

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.067.8.081.3+ 66.011

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-349-357>



## Регрессионные модели адсорбции ионов никеля (II) углеродными сорбентами

© Н.В. Иринчинова \*, В.И. Дударев\*, Е.Г. Филатова\*, В.С. Асламова\*\*

\*Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская федерация

\*\*Иркутский государственный университет путей сообщения,  
г. Иркутск, Российская федерация

**Резюме:** Использование недорогих материалов в качестве сорбентов повышает конкурентные преимущества удаления ионов тяжелых металлов, в том числе ионов никеля (II), из водных растворов и сточных вод. К таковым материалам можно отнести активные угли – углеродные сорбенты. В качестве объекта исследования использовали окисленный углеродный сорбент АД-05-2 и его исходный аналог. Окисление углеродного сорбента АД-05-2 осуществляли раствором азотной кислоты и мочевины по известной методике. В результате окисления улучшены текстурные характеристики углеродного сорбента. Увеличен суммарный объем пор, в том числе и объем микропор, что положительно повлияло на сорбционные свойства полученного образца. В работе исследована адсорбция ионов никеля (II) окисленным углеродным сорбентом АД-05-2 и его исходным аналогом. Для обоих образцов время установления адсорбционного равновесия в системе адсорбат–адсорбент составило 4 ч, pH = 9,6, интервал исследуемых температур – 298–338 К. Полученные экспериментальные данные по адсорбции ионов никеля (II) обработаны в пакете программы Statgraphics Plus. Изотермы адсорбции описаны регрессионными моделями параболического типа, которые охватывают 98,86–99,99% экспериментальных данных. Адсорбция ионов никеля (II) повышается с увеличением температуры, о чем свидетельствует рост значения первой производной  $dA/dC_p$ , по-видимому, за счет роста скорости внешней диффузии. Особенно крутой подъем изотерм соответствует температуре 338 К, что свидетельствует о воздействии диффузии на процесс адсорбции. Даны оценки точности регрессионных моделей: среднеквадратическая  $\sigma$  и абсолютная  $\Delta$  ошибки. По критерию Дарбина – Уотсона (DW) оценена автокорреляция опытных данных. Полученные модели регрессии могут быть использованы для расчета оптимальных параметров процесса адсорбции ионов никеля (II) из водных растворов и технологических сред с применением окисленного углеродного сорбента АД-05-2 и его исходного аналога.

**Ключевые слова:** ионы никеля (II), углеродный адсорбент АД-05-2, окисленный АД-05-2, регрессионные модели, адсорбция

**Для цитирования:** Иринчинова Н.В., Дударев В.И., Филатова Е.Г., Асламова В.С. Регрессионные модели адсорбции ионов никеля (II) углеродными сорбентами. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 3. С. 349–357. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-349-357>

## Regression models of adsorbing nickel (II) ions by carbon sorbents

Nadejda V. Irinchinova, Vladimir I. Dudarev, Elena G. Filatova, Vera S. Aslamova

\*Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation

\*\*Irkutsk State Transport University,  
Irkutsk, Russian Federation

**Abstract:** The use of inexpensive materials such as sorbents increases the competitive advantages of removing heavy metal ions, including nickel (II) ions, from aqueous solutions and wastewater. Such materials include active carbons – carbon sorbents. The oxidized carbon sorbent AD-05-2 and its original analogue have been used as the object of this research. The oxidation of carbon sorbent AD-05-2 was conducted using a solution of nitric acid and urea following a conventional method. Oxidation resulted in improvement of the textural characteristics of the carbon sorbent. The total pore volume increased, including the volume of micropores, which had a positive effect on the sorption properties of the obtained sample. This article studies the adsorption of nickel (II) ions by the oxidized carbon sorbent AD-05-2 and its original analogue. For both

models, the total time of establishing adsorptive equilibrium in the system adsorbate–adsorbent was 4 hours, pH = 9,6, and the range of temperatures – 298–338 K. The obtained experimental data on the nickel (II) ion adsorption are processed in the software package Statgraphics Plus. Adsorption isotherms are described using parabolic regression models, which cover 98.86–99.99% of the experimental data. The adsorption of nickel (II) ions increases with temperature, as indicated by a higher value of the first derivative  $dA/dC_p$ , apparently, due to accelerated external diffusion. A significant steep rise of the isotherms corresponds to the temperature of 338 K, which indicates the diffusion effect on the adsorption process. The estimates of the accuracy of regression models are provided by the mean square  $\sigma$  and absolute  $\Delta$  errors. Autocorrelation of experimental data is estimated using Durbin – Watson (DW) test. The obtained regression models can be applied for calculating the optimum parameters of nickel (II) ions' adsorption from aqueous solutions and process stream using the oxidized carbonic sorbent AD-05-2 and its original analog.

**Keywords:** nickel (II) ions, carbon adsorbent AD-05-2, oxidized AD-05-2, regression models, adsorption

**For citation:** Irinchinova NV, Dudarev VI, Filatova EG, Aslamova VS. Regression models of nickel (II) ion adsorption by carbon sorbent. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(3):349–357. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-349-357>

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач современного производства является очистка промышленных сточных вод и техногенных образований от соединений тяжелых металлов. Известно, что никель относится к числу канцерогенных элементов [1]. При этом свободные ионы никеля (II) вдвое токсичнее его комплексных соединений. Максимальное содержание ионов никеля (II) в отработанных растворах гальванического производства составляет 50 мг/дм<sup>3</sup>, в промывных водах – от 2 до 5 мг/дм<sup>3</sup> [2], в то время как согласно ГОСТ 4465-2016 их предельно допустимая концентрация не должна превышать 0,01 мг/дм<sup>3</sup>.

Для удаления ионов никеля (II) из водных растворов в последнее время широко используют различные наноматериалы [3, 4], в том числе одностойные (SWCNTs) и многослойные (MWCNTs) нанотрубки [5, 6], показавшие наибольшую сорбционную емкость по отношению к ионам тяжелых металлов. Так, в работе [7] исследована сорбция ионов никеля (II) многослойными нанотрубками и гранулированным активированным углем (GAC).

В статье [8] представлены экспериментальные данные по удалению ионов Cd(II), Ni(II), и Pb(II) с применением гидрофильных углеродных наночастиц (HNPs), нанесенных на гранулы диоксида кремния. Исследуемые сорбенты показали высокую эффективность удаления ионов Cd(II), Ni(II), и Pb(II) при нейтральном значении pH и низкой температуре (10 °C). Анализ изотерм адсорбции показал, что свободная энергия Гиббса взаимодействия между сорбентом и ионами Ni(II) и Pb(II) выше, чем у ионов Cd(II). Сорбенты демонстрируют заметную адсорбционную способность на грамм активной фазы, мг/г: 0,54 – для ионов Cd(II), 13,48 – для ионов Ni(II), 8,87 – для ионов Pb(II).

В работе [9] в качестве адсорбента для одновременного отделения ультра-следовых количеств кадмия, свинца, меди и никеля использован наногель, состоящий из магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, диоксида кремния и поли-4-винилпиридина. Эффективность извлечения составила больше 98%.

Для отделения и предварительного концентрирования следовых количеств ионов кадмия, меди, никеля и свинца из пищевых и сельскохозяйственных продуктов получен сорбент путем функционализации нанопористого кремнезема SBA-15 дитионом [10]. Эффективность выделения указанных металлов превысила 97%. Адсорбционная емкость сорбента SBA-15 составила, мг/г: 189 – для кадмия; 102 – для меди; 91 – для никеля; 208 – для свинца.

Для удаления ионов никеля (II) широко используются отходы различных производств. Так, авторы работы [11] для удаления никеля и хрома из водных растворов в качестве адсорбента использовали сырой жмых (отходы сахарного производства) и летучую золу (отходы ТЭЦ). Сырой жмых перед применением обрабатывали 0,1 н NaOH, а затем 0,1 н CH<sub>3</sub>COOH. Эффективность данных сорбентов по удалению хрома и никеля составила от 56,2 до 96,2% и от 83,6 до 100% соответственно.

В работе [12] в качестве сорбентов для удаления никеля из водных растворов использовали кальцинированный фосфат, красный и осветленный шлам (отходы сталелитейной промышленности). Адсорбционная емкость, рассчитанная на основе изотермы Ленгмюра, и полученные значения свободной энергии Гиббса показали, что кальцинированный фосфат обладает более высокой емкостью и способностью к извлечению никеля по сравнению с другими сорбентами.

Использование недорогих материалов в качестве сорбентов повышает конкурентные преимущества удаления ионов тяжелых металлов из водных растворов и сточных вод. К таковым материалам можно отнести активные угли – углеродные сорбенты.

Целью настоящей работы явилось исследование и описание регрессионными моделями закономерностей адсорбции ионов никеля (II) углеродными сорбентами.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования использовали углеродный сорбент АД-05-2. Для увеличения адсорбционной емкости исходного сорбента проведено его окисление раствором азотной кислоты и мочевины [13]. Окисленный уголь, полученный окислением в присутствии мочевины, устойчив в щелочных растворах и не выделяет в жидкую фазу побочные продукты. Мочевина в процессе окисления или модифицирования выступает как буфер: она предохраняет угольную матрицу от разрушения, уничтожает выделяющиеся в процессе окисления оксиды азота, тем самым затрудняет образование гуминовых соединений.

Для окисления использовали просеянный от пыли и мелких частиц углеродный сорбент АД-05-2 с размером частиц от 2 до 0,5 мм. Сорбент предварительно подвергли стадии обеззоливания раствором соляной кислоты в течение суток при умеренном перемешивании. Для ускорения выделения минеральных солей смесь подогрели до 65 °С, далее образец промыли водой до pH = 4.

Стадию окисления проводили в присутствии смеси азотной кислоты и мочевины при 80 °С в течение 3-х ч при периодическом перемешивании для предотвращения ее вспучивания от отходящих газов и удаления газовых карманов в слое смеси угля и кислоты. После окисления уголь промывали водой до pH = 4 и высушивали до постоянной массы при температуре 105 °С. Технические характеристики окисленного образца и его исходного аналога АД-05-2 приведены в табл. 1.

Из представленных в табл. 1 данных видно, что в результате окисления улучшены текстурные характеристики углеродного сорбента. Увеличен суммарный объем пор, в том числе и объем микропор, что положительно влияет на сорбционные свойства полученного образца, в частности, на сорбционную активность по йоду.

Определение ионов никеля (II) осуществляли спектрофотометрическим методом с селективным реагентом диметилглиоксимом в присутствии йода [14, 15] на спектрофотометре ПЭ-5400В.

Адсорбцию ионов никеля (II) проводили в статических условиях, используя метод неизменных концентраций (исходная концентрация  $C_0 = 200$  мг/дм<sup>3</sup>) и переменных навесок 2; 1; 0,75; 0,5 и 0,25 г. Объем адсорбата составлял 0,1 дм<sup>3</sup>.

Величину адсорбции,  $A$ , ммоль/г, вычисляли по формуле:

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

где  $C_0$  и  $C_p$  – исходная и равновесная концентрации иона металла в растворе соответственно, ммоль/дм<sup>3</sup>;  $V$  – объем раствора, дм<sup>3</sup>;  $m$  – масса сорбента, г.

Для каждого варианта исходных данных проводили 3–5 опытов, добиваясь воспроизводимости результатов с погрешностью не более 0,01. Точка на графиках – среднеарифметическое значение величины  $A$ .

Оптимальное значение pH среды устанавливали в диапазоне от 3 до 12 с помощью 0,2 М аммиачно-ацетатных буферных растворов. Выявлено, что сорбент АД-05-2 проявляет адсорбционную активность к ионам никеля (II) в слабо-щелочной и щелочной средах. Адсорбция резко возрастает при pH > 9,5, что может быть связано с изменением свойств поверхности сорбентов и изменением состояния сорбата в растворе. С увеличением pH и, следовательно, увеличением концентрации гидроксид-ионов происходит постепенное замещение молекул аммиака в координационной сфере никеля на гидроксид-ионы с образованием смешанной координационной сферы [16].

Обработку полученных данных по адсорбции ионов никеля (II) осуществляли в пакете программы Statgraphics Plus. По наибольшему значению коэффициента детерминации,  $R^2$ , %, определили вид регрессионной модели. Значение  $R^2$  выявляло, сколько процентов экспериментальных данных описывается найденным уравнением регрессии. Скорректированный коэффициент детерминации,  $R^2_c$ , %, использовали для оценки тесноты связи между независимой и зависимой переменными, а среднеквадратическую  $\sigma$  и абсолютную  $\Delta$  ошибки – для оценки точности модели. По критерию Дарбина – Уотсона (DW) судили об отсутствии автокорреляции в опытных данных.

**Таблица 1.** Технические характеристики углеродных адсорбентов исходного и окисленного АД-05-2

**Table 1.** Technical characteristics of original and oxidized AD-05-2 carbon adsorbents

Параметр	Сорбент	
	АД-05-2	Окисленный АД-05-2
Гранулометрический состав, %, при размере частиц, мм:		
<0,5	≤6	≤6
0,5–2	≥88	≥88
>2	≥6	≥6
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	550	580
Механическая прочность, %	82	85
Суммарный объем пор (по воде), см <sup>3</sup> /г	0,62	0,69
Объем микропор, см <sup>3</sup> /г	0,24	0,26
Объем мезопор, см <sup>3</sup> /г	0,12	0,14
Сорбционная активность по йоду, %	84	89
Насыпная плотность, г/дм <sup>3</sup>	550	550

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследована адсорбция ионов никеля (II) окисленным сорбентом АД-05-2 и его исходным аналогом. Время установления адсорбционного равновесия в системе адсорбат–адсорбент составило 4 ч для обоих образцов. Полученные изотермы адсорбции в температурном интервале 298–338 К представлены на рис. 1.

Как видно из представленных на рис. 1 графиков, величина адсорбции ионов никеля (II) окисленным углеродным сорбентом АД-05-2 выше, чем у исходного аналога и углеродного сорбента ИПИ-Т [17, 18]. Начальный участок изотерм более выпуклый (рис. 1, б), что подтверждает участие в адсорбции большего объема микропор. Для обоих образцов адсорбция ионов никеля (II) увеличивается с повышением температуры, очевидно, имеет место активированная адсорбция.

Полученные результаты адсорбции ионов

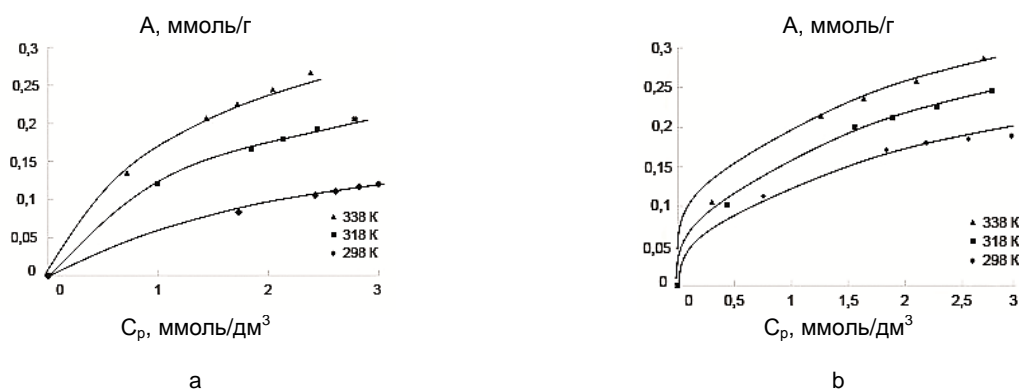
никеля (II) углеродными сорбентами обработаны с использованием пакета программы Statgraphics Plus. Получены регрессионные модели адсорбции. На рис. 2 приведены изотермы адсорбции ионов никеля (II) углеродным сорбентом АД-05-2, адекватно описываемые параболой (2)–(4) в интервале температур 298–338 К. Время адсорбции – 4 ч, pH = 9,6. Критерии адекватности даны в табл. 2.

Как видно из представленных на рис. 2 данных, адсорбция ионов никеля (II) углеродным сорбентом АД-05-2 увеличивается с повышением температуры, о чем свидетельствует рост значения первой производной  $dA/dC_p$ , по видимому, за счет увеличения скорости внешней диффузии. Особенно крутой подъем изотермы наблюдается при температуре 338 К, что свидетельствует о воздействии диффузии на процесс адсорбции.

$$T = 298 \text{ K} \quad A = 0,000053 + 0,059236 \cdot C_p - 0,006397 \cdot C_p^2 \quad (2)$$

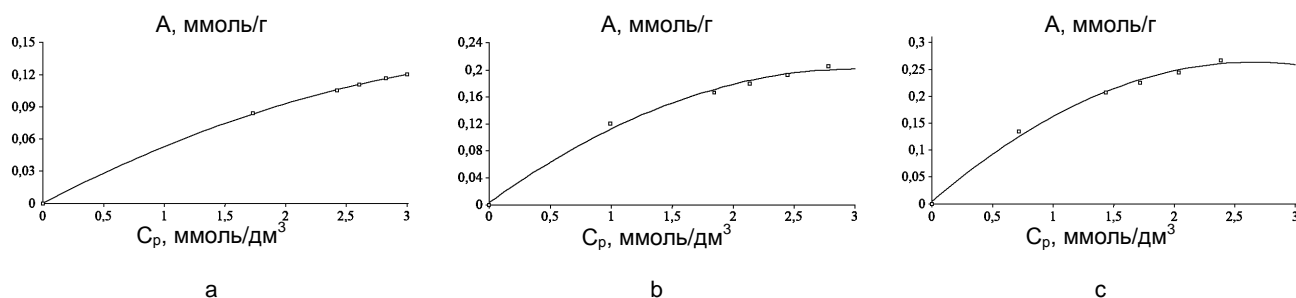
$$T = 318 \text{ K} \quad A = 0,002991 + 0,130722 \cdot C_p - 0,002150 \cdot C_p^2 \quad (3)$$

$$T = 338 \text{ K} \quad A = 0,003997 + 0,195342 \cdot C_p - 0,036772 \cdot C_p^2 \quad (4)$$



**Рис. 1.** Изотермы адсорбции ионов никеля (II):  
 а – сорбентом АД-05-2; б – окисленным сорбентом АД-05-2

**Fig. 1.** Adsorption isotherm of nickel (II) ions:  
 а – by the sorbent AD-05-2; б – by the oxidized sorbent AD-05-2



**Рис. 2.** Изотермы адсорбции ионов никеля (II) углеродным сорбентом АД-05-2 при температуре, К: а – 298; б – 318; с – 338

**Fig. 2.** Adsorption isotherm of nickel (II) ions by carbon sorbent AD-05-2 at temperature, K: а – 298, б – 318, с – 338

Таблица 2. Критерии адекватности регрессионных моделей

Table 2. Criteria for the adequacy of regression models

Номер модели	$R^2, \%$	$R^2_{cr}, \%$	DW	$\sigma$	$\Delta$
(2)	99,99	99,99	2,30	0,0005	0,0003
(3)	99,42	99,03	2,39	0,0075	0,0048
(4)	99,59	99,03	2,21	0,0082	0,0052
(5)	98,86	98,10	2,52	0,0102	0,0065
(6)	98,19	96,99	2,38	0,0164	0,0098
(7)	97,52	95,86	2,35	0,0222	0,0132

Об адекватности найденных регрессий экспериментальным данным можно судить по зависимостям, представленным на рис. 3, отражающим результат сопоставления значений величины расчетной адсорбции  $A_p$  по моделям (2)–(4).

Как видно из представленных на рис. 3 данных, получена удовлетворительная сходимость экспериментальных и расчетных значений, критерий Дарбина – Уотсона (см. табл. 1) подтверждает отсутствие автокорреляции в опытных

данных. Точность регрессионных моделей оценена среднеквадратической  $\sigma$  и абсолютной  $\Delta$  ошибками.

Изотермы адсорбции  $A$ , ммоль/г, ионов никеля (II) окисленным углеродным сорбентом АД-05-2 представлены на рис. 4 в интервале температур 298–338 К, адекватно описываемые параболой (5)–(7). Время адсорбции – 4 ч, pH = 9,6. Критерии адекватности см. в табл. 2.

$$T = 298 \text{ K} \quad A = 0,006175 + 0,146372 \cdot C_p - 0,029388 \cdot C_p^2 \quad (5)$$

$$T = 318 \text{ K} \quad A = 0,013751 + 0,168767 \cdot C_p - 0,031820 \cdot C_p^2 \quad (6)$$

$$T = 338 \text{ K} \quad A = 0,02130 + 0,199186 \cdot C_p - 0,038522 \cdot C_p^2 \quad (7)$$

Как видно из представленных на рис. 4 данных, адсорбция ионов никеля (II) окисленным углеродным сорбентом АД-05-2 так же, как и для исходного образца, растет с увеличением тем-

пературы. Особенно крутой подъем изотермы наблюдается при температуре 338 К, что свидетельствует о воздействии диффузии на процесс адсорбции.

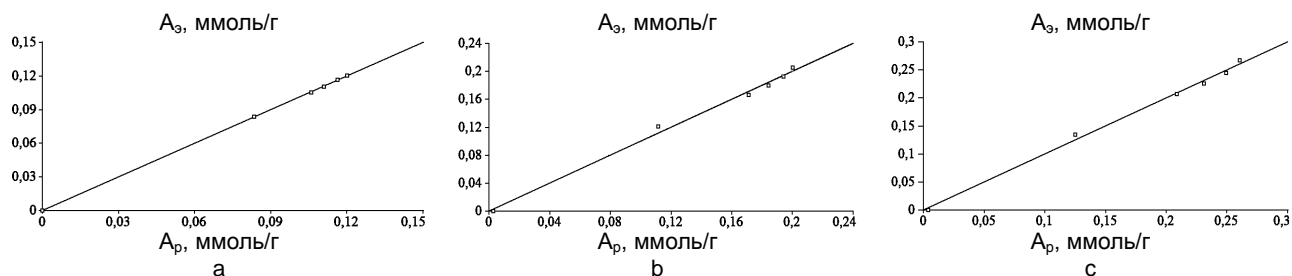


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных адсорбции  $A_э$  ионов никеля (II) углеродным сорбентом АД-05-2 с расчетными значениями  $A_p$  по модели: (2) – при 298 К (а); (3) – при 318 К (б); (4) – при 338 К (с)

Fig. 3. Comparison of experimental  $A_e$  adsorption data of nickel (II) ions by the carbon sorbent AD-05-2 with the calculated values of  $A_p$  according to the model: (2) – at 298 K (a); (3) – at 318 K (b); (4) – at 338 K (c)

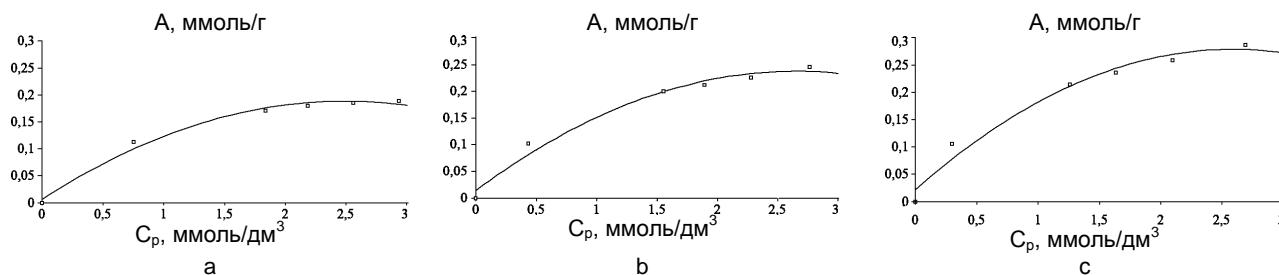


Рис. 4. Изотермы адсорбции ионов никеля (II) окисленным углеродным сорбентом АД-05-2 при температурах, К: а – 298; б – 318; с – 338

Fig. 4. Adsorption isotherm of nickel (II) ions by oxidized carbon sorbent AD-05-2 at temperatures, K: a – 298; b – 318; c – 338

Об адекватности найденных регрессий экспериментальным данным можно судить по зависимостям, представленным на рис. 5, отражающим результат сопоставления расчетных значений величины расчетной адсорбции  $A_p$  ионов никеля(II) окисленным углеродным сорбентом АД-05-2 по моделям (5)–(7).

Показана удовлетворительная сходимость экспериментальных и расчетных значений, критерий Дарбина – Уотсона (см. табл. 2) подтверждает отсутствие автокорреляции опытных данных. Полученные модели регрессии могут быть использованы для расчета оптимальных параметров процесса адсорбции ионов никеля (II).

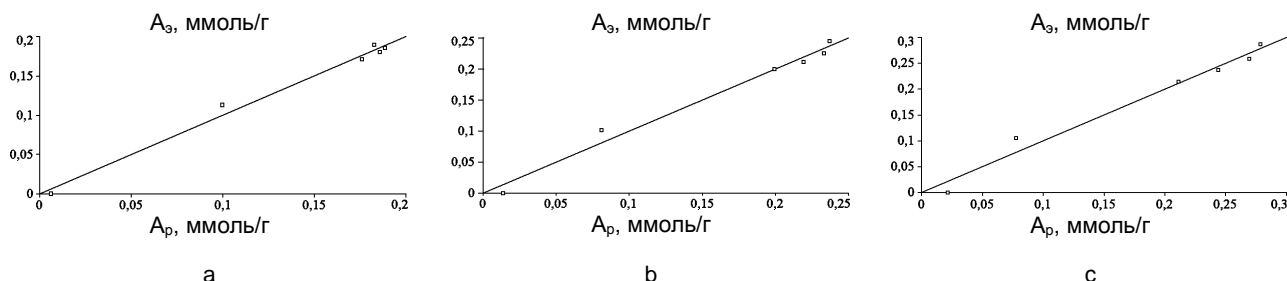


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных адсорбции  $A_э$  ионов никеля (II) окисленным углеродным сорбентом АД-05-2 с расчетными значениями  $A_p$  по модели:  
(5) – при 298 К (а); (6) – при 318 К (б); (7) – при 338 К (с)

Fig. 5. Comparison of experimental  $A_e$  adsorption data of nickel (II) ions by the oxidized carbon sorbent AD-05-2 with the calculated values of  $A_p$  according to the model:  
(5) – at 298 K (a); (6) – at 318 K (b); (7) – at 338 K (c)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована адсорбция ионов никеля (II) окисленным углеродным сорбентом АД-05-2 и его исходным аналогом. Для обоих образцов время установления адсорбционного равновесия в системе адсорбат–адсорбент составило 4 ч, pH = 9,6, интервал исследуемых температур – 298–338 К.

Полученные экспериментальные данные по

адсорбции ионов никеля (II) обработаны в пакете программы Statgraphics Plus. Изотермы адсорбции описаны регрессионными моделями. Полученные модели регрессии могут быть использованы для расчета оптимальных параметров процесса адсорбции ионов никеля (II) из водных растворов и технологических сред с применением окисленного углеродного сорбента АД-05-2 и его исходного аналога.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nezamzadeh-Ejhieh A., Kabiri-Samani M. Effective removal of Ni (II) from aqueous solutions by modification of nano particles of clinoptilolite with dimethylglyoxime // Journal of Hazardous Materials. 2013. Vol. 260. P. 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.05.014>
2. Borba C.E., Guirardello R., Silva E.A., Veit M.T., Tavares C.R.G. Removal of nickel (II) ions from aqueous solution by biosorption in a fixed bed column: Experimental and theoretical breakthrough curves // Biochemical Engineering Journal. 2006. Vol. 30. Issue 2. P. 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.04.001>
3. Zawisza B., Sitko R., Malicka E., Talik E. Graphene oxide as a solid sorbent for the preconcentration of cobalt, nickel, copper, zinc and lead prior to determination by energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry // Analytical Methods. 2013. Vol. 5. Issue 22. P. 6425–6430. <https://doi.org/10.1039/c3ay41451e>
4. Zawisza B., Baranik A., Malicka E., Talik E., Sitko R. Preconcentration of Fe (III), Co (II), Ni (II), Cu (II), Zn (II) and Pb (II) with ethylenediamine-modified graphene oxide // Microchimica Acta. 2016. Vol. 183. Issue 1. P. 231–240. <https://doi.org/10.1007/s00604-015-1629-y>
5. Zhou Q., Xing A., Zhao K. Simultaneous determination of nickel, cobalt and mercury ions in water samples by solid phase extraction using multi-walled carbon nanotubes as adsorbent after chelating with sodium diethyldithiocarbamate prior to high performance liquid chromatography // Journal of Chromatography. 2014. Vol. 1360. P. 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.07.084>
6. Amais R.S., Ribeiro J.S., Segatelli M.G., Yoshida I.V.P., Luccas P.O., Tarley C.R.T. Assessment of nanocomposite alumina supported on multi-wall carbon nanotubes as sorbent for on-line nickel preconcentration in water sample // Separation and Purification Technology. 2007. Vol. 58. Issue 1. P. 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.07.024>
7. Lu C., Liu C., Rao G.P. Comparisons of sorbent cost for the removal of Ni<sup>2+</sup> from aqueous solution by carbon nanotubes and granular activated carbon // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 151. Issue 1. P. 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.078>
8. Di Natale F., Gargiulo V., Alfe M. Adsorption of

heavy metals on silica-supported hydrophilic carbonaceous nanoparticles (SHNPs) // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393. Article number 122374. <https://doi.org/10.1016/j.hazmat.2020.122374>

9. Behbahani M., Bide Y., Bagheri S., Salarian M., Omid F., Nabid M.R. A pH responsive nanogel composed of magnetite, silica and poly (4-vinylpyridine) for extraction of Cd (II), Cu (II), Ni (II) and Pb (II) // *Microchimica Acta*. 2016. Vol. 183. Issue 1. P. 111–121. <https://doi.org/10.1007/s00604-015-1603-8>

10. Behbahani M., Salarian M., Amini M.M., Sadeghi O., Bagheri A., Bagheri S. Application of a new functionalized nanoporous silica for simultaneous trace separation and determination of Cd (II), Cu (II), Ni (II), and Pb (II) in food and agricultural products // *Food Analytical Methods*. 2013. Vol. 6. Issue 5. P. 1320–1329. <https://doi.org/10.1007/s12161-012-9545-9>

11. Rao M., Parwate A.V., Bhole A.G. Removal of Cr (VI) and Ni (II) from aqueous solution using bagasse and fly ash // *Waste Management*. 2002. Vol. 22. Issue 7. P. 821–830. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00011-9)

12. Hannachi Y., Shapovalov N.A., Hannachi A. Adsorption of nickel from aqueous solution by the use of low-cost adsorbents // *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2010. Vol. 27. Issue 1. P. 152–158. <https://doi.org/10.1007/s11814-009-0303-7>

13. Тарковская И.А. Окисленный уголь. Киев: Наукова думка, 1981. 200 с.

14. Гурьева Р.Ф., Саввин С.Б. Спектрофотометрические методы определения благородных металлов // *Журнал аналитической химии*. 2002. Т. 57. N 11. С. 1158–1175.

15. Лурье Ю.Ю., Рыбникова А.И. Химический анализ производственных сточных вод. М: Химия. 1974. 336 с.

16. Дударева Г.Н., Иринчинова Н.В. Сорбционное извлечение никеля в хлораммонийной технологии переработки окисленных руд // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2016. Т. 6. N 2. С. 83–89. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-2-83-89>

17. Дударев В.И., Иринчинова Н.В., Филатова Е.Г. Адсорбция ионов никеля (II) из водных растворов углеродными адсорбентами // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. N 1. С. 75–80. <https://doi.org/10.6060/tcct.2017601.5455>

18. Dudareva G.N., Irinchinova N.V., Dudarev V.I., Petukhova G.A. Study of removal of nickel (II) from aqueous solutions by sorption // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2019. Vol. 55. Issue 5. P. 488–495. <https://doi.org/10.1134/S2070205119050071>

## REFERENCES

1. Nezamzadeh-Ejhi A, Kabiri-Samani M. Effective removal of Ni (II) from aqueous solutions by modification of nano particles of clinoptilolite with dimethylglyoxime. *Journal of Hazardous Materials*. 2013;260:339–349. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.05.014>

2. Borba CE, Guirardello R, Silva EA, Veit MT, Tavares CRG. Removal of nickel (II) ions from aqueous solution by biosorption in a fixed bed column: Experimental and theoretical breakthrough curves. *Biochemical Engineering Journal*. 2006;30(2):184–191. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.04.001>

3. Zawisza B, Sitko R, Malicka E, Talik E. Graphene oxide as a solid sorbent for the preconcentration of cobalt, nickel, copper, zinc and lead prior to determination by energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry. *Analytical Methods*. 2013;5(22):6425–6430. <https://doi.org/10.1039/c3ay41451e>

4. Zawisza B, Baranik A, Malicka E, Talik E, Sitko R. Preconcentration of Fe (III), Co (II), Ni (II), Cu (II), Zn (II) and Pb (II) with ethylenediamine-modified graphene oxide. *Microchimica Acta*. 2016;183(1):231–240. <https://doi.org/10.1007/s00604-015-1629-y>

5. Zhou Q, Xing A, Zhao K. Simultaneous determination of nickel, cobalt and mercury ions in water samples by solid phase extraction using multiwalled carbon nanotubes as adsorbent after chelating with sodium diethyldithiocarbamate prior to high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*. 2014;1360:76–81. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2014.07.084>

chroma2014.07.084

6. Amais RS, Ribeiro JS, Segatelli MG, Yoshida IVP, Luccas PO, Tarley CRT. Assessment of nanocomposite alumina supported on multi-wall carbon nanotubes as sorbent for on-line nickel preconcentration in water sample. *Separation and Purification Technology*. 2007;58(1):122–128. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.07.024>

7. Lu C, Liu C, Rao GP. Comparisons of sorbent cost for the removal of Ni<sup>2+</sup> from aqueous solution by carbon nanotubes and granular activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;151(1):239–246. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.078>

8. Di Natale F, Gargiulo V, Alfe M. Adsorption of heavy metals on silica-supported hydrophilic carbonaceous nanoparticles (SHNPs). *Journal of Hazardous Materials*. 2020;393. Article number 122374. <https://doi.org/10.1016/j.hazmat.2020.122374>

9. Behbahani M, Bide Y, Bagheri S, Salarian M, Omid F, Nabid MR. A pH responsive nanogel composed of magnetite, silica and poly (4-vinylpyridine) for extraction of Cd (II), Cu (II), Ni (II) and Pb (II). *Microchimica Acta*. 2016;183(1):111–121. <https://doi.org/10.1007/s00604-015-1603-8>

10. Behbahani M, Salarian M, Amini MM, Sadeghi O, Bagheri A, Bagheri S. Application of a new functionalized nanoporous silica for simultaneous trace separation and determination of Cd (II), Cu (II), Ni (II), and Pb (II) in food and agricultural products. *Food Analytical Methods*. 2013;6(5):1320–

1329. <https://doi.org/10.1007/s12161-012-9545-9>

11. Rao M, Parwate AV, Bhole AG. Removal of Cr (VI) and Ni (II) from aqueous solution using bagasse and fly ash. *Waste Management*. 2002;22(7):821–830. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00011-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00011-9)

12. Hannachi Y, Shapovalov NA, Hannachi A. Adsorption of nickel from aqueous solution by the use of low-cost adsorbents. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2010;27(1):152–158. <https://doi.org/10.1007/s11814-009-0303-7>

13. Tarkovskaya IA. *Oxidized coal*. Kiev: Naukova dumka; 1981. 200 p. (In Russian)

14. Gur'eva RF, Savvin SB. Spectrophotometric methods for the determination of noble metals. *Zhurnal analiticheskoi khimii = Journal of Analytical Chemistry*. 2002;57(11):1158–1175. (In Russian)

15. Lu'e YuYu, Rybnikova AI. *Chemical analysis of industrial wastewater*. Moscow: Khimiya; 1974. 336 p. (In Russian)

16. Dudareva GN, Irinchinova NV. Sorption extraction of nickel in chlorine-ammonium technology of oxidized ores processing. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2016(2):83–89. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-2-83-89>

17. Dudareva GN, Irinchinova NV. Adsorption of nickel (II) ions from aqueous solutions by carbon adsorbents. *Izvestiya vysshii uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*. 2017;60(1):75–80. (In Russian) <https://doi.org/10.6060/tcct.2017601.5455>

18. Dudareva GN, Irinchinova NV, Dudarev VI, Petukhova GA. Study of removal of nickel (II) from aqueous solutions by sorption. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2019;55(5):488–495. <https://doi.org/10.1134/S2070205119050071>

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Иринчинова Надежда Владимировна,**

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

##### **Дударев Владимир Иванович,**

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

##### **Филатова Елена Геннадьевна,**

к.т.н., доцент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
✉e-mail: efila@list.ru

##### **Асламова Вера Сергеевна,**

д.т.н., профессор,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15,  
Российская Федерация  
e-mail: aslamovav@yandex.ru

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Nadejda V. Irinchinova,**

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

##### **Vladimir I. Dudarev,**

Dr Sci. (Engineering), Professor,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
Russian Federation,  
e-mail: vdudarev2@ex.istu.edu

##### **Elena G. Filatova,**

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
Russian Federation,  
✉e-mail: efila@list.ru

##### **Vera S. Aslamova,**

Dr Sci. (Engineering), Professor,  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074,  
Russian Federation,  
e-mail: aslamovav@yandex.ru

#### **Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад  
в подготовку публикации.

#### **Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 03.12.2020.*

*Одобрена после рецензирования 30.01.2021.*

*Принята к публикации 30.08.2021.*

**Conflict interests**

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

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

*The article was submitted 03.12.2020.*

*Approved after reviewing 30.01.2021.*

*Accepted for publication 30.08.2021.*