

РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ АДсорбции МЕДИ ДЕАЛЮМИНИРОВАННЫМИ ЦЕОЛИТАМИ

Е.Г. Филатова, В.С. Асламова, О.В. Лебедева

Елена Геннадьевна Филатова (ORCID 0000-0002-3387-2089)*, Оксана Викторовна Лебедева (ORCID 0000-0002-1609-4924)

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

E-mail: efila@list.ru*, lebedeva@istu.edu

Вера Сергеевна Асламова (ORCID 0000-0003-3306-0651)

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Российская Федерация, 664074

E-mail: aslamovav@yandex.ru

В работе оптимизирован процесс адсорбции меди активированными природными цеолитами с помощью математического моделирования при использовании пакета программы «Statgraphics Plus». Для этого было исследовано влияние температуры на адсорбцию ионов Cu(II) активированными минералами AC-HCl . Получены изотермы адсорбции в интервале температур от 298 до 338 К. Время достижения адсорбционного равновесия в системе сорбент-сорбат составляет 90 мин. Установлено, что с ростом температуры величина адсорбции увеличивается. При температуре 338 К и pH 5–5,5 значение адсорбции меди составляет 0,109 ммоль/г (6,9 мг/г). Полученные изотермы обработаны с помощью модели адсорбции Лэнгмюра. Значения коэффициентов детерминации ($R^2=0,999$) свидетельствуют о том, что модель Лэнгмюра адекватно описывает процесс адсорбции меди. По полученным значениям константы адсорбционного равновесия K рассчитана свободная энергия Гиббса. Показано, что энергия Гиббса ΔG^0 в интервале температур 298–338 К изменяется от –19,8 до –22,9 кДж/моль, что подтверждает самопроизвольное протекание процесса адсорбции, усиливающееся с ростом температуры. Полученные экспериментальные данные по адсорбции меди обработаны в «Statgraphics Plus». Разработаны регрессионные модели адсорбции параболического типа, которые описывают 97,45–99,12% экспериментальных данных. Получена множественная регрессия, учитывающая совместное влияние температуры и концентрации на процесс адсорбции с критерием достоверности 95,88%. Разработанные регрессионные модели можно использовать для обоснования технологического процесса адсорбции ионов меди(II) из сточных вод и производственных растворов до требуемых норм очистки.

Ключевые слова: ионы меди, очистка воды, цеолиты, регрессионные модели, адсорбция

REGRESSION MODELS OF COPPER ADSORPTION BY DEALUMINATED ZEOLITES

E.G. Filatova, V.S. Aslamova, O.V. Lebedeva

Elena G. Filatova (ORCID 0000-0002-3387-2089)*, Oksana V. Lebedeva (ORCID 0000-0002-1609-4924)

Irkutsk National Research Technical University, Lermontov st., 83, Irkutsk, 664074, Russia

E-mail: efila@list.ru*, lebedeva@istu.edu

Vera S. Aslamova (ORCID 0000-0003-3306-0651)

Irkutsk State Transport University, Chernyshevsky st., 15, Irkutsk, 664074, Russia

E-mail: aslamovav@yandex.ru

The paper optimizes the process of copper adsorption by activated natural zeolites using mathematical modeling using the "Statgraphics Plus" software package. For this purpose, the effect of temperature on the adsorption of Cu(II) ions by activated AC-HCl minerals was investigated. Adsorption isotherms were obtained in the temperature range from 298 to 338 K. The time to achieve adsorption equilibrium in the sorbent-sorbate system is 90 min. It has been found that the adsorption value increases with increasing temperature. At a temperature of 338 K and a pH of 5–5.5, the copper adsorption value is 0.109 mmol/g (6.9 mg/g). The obtained isotherms were processed using the Langmuir adsorption model. The values of the determination coefficients ($R^2=0.999$) indicate that the Langmuir model adequately describes the copper adsorption process. The Gibbs free energy is calculated from the obtained values of the adsorption equilibrium constant K . It is shown that the Gibbs energy ΔG^0 in the temperature range of 298–338 K varies from -19.8 to -22.9 kJ/mol, which confirms the spontaneous course of the adsorption process, which increases with increasing temperature. The obtained experimental data on copper adsorption were processed in the software package "Statgraphics Plus". Regression models of parabolic type adsorption have been developed, which describe 97.45–99.12% of experimental data. A multiple regression was obtained, taking into account the combined effect of temperature and concentration on the adsorption process, with a confidence criterion of 95.88%. The developed regression models can be used to justify the technological process of adsorption of copper (II) ions from wastewater and production solutions to the required purification standards.

Keywords: copper ions, water purification, zeolites, regression models, adsorption

Для цитирования:

Филатова Е.Г., Асламова В.С., Лебедева О.В. Регрессионные модели адсорбции меди dealюминированными цеолитами. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 11. С. 58–63. DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.7218.

For citation:

Filatova E.G., Aslamova V.S., Lebedeva O.V. Regression models of copper adsorption by dealuminated zeolites. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 12. P. 58–63. DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.7218.

ВВЕДЕНИЕ

Ионы тяжелых металлов, в том числе и меди, относят к приоритетным загрязняющим веществам, наблюдение за которыми обязательно во всех средах. Медь может присутствовать в сточных водах многих электрохимических производств, таких как гальваническое производство, электролиз и ряд других [1, 2]. Ионы меди(II) обладают хорошей реакционной способностью при взаимодействии с органическими и минеральными веществами, в результате образования комплексных соединений, адсорбции, ионного обмена и других процессов. Образующиеся при этом вещества, содержащие медь, обладают накопительным эффектом, главным образом, в водных объектах, нарушая тем самым деятельность экосистем многочисленных водоемов. Ионы меди(II) могут быть токсичными для живых организмов, поэтому их удаление из сточных вод является важной задачей. Адсорбция меди из сточных вод с использованием сорбентов является эффективным методом очистки воды. Существует множество сорбентов, которые могут

использоваться для адсорбции ионов тяжелых металлов из сточных вод. Они могут быть природного или синтетического происхождения [3–7]. Природные сорбенты включают: активированный уголь [8, 9], переработанные сельскохозяйственные отходы [10, 11], цеолиты [12–14]. Обоснование технологических параметров процесса адсорбции можно осуществить с помощью математического моделирования при использовании прикладного пакета программы «Statgraphics Plus». Полученные регрессионные модели могут быть использованы для расчета технологических параметров адсорбционного процесса очистки сточных вод от ионов меди(II), в том числе до концентраций ПДК.

Цель работы: обоснование выбора технологических параметров процесса адсорбции ионов меди(II) активированным природным сорбентом с использованием регрессионных моделей.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения изотерм адсорбции использовали метод неизменных навесок и переменных концентраций. При проведении эксперимента

масса навески сорбента составляла 1 г, объем сорбата – 0,1 дм³, концентрация меди в сорбате изменялась от 5 до 100 мг/дм³ (рН = 5-5,5). Массовое отношение жидкой и твердой фаз – 100:1. Адсорбция исследована в интервале температур 298-338 К. Концентрацию ионов Cu(II) в растворе определяли спектрофотометрическим методом анализа [15], относительная погрешность при определении концентрации не превышала 3%. При определении величины адсорбции и построении изотерм использовали общепринятую методику [16]. В качестве сорбентов использовали природные цеолиты Холинского месторождения (АС) [17], активированные соляной кислотой. Для активации: 10 г цеолитов, прогретых до постоянной массы фракции 0,5-1 мм при температуре 90 °С, перемешивали в 100 мл 12 %-ного раствора HCl в течение 2-х ч и оставляли в кислоте на 1 сут. Затем суспензию фильтровали и промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции. Полученные активированные цеолиты (АС-HCl) сушили до постоянной массы.

Обработка экспериментальных данных адсорбции меди образцом АС-HCl выполнена в прикладном пакете «Statgraphics Plus». По максимальному значению коэффициента детерминации R^2 , % выбирали вид регрессии [18, 19]. Значение R^2 показывает, какой процент данных эксперимента описывается полученным уравнением регрессии. Теснота связи между зависимой переменной и независимой описывается скорректированным коэффициентом детерминации R_c^2 , а точность модели – среднеквадратической σ и абсолютной Δ ошибками. Критерий Дарбина-Уотсона DW позволяет судить об отсутствии или наличии автокорреляции в данных эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что обработка минералов HCl приводит к увеличению их удельной поверхности и удельного объема пор более чем в 2 раза [20]. При этом средний размер пор сокращается от 1,78 до 1,60 нм. По данным элементного анализа отношение Si/Al становится равным 6,8, тогда как для природных аналогов АС оно составляет 3,8. Очевидно, что при активировании происходит удаление ионов алюминия, из бесконечного тетраэдрического каркаса минерала, образованного $[\text{AlO}_4]^{-5}$ и $[\text{SiO}_4]^{-4}$ (рис. 1).

Это приводит к разрушению основного компонента гейландита и уплотнению силикатного слоя сорбента АС-HCl.

В работе исследовано влияние температуры на адсорбцию ионов Cu(II) активированными минералами АС-HCl. Получены изотермы адсорбции в интервале температур от 298 до 338 К (рис. 2а). Время достижения адсорбционного равновесия в системе сорбент-сорбат – 90 мин. Установлено, что с ростом температуры величина адсорбции увеличивается, что свидетельствует об активированном процессе адсорбции [16]. При температуре 338 К значение адсорбции меди составляет 0,109 ммоль/г (6,9 мг/г).

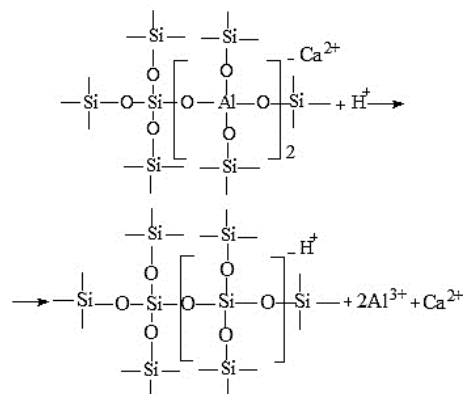


Рис. 1. Схема процесса деалюминирования природных алюмосиликатов
Fig. 1. Scheme of the process of dealuminating natural aluminosilicates

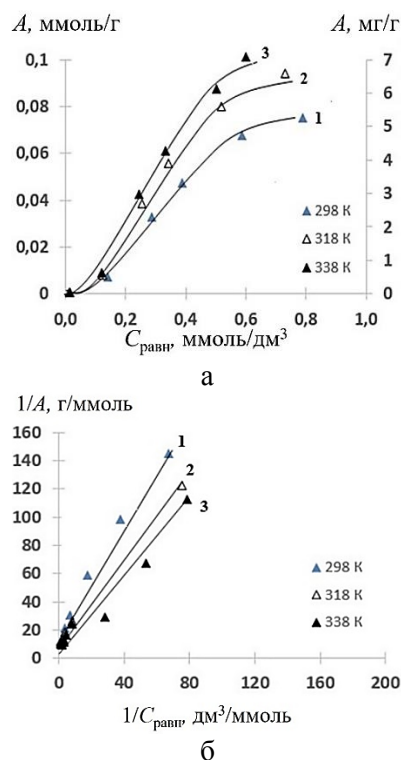


Рис. 2. Изотермы адсорбции ионов Cu(II)– а; изотермы Лэнгмюра – б (1–298 К; 2–318 К; 3–338 К)
Fig. 2. Adsorption isotherms of Cu(II) ions– а; Langmuir isotherms – б (1–298 К; 2–318 К; 3–338 К)

Полученные изотермы равновесия можно отнести к изотермам типа I по классификации БЭТ. Полученные изотермы обработаны с помощью модели адсорбции Лэнгмюра (рис. 2б). Значения коэффициентов детерминации ($R^2 = 0,999$) свидетельствуют о том, что модель Лэнгмюра адекватно описывает процесс адсорбции меди (табл. 1).

Таблица 1

Параметры модели Лэнгмюра
Table 1. Langmuir model parameters

T, K	A_{∞} , ммоль/г	A_{∞} , мг/г	$K \cdot 10^{-3}$	R^2
298	0,172	10,9	2,93	0,999
318	0,202	12,9	3,31	0,999
338	0,221	14,1	3,42	0,999

По полученным значениям константы адсорбционного равновесия K (табл. 1) с использованием уравнения химического сродства [16] рассчитана свободная энергия Гиббса. Рассчитанные значения ΔG^0 равны – 19,8; – 21,4; – 22,9 кДж/моль при T 298; 318; 338 К соответственно, что доказывает самопроизвольное протекания процесса адсорбции, усиливающееся с ростом температуры.

Полученные результаты исследований подтверждают эффективность использования полученных сорбентов для удаления меди из водных растворов и производственных сточных вод. Как сказано выше, при активировании природных цеоли-

тов происходит замена атомов алюминия на кремний в алюмосиликатном каркасе, что приводит к уплотнению силикатного слоя в активированных образцах. В результате этого наблюдается увеличение удельной поверхности и пористости минерала [20]. Что объясняет повышение значения величины адсорбции меди при активировании (табл. 2).

Таблица 2

Результаты адсорбции меди
Table 2. Copper adsorption results

Цеолиты	A , мг-экв/г	A , мг/г
АС	0,15	4,9
АС-HCl	0,30	5,4

Обоснование технологических параметров адсорбции (концентрации и температуры) выполняли с помощью программы «Statgraphics Plus». На рис. 3 представлены зависимости, отражающие сходимость экспериментальных и расчетных данных адсорбции.

Разработанные регрессионные модели приведены в табл. 3. Об их адекватности экспериментальным данным можно судить по зависимостям, которые представлены на рис. 3а, 3б, 3в, отражающих результат сопоставления экспериментальных значений $A_{\text{э}}$ величинам расчетной адсорбции $A_{\text{р}}$. Значения расчетной адсорбции находили по моделям, представленным в табл. 3.

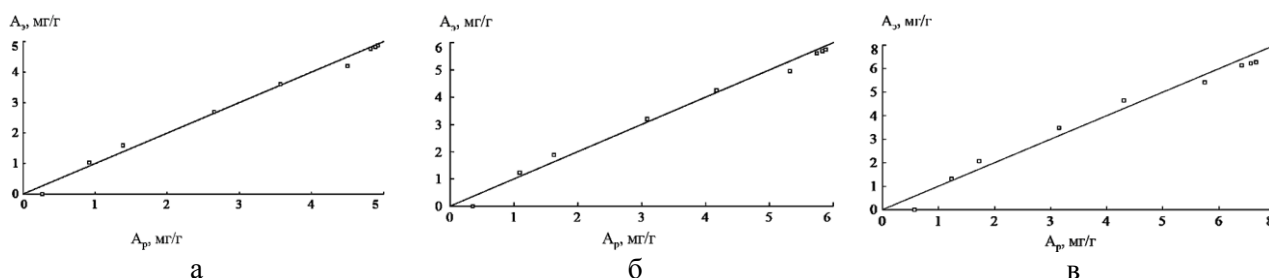


Рис. 3. Сходимость экспериментальных и расчетных данных адсорбции: а – при 298 К; б – 318 К; в – 338 К ($A_{\text{э}}$ – адсорбция экспериментальная, мг/г; $A_{\text{р}}$ – адсорбция расчетная, мг/г)

Fig. 3. Convergence of experimental and calculated adsorption data: а – 298 К; б – 318 К; в – 338 К ($A_{\text{э}}$ – experimental adsorption, mg/g; $A_{\text{р}}$ – calculated adsorption, mg/g)

Таблица 3

Регрессионные модели адсорбции меди
Table 3. Regression models of copper adsorption

№	T, K	Регрессионные модели
(1)	298	$A = 5 - 4,738 \cdot \exp(-0,346 \cdot C)$
(2)	318	$A = 6 - 5,650 \cdot \exp(-0,368 \cdot C)$
(3)	338	$A = 7 - 6,430 \cdot \exp(-0,294 \cdot C)$
(4)	298, 318, 338	$A = 6 - 5,624 \cdot \exp(-109,496 \cdot C/T)$

Об адекватности моделей можно судить по критериям достоверности (табл. 4). Множественная регрессия, учитывающая совместное влияние

температуры и концентрации на процесс адсорбции, описывается моделью (4), ее критерии достоверности указаны в табл. 4.

Анализируя значения критериев адекватности моделей, приведенных в табл. 4, можно сделать следующее заключение: поскольку значения критериев детерминации всех моделей выше 95%, то их можно использовать в качестве прогнозных моделей; несмотря на разброс экспериментальных точек для модели $A = 6 - 5,624 \cdot \exp(-109,496 \cdot C/T)$. Коэффициент детерминации множественной регрессии достаточно высок ($R_c^2 = 95,66\%$), поэтому в

первом приближении можно применять полученную регрессию для прогнозирования величины адсорбции при заданных значениях технологических параметров: концентрации и температуры. В исследуемом интервале температур 298-338 К возможно достичь снижение концентрации меди(II) до норм ПДК (0,01 мг/дм³) при начальной концентрации, не превышающей 5 мг/дм³.

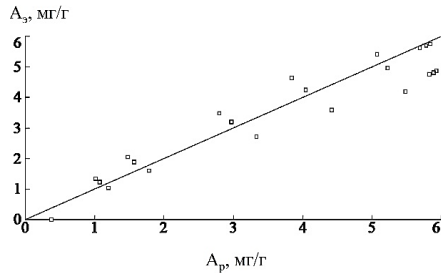


Рис. 4. Сходимость множественной регрессии ($A_э$ – адсорбция экспериментальная, мг/г; A_p – адсорбция расчетная, мг/г)
Fig. 4. Convergence of multiple regression ($A_э$ – experimental adsorption, mg/g; A_p – calculated adsorption, mg/g)

ВЫВОДЫ

Полученные результаты исследований подтверждают эффективность использования активиро-

ванного природного сорбента для удаления меди(II) из водных растворов и производственных сточных вод. Разработанные регрессионные модели можно использовать для обоснования выбора технологических параметров адсорбции ионов исследуемого металла для требуемых норм очистки. Максимальное значение адсорбции меди(II) – 0,109 ммоль/г (6,9 мг/г) – соответствует температуре 338 К.

Таблица 4

Критерии достоверности регрессионных моделей
Table 4. Criteria for the reliability of regression models

№	(1)	(2)	(3)	(4)
T , К	298	318	338	298-338
R^2 , %	99,12	98,88	97,45	95,88
R_c^2 , %	99,00	98,73	97,09	95,68
DW	0,46	0,37	0,53	0,46
σ	0,182	0,243	0,401	0,008
Δ	0,128	0,188	0,334	0,006

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кумпаненко И.В., Дюбанов М.В., Тамеева В.В. Очистка сточных вод химических производств методом динамической адсорбции. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2021. Т. LXV. № 4. С. 61-64. DOI: 10.6060/rcj.2020642.11.

2. Медведова И.В., Медведова О.М., Студенок А.Г., Студенок Г.А., Цейтлин Е.М. Новые композитные материалы и процессы для химических, физико-химических и биохимических технологий водоочистки. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 1. С. 6-27. DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6538.

3. Ferella F., Leone S., Innocenzi V., Michelis I.D., Taglieri G., Gallucci K. Synthesis of zeolites from spent fluid catalytic cracking catalyst. *J. Clean. Prod.* 2019. V. 230. P. 910–926. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.175.

4. Wang Y-S., Jia H., Chen P., Fang X., Du T. Synthesis of La and Ce modified X zeolite from rice husk ash for carbon dioxide capture. *J. Mater. Res. Technol.* 2020. V. 9. N 3. P. 4368–4378. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.02.061.

5. Melo C.C.A., Melo B.L.S., Rômulo Simões A., Paz S.P.A. Gibbsite-kaolinite waste from bauxite beneficiation to obtain FAU zeolite: Synthesis optimization using a factorial design of experiments and response surface methodology. *Appl. Clay Sci.* 2019. V. 170. P. 125–134. DOI: 10.1016/j.clay.2019.01.010.

6. Кунин А.В., Ильин А.А., Морозов Л.Н., Смирнов Н.Н., Никифорова Т.Е., Прозоров Д.А., Румянцев Р.Н., Афинеевский А.В., Борисова О.А., Гришин И.С., Верес К.А., Курникова А.А., Габрин В.А., Гордина Н.Е. Катализаторы и адсорбенты для переработки природного газа, производства минеральных удобрений, очистки технологических жидкостей. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 132-150. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6849j.

REFERENCES

1. Kumpanenko I.V., Dubanov M.V., Tameeva V.V. Wastewater treatment from chemical productions dynamic adsorption method. *Ross. Khim. Zhurn.* 2021. V. 65. N 4. P. 61–64 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2020642.11.

2. Medvedeva I.V., Medvedeva O.M., Studenok A.G., Studenok G.A., Tseytlin E.M. New composite materials and processes for chemical, physico-chemical and biochemical technologies of water purification. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 1. P. 6–27 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6538.

3. Ferella F., Leone S., Innocenzi V., Michelis I.D., Taglieri G., Gallucci K. Synthesis of zeolites from spent fluid catalytic cracking catalyst. *J. Clean. Prod.* 2019. V. 230. P. 910–926. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.175.

4. Wang Y-S., Jia H., Chen P., Fang X., Du T. Synthesis of La and Ce modified X zeolite from rice husk ash for carbon dioxide capture. *J. Mater. Res. Technol.* 2020. V. 9. N 3. P. 4368–4378. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.02.061.

5. Melo C.C.A., Melo B.L.S., Rômulo Simões A., Paz S.P.A. Gibbsite-kaolinite waste from bauxite beneficiation to obtain FAU zeolite: Synthesis optimization using a factorial design of experiments and response surface methodology. *Appl. Clay Sci.* 2019. V. 170. P. 125–134. DOI: 10.1016/j.clay.2019.01.010.

6. Kunin A.V., Ilyin A.A., Morozov L.N., Smirnov N.N., Nikiforova T.E., Prozorov D.A., Rumyantsev R.N., Afineevskiy A.V., Borisova O. A., Grishin I. S., Veres K. A., Kurnikova A. A., Gabrin V. A., Gordina N. E. Catalysts and adsorbents for conversion of natural gas, fertilizers production, purification of technological liquids. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 7. P. 132–150 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6849j.

7. Chugunov A.D., Filatova E.G. Solving environmental safety problems by sorption extraction of mercury(II), nickel(II),

7. **Чугунов А.Д., Филатова Е.Г.** Решение проблем экологической безопасности путем сорбционного извлечения ионов ртути(II), никеля(II), цинка(II) и меди(II) из водных растворов и техногенных образований. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т.66. Вып. 9. С. 6-19. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6884.
8. **Qin L., Feng L., Li C., Fan Z., Zhang G., Shen C., Meng Q.** Amination/oxidization dual-modification of waste ginkgo shells as bio-adsorbents for copper ion removal. *J. Clean. Prod.* 2019. V. 228. P. 112–123. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.249.
9. **Witek-Krowiak A., Szafran R.G., Modelski S.** Biosorption of heavy metals from aqueous solutions onto peanut shell as a low-cost biosorbent. *Desalination*. 2011. V. 265. N 1–3. P. 126–134. DOI: 10.1016/j.desal.2010.07.042.
10. **Singha B., Das S.K.** Adsorptive removal of Cu(II) from aqueous solution and industrial effluent using natural/agricultural wastes. *Colloid. Surf. B Biointerfaces*. 2013. V. 107. P. 97–106. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2013.01.060.
11. **Demcak S., Balintova M., Demcakova M., Zinicovskaia I., Yushin N., Frontasyeva M.V.** Using of wooden sawdust for copper removal from waters. *Nova Biotechnol. Chim.* 2019. V. 18. N 1. P. 66–71. DOI: 10.2478/nbec-2019-0009.
12. **Ferhat M., Kadouche S., Lounici H.** Immobilization of heavy metals by modified bentonite coupled coagulation/flocculation process in the presence of a biological flocculant. *Desalin. Water Treat.* 2016. V. 57. N 13. P. 6072–6080. DOI: 10.1080/19443994.2015.1012559.
13. **Eren E., Tabak A., Eren B.** Performance of magnesium oxide-coated bentonite in removal process of copper ions from aqueous solution. *Desalination*. 2010. V. 257. N 1–3. P. 163–169. DOI: 10.1016/j.desal.2010.02.028.
14. **Lesley J., Byung-Moon J., Flora J.R.V., Chang M., Yoon Y.P.** Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. *Chemosphere*. 2019. V. 229. P. 142–159. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.198.
15. **Marczenko Z.** Spectrophotometric Determination of the Elements. Ellis Horwood Series in Analytical Chemistry. New York: Wiley. 1976. 643 p.
16. **Цивадзе А.Ю., Русанов А.И., Фомкин А.А.** Физическая химия адсорбционных явлений. М.: Граница. 2011. 304 с.
17. **Филатова Е.Г., Матиенко О.И.** Исследование адсорбции ионов никеля(II) природными сорбентами. *Сорбц. и хроматограф. проц.* 2023. Т. 23. № 1. С. 116-128. DOI: 10.17308/sorpchrom.2023.23/10999.
18. **Асламова В.С., Шалунц Л.В., Асламов А.А., Грабельных В.А.** Компьютерное моделирование сорбции ионов тяжелых металлов серосодержащим модифицированным цеолитом. *Изв. вузов. Приклад. химия и биотехнология*. 2020. Т. 10. № 4. С. 564-572. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-4-564-572.
19. **Асламова В.С., Шалунц Л.В., Обуздина М.В., Грабельных В.А.** Моделирование процесса адсорбции в системе жидкость-твердое тело: регрессионный анализ извлечения меди из водных растворов цеолитом Холинского месторождения, модифицированным серосодержащим полимером. *Изв. вузов. Приклад. химия и биотехнология*. 2019. Т. 9. № 2. С. 351-359. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-2-351-359.
20. **Филатова Е.Г., Помазкина О.И., Пожидаев Ю.Н.** Адсорбция ионов никеля(II) и меди(II) модифицированными алюмосиликатами. *Защита металлов и физико-химия поверхностей*. 2017. Т. 53. № 6. С. 999-1004. DOI: 10.1134/S2070205117060259.
- zinc(II) and copper(II) ions from aqueous solutions and man-made formations. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 9. P. 6–19 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6884.
8. **Qin L., Feng L., Li C., Fan Z., Zhang G., Shen C., Meng Q.** Amination/oxidization dual-modification of waste ginkgo shells as bio-adsorbents for copper ion removal. *J. Clean. Prod.* 2019. V. 228. P. 112–123. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.249.
9. **Witek-Krowiak A., Szafran R.G., Modelski S.** Biosorption of heavy metals from aqueous solutions onto peanut shell as a low-cost biosorbent. *Desalination*. 2011. V. 265. N 1–3. P. 126–134. DOI: 10.1016/j.desal.2010.07.042.
10. **Singha B., Das S.K.** Adsorptive removal of Cu(II) from aqueous solution and industrial effluent using natural/agricultural wastes. *Colloid. Surf. B Biointerfaces*. 2013. V. 107. P. 97–106. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2013.01.060.
11. **Demcak S., Balintova M., Demcakova M., Zinicovskaia I., Yushin N., Frontasyeva M.V.** Using of wooden sawdust for copper removal from waters. *Nova Biotechnol. Chim.* 2019. V. 18. N 1. P. 66–71. DOI: 10.2478/nbec-2019-0009.
12. **Ferhat M., Kadouche S., Lounici H.** Immobilization of heavy metals by modified bentonite coupled coagulation/flocculation process in the presence of a biological flocculant. *Desalin. Water Treat.* 2016. V. 57. N 13. P. 6072–6080. DOI: 10.1080/19443994.2015.1012559.
13. **Eren E., Tabak A., Eren B.** Performance of magnesium oxide-coated bentonite in removal process of copper ions from aqueous solution. *Desalination*. 2010. V. 257. N 1–3. P. 163–169. DOI: 10.1016/j.desal.2010.02.028.
14. **Lesley J., Byung-Moon J., Flora J.R.V., Chang M., Yoon Y.P.** Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. *Chemosphere*. 2019. V. 229. P. 142–159. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.198.
15. **Marczenko Z.** Spectrophotometric Determination of the Elements. Ellis Horwood Series in Analytical Chemistry. New York: Wiley. 1976. 643 p.
16. **Tsivadze A.Yu., Rusanov A.I., Fomkin A.A.** Physical Chemistry of Adsorption Phenomena. М.: Granitsa. 2011. 304 p. (in Russian).
17. **Filatova E.G., Matienko O.I.** Investigation of the adsorption of nickel(II) ions by natural sorbents. *Sorbts. Khromatograf. Prots.* 2023. V. 23. N 1. P. 116-128 (in Russian). DOI: 10.17308/sorpchrom.2023.23/10999.
18. **Aslamova V.S., Shalunc L.V., Aslamov A.A., Grabelnykh V.A.** Computer simulation of the sorption of heavy metal ions by a sulphur-containing modified zeolite. *Izv. Vuzov. Prikl. Khim. Biotekhnol.* 2020. V. 10. N 4. P. 564–572 (in Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-4-564-572.
19. **Aslamova V.S., Shalunts L.V., Obuzdina M.V., Grabelnykh V.A.** Modelling the process of adsorption in the liquid-solid system: regression analysis of copper extraction from aqueous solutions by zeolite from the Kholinskoye deposit modified by a sulphur-containing polymer. *Izv. Vuzov. Prikl. Khim. Biotekhnol.* 2019. V. 9. N 2. P. 351–359 (in Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-2-351-359.
20. **Filatova E.G., Pomazkina O.I., Pozhidaev Yu.N.** Adsorption of nickel(II) and copper(II) ions by modified aluminosilicates. *Zashchita Metal. Fiz. Khim. Poverkh.* 2017. V. 53. N 6. P. 999–1004 (in Russian). DOI: 10.1134/S2070205117060259.

Поступила в редакцию (Received) 06.02.2025

Принята к опубликованию (Accepted) 26.09.2025