

## Сравнение сорбентов для извлечения катионов никеля (II) из водных сред

Лариса П. Бондарева<sup>1</sup>[larbon@mail.ru](mailto:larbon@mail.ru) 0000-0001-9143-9374Кристина В. Гринь<sup>1</sup>[kristina.zueva.2000@list.ru](mailto:kristina.zueva.2000@list.ru)<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Аннотация.** Актуальной экологической и технологической задачей является очистка природных и сточных вод от катионов никеля (II) и контроль их содержания, поскольку катионы никеля относятся к третьему классу и являются опасными для здоровья человека. К настоящему времени предложено большое количество методов удаления катионов никеля (II) из воды, основным из которых можно считать сорбционный. В свою очередь в литературе имеются разнообразные сведения о наиболее эффективных сорбентах для очистки от катионов никеля, которые иногда противоречат друг другу. В работе определены равновесные характеристики сорбции катионов никеля (II) на различных полярных сорбентах: катионообменниках пористом карбоксильном Токем 200, хелатном иминодикарбоксильном Amberlite IRC 748, гелевом сульфокатионите КУ-2, опытном фосфорноокислом гелевом КФП; сильноосновном гелевом анионообменнике АВ-17, а также природных адсорбентах кремнезем и шунгит. Получены и описаны уравнением Ленгмюра изотермы сорбции, установлены наиболее перспективные материалы для удаления катионов никеля (II) из водных сред. Определено, что изученные сорбенты по равновесным сорбционным характеристикам можно расположить в ряд: Токем 200 > КФП > Amberlite IRC 748 > АВ-17 > КУ-2 > Кремнезем > Шунгит. Наиболее эффективными сорбентами для удаления катионов никеля (II) из водных растворов можно считать опытный образец фосфорноокислого гелевого катионообменника КФП и карбоксильного пористого катионообменника Токем 200. В работе получены выходные кривые сорбции и десорбции катионов никеля (II) из смеси с катионами меди (II), показана возможность полного выделения катионов никеля из водного раствора.

**Ключевые слова:** катионы никеля, ионный обмен, сорбция, изотермы сорбции, коэффициенты равновесия, выходные кривые сорбции и десорбции

## Comparison of sorbents for extraction of nickel (II) cations from aqueous media

Larisa P. Bondareva<sup>1</sup>[larbon@mail.ru](mailto:larbon@mail.ru) 0000-0001-9143-9374Krustina V. Grin<sup>1</sup>[kristina.zueva.2000@list.ru](mailto:kristina.zueva.2000@list.ru)<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Abstract.** Abstract: An urgent ecological and technological problem is the purification of natural and waste water from nickel cations and control of their content, since nickel cations belong to the third class and are hazardous to human health. To date, a large number of methods for removing nickel (II) cations from water have been created, the main of which can be considered sorption. In turn, the literature contains a variety of information about the most effective sorbents for cleaning from nickel cations, which sometimes contradict each other. The work determined the equilibrium characteristics of the sorption of nickel (II) cations on various polar sorbents on cation exchangers porous carboxyl Tokem 200, chelated iminodicarboxylic Amberlite IRC 748, gel sulfonic cation exchanger KU-2, experimental phosphoric acid gel KFP; strongly basic gel anion exchanger AV-17, as well as natural adsorbents flint and shungite. Sorption isotherms were obtained and described by the Langmuir equation, and the most promising materials for removing nickel cations from aqueous media were established. It has been determined that the studied sorbents, according to their equilibrium sorption characteristics, can be arranged in the following order: Tokem 200 > KFP > Amberlite IRC 748 > AV-17 > KU-2 > Flint > Shungite. The most effective sorbents for removing nickel (II) cations from aqueous solutions can be considered a prototype of a phosphate cation exchanger for gel CFP and a carboxyl porous cation exchanger Tokem 200, separating nickel cations from an aqueous solution.

**Keywords:** nickel cations, ion exchange, sorption, sorption isotherms, equilibrium coefficients, output curves of sorption and desorption

### Введение

В перечень главных загрязнителей водных объектов окружающей среды в первую очередь входят катионы тяжелых металлов, среди которых выделяют никель, как наиболее опасный для здоровья человека. Никель и его соединения раздражающе действуют на органы дыхания и кожу, являются аллергенами, изменяют иммуно-биологическое состояние организма, обладают канцерогенными свойствами, поэтому содержание катионов никеля нормируется в водных

Для цитирования

Бондарева Л.П., Гринь К.В. Сравнение сорбентов для извлечения катионов никеля (II) из водных сред // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 1. С. 238-244. doi:10.20914/2310-1202-2022-1-238-244

объектах. Предельно допустимая концентрация катионов никеля в воде составляет 0.1 мг/л, порог токсичности для организма человека – 20 мг/день, класс опасности третий.

Актуальной экологической и технологической задачей является очистка природных и сточных вод от катионов никеля и контроль их содержания.

В настоящее время существует достаточно методов очистки воды от катионов тяжелых металлов, в том числе реагентная очистка,

For citation

Bondareva L.P., Grin K.V. Comparison of sorbents for extraction of nickel (II) cations from aqueous media. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 1. pp. 238–244. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-1-238-244

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

методами осаждения и электрокоагуляции, связыванием в комплексные соединения и прочие [1, 2]. Однако наиболее перспективной, позволяющей полностью извлекать токсичные катионы без больших затрат и экологических последствий остается сорбционная очистка.

Сорбционной очистке от катионов никеля посвящено большое количество работ, в которых используются различные природные, модифицированные или синтетические материалы [3–22]. Так в работах [3, 4] исследована сорбция ионов Ni (II) волокнистым ионообменником ФИБАН X-1, содержащим иминодикарбоксильные функциональные группы, получены изотермы, рассчитаны равновесные характеристики и отмечены особенности процессов, сопровождающих сорбцию, показана перспективность применения данного сорбента для выделения катионов никеля в малых концентрациях. Полученные значения констант сорбции и величины предельной сорбции катионов Ni (II) показали, что волокнистый ионообменник ФИБАН X-1 может быть использован на стадии доочистки сточных вод гальванического производства.

В работе [5] исследованы закономерности сорбции никеля на слабокислотном катионите Lewatit MonoPlus TP 207. Показано, что процесс может быть достаточно достоверно описан с помощью уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха. Определены статические обменные емкости катионита. Установлено, что при повышении температуры с 305 до 328 К равновесная концентрация никеля достигается примерно в 13 раз быстрее. Определены значения констант скоростей внешней и внутренней диффузий. Для известных значений констант гидролиза никеля рассчитаны содержания ионных форм и статические обменные емкости в зависимости от pH раствора. Отмечено, что извлечение никеля возрастает при появлении малогидратированных однозарядных комплексов в диапазоне pH от 8 до 9.

Исследованы сорбционные свойства фосфорнокислого катионита на основе стирольно-фурфурольного полимера по отношению к катионам меди, никеля, кобальта и др. при различных pH среды, ионных формах катионита и концентрации исследуемых ионов. Показано, что полученный катионит может быть использован в процессах сорбции исследуемых катионов из различных вод [6].

В работе [7] показано, что наибольшей сорбционной способностью по отношению к ионам никеля обладает модифицированный образец – термообработанные оболочки плодов пшеницы, который может быть рекомендован для доочистки никельсодержащих вод.

Изучена сорбция катионов никеля комплексобразующим анионитом АМ-7. Показано, что сорбция ионов никеля из водных растворов удовлетворительно описывается уравнением Ленгмюра, линейная аппроксимация которого позволяет определить максимальную сорбционную емкость комплексобразующего анионита. Для определения характеристик ионитного комплекса – констант устойчивости и координационного числа – рассмотрены два независимых метода: определение константы устойчивости по коэффициенту распределения и методом разрушения аммиачных комплексов никеля при контакте с депротонированной формой ионита. Рассчитанные константы устойчивости ионитных комплексов и значение координационного числа в обоих случаях находятся в удовлетворительном согласовании [8].

Авторами работы [9] проведено сравнение сорбционных свойств сильнокислотного сульфокатионита КУ-2 х 8, слабокислотного карбоксильного катионита КБ-4 и комплексобразующего хелатного катионита АНКБ-35 для извлечения ионов цинка и кадмия из промывных вод гальванических производств, содержащих ионы аммония или мездровый клей. Показано, что наиболее эффективным по отношению к этим ионам в процессах сорбции является катионит КУ-2 х 8.

В работе [10] описана совместная сорбция двухвалентных катионов никеля, меди и кадмия из концентрированных водных растворов. Расчетным и экспериментальным методами подобраны условия разделения различающихся и близких по сорбционным свойствам бинарных ионных систем на аминокислотном полиамфолите Purolite S950 в натриевой форме.

Изучены перспективы сорбционной очистки от ионов Ni (II) модельных растворов с использованием в качестве сорбционных материалов измельченной исходной и термообработанной кожуры арахиса. Получены изотермы адсорбции и описаны в рамках моделей Ленгмюра, Фрейндлиха и БЭТ. Изучена кинетика адсорбции ионов Ni (II) исходной и термообработанной кожурой арахиса. Экспериментально определено, что максимальная сорбционная емкость исходной кожуры арахиса при начальной концентрации ионов Ni(II) 1000 мг/дм<sup>3</sup> составляет 0.6 ммоль/г, а для термообработанной при температурах 250 и 350 °С – 0.66 ммоль/г и 0.78 ммоль/г соответственно [11].

В работе [12] описаны результаты лабораторного моделирования адсорбционных свойств дисперсных пород по отношению к тяжелым металлам, связанных с техногенезом на примере Ni (II). Приведены данные по адсорбции элемента образцами различных

литологических разновидностями пород. Определены подвижные формы соединений никеля, оценена интенсивность процесса адсорбции, перечислены факторы, определяющие изменение содержания никеля по разрезу. Полученная информация имеет важное значение при решении экологических [13–15], медико-социальных [16–17, 22] и инженерно-геологических задач [17–21].

Анализ литературы показывает, что в настоящее время предложено и применяется большое количество сорбционных способов очистки сточных вод от катионов Ni (II), разработанных различными авторами. Наиболее перспективным и эффективным методом очистки сточных вод от катионов никеля является ионообменный, главными преимуществами которого можно считать хорошую управляемость процессом, относительной простоту конструкции установки и высокую степень очистки. Таким образом целью настоящего исследования стало определение равновесных характеристик сорбции катионов Ni (II) на различных полярных сорбентах и установление наиболее перспективных материалов для удаления катионов никеля из водных сред.

## Материалы и методы

Сорбция никеля проводилась на ионообменных смолах и природных адсорбентах, характеристики которых представлены в таблице 1.

Для перевода катионообменников или анионообменника в рабочую форму через слой ионообменников последовательно пропускали растворы NaOH или HCl с концентрацией 0.5 моль/дм<sup>3</sup>, дистиллированную воду до полного удаления гидроксида натрия или соляной кислоты из межгранульного пространства. Значение pH фиксировали с помощью pH-метра.

Для получения изотерм сорбции использовали навески воздушно-сухих ионообменных смол и адсорбентов массой  $0.1 \pm 0.0001$  г. каждая, помещали в колбы и заливали раствором сульфата никеля (II) в интервале концентраций 0.001–0.02 моль/дм<sup>3</sup>. Сорбцию проводили в течение 24 часов при 298 К.

После установления равновесия отбирали аликвотную часть растворов из колб и определяли концентрацию катионов Ni (II) в исходном растворе и после сорбции. Концентрацию катионов Ni (II) определяли «горячим» титрованием с мурексидом.

Таблица 1.

Характеристика сорбентов, использованных в работе

Table 1.

Characteristics of sorbents used in the work

| Сорбент<br>Sorbent                                                      | Пористость<br>Porosity       | Рабочая форма<br>Working form | Функциональные группы или химический состав<br>Functional groups or chemical composition |
|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Катионообменник Токем 200<br>Cation Exchanger Tokem 200                 | макропористый<br>macroporous | Na <sup>+</sup>               | карбоксильная   carboxyl                                                                 |
| Катионообменник Amberlite IRC 748<br>Cation Exchanger Amberlite IRC 748 |                              |                               | Иминодикарбоксильная   iminodicarboxylic                                                 |
| Катионообменник КФП<br>Cation Exchanger KFP                             | гелевый<br>gel               |                               | фосфорнокислая   phosphate                                                               |
| Катионообменник КУ-2<br>Cation Exchanger KU-2                           |                              |                               | сульфо-группа   sulfo-group                                                              |
| Анионообменник АВ-17/<br>Anion exchanger AV-17                          |                              | Cl <sup>-</sup>               | четвертичная триметиламмониевая<br>quaternary trimethylammonium                          |
| Шунгит   Shungite                                                       | мезопористый<br>mesoporous   | -                             | оксид кремния   oxide silicon                                                            |
| Кремень   Flint                                                         |                              | -                             |                                                                                          |

Количество сорбированных катионов никеля (II) ( $A$ , моль/г), имеющее смысл сорбционной емкости для ионообменников и адсорбции для кристаллических сорбентов рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{(c_0 - c_s) \times V_s}{m_r},$$

где  $c_r$  – концентрация ионов в смоле, моль/г;  $c_0$  – исходная концентрация ионов в растворе, моль/дм<sup>3</sup>;  $c_s$  – равновесная концентрация ионов в растворе моль/дм<sup>3</sup>;  $V_s$  – объем раствора, дм<sup>3</sup>;  $m_r$  – масса навески сорбента, г.

Расчет сорбционной обменной емкости (COE) и предельной сорбции ( $A_\infty$ ), а также коэффициентов равновесия ( $k$ ) проводили по линейному уравнению Ленгмюра:

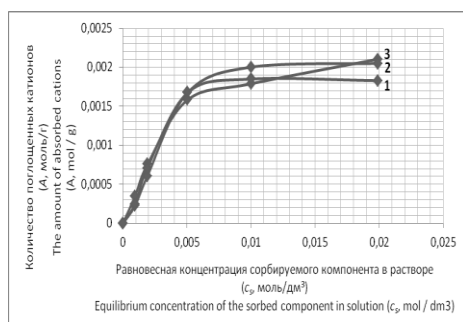
$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_\infty} + \frac{1}{A_\infty \cdot k \cdot c_s}. \quad (1)$$

Для проведения сорбции в динамических условиях навеску воздушно-сухого ионита помещали в колонку, заливали дистиллированной водой для набухания и оставляли на несколько часов. После этого через колонку пропускали очищаемый раствор со скоростью 0.015 см<sup>3</sup>/с,

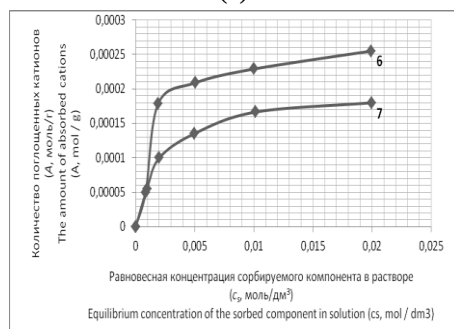
отбирали по 10 см<sup>3</sup> фильтрата и определяли электрическую проводимость. Для проведения десорбции через ионообменную смолу, насыщенную катионами, пропускали раствор соляной кислоты с концентрацией равной 0.5 моль/дм<sup>3</sup> со скоростью 0.033 см<sup>3</sup>/с, отбирали по 10 см<sup>3</sup> элюата и определяли концентрацию катионов в каждой пробе.

### Обсуждение

В работе получены изотермы сорбции катионов никеля (II), характеризующие зависимость количества поглощенных катионов ( $A$ , моль/г) от равновесной концентрации сорбируемого компонента в растворе ( $c_s$ , моль/дм<sup>3</sup>)



(a)



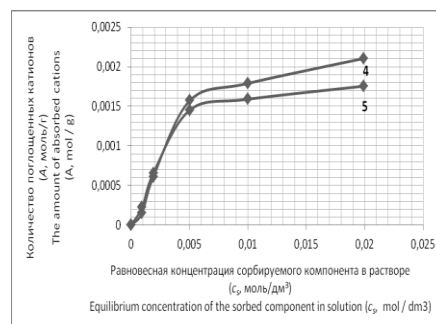
(c)

По данным о распределении следуемого сорбата в гетерофазной системе «водный раствор – сорбент» с использованием линейных изотерм в координатах Ленгмюра определили основные характеристики адсорбции – максимальную сорбцию ( $COE$  или  $A_{\infty}$ ) и коэффициенты сорбционного равновесия ( $k$ ). Для нахождения полной обменной емкости или максимальной сорбции, согласно уравнению (1), построили функцию в координатах Ленгмюра  $1/A = f(1/c_s)$ . Полученные линейные уравнения и равновесные характеристики сорбции катионов никеля (II) из водного раствора при 298 К представлены в таблице 2.

Полученные результаты показывают, что фосфорнокислый катионообменник гелевого типа КФП и слабокислый пористый катионит Токем 200 обладают достаточно высокой обменной емкостью по отношению к катионам никеля (II), что обусловлено наличием у сорбентов фосфорнокислых или карбоксильных групп.

при постоянной температуре на изученных сорбентах. Примеры полученных изотерм представлены на рисунке 1.

С увеличением концентрации сорбата степень его извлечения на всех сорбентах увеличивается. По полученным изотермам сорбции видно, что на начальных участках сорбция практически прямо пропорциональна концентрации сорбтива в растворе. Степень извлечения ионов Ni (II) на ионообменниках КФП и Токем 200 значительно выше, чем на остальных сорбентах. Полученные изотермы имеют вид изотерм Ленгмюра, то есть происходит мономолекулярная сорбция на активных центрах с предельным насыщением.



(b)

Рисунок 1. Изотермы сорбции катионов никеля (II) на ионообменных смолах (a) – КУ 2 (1), АВ 17 (2), КФП (3), (b) – Токем 200 (4), Amberlite IRC 748(5), (c) – шунгит (6), кремнь (7) при 298 К

Figure 1. Isotherms of sorption of nickel (II) cations on ion-exchange resins (a) – KU 2 (1), AV 17 (2), KFP (3), (b) – Tokem 200 (4), Amberlite IRC 748 (5), (c) – shungite (6), flint (7) at 298 K

Данное обстоятельство позволяет рассматривать сорбцию сильных электролитов в гетерофазной системе «сорбент – водный раствор» как ионный обмен на функциональных группах. Согласно результатам, приведённым в таблице 2, максимальной сорбционной ёмкостью по отношению к ионам Ni (II) обладает Токем 200, полная обменная емкость которого равна 3.57 ммоль/г. Коэффициент равновесия  $k$  характеризует степень сродства сорбата к сорбенту и является мерой сорбционной активности сорбента. Чем больше величина  $k$ , тем сильнее взаимодействие сорбат-сорбент, тем активнее должны извлекаться ионы металлов из растворов. Максимальное значение  $k$  при ионном обмене Ni (II) характерно для сорбента Токем 200. Проведенные исследования показали, что для извлечения катионов никеля (II) целесообразно использовать слабокислый пористый катионит Токем 200 в натриевой форме.

Таблица 2.

Равновесные характеристики сорбции катионов никеля (II) из водного раствора при 298 К

Table 2.

Equilibrium characteristics of sorption of nickel (II) cations from an aqueous solution at 298 K

| Сорбент<br>Sorbent                                                            | ПОЕ*, ммоль/г<br>POE*, mmol/g | Уравнения в координатах<br>$1/A = f(1/c_s)$ .<br>Equations in coordinates<br>$1/A = f(1/c_s)$ . | $A_{\infty}$ , ммоль/г<br>$A_{\infty}$ , mmol / g | COE, ммоль/г<br>SOE, mmol / g | k   |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|-----|
| Катионообменник КФП<br>Cation Exchanger KFP                                   | 2,9                           | $y = 3.20 x + 359$                                                                              | -                                                 | $2.84 \pm 0.14$               | 110 |
| Катионообменник Токем 200<br>Cation Exchanger Tokem 200                       | 4,3                           | $y = 3.91 x + 280$                                                                              | -                                                 | $3.57 \pm 0.18$               | 195 |
| Анионообменник АВ-17<br>Anion exchanger AV-17                                 | 1,5                           | $y = 8.03 x + 105$                                                                              | -                                                 | $1.31 \pm 0.07$               | 95  |
| Катионообменник КУ-2<br>Cation Exchanger KU-2                                 | 1,8                           | $y = 3.48 x + 87$                                                                               | -                                                 | $1.15 \pm 0.06$               | 25  |
| Катионообменник<br>Amberlite IRC 748<br>Cation Exchanger<br>Amberlite IRC 748 | 1,4                           | $y = 7.38 x + 465$                                                                              | -                                                 | $1.13 \pm 0.06$               | 63  |
| Кремень   Flint                                                               | -                             | $y = 12.6 x + 4664$                                                                             | $0.21 \pm 0.011$                                  | -                             | 12  |
| Шунгит   Shungite                                                             | -                             | $y = 13.6 x + 2391$                                                                             | $0.42 \pm 0.022$                                  | -                             | 13  |

Примечание: \* литературные данные

Note: \* literature data

В работе получены выходные кривые сорбции (рисунок 2) и десорбции (рисунок 3) катионов никеля из смеси с катионами Cu (II). Исходное соотношение катионов в очищаемом растворе составляло 1:10.

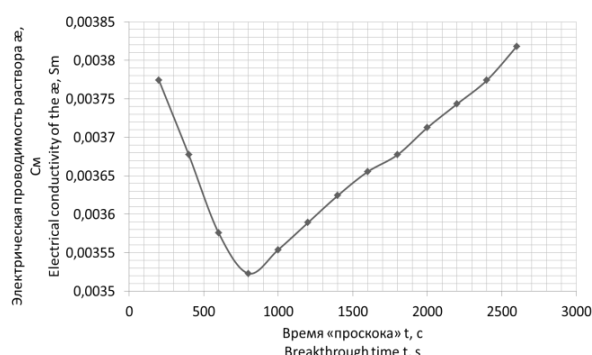


Рисунок 2. Выходная кривая сорбции катионов меди (II) и никеля (II) на катионите Токем 200 в натриевой форме

Figure 2. The output sorption curve on the Tokem 200 cation in sodium form

Определено, что при пропускании очищаемого раствора в течение 800 с происходит насыщение ионообменника извлекаемыми катионами и при дальнейшем увеличении объема подаваемого раствора наблюдается «проскок» катионов.

Установлено, что катионы никеля элюируются раньше катионов меди. Время удерживание катионов никеля (II) составляет 400 с, а время удерживания катионов меди (II) 800 с.

Такое различие позволяет полностью отделить катионы друг от друга, а высокая константа сорбционного равновесия и сорбционная обменная емкость – выделить на 100% катионы никеля (II) из водного раствора.

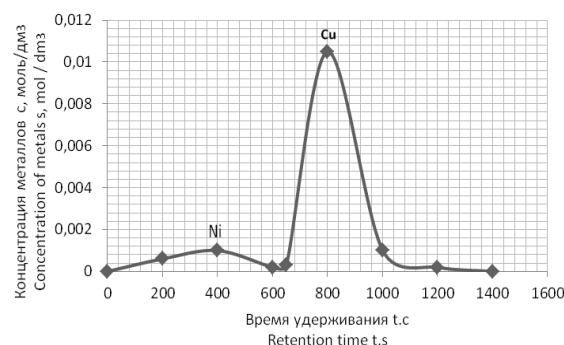


Рисунок 3. Выходная кривая десорбции ионов никеля (II) и меди (II) из катионита Токем 200

Figure 3. Output curve of desorption of nickel (II) and copper (II) ions from Tokem 200 cationite

### Заключение

Изученные сорбенты по равновесным сорбционным характеристикам можно расположить в ряд: Токем 200 > КФП > Amberlite IRC 748 > АВ-17 > КУ-2 > Кремень > Шунгит.

Наиболее эффективными сорбентами для удаления, извлечения и концентрирования катионов Ni (II) из водных растворов можно считать опытный образец фосфорнокислого катионообменника гелевого типа КФП и карбоксильный пористый катионит Токем 200.

## Литература

- 1 Смирнова В.С., Худорожкова С.А., Ручкина О.И. Обоснование оптимальных условий реагентной очистки промывных вод от ионов тяжелых цветных металлов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10, № 2. С. 106–118.
- 2 Бочарников В.С., Мещеряков М.П., Денисова М.А. Исследование сорбционных свойств сорбентов с использованием ферритовых реагентов при очистке сточных вод // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование 2019. № 1 (59). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sorbtionnyh-svoystv-sorbentov-s-ispolzovaniem-ferritovyh-reagentov-pri-ochistke-stochnyh-vod/viewer>
- 3 Астапов А.В., Перегудов Ю.С., Нифталиев С.И. Сорбция катионов никеля(II) хелатным волокнистым сорбентом ФИБАН X-1 // Журнал физической химии. 2017. Т. 91. № 8. С. 1397–1402.
- 4 Перегудов Ю.С., Тимкова А.В., Горбунова Е.М., Плотникова С.Е. Применение ионообменного волокна на стадии доочистки сточных вод гальванического производства // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 330–336. doi: 10.20914/2310-1202-2018-4-330-336
- 5 Мальцев Г.И. Сорбция никеля на слабокислотном катионите Lewatit monoplus TP207 // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. 2019. С. 227–232.
- 6 Пулатов Х.Л., Турабжанов С.М., Игитов Ф.Б., Хамдамова О.Б. Поликонденсационные фосфорнокислые катиониты для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Universum: химия и биология. 2018. № 11. С. 53.
- 7 Назаренко А.А., Степанова С.В. Сорбционное извлечение ионов никеля из модельных вод модифицированными оболочками плодов пшеницы // Северная пальмира: сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов, студентов и преподавателей по результатам проведения VIII молодежного экологического конгресса. 2017. Т. 20. № 6. С. 89–92.
- 8 Колодяжный В.А., Челнакова П.Н., Мурачева Е.С. Определение параметров ионитных комплексов, образующихся при сорбции катионов никеля слабоосновным анионитом АМ-7 // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т. 19. № 1. С. 85–91.
- 9 Кеймиров М.А. Очистка промывных вод гальванических производств от ионов тяжелых металлов ионообменным способом // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. № 19. С. 76–79.
- 10 Бондарева Л.П., Чесноков А.И., Загоруйко Е.А. Разделения катионов тяжелых металлов из концентрированных гальванических стоков // Вестник ВГУИТ. 2018. № 1. С. 223–227. doi: 10.20914/2310-1202-2018-1-223-227
- 11 Свергузова С.В., Шайхiev И.Г., Хунади Л., Бомба И.В. Исследование адсорбции ионов Ni(II) модифицированными отходами переработки арахиса // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 3. С. 39–43.
- 12 Хансварова Н.М., Ложкин А.Д. Исследование адсорбционных свойств дисперсных пород по отношению к тяжелым металлам на примере Ni (III) // Инженерный вестник дона. 2015. Т. 38. № 4. С. 147.
- 13 Бондарева Л.П., Астапов А.В., Селеменев В.Ф., Ильина А. Ю. Селективность ионного обмена на иминокарбоксильной смоле и энергия гидратации ее ионных форм // Журн. физ. химии. 2018. Т. 92. № 8. С. 1323-1328.
- 14 Biela. R., Kučera T. Efficacy of Sorption Materials for Nickel, Iron and Manganese Removal from Water // Procedia Engineering. 2016. V. 162. P. 56-63. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.012
- 15 Veneu D.M., Yokoyama L., Cunha O.G.C., Schneider C.L., Monte M.B.D.M. Nickel sorption using Bioclastic Granules as a sorbent material: equilibrium, kinetic and characterization studies // Journal of Materials Research and Technology. 2019. V. 8. P. 840-852. doi: 10.3390/met10121630
- 16 Piątek J., de Bruin-Dickason C.N., Jaworski A., Chen J. et al. Glycine-functionalized silica as sorbent for cobalt(II) and nickel(II) recovery // Applied Surface Science. 2020. V. 530. doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147299
- 17 Ji C., Zhang J., Jia R., Zhang W. et al. Sorption enhancement of nickel(II) from wastewater by ZIF-8 modified with poly (sodium 4-styrenesulfonate): Mechanism and kinetic study // Chemical Engineering Journal. 2021 V. 414. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894721004083?via%3Dihub>
- 18 Abu-Saied M.A., Wycisk R., Abbassy M.M., Abd El-Naim G. et al. Sulfated chitosan/PVA absorbent membrane for removal of copper and nickel ions from aqueous solutions—Fabrication and sorption studies // Carbohydrate polymers. 2017. V. 165. P. 149-158. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.12.039
- 19 Masoumi H., Ghaemi A., Gilani H.G. Elimination of lead from multi-component lead-nickel-cadmium solution using hyper-cross-linked polystyrene: Experimental and RSM modeling // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. V.9. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343721015566>
- 20 Chaudhari V., Patkar M. Removal of nickel from aqueous solution by using corncob as adsorbent // Materialstoday: Proceedings. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321063744?via%3Dihub>
- 21 Gafoor A., Kumar S., Begum S., Rahman Z. Elimination of nickel (II) ions using various natural/modified clay minerals: A review // Materials Today: Proceedings. 2021. V. 37. P. 2033-2040. doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.500
- 22 Уиен Д.М., Сироткин А.С., Тхуан Л.В., Хань К.Х. и др. Адсорбционное удаление ионов никеля (II) из водных растворов шаровидным углеродным сорбентом на основе Litsea Glutinosa // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2021. Т. 64. № 11. С. 71-78. doi: 10.6060/ivkkt.20216411.6416

## References

- 1 Smirnova V.S., Khudorozhkova S.A., Ruchkinova O.I. Substantiation of optimal conditions for reagent purification of wash water from ions of heavy non-ferrous metals. Bulletin of PNRPU. Construction and architecture. 2019. vol. 10. no. 2. pp. 106–118. (in Russian).
- 2 Bochamnikov V.S., Meshcheryakov M.P., Denisova M.A. Study of the sorption properties of sorbents using ferrite reagents in wastewater treatment. Proceedings of the Nizhnevolzhsky AgroUniversity Complex: Science and Higher Professional Education 2019. no. 1 (59). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sorbtionnyh-svoystv-sorbentov-s-ispolzovaniem-ferritovyh-reagentov-pri-ochistke-stochnyh-vod/viewer> (in Russian).

- 3 Astapov A.V., Peregudov Yu.S., Niftaliev S.I. Sorption of nickel(II) cations by chelate fibrous sorbent FIBAN X 1. *Journal of Physical Chemistry*. 2017. vol. 91. no. 8. pp. 1397–1402. (in Russian).
- 4 Peregudov Yu.S., Timkova A.V., Gorbunova E.M., Plotnikova S.E. The use of ion-exchange fiber at the stage of post-treatment of wastewater in galvanic production. *Proceedings of VSUET*. 2018. vol. 80. no. 4. pp. 330–336. doi: 10.20914/2310-1202-2018-4-330-336 (in Russian).
- 5 Maltsev G.I. Sorption of nickel on a weakly acidic cation exchanger Lewatit monoplus TP207. *Scientific bases and practice of processing ores and technogenic raw materials*. 2019. pp. 227–232. (in Russian).
- 6 Pulatov H.L., Turabzhanov S.M., Igitov F.B., Khamdamova O.B. Polycondensation phosphate cation exchangers for wastewater treatment from heavy metal ions. *Universum: chemistry and biology*. 2018. no. 11. pp. 53. (in Russian).
- 7 Nazarenko A.A., Stepanova S.V. Sorption extraction of nickel ions from model waters by modified shells of wheat fruits. *Northern palmyra: a collection of scientific works of young scientists, graduate students, students and teachers based on the results of the VIII Youth Ecological Congress*. 2017. vol. 20. no. 6. pp. 89–92. (in Russian).
- 8 Kolodyazhny V.A., Chelnakova P.N., Muracheva E.S. Determination of the parameters of ion-exchange complexes formed during the sorption of nickel cations by a weakly basic anion exchanger AM 7. *Sorption and chromatographic processes*. 2019. vol. 19. no. 1. pp. 85–91. (in Russian).
- 9 Keimirov M.A. Purification of washing water of galvanic production from ions of heavy metals by ion-exchange method. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2020. vol. 23. no. 19. pp. 76–79. (in Russian).
- 10 Bondareva L.P., Chesnokov A.I., Zagorulko E.A. Separation of heavy metal cations from concentrated galvanic drains. *Proceedings of VSUET*. 2018. no. 1. pp. 223–227. doi: 10.20914/2310-1202-2018-1-223-227 (in Russian).
- 11 Sverguzova S.V., Shaikhiev I.G., Khunadi L., Bomba I.V. Study of the adsorption of Ni(II) ions by modified peanut processing waste. *Ecology and Industry of Russia*. 2020. vol. 24. no. 3. pp. 39–43. (in Russian).
- 12 Khansivarova N.M., Lozhkin A.D. Study of the adsorption properties of dispersed rocks in relation to heavy metals on the example of Ni (III). *Engineering Bulletin of the Don*. 2015. vol. 38. no. 4. pp. 147. (in Russian).
- 13 Bondareva L.P., Astapov A.V., Selemenov V.F., Ilyina A.Yu., Selectivity of ion exchange on iminocarboxylic resin and hydration energy of its ionic forms. *Zh. physical chemistry*. 2018. vol. 92. no. 8. pp. 1323-1328. (in Russian).
- 14 Biela R., Kučera T. Efficacy of Sorption Materials for Nickel, Iron and Manganese Removal from Water. *Procedia Engineering*. 2016. vol. 162. pp. 56-63. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.012
- 15 Veneu D.M., Yokoyama L., Cunha O.G.C., Schneider C.L., Monte M.B.D.M. Nickel sorption using Bioclastic Granules as a sorbent material: equilibrium, kinetic and characterization studies. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. vol. 8. pp. 840-852. doi: 10.3390/met10121630
- 16 Piątek J., de Bruin-Dickason C.N., Jaworski A., Chen J. et al. Glycine-functionalized silica as sorbent for cobalt(II) and nickel(II) recovery. *Applied Surface Science*. 2020. vol. 530. doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147299
- 17 Ji C., Zhang J., Jia R., Zhang W. et al. Sorption enhancement of nickel(II) from wastewater by ZIF-8 modified with poly (sodium 4-styrenesulfonate): Mechanism and kinetic study. *Chemical Engineering Journal*. 2021. vol. 414. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894721004083?via%3Dihub>
- 18 Abu-Saied M.A., Wycisk R., Abbassy M.M., Abd El-Naim G. et al. Sulfated chitosan/PVA absorbent membrane for removal of copper and nickel ions from aqueous solutions—Fabrication and sorption studies. *Carbohydrate polymers*. 2017. vol. 165. pp. 149-158. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.12.039
- 19 Masoumi H., Ghaemi A., Gilani H.G. Elimination of lead from multi-component lead-nickel-cadmium solution using hyper-cross-linked polystyrene: Experimental and RSM modeling. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. vol. 9. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343721015566>
- 20 Chaudhari V., Patkar M. Removal of nickel from aqueous solution by using corncob as adsorbent. *Materialstoday: Proceedings*. 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321063744?via%3Dihub>
- 21 Gafoor A., Kumar S., Rahman Z. Elimination of nickel (II) ions using various natural/modified clay minerals: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. vol. 37. pp. 2033-2040. doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.500
- 22 Uyen D.M., Sirotkin A.S., Thuan L.V., Han K.H. Adsorption removal of nickel(II) ions from aqueous solutions by a spherical carbon sorbent based on Litsea Glutinosa. *Chemistry and chemical technology*. 2021. vol. 64. no. 11. pp. 71-78. doi: 10.6060/ivkkt.20216411.6416 (in Russian).

**Сведения об авторах**

**Лариса П. Бондарева** к.х.н., доцент, кафедры физической и аналитической химии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, [larbon@mail.ru](mailto:larbon@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9143-9374>

**Кристина В. Гринь** студент, кафедра физической и аналитической химии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т, Революции, 19, г. Воронеж, 394066, Россия, [kristina.zueva.2000@list.ru](mailto:kristina.zueva.2000@list.ru)

**Вклад авторов**

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Information about authors**

**Larisa P. Bondareva** Cand. Sci. (Chem.), associate professor, physical and analytical chemistry department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, [larbon@mail.ru](mailto:larbon@mail.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-9143-9374>

**Krustina V. Grin** student, physical and analytical chemistry department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394066, Russia, [kristina.zueva.2000@list.ru](mailto:kristina.zueva.2000@list.ru)

**Contribution**

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

|                      |                                |                             |
|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Поступила 17/01/2022 | После редакции 03/02/2022      | Принята в печать 24/02/2022 |
| Received 17/01/2022  | Accepted in revised 03/02/2022 | Accepted 24/02/2022         |