



Водоочистка техногенных растворов от ионов никеля (II) комбинированным процессом

Н.В. Иринчинова¹, Е.Г.Филатова², В.И. Дударев³✉, В.Н. Кульков⁴

^{1,2,3,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Вариант комбинированной очистки водных растворов от ионов никеля (II) опирается на сорбционные технологии с применением электрогенерируемого гидроксида алюминия с аморфной пористой структурой в виде гидрогеля и развитой сорбирующей поверхностью. Такой гидроксид алюминия обладает мицеллярным строением и может быть описан коллоидной частицей: $\{[m \text{ Al(OH)}_3] n\text{Al(OH)}_2^+ (n-x) \text{ OH}^{-}\}^{x+} x\text{OH}^-$. Очистка связана с явлением сорбции загрязняющего иона на поверхности сорбента за счет дисперсионного взаимодействия. Предельная величина адсорбции никеля при 298 К и pH 7,6 составила 8,3 ммоль/г. Расход количества электричества соответствовал 9,5 А·ч при оптимальном времени электроагуляции десять минут и плотности тока 1,6 мА/см². Преимущества метода электроагуляции с применением алюминиевых электродов, в сравнении с другими методами очистки сточных вод, заключаются в простоте изготовления аппаратов и простоте их обслуживания. Эффективность очистки при электроагуляционной обработке составила 86 %. Доочистку техногенных водных растворов выполняли с использованием углеродных сорбентов в слабощелочной среде при pH 9,8. Величина сорбции никеля достигает 0,25 ммоль/г. Особенностью комбинированной технологии извлечения никеля из водных растворов является обеззараживание воды с улучшением ее органолептических показателей и возможностью избежать вторичного загрязнения очищаемых водных растворов вносимыми реагентами.

Ключевые слова: очистка, техногенные растворы, медь, сорбция

Для цитирования: Иринчинова Н.В., Филатова Е.Г., Дударев В.И., Кульков В.Н. Водоочистка техногенных растворов от ионов никеля (II) комбинированным процессом // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 3. С. 433–441.
<https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-433-441>. EDN: FPTQIO.

Original article

Water purification of technogenic solutions from nickel (II) ions by a combined process

Nadezhda V. Irinchinova¹, Elena G. Filatova²,
Vladimir I. Dudarev³✉, Viktor N. Kulkov⁴

^{1,2,3,4}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The option of combined purification of aqueous solutions from nickel (II) ions is based on sorption technologies using electrically generated aluminum hydroxide with an amorphous porous structure in the form of a hydrogel and a developed sorbing surface. Such aluminum hydroxide has a micellar structure and can be described by a colloidal particle: $\{[m \text{ Al(OH)}_3] n\text{Al(OH)}_2^+ (n-x) \text{ OH}^{-}\}^{x+} x\text{OH}^-$. Purification is associated with the phenomenon of sorption of a contaminating ion on the surface of the sorbent due to the dispersion interaction. The limiting value of nickel adsorption at 298 K and pH 7.6 was 8.3 mmol/g, the consumption of electricity corresponded to 9.5 A.h with an optimal electrocoagulation time of ten minutes and a current density of 1.6 mA/cm². The advantages of the electrocoagulation method using aluminum electrodes, in comparison with other wastewater treatment methods, are the simplicity of the equipment manufacturing and ease of maintenance. The purification efficiency during

© Иринчинова Н.В., Филатова Е.Г., Дударев В.И., Кульков В.Н., 2025

Том 15 № 3 2025

с. 433–441

Vol. 15 No. 3 2025

pp. 433–441

Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость
Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate

ISSN 2227-2917

(print)

ISSN 2500-154X

(online)

433

electrocoagulation treatment was 86%. Aftertreatment of technogenic aqueous solutions was performed using carbon sorbents in a slightly alkaline medium at pH 9.8. The sorption value of nickel reaches 0.25 mmol/g. A feature of the combined technology for extracting nickel from aqueous solutions is the disinfection of water with an improvement in its granoleptic properties and the possibility of avoiding secondary contamination of the treated aqueous solutions with applied reagents.

Keywords: purification, technogenic solutions, copper, sorption

For citation: Irinchinova N.V., Filatova E.G., Dudarev V.I., Kulkov V.N. Water purification of technogenic solutions from nickel (II) ions by a combined process. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2025;15(3):433-441. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-3-433-441>. EDN: FPTQIO.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение водных объектов ионами никеля происходит из-за техногенных стоков, образующихся при добыче и обогащении руды [1–3], выплавке сплавов [4], электрохимическом извлечении никеля из растворов [5–7], производстве и утилизации различных электротехнических изделий на гальванических производствах [8–10]. Основным источником ионов никеля (II) на предприятиях, использующих гальваническое производство, являются цианистые стоки, образующиеся при промывке после гальванопокрытий из цианистых ванн (цинкование, никелирование, меднение, кадмирование), осветление и обезжиривания деталей, которые содержат от 50 до 100 мг/дм³ комплексных цианидов тяжелых металлов [4]. Цианистый сток недопустимо смешивать с кислым во избежание образования летучих высокотоксичных соединений. Стоки мало агрессивны, но склонны к образованию отложений на стенках труб и резервуаров, и их сброс в системы канализации строго регламентирован [11, 12]. Обработка реагентами сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, позволяет в большинстве случаев снизить содержание ионов до величин, позволяющих осуществлять сброс условно очищенной воды в системы канализации. Когда требуется более глубокая очистка сточных вод, использование только реагентов не дает необходимого эффекта [13]. Метод не обеспечивает необходимой степени извлечения из сточных вод ионов никеля (II). Происходит дополнительное загрязнение стоков за счет внесения в них катионов и анионов реагентов [14]. Накапливаются большие объемы трудно обезвоживаемого и не утилизируемого осадка [15]. Серьезные трудозатраты связаны с эксплуатацией, необходимостью организации и содержания реагентного хозяйства с коррозионно-устойчивым специальным оборудованием и дозирующими устройствами [16]. Для обеспечения высокой степени очистки произ-

водственных сточных вод от ионов никеля (II) целесообразно использовать физико-химические методы очистки, основанные на вариантах сорбции [17, 18]. Так, метод электроагуляции с применением алюминиевых электродов имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами очистки сточных вод:

- простота изготовления аппаратов и неподвижность их обслуживания;
- возможность регулирования степени очистки путем изменения только одного параметра;
- отсутствие вращающихся частей в рабочей зоне аппарата [19].

Целью данной работы является разработка комбинированного процесса очистки водных растворов от ионов никеля (II), опирающегося на сорбционные технологии.

МЕТОДЫ

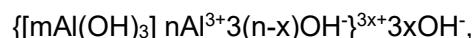
Изучение сорбционного процесса извлечения ионов никеля (II) из водных растворов проводили на модельных растворах, подготовленных из соли $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ квалификации «хх» и дистиллированной воды. Усредненный состав производственных сточных вод послужил основой для создания рабочих концентраций модельных растворов [4, 11]. При моделировании техногенных стоков электрохимических производств готовили растворы varying концентрации ионов никеля (II) от 5 до 70 мг/дм³. Концентрации ионов металла в растворах устанавливали по стандартным методикам [20]. При получении адсорбционных характеристик материалов использовали методы переменных концентраций, от 1 до 70 мг/дм³, и неизменных навесок – 0,1 г. В исследуемых растворах (100 см³) массовое соотношение жидкой и твердой фаз составляло 1:100. Величину адсорбции (A , ммоль/г) вычисляли по формуле: $A = (C_0 - C_{\text{равн}}) V / m$, где C_0 и $C_{\text{равн}}$ – исходная и равновесная концентрации металла в растворе, ммоль/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса сорбента, г.

Опыты проводили в термостатированных условиях при постоянной скорости перемешивания растворов для исключения влияния на процесс динамики перемещения ионов. Установка для электроагуляционного процесса извлечения никеля с помощью гидроксида алюминия включала источник питания Б5-71, амперметр М-1104, вольтметр М-243, электрохимическую ячейку объемом 100 см³ с алюминиевыми электродами, кулонометр и реостат, термостат UNU-4. Силу тока варьировали от 4 до 160 мА при напряжении 12 В. Остаточные количества ионов никеля (II) извлекали адсорбционными приемами с использованием углеродных сорбентов [21].

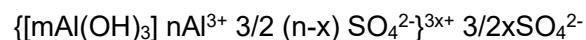
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При электроагуляции с алюминиевыми электродами происходит изменение физико-химических и фазово-дисперсных характеристик загрязнений, что способствует их обезвреживанию и более быстрому извлечению из воды [22]. Взаимодействие поллютантов с образующимися частицами адсорбентов является достаточно сложным. Наряду с воздействием на дисперсную систему электрического поля существенное влияние оказывают продукты электродных реакций, а также окислительно-восстановительные реакции на электродах [23]. Эффективность коагуляции и адсорбции частиц загрязнителей определяется их размерами, электрическими свойствами, материалом электродов, технологическими параметрами электролиза, ионным составом воды и т. д. [24]. В результате электроагуляционного процесса в сточных водах образу-

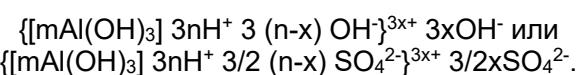
ется дисперсный раствор, состоящий из коллоидных частиц. Структуру мицеллы гидроксида алюминия можно представить формулой:



если в сточной воде присутствуют сульфат ионы, мицелла может иметь вид



В предположении, что потенциалопределяющим ионом является H⁺, мицеллы гидроксида алюминия могут иметь следующее строение



Исследование показало, что полученный электролитическим путем, гидроксид алюминия имеет пористую структуру гидрогеля и способен активно сорбировать на своей поверхности ионы тяжелых металлов. При значении pH 7,6 зафиксирован минимальный расход алюминия и минимальный расход количества электричества составляющий 3,2 г алюминия для удаления 1 г никеля при расходе количества электричества – 9,5 А·ч.

Оптимальная плотность тока для электроагуляционного извлечения ионов никеля (II) составила 1,6 мА/см². Адсорбция при этом удовлетворительно описывается изотермами Лэнгмюра и Фрейндлиха. Предельная величина сорбции достигала значений 8,3 ммоль/г (табл. 1).

Таблица 1. Значения предельной сорбции и константы сорбционного равновесия при оптимальных плотностях тока ($R^2=0,98$)

Table 1. Values of Ultimate Sorption and Sorption Equilibrium Constant at optimal current densities ($R^2=0,98$)

Ион	Температура, К	Уравнение изотермы сорбции Лэнгмюра	Предельная адсорбция A_{∞}		Константа сорбционного равновесия K
			ммоль/г	мкг/мг	
Ni ²⁺	298	$c/A = 0,1200c + 0,0138$	8,3	487,0	14 174
	318	$c/A = 0,0320c + 0,0025$	31,2	1831,4	12 820
	338	$c/A = 0,2150c + 0,0021$	40,0	298,5	11 905

Изучение влияния температуры на сорбируемость ионов никеля (II) показало (рис. 1), что с ростом температуры величина сорбции увеличивается.

Термодинамические расчеты процесса сорбции гидроксидом алюминия выполняли на основании уравнения Лэнгмюра. Для этого использовали изотермы сорбции, которые представляли в виде линейной зависимости

$c/A = f(c)$ при различных температурах. Значение дифференциальной теплоты сорбции для ионов никеля (II) 39,3 кДж/моль указывают на смешанный характер процесса, который заключается в том, что в начале имеет место хемосорбция, а затем физическая адсорбция. Полученное значение кажущейся энергии активации 22,9 кДж/моль свидетельствует о протекании процесса сорбции в диффузион-

ной области. Следовательно, скорость процесса сорбции зависит от перемешивания и концентрации растворителя. Такой эффект объясняется тем, что при увеличении скорости воды в электродном пространстве элек-

тролитической ячейки происходит вынос хлопьев гидроксида алюминия, уменьшается толщина диффузационного приэлектродного слоя, а также резко сокращается газонакопление в сточной воде.

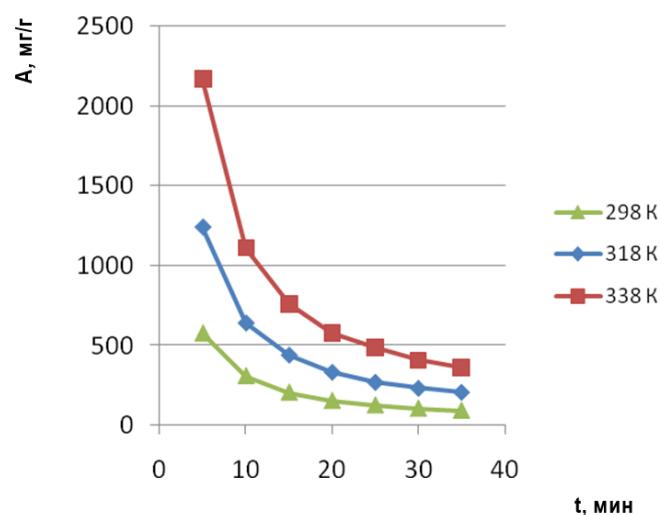


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции ионов никеля на гидрогеле при разных температурах среды

Fig. 1. Kinetic curves of sorption of nickel ions on a hydrogel at different temperatures of the medium

Результаты проведенных кинетических экспериментов свидетельствуют об уменьшении сорбции ионов металла во времени, что связано с изменением пористой структуры гидрогеля в результате кристаллизации. С течением времени самопроизвольно начинает протекать процесс старение коагулянта, направленный в сторону увеличения пассивности системы в отношении поверхностных явлений. Исходя из этого оптимальное время проведения электроагрегации составляет 10 мин. При оптимальном времени проведения электроагрегации, максимальная величина сорбции для ионов никеля 432 мкг/мг, а эффективность удаления ионов никеля из гальванических стоков находится в пределах 86 %. Для достижения предельно допустимых концентраций ионов никеля (II) в очищенных водах был изучен процесс доизвлечения металла с использованием углеродных сорбентов [25]. Углеродные сорбенты представляют собой темные пористые гранулы неправильной формы от 0,5 до 2,0 мм.

Суммарная пористость, представленная в основном микропорами, составляет 0,69 см³/г, а удельная поверхность 550 м²/г [26]. Выявлено, что угольно-сорбционный процесс существенно зависит от кислотности среды. Наибольшая величина адсорбции катионов никеля (II) наблюдается в слабощелочной среде при pH = 9,8.

Кинетические исследования показали, что адсорбционное равновесие в системе металло содержащий раствор – углеродный сорбент, отвечающее постоянству концентрации металла в растворе, устанавливается за три часа. При исходной концентрации металла 0,10–0,30 ммоль/дм³ за 30–45 мин достигается 80 % степень насыщения сорбента. Вероятно, определяющей стадией кинетики процесса адсорбции в изученных условиях является диффузия внутри гранул сорбента, то есть процесс адсорбции реализуется в условиях «гелевой» кинетики и скорость адсорбции тормозится внутридиффузионными процессами [27]. Функциональная оценка адсорбционного процесса может быть представлена изотермами мономолекулярной адсорбции, которые описываются классическим уравнением Ленгмюра [25]. Полученные изотермы адсорбции ионов никеля (II) (рис. 2) можно отнести к изотермам мономолекулярной адсорбции. Анализ полученных данных показывает, что адсорбция ионов увеличивается с ростом температуры. При 298 К величина адсорбции ионов никеля (II) составила 0,17 ммоль/л (9,9 мг/г), а при 338 К – 0,25 ммоль/л (14,7 мг/г). Известно, что процесс адсорбции является экзотермическим [28].

Рост величины адсорбции с ростом температуры, можно объяснить активированной адсорбцией ионов никеля (II). Обработка экспе-

риментальных данных с помощью уравнения Лэнгмюра, преобразованного к линейной форме: $1/A = 1/A_\infty + 1/A_\infty K C_{\text{равн}}$, позволила определить по величине отрезка прямой, пе-

ресекающейся с осью ординат, предельную величину адсорбции A_∞ и константу адсорбционного равновесия K , по тангенсу угла наклона прямой (табл. 2)

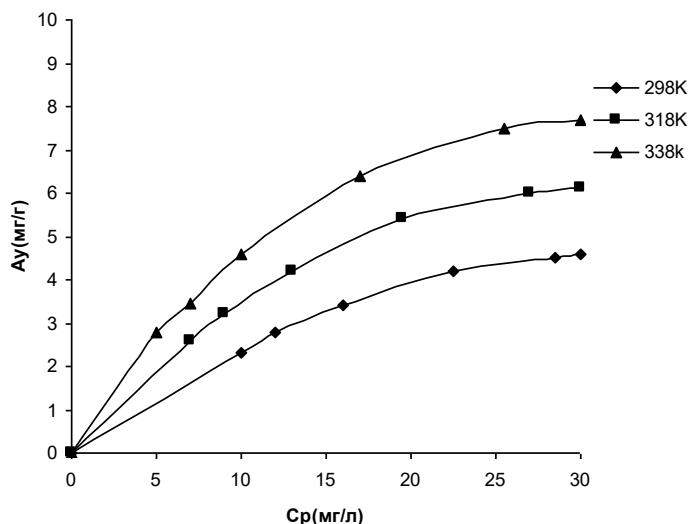


Рис. 2. Изотермы адсорбции ионов никеля (II) на углеродном сорбенте
Fig. 2. Isotherms of sorption of nickel (II) ions on carbon sorbent

Таблица 2. Термодинамические параметры адсорбции ионов никеля (II) на углеродном сорбенте
Table 2. Thermodynamic parameters of adsorption of nickel (II) ions on a carbon sorbent

T, K	A _∞ , ммоль/г	A _∞ , мг/г	K	ΔG ⁰ , кДж/моль	R ²
298	0,17	9,9	1770	-8,0	0,990
318	0,22	12,9	2054	-8,7	0,991
338	0,25	14,7	2672	-9,6	0,986

Энергию Гиббса рассчитывали по формуле $\Delta G = -RT \ln K$, где ΔG – энергия Гиббса; R – универсальная газовая постоянная 8,314 Дж/(моль×К); T – температура реакционной среды; K – константа равновесия. Значение энергии Гиббса при 298 К равное -23,7 кДж/моль указывает на самопроизвольный характер адсорбции. Наиболее вероятно, что адсорбционная способность амфотерного углеродного сорбента, использованного в работе, объясняется тем, что на поверхности пор присутствуют активные центры, определяющие его катионаобменные свойства [29]. Извлечение ионов никеля (II) из раствора протекает предпочтительно по ионообменному типу с обменом ионов металла из раствора на протоны в твердой фазе сорбента, о чем свидетельствует понижение равновесного значения pH от 9,8 до 9,5. Также было установлено, что десорбция и регенерация углеродного сорбента возможна разбавленными растворами серной кислоты [30]. Получаемый в результате комбинированной электрофлотационной и углеадсорбционной очистки раствор пригоден для работы в замкнутой системе водоснабжения промышленных предприятий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинированная технология очистки техногенных водных растворов от ионов никеля (II) основана на применении электрогенерируемого гидроксида алюминия, имеющего аморфную пористую структуру гидрогеля с развитой сорбирующей поверхностью. Активный гидроксид алюминия обладает мицеллярным строением и может быть представлен коллоидной частицей: $\{[m Al(OH)_3] nAl(OH)_2^+(n-x) OH^-\}^{x+}$. Процесс очистки связан с явлением сорбции загрязняющего иона на поверхности сорбента за счет дисперсионного взаимодействия. Предельная величина адсорбции никеля при 298 К и pH 7,6 составила 8,3 ммоль/г.

Расход количества электричества соответствовал 9,5 А·ч при оптимальном времени электроагрегации 10 мин и плотности тока 1,6 мА/см². Эффективность очистки загрязненных водных растворов при электроагрегационной обработке составляет 86 %. Доочистка водных растворов с использованием углеродных сорбентов выполняется в слабокислой среде при pH 9,8. Величина сорбции никеля достигает 0,25 ммоль/г. Особенностью

комбинированной технологии извлечения никеля из водных растворов является возможность избежать вторичного загрязнения очищаемых водных растворов вносимыми реген-

тами. При электрохимической обработке производится очистка и обеззараживание воды, одновременно улучшаются ее органолептические показатели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Короневич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Антропогенные воздействия на мировые водные ресурсы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 67–79. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-67-79>. EDN: BELBFC.
2. Akbal F., Camci S. Copper, Chromium and Nickel Removal from Metal Plating Wastewater By Electro-coagulation // Desalination. 2011. Vol. 269. P. 214–222. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.001>.
3. Li Chen, Mingxi Zhou, Jingzhe Wang, Zhiqin Zhang, Chengjiao Duan, Xiangxiang Wang et al. A Global Meta-Analysis of Heavy Metal(Loid)S Pollution in Soils Near Copper Mines: Evaluation Of Pollution Level And Probabilistic Health Risks // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 835. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155441>.
4. Чугунов А.Д., Филатова Е.Г. Тяжелые металлы: химические вопросы экологической безопасности. Монография. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2024. 180 с. EDN: APQDGW.
5. Гайдукова А.М., Колесников В.А., Похвалилова А.А. Очистка сточных вод гальванического производства от ионов металлов с применением сорбции в статическом режиме и электрофлотации // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 160–166. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-160-166>. EDN: EMPPDT.
6. Akbarpour M.R., Gharibi Asl F., Rashedi H. Anti-corrosion and Microstructural Properties of Nanostructured Ni-Co Coating Prepared by Pulse-Reverse Electrochemical Deposition Method // Journal of Materials Engineering and Performance. 2024. Vol. 33. P. 94–101. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-07969-4>.
7. Keshtkar Z., Tamjidi S., Vaferi B. Intensifying Nickel (II) Uptake from Wastewater Using the Synthesized γ -Alumina: An Experimental Investigation of the Effect of Nano-Adsorbent Properties and Operating Conditions // Environmental Technology & Innovation. 2021. Vol. 22. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101439>.
8. Bilal M., Ihsanullah I., Younas M., UI Hassan Shah M. Recent Advances in Applications of Low-Cost Adsorbents for the Removal of Heavy Metals from Water: A Critical Review // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 278. P. 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119510>.
9. Mohammadpour Z., Zare H.R. Improving the Corrosion Resistance of the Nickel–Tungsten Alloy by Optimization of the Electroplating Conditions // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2020. Vol. 73. P. 937–944. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01894-z>.
10. Xinping He, Bing Yao, Yang Xia, Hui Huang, Yongping Gan, Wenku Zhang Coal Fly Ash Derived Zeolite for Highly Efficient Removal of Ni²⁺ Inwaste Water // Powder Technology. 2020. Vol. 367. P. 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.037>.
11. Смирнов А.В., Смирнов В.Н., Смирнов К.В. Очистка шахтных вод с использованием природных сорбентов в условиях стационарных очистных сооружений предприятий металлургии // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2. С. 62–76. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/62-76>. EDN: CAQCFK.
12. Kruszelnicka I., Ginter-Kramarczyk D., Gora W., Staszak K., Baraniak M., Lota G. et al. Removal of Nickel(II) from Industrial Wastewater Using Selected Methods: A Review // Chemical and Process Engineering. 2022. Vol. 43. Iss. 4. P. 437–448. <https://doi.org/10.24425/cpe.2022.142284>.
13. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство. М.: Глобус, 2002. 352 с.
14. Kumara A., Baloucha A., Pathanb A.A., Abdullahe, Jagirania M.S., Ali Muhammad Maher et al. Remediation of Nickel Ion from Wastewater by Applying Various Techniques: A Review // Acta Chemica Malaysia. 2019. Vol. 3. Iss. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.2478/acmty-2019-0001>.
15. Домрачева В.А., Васильковская Д.В. Обоснование ферментно-кавитационной обработки осадка сточных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 114–122. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-114-122>. EDN: UPZYBG.
16. Ястребов К.Л., Дружинина Т.Я., Надршин В.В., Карлина А.И. Подготовка и очистка природных и сточных вод. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2014. 564 с. EDN: TJNFUX.
17. Серпокрылов Н.С., Вильсон Е.В., Гетманцев С.В., Марочкин А.А. Экология очистки сточных вод физико-химическими методами. М.: Ассоциация строительных вузов, 2009. 261 с. EDN: QNOEEN.
18. Веденяпина М.Д., Курмышева А.Ю., Кулайшин С.А., Кряжев Ю.Г. Адсорбция некоторых тяжелых металлов на активированных углях (обзор) // Химия твердого топлива. 2021. № 2. С. 18–41. <https://doi.org/10.31857/S0023117721020092>. EDN: UOOLVP.

19. Филатова Е.Г., Дударев В.И. Оптимизация электроагуляционной очистки сточных вод гальванических производств. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2013. 140 с. EDN: TJNHKV.
20. Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод. М.: Химия, 1974. 336 с.
21. Дударев В.И., Филатова Е.Г. Углеродные адсорбенты на основе природных углей для извлечения металлов из растворов // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35. № 13. С. 28–30. EDN: OOVWUJ.
22. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. Characteristics and Adsorption Capacities of Low-Cost Sorbents for Wastewater Treatment: A Review // Sustainable Materials and Technologies. 2016. Vol. 9. P. 10–40. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.002>.
23. Браяловский Г.Б., Никифоров А.Ф., Насчетникова О.Б., Мигалатий Е.В. Экология водных систем: применение ингибиторов коррозии для очистки сточных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 114–123. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_3_8. EDN: BMFUGK.
24. Dudarev V.I., Filatova E.G. A Study of the Adsorption of Toxic Ions by Electrogenerated Gibbsite // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2021. Vol. 57. P. 283–288. <https://doi.org/10.1134/S2070205121020052>.
25. 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. № 1. С. 133–139. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-133-139>. EDN: AFTXBO.
26. Фомкин А.А. Синтез, свойства и применение углеродных адсорбентов. М.: Граница, 2021. 312 с.
27. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. СПб.: Химия, 1982. 168 с.
28. Цивадзе А.Ю., Русанов А.И., Фомкин А.А. Физическая химия адсорбционных явлений. М.: Граница, 2011. 301 с.
29. Тимощук И.В., Горелкина А.К., Иванова Л.А. К вопросу о возможности использования адсорбции при очистке карьерных сточных вод // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2021. № 3. С. 59–63. EDN: BCZQVT.
30. Леонов С.Б., Елшин В.В. Дударев В.И., Рандин О.И., Озnobихин Л.М., Домрачева В.А. Углеродные сорбенты на основе ископаемых углей. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2000. 268 с. EDN: TZLQAD.

REFERENCES

1. Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaitseva I.S. Anthropogenic Impacts on Global Water Resources. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2024;2:67-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-67-79>. EDN: BELBFC.
2. Akbal F., Camci S. Copper, Chromium and Nickel Removal from Metal Plating Wastewater by Electro-coagulation. Desalination. 2011;269:214-222. [http://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.001](https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.001).
3. Li Chen, Mingxi Zhou, Jingzhe Wang, Zhiqin Zhang, Chengjiao Duan, Xiangxiang Wang et al. A Global Meta-Analysis of Heavy Metal(Loid)S Pollution in Soils Near Copper Mines: Evaluation Of Pollution Level And Probabilistic Health Risks. Science of The Total Environment. 2022;835:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155441>.
4. Chugunov A.D., Filatova E.G. Heavy Metals: Chemical Issues of Environmental Safety. Monograph. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk National Research Technical University, 2024. 180 p. (In Russ.). EDN: APQDGW.
5. Gaydukova A.M., Kolesnikov V.A., Pokhvalitova A.A. Treatment of Electroplating Wastewater From Metal Ions with the Use of Sorption in Static Mode and Electroflotation. Theoretical and Applied Ecology. 2021;4:160-166. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-160-166>. EDN: EMPPDT.
6. Akbarpour M.R., Gharibi Asl F., Rashedi H. Anti-corrosion and Microstructural Properties of Nanostructured Ni-Co Coating Prepared by Pulse-Reverse Electrochemical Deposition Method. Journal of Materials Engineering and Performance. 2024;33:94-101. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-07969-4>.
7. Keshtkar Z., Tamjidi S., Vaferi B. Intensifying Nickel (II) Uptake from Wastewater Using the Synthesized γ-Alumina: An Experimental Investigation of the Effect of Nano-Adsorbent Properties and Operating Conditions. Environmental Technology & Innovation. 2021;22:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101439>.
8. Bilal M., Ihsanullah I., Younas M., Ul Hassan Shah M. Recent Advances in Applications of Low-Cost Adsorbents for the Removal of Heavy Metals from Water: A Critical Review. Separation and Purification Technology. 2021;278:1-28. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119510>.

9. Mohammadpour Z., Zare H.R. Improving the Corrosion Resistance of the Nickel–Tungsten Alloy by Optimization of the Electroplating Conditions. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020;73:937-944. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01894-z>.
10. Xinpingle He, Bing Yao, Yang Xia, Hui Huang, Yongping Gan, Wenku Zhang Coal Fly Ash Derived Zeolite for Highly Efficient Removal of Ni²⁺ Inwaste Water. *Powder Technology*. 2020;367:40-46. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.037>.
11. Smirnov A.V., Smirnov V.N., Smirnov K.V. Purification of Mine Wastewater Using Natural Sorbents in the Conditions of Stationary Treatment Facilities of Metallurgy Enterprises. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2024;2:62-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2024-2/62-76>. EDN: CAQCFK.
12. Kruszelnicka I., Ginter-Kramarczyk D., Gora W., Staszak K., Baraniak M., Lota G. et al. Removal of Nickel(II) from Industrial Wastewater Using Selected Methods: A Review. *Chemical and Process Engineering*. 2022;43(4):437-448. <https://doi.org/10.24425/cpe.2022.142284>.
13. Vinogradov S.S. *Environmentally Safe Galvanic Production*. Moscow: Globus, 2002. 352 p. (In Russ.).
14. Kumara A., Baloucha A., Pathanb A.A., Abdullahe, Jagirania M.S., Mahar A.M. et al. Remediation of Nickel Ion from Wastewater by Applying Various Techniques: A Review. *Acta Chemica Malaysia*. 2019;3(1):1-16. <https://doi.org/10.2478/acmy-2019-0001>.
15. Domracheva V.A., Vasilkovskaya D.V. Rationale for Enzymatic Cavitation Treatment of Sewage Sludge. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024;3:114-122. (In Russ.). <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-114-122>. EDN: UPZYBG.
16. Yastrebov K.L., Druzhinina T.Ya., Nadrsrin V.V., Karlina A.I. *Preparation and Purification of Natural and Waste Water*. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk National Research Technical University, 2014. 564 p. (In Russ.). EDN: TJNFUX.
17. Serpokrylov N.S., Vilson E.V., Getmantsev S.V., Marochkin A.A. *Ecology of Wastewater Treatment by Physical and Chemical Methods*. Moscow: Association of Construction Universities, 2009. 261 p. (In Russ.). EDN: QNOEEN.
18. Vedenyapina M.D., Kurmysheva A.Y., Kulaishin S.A., Kryazhev Y.G. Adsorption of Heavy Metals on Activated Carbons (A Review). *Solid Fuel Chemistry*. 2021;2:18-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0023117721020092>. EDN: UOOLVP.
19. Filatova E.G., Dudarev V.I. *Optimization of Electrocoagulation Treatment of Wastewater from Galvanic Industries*. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk National Research Technical University, 2013.140 p. (In Russ.). EDN: TJNHKV.
20. Lure Yu.Yu., Rybnikova A.I. *Chemical Analysis of Industrial Wastewater*. Moscow: Chemistry, 1974. 336 p. (In Russ.).
21. Dudarev V.I., Filatova E.G. Carbone Adsorbentbased on Natural Coals For the Extraction of Metals from Solutions. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2021;35(13):28-30. (In Russ.). EDN: OOVWUJ.
22. De Gisi S., Lofrano G., Grassi M., Notarnicola M. Characteristics and Adsorption Capacities of Low-Cost Sorbents for Wastewater Treatment: A Review. *Sustainable Materials and Technologies*. 2016;9:10-40. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2016.06.002>.
23. Brayalovskiy G.B., Naschetnikova O.B., Nikiforov A.F., Migalati E.V. Ecology of Aquatic Systems: Application of Corrosion Inhibitors for Waste Water Treatment. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023;3:114-123. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/19994508_2023_3_8. EDN: BMFUGK.
24. Dudarev V.I., Filatova E.G. A Study of the Adsorption of Toxic Ions by Electrogenerated Gibbsite. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2021;57:283-288. <https://doi.org/10.1134/S2070205121020052>.
25. Dudareva G.N., Irinchinova N.V., Dudarev V.I. Adsorption Extraction of Nickel (li) From Industrial Aqueous Solutions. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(1):133-139. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-1-133-139>. EDN: AFTXBO.
26. Fomkin A.A. *Synthesis, Properties and Application of Carbon Adsorbents*. Moscow: Granitsa, 2021. 312 p. (In Russ.).
27. Smirnov A.D. *Sorption Purification of Water*. Saint Petersburg: Chemistry, 1982. 168 p. (In Russ.).
28. Tsivadze A.Yu., Rusanov A.I., Fomkin A.A. *Physical Chemistry of Adsorption Phenomena*. Moscow: Granitsa, 2011. 301 p. (In Russ.).
29. Timoshchuk I.V., Gorelkina A.K., Ivanova L.A., Prosekov A.Yu., Latokhin V.A. On The Issue of Possibility to Use Adsorption While the Open-Cast Mine Wastewater Treatment. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti*. 2021;3:59-63. (In Russ.). EDN: BCZQVT.
30. Leonov S.B., Elshin V.V. Dudarev V.I., Randin O.I., Oznobikhin L.M., Domracheva V.A. *Carbon Sorbents Based on Fossil Coals*. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk National Research Technical University, 2000. 268 p. (In Russ.). EDN: TZLQAD.

Информация об авторах

Иринчинова Надежда Владимировна,
Заведующий учебными лабораториями,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: irnavl@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-9575-430X>
Author ID: 858400

Филатова Елена Геннадьевна,
к.т.н., доцент, доцент кафедры химии
и биотехнологии им. В.В. Тутуриной,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: efila@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8704-7455>
Author ID: 461353

Дударев Владимир Иванович,
д.т.н., профессор, профессор кафедры химии
и биотехнологии им. В.В. Тутуриной,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉e-mail: vdudarev@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-6477-4422>
Author ID: 676659

Кульков Виктор Николаевич,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры инженерных коммуникаций
и систем жизнеобеспечения,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3838-0777>
Author ID: 730720

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в
подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.04.2025.
Одобрена после рецензирования 12.05.2025.
Принята к публикации 14.05.2025.

Information about the authors

Nadezhda V. Irinchinova,
Head of Educational Laboratories,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: irnavl@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-9575-430X>
Author ID: 858400

Elena G. Filatova,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Chemistry and Biotechnology named
after V.V. Tuturina,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: efila@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8704-7455>
Author ID: 461353

Vladimir I. Dudarev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Chemistry
and Biotechnology named after V.V. Tuturina,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉e-mail: vdudarev@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-6477-4422>
Author ID: 676659

Victor N. Kulkov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Engineering
Communications and Life Support Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russia,
e-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3838-0777>
Author ID: 730720

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of 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 article

The article was submitted 30.04.2025.
Approved after reviewing 12.05.2025.
Accepted for publication 14.05.2025.