

Для цитирования:

Дударев В.И., Иринчинова Н.В., Филатова Е.Г. Адсорбция ионов никеля (II) из водных растворов углеродными адсорбентами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 1. С. 75–80.

For citation:

Dudarev V.I., Irinchinova N.V., Filatova E.G. Adsorption of ions of nickel (II) from water solutions with carbon adsorbents. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2017. V. 60. N 1. P. 75–80.

УДК: 628.386

В.И. Дударев, Н.В. Иринчинова, Е.Г. Филатова

Владимир Иванович Дударев, Надежда Владимировна Иринчинова

Кафедра общеобразовательных дисциплин, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Российская Федерация, 664074

E-mail: vdudarev@mail.ru, shushueva.nadejda@yandex.ru

Елена Геннадьевна Филатова (✉)

Кафедра технологии продуктов питания и химии, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Российская Федерация, 664074

E-mail: efila@list.ru (✉)

АДСОРБЦИЯ ИОНОВ НИКЕЛЯ (II) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ УГЛЕРОДНЫМИ АДСОРБЕНТАМИ

Изучена адсорбционная способность углеродных адсорбентов ИПИ-Т, синтезированных из отходов фенолформальдегидной смолы по отношению к ионам никеля (II). Построены изотермы адсорбции при различных температурных режимах. Полученные экспериментальные данные обработаны с применением моделей БЭТ и Дубинина-Радушкевича. Модель Дубинина-Радушкевича использована для расчета свободной энергии адсорбции. Значение свободной энергии адсорбции указывает на то, что закрепление ионов тяжелого металла имеет физическую природу. Эффективность очистки сточных вод гальванического производства от ионов никеля (II) составила не менее 98%.

Ключевые слова: углеродные адсорбенты, адсорбция, сточные воды, ионы никеля (II)

UDC: 628.386

V.I. Dudarev, N.V. Irinchinova, E.G. Filatova

Vladimir I. Dudarev, Nadezhda V. Irinchinova

Department of General Educational Disciplines, Irkutsk National Research Technical University, Lermontov st., 83, Irkutsk, 664074, Russia

E-mail: vdudarev@mail.ru, shushueva.nadejda@yandex.ru

Elena G. Filatova (✉)

Department of Food Technology and Chemistry, Irkutsk National Research Technical University, Lermontov st., 83, Irkutsk, 664074, Russia

E-mail: efila@list.ru (✉)

ADSORPTION OF IONS OF NICKEL (II) FROM WATER SOLUTIONS WITH CARBON ADSORBENTS

Adsorption methods of cleaning remains beyond comparison for deep extraction of heavy metal ions from dilute solutions. Their practical application allows achieving the high efficiency of wastewater treatment with minimal impact on the environment. It is known that nickel is one of carcinogenic elements. Thus, free nickel ions (II) are twice toxic than complex compounds. The maximum content of nickel ion (II) at the production of spent electroplating solutions is 50 mg/l, in washing waters – from 2 to 5 mg/l. In this paper we studied the adsorption capacity of carbon adsorbents IPI-T, synthesized from waste phenol-formaldehyde resin with respect to the nickel ions (II). Carbon adsorbents IPI-T are black granules of irregular shape with an average particle size from 2 to 5 mm, and a surface area of 480 m²/g. Adsorption equilibrium time in static conditions corresponding to the constancy of the concentration of heavy metal ions in solution was four hours. A study of the adsorption capacity of carbon adsorbents IPI-T was performed at pH of 9.5. The adsorption process accompanied by the slight decrease in pH. Isotherms were build according to the results of research of adsorption at different temperatures. The shape of the isotherms obtained corresponds to poly-molecular adsorption. The resulting isotherms were processed using adsorption models of BET and Dubinin-Radushkevich. It was shown that the adsorption process model is best described by BET. Model Dubinin-Radushkevich was used to calculate the free energy of adsorption. The value of the free energy of adsorption indicates that the binding of nickel ion (II) has a physical nature. It was found that with the temperature increasing the adsorption capacity of carbon adsorbents IPI-T decreases. The dynamic activity of the adsorbent was characterized by the time of beginning of pass of the adsorbate till «breakthrough». Maximum protective effect of the adsorbent was 5 hours, and it was recovered 150 mg of nickel ions (II). The effectiveness of wastewater treatment of galvanic production from heavy metal ions was not less than 98%.

Key words: carbon adsorbents, adsorption, wastewater, nickel ions (II)

На сегодняшний день более миллиарда людей во всем мире не имеют доступа к чистой питьевой воде. Более двух миллиардов человек не располагают достаточным количеством систем очистки воды. Это является основной причиной заболеваний, вызываемых употреблением воды, которая не соответствует санитарным стандартам [1, 2]. Данный факт свидетельствует о серьезной экологической проблеме глобального кризиса водных ресурсов. В нашей стране, несмотря на имеющиеся запасы чистой пресной воды, в ряде регионов существуют трудности в водообеспечении населения безопасной питьевой водой.

В связи с этим, наибольшую актуальность представляет проблема очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Одними из значимых антропогенных источников поступления ионов тяжелых металлов в окружающую среду являются сточные воды предприятий цветной металлургии, приборостроения, машиностроения и ряда других отраслей.

Известно, что никель относится к числу канцерогенных элементов. При этом свободные ионы никеля (II) вдвое токсичнее его комплексных соединений. Максимальное содержание ионов ни-

келя (II) в отработанных производственных растворах гальванического производства составляет 50 мг/дм³, в промывных водах – от 2 до 5 мг/дм³ [3]. Согласно данным нормативного документа [4] ПДК ионов никеля (II) в водоемах рыбохозяйственного назначения не должно превышать 0,01 мг/дм³.

Для глубокого извлечения ионов никеля (II) из разбавленных растворов вне конкуренции остаются адсорбционные методы очистки. Адсорбционные методы очистки сточных вод наряду с высокой эффективностью относятся к экологически чистым методам. Наиболее часто используемыми промышленными адсорбентами являются активные угли. Известно, что разные марки активных углей адсорбируют ионы тяжелых металлов, проявляя при этом различную поглотительную способность [5, 6]. Основным фактором, определяющим эффективность адсорбции, является величина pH. Чаще всего максимум адсорбции достигается при pH 4, т. е. процесс проходит до образования продуктов гидролиза [7].

Цель работы: исследовать адсорбционные свойства по отношению к ионам никеля (II) углеродного адсорбента ИПИ-Т, полученного из отходов производства фенолформальдегидной смолы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования использовали углеродные адсорбенты ИПИ-Т, синтезированные в Иркутском государственном техническом университете (ИрГТУ) [8, 9]. Углеродные адсорбенты ИПИ-Т представляют собой черные гранулы неправильной формы со средним размером частиц от 2 до 5 мм, текстурные характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Текстурные свойства адсорбента ИПИ-Т
Table 1. Textural properties of the adsorbent IPI-T

Характеристика	Величина
Размер зерен, мм	2-5
Удельная поверхность, м ² /г	480
Общая суммарная пористость, см ³ /г	0,65
Объем микропор, см ³ /г	0,28
Объем переходных пор, см ³ /г	0,06
Насыпная плотность, г/дм ³	420

Изучение адсорбционных свойств углеродных адсорбентов осуществляли на модельных растворах, для приготовления которых использовали семиводный сульфат никеля NiSO₄·7H₂O квалификации «х.ч.» и дистиллированную воду. Исходная концентрация ионов никеля (II) в модельных растворах соответствовала реальным составам сточных вод гальванических цехов. Значение водородного показателя модельных растворов поддерживали с помощью аммиачно-ацетатных буферных растворов с pH 9-10. В качестве объектов исследования использовали также сточные воды цеха гальванопокрытий. Концентрацию ионов никеля (II) определяли фотометрическим методом анализа с помощью диметилглиоксима [10, 11].

Адсорбцию ионов никеля (II) исследовали в статических и динамических условиях. Изучение адсорбционной способности в статических условиях проводили с помощью изотерм. В работе использован метод переменных навесок (2,0; 1,0; 0,75; 0,5 и 0,25 г) и неизменных концентраций (исходная концентрация ионов никеля (II) – 80 мг/дм³). Кинетическими опытами в статических условиях определяли время установления равновесия в системе углеродный адсорбент – раствор соли металла.

Величину адсорбции в статических условиях (*A*, мг/г) вычисляли по формуле:

$$A = \frac{C_0 - C_{равн.}}{m} \cdot V, \quad (1)$$

где *C*₀ и *C*_{равн.} – исходная и равновесная концентрации ионов тяжелого металла в растворе, мг/дм³;

V – объем раствора, дм³; *m* – навеска адсорбента, г. Объем сточной воды при проведении опытов составлял 0,1 дм³.

Адсорбция в динамических условиях имеет технологические, эксплуатационные и экономические преимущества по сравнению с адсорбцией в статических условиях. Процесс адсорбции в динамических условиях проводили в колонке с внутренним диаметром 16 мм. Колонку заполняли адсорбентом в количестве 20 г. Скорость пропускания адсорбата через слой адсорбента составила 7 см³/мин. Динамическую активность адсорбента характеризовали временем от начала пропускания адсорбата до «проскока», т. е. до появления ионов никеля (II) за слоем адсорбента.

Величину адсорбции в динамических условиях (*A*_д, мг/г) рассчитывали по формуле

$$A_d = \frac{V_p \cdot C_0}{m}, \quad (2)$$

где *V*_р – объем чистого адсорбата, вышедшего из колонки от начала опыта до появления растворенного вещества, дм³; *C*₀ – исходная концентрация ионов тяжелого металлов, мг/дм³; *m* – масса адсорбента в колонке, г.

Эффективность очистки (Э, %) сточных вод цеха гальванопокрытий от ионов никеля (II) рассчитывали по формуле:

$$\text{Э} = \frac{(C_0 - C_{ост})}{C_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где *C*₀ и *C*_{ост} – исходная и остаточная концентрации ионов тяжелого металла в растворе, мг/дм³.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что при pH > 9,5 происходит значительное увеличение адсорбции ионов никеля (II) [12, 13], что связывают с изменением свойств поверхности адсорбента, а также с изменением свойств состояния адсорбата в растворе. В интервале pH 9,0-10,5 преобладающей формой существования ионов никеля (II) в растворе является [Ni(OH)]⁺ [13]. С учетом состава растворов, значения pH и сольватации ионов растворителем, форму нахождения никеля (II) в растворе можно предположить как [Ni(NH₃)₅(OH)]⁺ [14]. Поэтому исследование адсорбционной способности углеродных адсорбентов ИПИ-Т вели при pH 9,5. В процессе адсорбции наблюдали незначительное снижение величины pH.

Время установления адсорбционного равновесия, отвечающее постоянству концентрации ионов тяжелых металлов в растворе, составило 4 ч. Полученные изотермы при различных температурных режимах представлены на рис. 1.

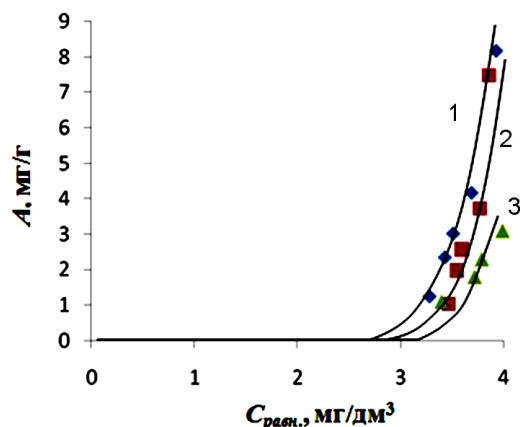


Рис. 1. Изотермы адсорбции ионов никеля (II) при температуре, К: 1 – 298, 2 – 318, 3 – 338
Fig. 1. The adsorption isotherms of nickel (II) ions at T, K: 1 – 298, 2 – 318, 3 – 338

Как видно из представленных данных, с увеличением температуры адсорбционная способность углеродных адсорбентов ИПИ-Т снижается, что свидетельствует об экзотермичности исследуемого процесса. Форма изотерм соответствует полимолекулярной адсорбции, происходящей на адсорбентах, не имеющих узких пор или капилляров, поэтому явление капиллярной конденсации можно исключить. При этом молекулы адсорбата взаимодействуют между собой гораздо сильнее, чем с поверхностью адсорбента.

Для описания полимолекулярной адсорбции использовали теорию БЭТ. Уравнение изотермы полимолекулярной адсорбции БЭТ имеет вид:

$$A = \frac{A_{\infty} \cdot c \cdot (C/C_0)}{(1 - C/C_0) \cdot [1 + (c - 1)(C/C_0)]}, \quad (4)$$

где A – величина адсорбции, ммоль/г; A_{∞} – предельная адсорбционная емкость монослоя, ммоль/г; c – постоянная для данной адсорбционной системы, непосредственно связанная с теплотой и энтропией адсорбции; C , C_0 – равновесная и исходная концентрация ионов тяжелого металла, ммоль/дм³.

Уравнение адсорбции БЭТ в линейной форме:

$$\frac{C/C_0}{A(1 - C/C_0)} = \frac{1}{A_{\infty} \cdot c} + \frac{c - 1}{A_{\infty} \cdot c} \cdot C/C_0. \quad (5)$$

С использованием уравнения адсорбции БЭТ в линейной форме построены изотермы адсорбции ионов никеля (II) (рис. 2).

Из линейных зависимостей, приведенных на рис. 2, по тангенсу угла наклона полученных прямых и величине отрезков, отсекаемых на оси ординат, определяли предельную адсорбционную емкость монослоя (A_{∞}) и константу (c) (табл. 2).

Как видно из представленных данных, максимальная величина предельной адсорбцион-

ной емкости монослоя ионов никеля (II) получена при температуре 298 К – 0,033 ммоль/г (1,95 мг/г). Известно, что константа (c) в уравнении БЭТ представляет собой отношение двух констант равновесия $c = K_1/K_2$ [15], и может быть использована для расчета стандартной энергии Гиббса:

$$\Delta G^0 = -R \cdot T \cdot \ln c = -R \cdot T \cdot \ln K_1/K_2. \quad (6)$$

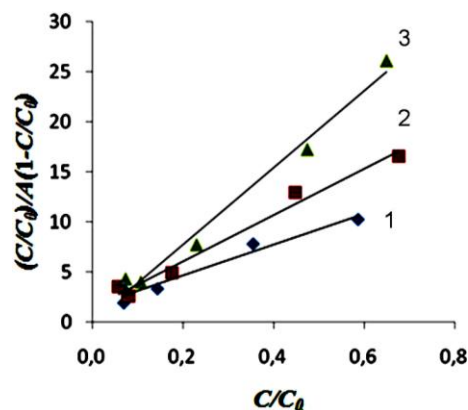


Рис. 2. Изотермы адсорбции в координатах линейной формы уравнения БЭТ. Температура, К: 1 – 298, 2 – 318, 3 – 338
Fig. 2. The adsorption isotherms in coordinates of linear form of the BET equation. Temperature, K: 1 – 298, 2 – 318, 3 – 338

Таблица 2

Параметры модели БЭТ при адсорбции
Table 2. Parameters of the BET model for adsorption

T, К	A_{∞} , ммоль/г	$c \cdot 10^{-3}$	ΔG^0 , кДж/моль	R
298	0,033	0,850	-16,712	0,98
318	0,004	0,218	-13,340	0,98
338	0,003	0,201	-13,139	0,97

Полученные значения стандартной энергии Гиббса (табл. 2), свидетельствуют о том, что вероятность протекания адсорбционного процесса больше при более низких температурах.

Равновесные данные адсорбционного процесса были обработаны с помощью модели изотермы Дубинина-Радушкевича $A = A_m \cdot \exp(-k \cdot \varepsilon^2)$, где k – константа (моль²/кДж²), связанная с энергией адсорбции; ε – потенциал Поляни (кДж/моль), отражающий изотермическую работу переноса одного моля ионов тяжелых металлов из объема равновесного раствора к поверхности адсорбента, и определяемый из выражения $\varepsilon = RT \ln(1 + 1/C)$, где R – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К; T – абсолютная температура, К; C – равновесное содержание ионов тяжелых металлов в растворе.

Используя уравнение адсорбции Дубинина-Радушкевича в линейной форме $\ln A = \ln A_m - k \cdot \varepsilon^2$, построены зависимости $\ln A = f(\varepsilon^2)$ (рис. 3).

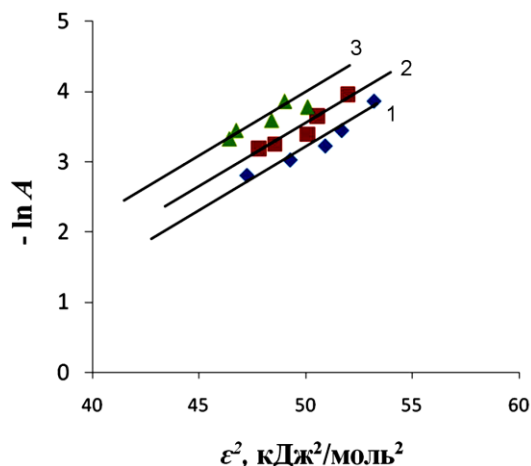


Рис. 3. Изотермы адсорбции в координатах линейной формы уравнения Дубинина-Радушкевича. Температура, К: 1 – 298, 2 – 318, 3 – 338

Fig. 3. Adsorption isotherms in coordinates of the linear form of Dubinin-Radushkevich equation. Temperature, K: 1 – 298, 2 – 318, 3 – 338

По наклону представленных прямых (рис. 3) и отрезку, отсекаемому на оси ординат, определяют константы k и A_m . Модель Дубинина-Радушкевича указывает на природу адсорбции адсорбата на адсорбенте и может быть использована для расчета свободной энергии адсорбции $E = (-2k)^{-0.5}$. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры модели Дубинина-Радушкевича
Table 3. Parameters of Dubinin-Radushkevich model

T, K	A_m , ммоль/г	k , моль ² /кДж ²	E , кДж/моль	R
298	0,268	0,055	3,02	0,97
318	0,204	0,041	3,49	0,96
338	0,163	0,038	3,63	0,96

Известно, что если значение свободной энергии адсорбции лежит между 8 и 16 кДж/моль, то адсорбционный процесс протекает по ионообменному механизму; если же значение E меньше 8 кДж/моль, то процесс адсорбции носит физический характер. В нашем случае, значение свободной энергии адсорбции указывает на то, что закрепление ионов тяжелого металла имеет физическую природу. Из анализа значений коэффициентов корреляции, R , (табл. 2 и 3), представленных моделей БЭТ и Дубинина-Радушкевича, следует, что адсорбцию наилучшим образом описывает модель БЭТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фомин Г.С.** Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. М.: Протектор. 2010. 1080 с.

На рис. 4 представлена зависимость, характеризующая динамическую активность адсорбента временем от начала пропускания адсорбата до проскока, т. е. до появления ионов никеля (II) за слоем адсорбента.

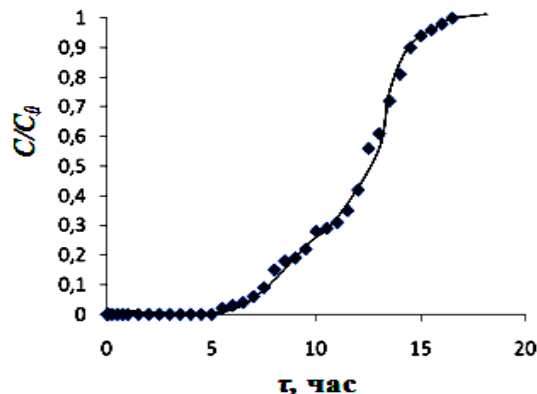


Рис. 4. Время защитного действия слоя адсорбента
Fig. 4. Time of protective action of the adsorbent layer

Из представленных данных (рис. 4) видно, что максимальное время защитного действия адсорбента составляет 5 ч, объем пропущенной воды составил 2,1 дм³, при этом было извлечено 150 мг ионов никеля (II). При исследовании адсорбционной способности углеродных адсорбентов ИПИ-Т на сточных водах гальванического производства установлено, что эффективность очистки сточных вод от ионов никеля (II) составила не менее 98%.

ВЫВОДЫ

Исследована адсорбция ионов никеля (II) углеродными адсорбентами ИПИ-Т, синтезированными из отходов фенолформальдегидной смолы. Форма полученных изотерм соответствует полимолекулярной адсорбции. Адсорбционный процесс наилучшим образом описывает модель БЭТ. Значение свободной энергии адсорбции, найденное из уравнения Дубинина-Радушкевича, указывает на то, что закрепление ионов тяжелого металла имеет физическую природу. С увеличением температуры адсорбционная способность углеродных адсорбентов ИПИ-Т снижается, что свидетельствует об экзотермичности исследуемого процесса. Эффективность очистки сточных вод гальванического производства составила не менее 98%.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Fomin G.S.** Water. Control of Chemical, Bacterial and Radiation Safety According to International Standards. M.: Protector. 2010. 1080 p. (in Russian).

2. **Алексеев Е.В.** Физико-химическая очистка сточных вод. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2007. 248 с.
3. ГОСТ 9.314-90 ЕСЗКС. Вода для гальванического производства и схемы промывок.
4. Приказ от 18 января 2010 года № 20. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Зарегистрировано в Минюсте РФ 9 февраля 2010 г. Регистрационный № 16326.
5. **Запольский А.К., Образцов В.В.** Комплексная переработка сточных вод гальванического производства. К.: Техника. 1989. 199 с.
6. **Смирнов Д.Н., Генкин В.Е.** Очистка сточных вод в процессах обработки металлов. М.: Metallurgiya. 1989. 224 с.
7. **Серпокровлов 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.
8. **Леонов С.Б., Зельберг Б.И., Елшин В.В., Дударев В.И., Ознобихин Л.М., Рандин О.И., Ращенко А.Ф., Петренко И.С.** Патент 2098176 РФ. Способ получения углеродного сорбента. Опубл. 10.12.1997. Бюл. № 34.
9. **Филатова Е.Г., Помазкина О.И., Дударев В.И.** Сорбционная очистка гальваносточков от железа (II), (III) и повторное использование сорбента ИПИ-Т. *Журн. Сиб. Фед. ун-та. Сер.: Техника и технологии.* 2013. Т. 6. № 8. С. 903-910.
10. **Лурье Ю. Ю., Рыбникова А.И.** Химический анализ производственных сточных вод. М.: Химия. 1974. 336 с.
11. ПНД Ф 14.1:2.46-96. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации никеля в природных и сточных водах фотометрическим методом с диметилглиоксимом.
12. **Дударева Г.Н., Рандин О.И., Петухова Г.А., Вакульская Т.И.** О механизме сорбции ионов никеля (II) модифицированными углеродными сорбентами. *Физикохимия поверхности и защита материалов.* 2015. Т. 51. № 6. С. 582.
13. **Дударева Г.Н., Петухова Г.А., Нгуен А.Т.Н., Сырых Ю.С.** Исследование сорбции ионов никеля (II) на углеродных сорбентах. *Физикохимия поверхности и защита материалов.* 2013. Т. 49. № 4. С. 389.
14. **Дударева Г.Н.** Сорбционное концентрирование и аналитическое определение никеля. Иркутск: ИРНТУ. 2015. 154 с.
15. **Фролов Ю.Г.** Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия. 1989. 462 с.
2. **Alekseev E.V.** Wastewater physico - chemical treatment. M. Publisher Assotsiatsii Stroitelnykh vuzov. 2007. 248 p. (in Russian).
3. GOST 9.314-90 ESZKS. Water for galvanic production and leaching circuits (in Russian).
4. Order of January 18, 2010 N 20. On approval of the fishery quality standards for water bodies of water, including the standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies. Registered in the Ministry of Justice on February 9, 2010. Registration number 16326. (in Russian).
5. **Zapol'skiy A.K., Obratsov V.V.** Complex processing wastewater of electroplating. K.: Tekhnika. 1989. 199 p. (in Russian).
6. **Smirnov D.N., Genkin V.E.** Wastewater treatment in metalworking processes. M.: Metallurgiya. 1989. 224 p. (in Russian).
7. **Serpokrylov N.S., Vil'son E.V., Getmantsev S.V., Marochkin A.A.** Ecology of wastewater treatment with physico - chemical methods. M.: Assotsiatsiya Stroitelnykh Vuzov. 2009. 261 p. (in Russian).
8. **Leonov S.B., Zel'berg B.I., Elshin V.V., Dudarev V.I., Oznobikhin L.M., Randin O.I., Rashchenko A.F., Petrenko I.S.** RF Patent 2098176. A method for producing carbon sorbent. Published. 10.12.1997. Byl'. N 34 (in Russian).
9. **Filatova E.G., Pomazkina O.I., Dudarev V.I.** Sorption cleaning of galvanic wastewater from Fe ions (II), (III) and reuse of sorbent IPI-T. *J. Sib. Fed. Univ. Ser.: Technics and technology.* 2013. V. 6. N 8. P. 903 - 910 (in Russian).
10. **Lyr'e Yu.Yu., Rybnikova A.I.** Chemical analysis of industrial wastewater. M.: Khimiya. 1974. 336 p. (in Russian).
11. ПНД Ф 14.1: 2.46-96. Quantitative chemical analysis of water. Methods of measurement of mass concentration of nickel in natural waters and sewage by photometric method with dimethylglyoxime (in Russian).
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. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov.* 2015. V. 51. N 6. P. 582. (in Russian).
13. **Dudareva G.N., Petukhova G.A., Nguen A.T.N., Syrykh Yu.S.** Adsorption of nickel (II) ions on carbon adsorbents. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov.* 2013. V. 49. N 4. 389 p.. (in Russian).
14. **Dudareva G.N.** Sorption concentration and analytical determination of nickel. Irkutsk: IRNITU. 2015. 154 p. (in Russian).
15. **Frolov Yu.G.** Course of the Colloid Chemistry. Surface phenomena and disperse systems. M.: Khimiya. 1989. 462 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 13.09.2016
Принята к опубликованию 05.12.2016*

*Received 13.09.2016
Accepted 05.12.2016*