

Оригинальная статья / Original article

УДК 661.183 : 669.213

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-133-139>

Адсорбционное извлечение никеля(II) из водных растворов техногенного характера

© Г.Н. Дударева, Н.В. Иринчинова, В.И. Дударев

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Разработана схема основного аппаратного узла для адсорбционного извлечения никеля из промышленных растворов, образующихся при переработке окисленных никелевых руд. Растворы представляют собой водную вытяжку комплексных соединений переходных металлов из руды с исходным содержанием никеля 1–2 %. Ступенчатая обработка растворов ориентирована на последовательное осаждение металлов аммиачной водой в виде гидроксидов, их декантационное и фильтратационное отделение и т.д., что существенно усложняет процесс получения целевого металла. Адсорбционный процесс значительно повышает экономическую эффективность извлечения ценного металла. По своим свойствам углеродные сорбенты отличаются химической устойчивостью, выдерживая жесткие условия высокотемпературного воздействия, противостоят сильноокислотной и сильнощелочной обработке. При этом они имеют развитую пористую структуру, значительную удельную поверхность и механическую прочность. Никель извлекается углеродными адсорбентами из растворов в слабощелочной среде при повышенной температуре. Схема узла извлечения ионов никеля(II) адсорбционным методом основана на использовании адсорбера с псевдоожиженным слоем, для которого вычислены эксплуатационные параметры на основе изучения непосредственно сорбции ионов никеля. Процесс адсорбционного извлечения ионов никеля(II) позволяет производить его полное селективное отделение и получение после десорбции насыщенного раствора, пригодного для прямого электролитического получения металла.

Ключевые слова: углеродные адсорбенты, селективное извлечение никеля, водные растворы

Информация о статье: Дата поступления 13 мая 2019 г.; дата принятия к печати 25 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2020 г.

Для цитирования: 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. Т. 10. N 1. С. 133–139. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-133-139>

Adsorption extraction of nickel (II) from industrial aqueous solutions

Galina N. Dudareva, Nadejda V. Irinchinova, Vladimir I. Dudarev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: A scheme for the primary unit of a technological means for the adsorption extraction of nickel from industrial solutions resulting from the processing of oxidised nickel ores is presented. The solutions comprise an aqueous extract of complex compounds of transition metals from an ore having an initial nickel content of 1–2 %. The traditional stepwise treatment of the solutions is oriented towards sequential precipitation of metals by ammonia water in the form of hydroxides, involving their decantation and filtration, etc., which significantly complicates the process of obtaining the target metal. The adsorption process significantly increases the economic efficiency of the extraction process for this valuable metal. In terms of their properties, carbon sorbents are chemically resistant, able to endure the harsh conditions of high temperature exposure and treatments based on strongly acidic and strongly alkaline solutions. Moreover, such sorbents have a developed porous structure, a significant specific surface area and high mechanical strength. The process of nickel extraction using carbon adsorbents from solutions in a weakly alkaline environment at elevated temperatures is described. The scheme of the nickel (II) ion extraction by adsorption unit is based on the use of a fluidised bed whose operational parameters are calculated directly by studying the sorption of nickel ions. The adsorp-

tion extraction of nickel (II) ions facilitates the complete selective separation and derivation of the metal following desorption of a saturated solution making the process suitable for direct electrolytic metal production.

Keywords: carbon adsorbents, selective nickel recovery, aqueous solutions

Information about the article: Received May 13, 2019; accepted for publication February 25, 2020; available online March 31, 2020.

For citation: Dudareva GN, Irinchinova NV, Dudarev VI. Adsorption extraction of nickel (II) from industrial aqueous solutions. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2020;10(1):133–139. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-133-139>

ВВЕДЕНИЕ

Никельсодержащие окисленные руды являются одним из проблемных видов сырья для производства никеля [1]. В состав руды входят такие металлы, как железо, алюминий, никель, хром, кобальт, марганец, магний, кальций [2]. По инновационной технологии руда обрабатывается при высокой температуре хлоридом аммония, далее выполняется водное выщелачивание и последовательное осаждение металлов аммиачной водой в виде гидроксидов, их декантационное и фильтрационное отделение [3]. Образующиеся растворы представляют собой водную вытяжку комплексных соединений переходных металлов из руды. При содержании в руде 1–2 % никеля такой передел является весьма длительным и не обеспечивает рентабельности производства никеля [4]. Одним из доступных и реальных путей решения этой проблемы является применение сорбционного способа, являющегося удобным и эффективным процессом при использовании углеродных адсорбентов [5]. Такие адсорбенты по своей природе способны выдерживать действие высоких температур и давления, агрессивных сред, механического воздействия [6]. Способ является высокоселективным в определенных условиях [7]. Для многократного использования адсорбента его емкость можно восстанавливать химическими или термохимическими процессами. Кроме того, адсорбционные процессы легко поддаются контролю и автоматизации. Адсорбционным способом возможно концентрирование никеля из большого объема производственных стоков в насыщенный раствор, пригодный для непосредственного электролитического выделения металла [8].

Целью настоящего исследования являлась разработка схемы и аппаратное оформление эффективного адсорбционного узла извлечения ионов никеля(II) из промышленных растворов с использованием новых углеродных адсорбентов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Углеродные адсорбенты, использованные в данной работе, получены парогазовой активацией термообработанных каменных углей и представляют собой черные гранулы неправильной формы со средним размером частиц от

1 до 2 мм, удельной поверхностью 550 м²/г, механической прочностью 82 %, суммарным объемом пор (по воде) 0,61 см³/г, сорбционной активностью по йоду 84 %, насыпной плотностью 560 г/дм³. Адсорбенты предварительно модифицировали органическим реагентом – диметилглиоксимом (ДМГ), избирательно взаимодействующим с ионами никеля(II) [9]. Модифицирование адсорбентов ДМГ проводили из 10 %-го раствора гидроксида натрия (NaOH) и 96 %-го этилового спирта (C₂H₅OH). При модифицировании использовали стандартный прием пропитки адсорбентов и последующего доведения образцов до постоянного веса. Адсорбцию никеля из производственных растворов проводили в статических условиях. Испытательный раствор объемом 50 см³ помещали в коническую колбу вместимостью 0,25 дм³, добавляли 1 г модифицированного сорбента и при перемешивании раствор аммиака (NH₃) до pH = 9,5–10 по универсальной индикаторной бумаге. Смесь перемешивали в течение 30 мин на магнитной мешалке. Далее адсорбент отфильтровывали на бумажный фильтр и направляли на регенерацию. Фильтр ополаскивали 3–5 мл 0,1 N раствором соляной кислоты (HCl) и водой по каплям до нейтральной реакции. Фильтрат количественно переносили в мерную колбу вместимостью 50 см³, приливали необходимые реактивы и доводили до метки дистиллированной водой. Количественное определение никеля проводили по методике с N-ацил-ацетгидразином [10]. Для определения количества сорбированного никеля сорбент подвергали регенерации с одновременным концентрированием никеля в малом объеме элюента. Модифицированные углеродные адсорбенты способны эффективно извлекать ионы никеля(II) из слабощелочной водной среды. Сорбционная емкость адсорбентов в отношении ионов никеля(II), определенная в статическом режиме, составляла 0,35 ммоль/г (при температуре 294 К), а динамическая обменная емкость – 85 % от статической (0,30 ммоль/г при той же температуре) [11].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная схема включает адсорбци-

онное извлечение никеля из определенного объема водных растворов модифицированным углеродным адсорбентом и аналитическое определение фотометрическим методом остаточной концентрации никеля в очищенном стоке [12].

Схема узла извлечения ионов никеля(II) сорбционным методом основана на использовании стандартного адсорбера с псевдооживленным слоем адсорбента. Растворы предварительно корректируются по кислотности среды. Оптимальную кислотность среды (pH = 9,5) создают добавлением раствора гидроксида аммония. Далее раствор насосом подается в нижнюю корпусную часть адсорбера, где осуществляется адсорбционный процесс. Аппараты с псевдооживленным слоем адсорбента имеют ряд преимуществ по сравнению с другими конструкциями адсорберов: большая площадь контакта фаз при том же объеме загрузки, большее время контакта фаз. Для работы была выбрана конструкция адсорбера в виде цилиндрической колонны с конусообразной нижней частью и распределительными решетками внутри аппарата. В лабораторных условиях лучшие сорбционные характеристики адсорбентов проявились в статическом режиме. Для организации непрерывного процесса извлечения использовали два адсорбера: после насыщения углеродного адсорбента в первом аппарате его переключали на перезагрузку, а второй включали на сорбцию. Во время перезагрузки адсорбент направлялся в десорбер, оснащенный мешалкой, куда подавался 1 %-й раствор соляной кислоты. Концентрированный раствор никеля(II) после десорбции предлагается возвращать в производство для дальнейшего использования. Расчет основных параметров адсорбера производили согласно СНиП 2.04.03-85¹ с учетом данных, полученных в ходе опытных исследований.

В промышленных установках высота псевдооживленного слоя в 1,2–1,5 раза выше высоты неподвижного слоя² [13].

Скорость потока промышленного раствора находили из соотношения:

$$Re = wdp_{ж} / \mu_{ж},$$

где Re – критерий Рейнольдса; d – диаметр шара того же объема, что и частица, м; ε_{nc} – порозность псевдооживленного слоя; $\mu_{ж}$ – динамическая вязкость воды, равная 0,0101 Па·с.

Критерий Архимеда вычисляли по формуле:

$$Ar = \frac{D^3 \cdot \rho_{ж}^2 \cdot g \cdot (\rho_T \pm \rho_{ж})}{\mu_{ж}^2 \cdot \rho_{ж}} = 13134,44.$$

где $\rho_{ж}$ – плотность воды, км/м³; g – ускорение

свободного падения, м/с²; ρ_T – истинная плотность адсорбента, км/м³.

Критерий Рейнольдса, рассчитанный по формуле

$$Re = \frac{Ar \varepsilon_{nc}^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar \varepsilon_{nc}^{4,75}}}$$

равен 15,51. Далее с учетом вычисленного значения Re определили скорость потока воды w , м/с:

$$w = \frac{Re \cdot \mu_{ж}}{dp_{ж}} = 0,01.$$

Диаметр аппарата определяли из уравнения расхода:

$$D_a = \sqrt{\frac{4q_w}{\pi w}} = 1,88.$$

Примем диаметр аппарата $D_a = 2$.

Высота неподвижного слоя H_0 связана с высотой псевдооживленного следующим соотношением [13]:

$$(1 - \varepsilon_H) \cdot H_0 = (1 - \varepsilon_{nc}) \cdot H_{nc},$$

где $\varepsilon_{nc} = \left(\frac{18Re + 0,36Re^2}{Ar} \right) \cdot 0,21 = 0,64$ – порозность псевдооживленного слоя.

Тогда высота псевдооживленного слоя, м, равна:

$$H_{nc} = \frac{H_0(1 - \varepsilon_0)}{1 - \varepsilon_0} = 1,4.$$

Объем псевдооживленного слоя равен 3,91 м³.

Скорость потока раствора должна быть меньше скорости начала псевдооживления, которая для слоя сферических частиц может быть найдена из соотношения [14]

$$Re_{onc} = w_{nc} dp_{ж} / \mu_{ж},$$

где $Re_{onc} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar}} = 6,57$ – критическое

значение модифицированного критерия Рейнольдса; w_{nc} – скорость начала псевдооживления, м/с; d – диаметр шара того же объема, что и частица, м.

¹ СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения (с изменением № 1); утв. постановлением Госкомитета СССР по делам строительства от 21.05.1985 г. № 71.

² Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / под ред. Ю.И. Дытнерского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1991. 496 с.

Рассчитанное значение скорости начала псевдооживления составило 0,005 м/с. Критическая скорость начала псевдооживления выше скорости потока жидкости, что обеспечивает нормальные условия движения адсорбента через аппарат.

Скорость уноса рассчитывали из уравнения

$$w_y = \frac{Re_y \nu}{d},$$

где ν – кинематическая вязкость воды, равная 10^{-6} м²/с.

При минимальном размере частиц адсорбента $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м критерий Архимеда равен:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_{ж}^2 \cdot g \cdot (\rho_T - \rho_{ж})}{\mu_{ж}^2 \cdot \rho_{ж}} = 840,6.$$

Соответствующий данному критерию Архимеда критерий Рейнольдса равен:

$$Re_y = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} = 23,56.$$

Тогда скорость уноса будет равна 0,05 м/с.

При расчете получено следующее соотношение скоростей начала псевдооживления, рабочего потока и скорости уноса: $0,005 < 0,01 < 0,05$ м/с, что вполне соответствует реальному процессу.

При среднем размере частиц адсорбента $d = 1,25 \cdot 10^{-3}$ м и скорости уноса 0,05 м/с критерий Рейнольдса равен 58,89, порозность слоя – 0,69. Тогда высота слоя, соответствующая началу уноса, будет равна:

$$H_y = \frac{H_0(1 - \varepsilon_0)}{1 - \varepsilon_y} = 1,63.$$

Высота неподвижного слоя $H_0 = 1$ м; псевдооживленного – $H_{nc} = 1,4$ м; высота слоя, соответствующая началу уноса, $H_y = 1,63$ при общей высоте адсорбера $H = 2,5$ м.

Расход адсорбента определяли, приняв, что на выходе из аппарата адсорбент полностью насыщен. Массовый расход адсорбента, кг/ч, рассчитанный как

$$G = \frac{q_w}{A} (C_H - C_K),$$

Равен 2,5 здесь A – емкость адсорбента, определенная по изотерме сорбции, г/кг.

Для расчета площади поверхности контакта фаз примем, что частицы имеют сферическую форму. В таком случае объем одной частицы равен:

$$V_q = \frac{\pi d^3}{6} = 1,02 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Площадь одной частицы:

$$S_q = \pi d^2 = 4,91 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Объем загрузки, который будет учитывать только объем частиц адсорбента, рассчитывается по формуле

$$V_3 = H_0 S_0 \varepsilon_0 = 1,42 \cdot \text{м}^3,$$

где S_0 – площадь адсорбера; H_0 – высота загрузки.

Число частиц, вступающих в контакт с жидкой фазой, рассчитывается как

$$N = \frac{V_3}{V_q} = 1,39 \cdot 10^9.$$

Площадь контакта фаз в псевдооживленном слое равна:

$$S_{к.ф.пс.} = N S_q = 6801,24 \text{ м}^2.$$

Площадь контакта фаз в неподвижном слое:

$$S_{к.ф.н.} = V_3 a = 906,83 \text{ м}^2,$$

где a – удельная поверхность адсорбента, м²/м³.

В псевдооживленном слое площадь контакта фаз значительно больше. Этот факт позволяет судить о рациональности применения аппаратов с псевдооживленным слоем.

Время контакта фаз для псевдооживленного слоя рассчитывается по формуле:

$$t_{кф} = \frac{V_{зпс}}{q_w} = \frac{\pi^2 H_{пс}}{q_w} = 1166,88 \text{ с} = 19 \text{ мин.}$$

При неподвижном слое адсорбента скорость потока $W = q_w / S_0 = 0,0012$ м/с. Учитывая, что высота неподвижного слоя $H_0 = 1$ м, получим:

$$t_{кф} = \frac{H_0}{W} = 33,45 \text{ с} = 13,89 \text{ мин.}$$

При условии обеспечения необходимого расхода время контакта фаз в псевдооживленном слое выше, чем в неподвижном.

Рассчитаем продолжительность работы адсорбционной установки t_{ads} до проскока (при одном адсорбере, находящемся в процессе перегрузки) для $Re > 4$, ч:

$$t_{ads} = \frac{p_{т}^{нвс}}{D_{sb}^{пвс} W} \left\{ H_{tot} - \frac{W}{\beta} \left[\frac{1}{p} \ln \left(\frac{C_H}{C_K} - 1 \right) + \ln \left(1 - \frac{C_K}{C_H} \right) + 1 \right] \right\} = 240,$$

где $D_{sb}^{max} = \frac{C_H - C_0}{a_{sb}^{min}}$ – минимальная доза адсор-

бента, кг/м³; H_{tot} – общая высота загрузки адсор-

бента в установке с учетом резервного адсорбе-

ра, м; $P = C_H / C_{0,5}$; $C_{0,5} = 15 \frac{C_s^{0,5072}}{K_p^{0,39282,6759}}$, моль/м³; C_s – растворимость никеля в воде, $C_s = 12,48$ моль/м³; K_p – константа равновесия, $K_p = 1490$ при 294 К (1730 при 314 К); γ – отношение молярного объема данного вещества к молярному объему стандартного вещества.

С учетом того, что каждый аппарат работает три цикла и степень очистки в каждом последующем на 10 % ниже, чем в предыдущем, общее время работы одного адсорбера до перезагрузки угля составляет 648 ч.

Переключение адсорберов обычно производится раньше полного насыщения загрузки, поскольку при времени, граничащем со временем полного насыщения адсорбента, концентрация металлов в растворе близка к равновесной и скорость сорбции снижается.

Результаты расчетов параметров адсорбера представлены в таблице.

Технико-экономическое обоснование и сравнение предложенного технологического способа очистки стоков от никеля с современными действующими технологиями выполнено с учетом минимизации производственных затрат на дополнительные операции с растворами [14–19].

**Характеристики адсорбера
с псевдооживленным слоем
для извлечения ионов никеля(II)**

**Characteristics of fluidized bed adsorber
for extraction of nickel (II) ions**

Показатель	Значение
Размер частиц адсорбента, мм	0,5–2,0
Общая площадь работающих адсорберов, м ²	2,83
Высота загрузки одного адсорбера, м	1
Скорость перемещения воды, м/с	0,01
Высота адсорбера, м	2,5
Диаметр адсорбера, м	2
Массовый расход адсорбента, кг/ч	2,5
Продолжительность работы одного адсорбера до регенерации адсорбента, ч	240
Продолжительность работы одного адсорбера до перезагрузки адсорбента, ч	648

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана схема адсорбционного извлечения ионов никеля(II) из водных растворов техногенного характера и его аппаратное оформление на основании расчета оптимальных параметров. Предложенная схема может быть рекомендована для селективного извлечения никеля из промышленных растворов, образующихся при переработке окисленных никелевых руд.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резник И.Д., Ермаков Г.П., Шнеерсон Я.М. Никель. В 3 т. Т. 2. М.: Изд-во ООО «Наука и технологии», 2001. 468 с.
2. Андреев А.А., Дьяченко А.Н., Крайденко Р.И. Хлораммонийная технология переработки окисленных никелевых руд // Цветные металлы. 2011. N 1. С. 18–21.
3. Дударев В.И., Филатова Е.Г., Дударева Г.Н., Климова О.В., Минаева Л.А., Рандин О.И. Сорбционное концентрирование тяжелых металлов и определение никеля в производственных растворах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. N 1 (81). С. 16–23.
4. Уткин Н.И. Производство цветных металлов. М.: Интермет Инжиниринг, 2000. 442 с.
5. Леонов С.Б., Домрачева В.А., Елшин В.В., Дударев В.И., Ознобихин Л.М., Рандин О.И. Углеродные сорбенты на основе ископаемых углей: монография. Иркутск: Из-во ИРГТУ, 2000. 268 с.
6. Дударева Г.Н. Сорбционное концентрирование и аналитическое определение никеля: монография. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. 154 с.
7. Дударева Г.Н., Везенцев А.И. Углеродные сорбенты для избирательного извлечения никеля(II) из водных растворов // Научные ведомости Белгородского университета. Серия: Естественные науки. 2013. N 10 (153). С. 125–130.
8. Запольский А.К., Образцов В.В. Комплексная переработка сточных вод гальванического производства. Киев: Тэхника. 1989. 199 с.
9. Дударева Г.Н., Рандин О.И. Сорбция ионов никеля(II) модифицированными углеродными сорбентами // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2013. N 1 (4). С. 34–38.
10. Dudareva G.N., Nguen N.A.T., Syrykh Yu.S., Petukhova G.A. Adsorption of nickel (II) ions on carbon adsorbents // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2013. Vol. 49. Issue 4. P. 413–420. <https://doi.org/10.1134/S2070205113040023>
11. Nguen N.A.T., Dudareva G.N. The mechanism of nickel(II) adsorption using AD-05-2 and sunit carbon adsorbents // Journal of Science and Technology. 2012. Vol. 50. N 3B. P. 26–31.
12. Dudareva G.N., Randin O.I., Petukhova G.A., Vakul'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. Vol. 51. Issue 6. P. 939–943. <https://doi.org/10.1134/S2070205115060064>
13. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1981. 810 с.
14. Колмачихина О.Б., Набойченко С.С., Бошняк М.В., Галимьянов А.Р. Выщелачивание

окисленных руд с предварительным хлорирующим обжигом // Цветные металлы. 2019. N 2. С. 21–25. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.02.03>

15. Серпокровлов Н.С., Вильсон Е.В., Гетманцев С.В., Марочкин А.А. Экология очистки сточных вод физико-химическими методами. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. 261 с.

16. Цемехман Л.Ш., Цымбулов Л.Б. Современные проблемы пирометаллургической переработки окисленных никелевых руд России // Цветные металлы. 2016. N 11 (887). С. 50–56. <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.11.04>

17. Mu W., Cui F., Huang Z., Zhai Y., Xu Q., Luo S. Synchronous extraction of nickel and copper from a mixed oxide-sulfide nickel ore in a low-

temperature roasting system // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 177. P. 371–377. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.260>

18. Дударев В.И., Иринчинова Н.В., Филатова Е.Г. Адсорбция ионов никеля(II) из водных растворов углеродными адсорбентами // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2017. N 1. С. 75–80. <https://doi.org/10.6060/tcct.2017601.5455>

19. 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. Vol. 55. Issue 5. P. 841–848. <https://doi.org/10.1134/S2070205119050071>

REFERENCES

1. Reznik ID, Ermakov GP, Shneerson YaM. *Nikel'*. Vol. 2. Moscow: Nauka i tekhnologii; 2001. 468 p. (In Russian)

2. Andreev AA, Dyachenko AN, Kraydenko RI. Chlorine-ammonium technology for processing of oxidized nickel ores. *Tsvetnye Metally*. 2011; 1:18–21. (In Russian)

3. Dudarev VI, Filatova EG, Dudareva GN, Klimova OV, Minaeva LA, Randin OI. Sorption concentration of heavy metals and determination of nickel in industrial solutions. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. 2015;1:16–23. (In Russian)

4. Utkin NI. *Non-ferrous metal production*. Moscow: Intermet Inzhiniring; 2000. 442 p. (In Russian)

5. Leonov SB, Domracheva VA, Elshin VV, Dudarev VI, Oznobihin LM, Randin OI. *Carbon sorbents on the basis of coal*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2000. 268 p. (In Russian)

6. Dudareva GN. *Sorptive concentration and analytical determination of nickel*. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2015. 154 p. (In Russian)

7. Dudareva GN, Vezentsev AI. Carbon sorbents for selective extraction of nickel (II) from aqueous solutions. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki* = Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences. 2013;10:125–130. (In Russian)

8. Zapol'skii AK, Obraztsov VV. *Complex processing of the galvanic production sewage*. Kiev: Tekhnika; 1989. 199 p. (In Russian)

9. Dudareva GN, Randin OI. The sorption of nickel (II) ions by modified carbon sorbents. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2013;1:34–38. (In Russian)

10. Dudareva GN, Nguen NAT, Syrykh YuS, Petukhova GA. Adsorption of nickel(II) ions on Carbon Adsorbents. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2013;49(4):413–420. <https://doi.org/10.1134/S2070205113040023>

11. Nguen NAT, Dudareva GN. The mechanism of nickel (II) adsorption using AD-05-2 and sunit carbon adsorbents. *Journal of Science and Technology*. 2012;50(3B):26–31.

12. Dudareva GN, Randin OI, Petukhova GA, Vakul'skaya TI. 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>

13. Gel'perin NI. *Basic processes and apparatuses of chemical technology*. Moscow: Khimiya; 1981. 810 p. (In Russian)

14. Kolmachikhina OB, Naboichenko SS, Bosnyak MV, Galimyanov AR. Oxidized nickel ore leaching with preliminary chloridizing roasting. *Tsvetnye Metally*. 2019;2:21–25. (In Russian) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.02.03>

15. Serpokrylov NS, Vil'son EV, Getmantsev SV, Marochkin AA. *Ecology of wastewater treatment by physico-chemical methods*. Moscow: Izdatel'stvo Associacii stroitel'nyh vuzov; 2009. 261 p. (In Russian)

16. Tsemekhman LSh., Tsymbulov LB. Modern problems of pyrometallurgical processing of oxidized nickel ores in Russia. *Tsvetnye Metally*. 2016;11:50–56. (In Russian) <https://doi.org/10.17580/tsm.2016.11.04>

17. Mu W, Cui F, Huang Z, Zhai Y, Xu Q, Luo S. Synchronous extraction of nickel and copper from a mixed oxide-sulfide nickel ore in a low-temperature roasting system. *Journal of Cleaner Production*. 2018;177:371–377. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.260>

18. Dudarev VI, Irinchinova NV, Filatova EG. Absorption of nickel ions (II) from water solutions by carbon adsorbents. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology. 2017; 1:75–80. (In Russian) <https://doi.org/10.6060/tcct.2017601.5455>

19. Dudareva GN, Irinchinova NV, Dudarev VI,

Petukhova GA. 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>

Критерии авторства

Дударева Г.Н., Иринчинова Н.В., Дудаев В.И. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Дударева Г.Н., Иринчинова Н.В., Дудаев В.И. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дударева Галина Николаевна,
к.х.н., доцент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
✉ e-mail: gndudareva@mail.ru

Иринчинова Надежда Владимировна,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: irnavl@mail.ru

Дударев Владимир Иванович,
д.т.н., профессор,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: vdudarev2@ex.istu.edu

Contribution

Galina N. Dudareva, Nadejda V. Irinchinova, Vladimir I. Dudarev carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Galina N. Dudareva, Nadejda V. Irinchinova, Vladimir I. Dudarev have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galina N. Dudareva,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
✉ e-mail: gndudareva@mail.ru

Nadejda V. Irinchinova,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
e-mail: irnavl@mail.ru

Vladimir I. Dudarev,
Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
e-mail: vdudarev2@mail.ru