = 0,96$)

Table 2. Thermodynamic sorption constants ($R^2 = 0.96$)

Параметр	Температура, К		
	298	318	338
$A_{\infty}, 10^{-4}$ ммоль/г	1,01	1,53	1,66
K_p	394	416	524
k_c, c^{-1}	0,204	0,229	0,287
ΔG , кДж/моль	–20,5	–22,1	–24,7
ΔH , кДж/моль		–8,96	
E_a , кДж/моль		7,1	

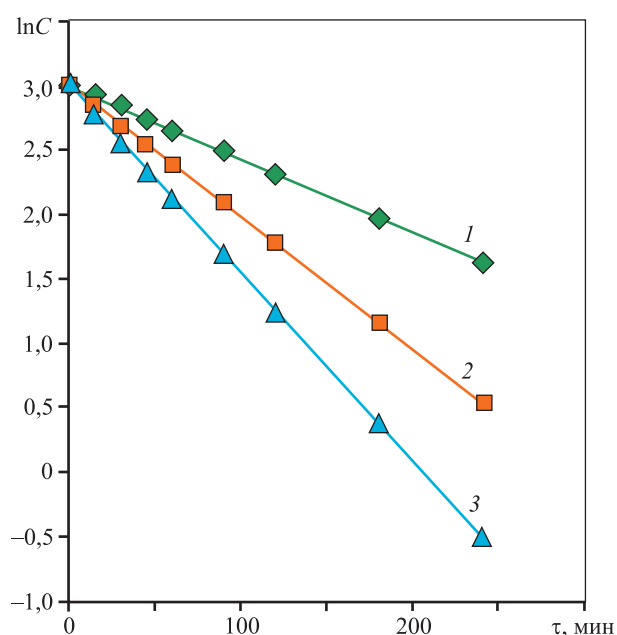


Рис. 2. Кинетические зависимости сорбции ионов Ni(II) от температуры 298 К (1), 318 К (2) и 338 К (3)

Fig. 2. Kinetic dependences of Ni(II) ion sorption at temperatures 298 K (1), 318 K (2), and 338 K (3)

ции растет значительно медленнее, что свидетельствует о сложности механизма данного процесса. Это подтверждает и величина энергии активации (E_a), найденная графически спрямлением уравнения Аррениуса:

$$\ln k = \ln k_0 \frac{E_a}{RT}. \quad (7)$$

Экспериментально установленное значение энергии активации процесса адсорбции составило 7,1 кДж/моль, что свидетельствуют о протекании процесса в диффузионной области [28].

Для решения вопроса о лимитирующей стадии адсорбции были проведены опыты с прерыванием

процесса в динамическом режиме на определенное время. Результаты показали, что во всех случаях при прерывании течения адсорбции на 24 ч наблюдалось снижение концентрации сорбируемого металла в вытекающем из колонки растворе. Разрыв непрерывности на выходных кривых адсорбции позволяет сделать заключение о том, что лимитирующей стадией кинетики процесса адсорбции ионов Ni(II) на углеродном адсорбенте в изученных условиях является диффузия внутри гранул адсорбента, т.е. адсорбция реализуется в условиях «гелевой» кинетики и скорость ее протекания тормозится внутридиффузионными процессами. Возможный механизм сорбции можно рассматривать как процесс диффузии комплексных ионов Ni(II), в частности гидроксопентамин-катиона $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_5(\text{OH})]^+$, внутрь гранул и взаимодействие его с функционально активными группировками на поверхности сорбентов по схеме ионного обмена.

Изучение взаимодействия методами ИК-спектроскопии показало, что регистрируемые результаты сорбции ионов металла происходят с участием двойных связей фрагментов соединений, расположенных на углеродной поверхности. Зафиксированы изменения в обертонах связей $=\text{CH}_2$, $=\text{C}-\text{NH}_2$ и $=\text{C}-\text{OH}$, а также в сопряженных фрагментах связей $-\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{C}-$ и $\text{R}-\text{C}=\text{O}$, $\text{R}-\text{OH}$. Это позволяет сделать вывод об участии в реакциях π -электронов указанных фрагментов молекул или их обменных частей. Возможно, они выступают донорами электронных пар, а свободные d -орбитали сорбируемого металла — акцепторами в комплексах соответствующих соединений. Это заключение подтверждает характер взаимодействия ионов металла с поверхностью адсорбента. Появление полос в его спектре после сорбции ионов металла при $\nu = 574, 604$ и 836 см^{-1} , соответствующих характеристическим полосами деформационных колебаний связей $\text{Me}-\text{O}-\text{C}$ и $\text{Me}-\text{O}-\text{Me}$, свидетельствует о наличии соответствующих связей в исследуемых соединениях.

Анализ результатов также показал, что в ходе адсорбции с ростом температуры наблюдается увеличение емкости сорбента по отношению к никелю. Адсорбция ионов Ni(II) в данном случае не соответствует классическому поведению ионов металлов: для многих из них в результате адсорбции наблюдается экзотермический эффект [29]. Вероятно, высокая устойчивость ассоциированных соединений никеля: аминоккомплексов ($K_y = 5,3 \cdot 10^8$), аквааминоккомплексов ($K_y = 4,2 \cdot 10^6$),

гидроксоаминоккомплексов ($K_y = 5,8 \cdot 10^6$) [26], предопределяет необходимость затрат дополнительной энергии для их разрушения перед сорбцией. Возможно, ее величина больше, чем энергия экзотермической реакции ионного обмена при закреплении Ni(II) на поверхности сорбента, и поэтому в целом процесс сорбции представляется эндотермическим.

В хлораммонийной технологии извлечения никеля из окисленных руд активный реагент, используемый для технологического преобразования оксидов металлов, регенерируется и возвращается в голову процесса для разложения новой партии ОНР [6]. Селективность хлорида аммония позволяет на начальной стадии освобождаться от большей части породы. При этом при вскрытии руды извлекается 75 % никеля в виде гидроксида [7]. На наш взгляд, целесообразно введение стадии адсорбционного извлечения никеля в процессе разделения технологического раствора, на которой осаждение и отделение гидроксида никеля будут происходить при $\text{pH} = 8,0 \div 8,5$ [8]. Для адсорбционного извлечения Ni(II) предлагается схема с двумя адсорберами с псевдоожиженным слоем сорбента (рис. 3).

При проведении адсорбционных исследований были получены сведения о механизме процесса, которые позволили разработать некоторые практические рекомендации для реализации предлагаемой схемы. Перед осуществлением процесса необходима корректировка кислотности технологического раствора до оптимальных значений, что достигается добавлением раствора гидроксида аммония. Для проведения адсорбции раствор насосом направляется снизу в адсорбер. По сравнению с другими конструкциями адсорберы с псевдоожиженным слоем сорбента имеют преимущества, такие как увеличенная площадь контакта фаз при том же объеме загрузки и большее время их контакта. Для адсорбционного извлечения металла выбрана конструкция в виде цилиндрической колонны с конусообразной нижней частью и распределительными решетками внутри аппарата. Для организации непрерывного процесса извлечения необходимо использовать два адсорбера: после насыщения сорбента в первом аппарате он переключается на перезагрузку, а второй включается на сорбцию. После перезагрузки сорбент направляется в десорбер, оснащенный мешалкой, куда подается разбавленный (1 : 20, или 2,3 %-ный) раствор серной кислоты. Нами установлено, что при использовании качестве элюата H_2SO_4 такой

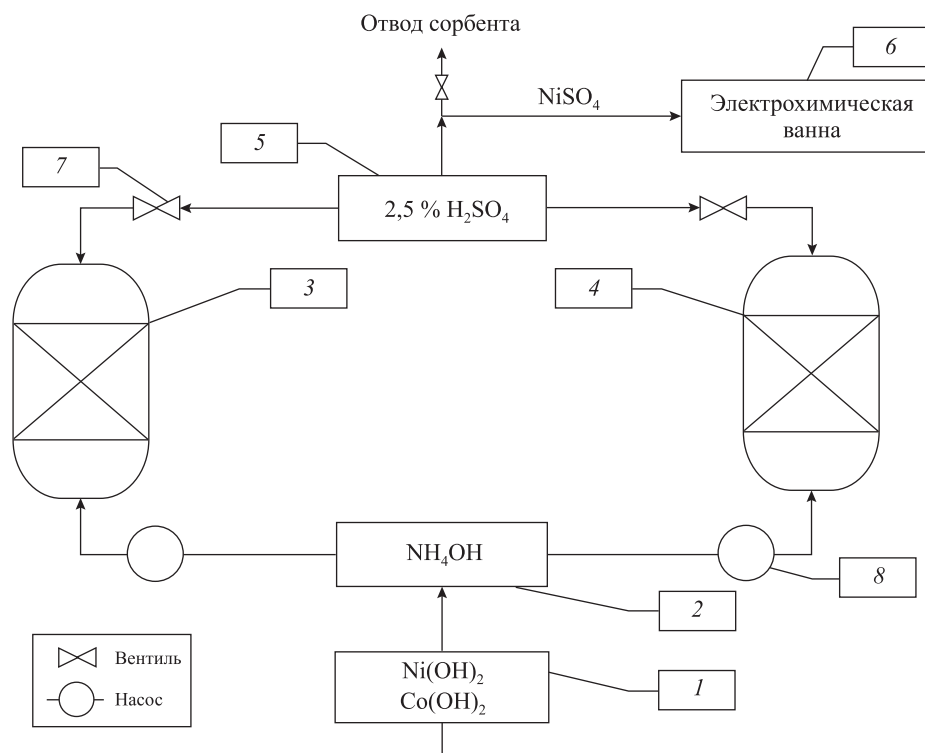


Рис. 3. Схема цепи аппаратов для сорбционного извлечения никеля

1, 2, 5, 6 – емкости для растворов; 3, 4 – адсорберы; 7 – вентили; 8 – насосы

Fig. 3. Schematic diagram of the apparatus chain for nickel sorption extraction

1, 2, 5, 6 – solution tanks; 3, 4 – adsorbers; 7 – valves; 8 – pumps

концентрации десорбируется от 95 до 98 % никеля. Насыщенный раствор Ni(II) после десорбции предлагается использовать для электролитического извлечения металла.

При работе сорбционных колонн следует учитывать, что степень извлечения никеля из растворов после каждого цикла уменьшается на 3–5 %. Переключение адсорберов производится раньше полного насыщения загрузки, так как при времени, граничащем со временем полного насыщения адсорбента, концентрация металлов в растворе близка к равновесной, и скорость адсорбции реально снижается. Ориентировочно общая продолжительность работы одного адсорбера до перезагрузки угля составляет 648 ч. В процессах целесообразно использовать только стандартные химические машины и аппараты.

Закключение

Хлораммонийная технология гидрометаллургического извлечения никеля из окисленных руд основана на твердофазном хлорировании окисленных никелевых руд хлоридом аммония при

$T = 473$ К с последующим водным выщелачиванием растворимых хлоридов никеля и других ценных компонентов. Целесообразно включение в вышеуказанную технологическую схему процесса адсорбционного извлечения никеля на стадии получения аммиачных растворов (Ni^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+}). Наиболее вероятно, что после осаждения металлы находятся в технологическом растворе в виде комплексных аммиакатов.

Исследование показало, что адсорбционное взаимодействие в системе «металлсодержащий раствор — углеродный сорбент» протекает достаточно интенсивно: константы скорости составляют от 0,204 до 0,287 с^{-1} . Значение энергии активации ($E_a = 7,1$ кДж/моль) указывает на протекание процесса адсорбции в диффузионной области. Изменение энергии Гиббса ($\Delta H = -8,96$ кДж/моль) свидетельствует, что с увеличением температуры повышается вероятность самопроизвольного течения процесса адсорбции.

Для адсорбционного извлечения Ni(II) предлагается схема с двумя адсорберами с псевдооживленным слоем сорбента и нижней подачей слабощелочного технологического раствора. Десорбция

никеля осуществляется 2,3 %-ным раствором серной кислоты. При этом десорбируется от 95 до 98 % никеля.

Список литературы/References

1. Нафталъ М.Н., Дьяченко В.Т., Серова Н.В., Брюквин В.А., Лысых М.П. Окисленные никелевые руды — перспективный источник минерального сырья для повышения объемов производства никеля и кобальта в ОАО «ГМК «Норильский никель». *Цветные металлы*. 2012;6:25—28.
Naftal M.N., Dyachenko V.T., Serova N.V., Bryukvin V.A., Lysykh M.P. Oxidized nickel ores are a promising source of mineral raw materials for increasing the production of nickel and cobalt in LLC MMK Norilsk Nickel. *Tsvetnye metally*. 2012;6:25—28. (In Russ.).
2. Резник И.Д., Ермаков Г.П., Шнейерсон Я.М. Никель. Т. 2. М.: Наука и технология, 2001. 468 с.
3. Калашникова М.И. Разработка научных основ создания новых и совершенствования действующих гидрометаллургических технологий переработки рудного сырья и промежуточных продуктов медно-никелевого производства: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2007.
4. Чунарев А.А., Колмачихина О.Б., Набойченко С.С. Обзор методов переработки окисленных никелевых руд и перспективы развития на Урале никелевого производства. В сб.: *Урал индустриальный. Бакунинские чтения: Индустриальная модернизация Урала в XVIII—XXI вв.*: Материалы XII Всероссийской научной конференции (4—5 дек. 2014 г.). Екатеринбург, 2014. Т. 2. С. 333—335.
5. Колмачихина О.Б. Комбинированная технология переработки окисленных никелевых руд (на примере Серовского месторождения): Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург: УрФУ, 2018. 132 с.
6. Андреев А.А., Дьяченко А.Н., Крайденко Р.И. Переработка окисленных никелевых руд с применением хлорида аммония. *Химическая технология*. 2010;11(2): 91—96.
Andreev A.A., Dyachenko A.N., Kraydenko R.I. Processing of oxidized nickel ores using ammonium chloride. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2010;11(2): 91—96. (In Russ.).
7. Андреев А.А., Дьяченко А.Н., Крайденко Р.И. Хлораммонийная технология переработки окисленных никелевых руд. *Цветные металлы*. 2011;1:18—21.
Andreev A.A., Dyachenko A.N., Kraydenko R.I. Chlorammonium technology of processing oxidized nickel ores. *Tsvetnye metally*. 2011;1:18—21.
8. Дударева Г.Н., Иринчинова Н.В., Дударев В.И. Адсорбционное извлечение никеля (II) из водных растворов техногенного характера. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2020;1(32):133—139.
<https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-133-139>
Dudareva G.N., Irinchinova N.V., Dudarev V.I. Adsorption extraction of nickel (II) from aqueous solutions of technogenic character. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. 2020;1(32):133—139. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-133-139>
9. Курдюмов В.Р., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И., Лебедь А.Б. Сорбционное извлечение ионов никеля (II) и марганца (II) из водных растворов. *Записки Горного института*. 2020;242:209.
<https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.209>
Kurdyumov V.R., Timofeev K.L., Maletsev G.I., Lebed A.B. Sorption extraction of nickel (II) and manganese (II) ions from aqueous solutions. *Zapiski Gornogo instituta*. 2020;242:209. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.209>
10. Tamjidi S., Esmaeili H., Moghadas B.K. Application of magnetic adsorbents for removal of heavy metals from wastewater: a review study. *Materials Research Express*. 2019;6(10):862—873.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3ffb>
11. Çelebi H., Gök G., Gök O. Adsorption capability of brewed tea waste in waters containing toxic lead (II), cadmium (II), nickel (II), and zinc (II) heavy metal ions. *Scientific Reports*. 2020;10(1):12.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-74553-4>
12. Nilgün Onursal, Yalçın Altunkaynak, Ayşe Baran, Mehmet Can Dal. Adsorption of nickel (II) ions from aqueous solutions using Malatya clay: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2017;42(5):14150.
<https://doi.org/10.1002/ep.14150>
13. Olufemi B., Eniodunmo O., Adsorption of nickel (II) ions from aqueous solution using banana peel and coconut shell. *International Journal of Technology*. 2018;9(3):434—445.
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i3.1936>
14. Chang Y.S., Au P.I., Mubarak N.M., Khalid M., Jagdish P., Walvekar R., Abdullah E.C. Adsorption of Cu(II) and Ni(II) ions from wastewater onto bentonite and bentonite/GO composite. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:33270—33296.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-09423-7>
15. Khan M.I., Almesfer M.K., Danish M., Ali I.H., Shoukry H., Patel R., Gardy J., Nizami A.S., Rehan M. Potential of Saudi natural clay as an effective adsorbent in heavy metals removal from wastewater. *Desalination and Water Treatment*. 2019;158:140—151.
<https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24270>

16. Gupta S., Sharma S.K., Kumar A. Biosorption of Ni(II) ions from aqueous solution using modified Aloe barbadensis Miller leaf powder. *Water Science and Engineering*. 2019;12:27–36.
<https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.04.003>
17. Islam M.A., Awual M.R., Angove M.J. A review on nickel (II) adsorption in single and binary component systems and future path. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019;7(5):103305.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103305>
18. Shahat A., Hassan M.A. H., El-Shahat M.F., Osama El-Shahawy, Md. Rabiul Awual. Visual nickel (II) ions treatment in petroleum samples using a mesoporous composite adsorbent. *Chemical Engineering Journal*. 2018;334:957–967.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.105>
19. Praveen P., Munilakshmi N., Sravani P. Removal of nickel (II) ion from an aqueous solution using red brick as an adsorbent. *Journal of Solid Waste Technology and Management*. 2023;49(2):175–184.
<https://doi.org/10.5276/jswtm/iswmaw/492/2023.175>
20. Mahmoud O. Abd El-Magied, Ali M.A. Hassan, Hamdi M.H. Gad T.M. Removal of nickel (II) ions from aqueous solutions using modified activated carbon: A kinetic and equilibrium study. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2018;39(6).
<https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1402337>
21. Qasem N.A., Mohammed R.H., Lawal D.U. Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *npj Clean Water*. 2021;4(1):1–15.
<https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
22. Леонов С.Б., Домрачева В.А., Елшин В.В., Дударев В.И., Ознобихин Л.М., Рандин О.И. Углеродные сорбенты на основе ископаемых углей. Иркутск: ИрГТУ, 2000. 268 с.
23. Леонов С.Б., Елшин В.В., Дударев В.И., Домрачева В.А. Способ получения сорбента: Патент 2064335 (РФ). 1996.
24. Dudareva G.N., Randin O.I., Petukhova G.A., Vavkul'skaya T.I. On the mechanism of sorption of nickel (II) ions by modified carbon sorbents. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2015;51(6):939–943.
<https://doi.org/10.1134/S2070205115060064>
25. Dudareva G.N., Irinchinova N.V., Dudarev V.I., Petukhova G.A. Study of removal of nickel(II) from aqueous solutions by sorption. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2019;55(5):841–848.
<https://doi.org/10.1134/S2070205119050071>
26. Дударева Г.Н. Сорбционное концентрирование и аналитическое определение никеля: Монография. Иркутск: ИРНИТУ, 2015. 154 с.
27. Марочкина В.В., Буюева Е.И., Кулагина Е.С. Сравнительный анализ методик определения хрома, ванадия, меди, никеля, марганца в сталях и чугунах методом атомно-абсорбционной спектроскопии с атомизацией в пламени. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2023;89(2):57–63.
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-2-II-57-64>
28. Marochkina V.V., Bueva E.I., Kulagina E.S. Comparative analysis of methods for determining chromium, vanadium, copper, nickel, manganese in steels and cast irons by the method of atomic absorption spectrometry with atomization in the flame. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2023; 89(2):57–63. (In Russ.).
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-2-II-57-64>
29. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1989. 462 с.
30. Цивадзе А.Ю., Русанов А.И., Фомкин А.А., Волощук А.М., Товбин Ю.К., Толмачев А.М., Авраменко В.А. Физическая химия адсорбционных явлений. М.: Граница, 2011. 302 с.

Информация об авторах

Владимир Иванович Дударев — д.т.н., профессор кафедры химии и биотехнологии им. проф. В.В. Тутуриной, Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ).

<https://orcid.org/0009-0001-6477-4422>

E-mail: vdudarev@mail.ru

Галина Николаевна Дударева — к.х.н., доцент кафедры химии и биотехнологии им. проф. В.В. Тутуриной, ИРНИТУ.

<https://orcid.org/0009-0004-3234-0672>

E-mail: gndudareva@mail.ru

Ариадна Алексеевна Яковлева — д.т.н., профессор кафедры химии и биотехнологии им. проф. В.В. Тутуриной, ИРНИТУ.

<https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

E-mail: ayakovistu@mail.ru

Information about the authors

Vladimir I. Dudarev — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Chemistry and Biotechnology named after Prof. V.V. Tuturina, Irkutsk National Research Technical University (INRTU).

<https://orcid.org/0009-0001-6477-4422>

E-mail: vdudarev@mail.ru

Galina N. Dudareva — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of Chemistry and Biotechnology named after Prof. V.V. Tuturina, INRTU.

<https://orcid.org/0009-0004-3234-0672>

E-mail: gndudareva@mail.ru

Ariadna A. Yakovleva — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Chemistry and Biotechnology named after Prof. V.V. Tuturina, INRTU.

<https://orcid.org/0000-0002-5747-2864>

E-mail: ayakovistu@mail.ru

Вклад авторов

В.И. Дударев — формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов.

Г.Н. Дударева — осуществление расчетов, проведение испытаний образцов, подготовка текста статьи.

А.А. Яковлева — научное руководство, корректировка текста, корректировка выводов.

Contribution of the authors

V.I. Dudarev — developed of the main concept, set the goal and objectives of the study, prepared the text, and formulated the conclusions.

G.N. Dudareva — performed calculations, tested samples, and prepared the text of the article.

A.A. Yakovleva — provided scientific guidance, revised the text, and refined the conclusions.

Статья поступила в редакцию 05.01.2024 г., доработана 14.03.2024 г., подписана в печать 18.03.2024 г.

The article was submitted 05.01.2024, revised 14.03.2024, accepted for publication 18.03.2024