

УДК 628.316.12 : 544.723.21

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ОЧИСТКИ МОДЕЛЬНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ МЕДИ И НИКЕЛЯ ТЕРМООБРАБОТАННЫМ ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИМ МАТЕРИАЛОМ

© 2023 А.В. Святченко, Ж.А. Сапронова, С.В. Свергузова

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Статья поступила в редакцию 18.10.2023

Адсорбция известна как один из традиционных методов очистки сточных вод, который считается эффективным в отношении тяжелых металлов. В настоящее время растительные отходы часто исследуются в качестве сырья для получения недорогих сорбентов. В статье приводится анализ эффективности использования сорбционного материала, полученного термической модификацией целлюлозосодержащего отхода в отношении ионов меди и никеля. Установлено, что сорбция носит физический характер, максимальная сорбционная емкость по ионам  $\text{Cu}^{2+}$  составила 0,320 ммоль/г, по ионам  $\text{Ni}^{2+}$  0,342 ммоль/г. Обработка изотермы с использованием математических моделей Ленгмюра и Фрейндлиха указывает на явления многослойной адсорбции, на материале, имеющем различные активные сорбционные центры с неравнозначной энергией. *Ключевые слова:* растительные отходы, сорбенты, никель, медь, эффективность очистки.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-174-180

EDN: BDTBUR

*Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.*

Загрязнение экосистем тяжелыми металлами, главным образом поверхностных и подземных вод, в условиях быстрого роста населения планеты и индустриализации вызывает серьезную озабоченность на глобальном уровне. Наиболее значительными источниками тяжелых металлов в окружающей среде являются геологическое выветривание и промышленная деятельность, такая как выплавка металлосодержащих материалов, добыча и переработка полезных ископаемых (включая производство энергии и топлива), обработка поверхности металлосодержащих материалов (включая гальваническое покрытие), текстиль (включая производство красителей и пигментов), производство химикатов (включая удобрения и пестициды) и другие виды производства. Кроме того, к источникам выброса тяжелых металлов в воду относятся бытовые сточные воды, фильтрат свалок, сельскохозяйственные стоки. Отходы, содержащие металлы, прямо или косвенно выбрасываются в окружающую среду угрожающими темпами [1].

Поскольку тяжелые металлы не поддаются биологическому разложению, они, как правило, остаются в окружающей среде в течение дли-

тельного времени, накапливаясь в пищевых цепях, что может нанести вред окружающей среде и здоровью людей. Даже при очень низких уровнях тяжелые металлы и их соединения чрезвычайно токсичны, канцерогенны, мутагены и тератогенны. Люди подвергаются их воздействию при прямом прикосновении, вдыхании и приеме внутрь, что может вызывать мутации и генетические повреждения, а также нарушать работу центральной нервной системы и повышать риск развития рака [2].

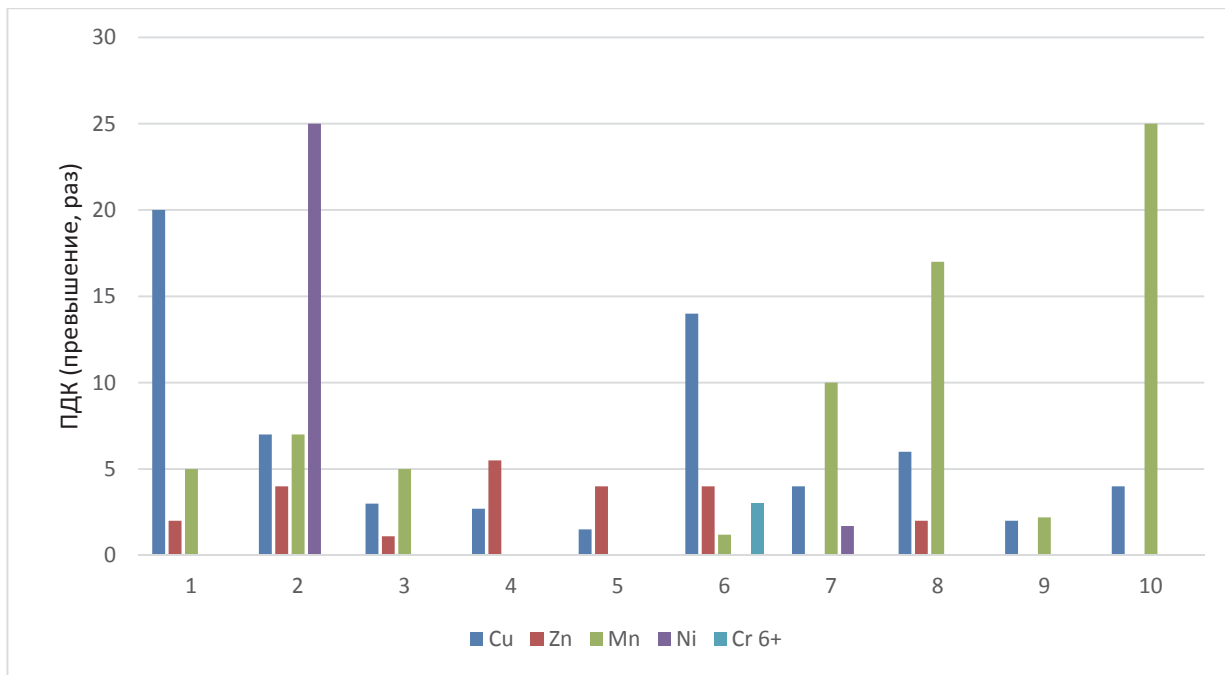
Наиболее распространенными тяжелыми металлами, образующимися в различных отраслях промышленности, являются цинк (Zn), свинец (Pb), хром (Cr), медь (Cu), никель (Ni), кадмий (Cd), мышьяк (As) и ртуть (Hg) [3].

На рис. 1. приведены статистические данные о присутствии тяжелых металлов, часто выступающих в роли загрязнителей воды в ряде рек Российской Федерации [4]

Исследователи считают адсорбцию перспективным методом удаления тяжелых металлов [5].

Адсорбция известна как один из традиционных методов очистки сточных вод, который является более жизнеспособным и выгодным по сравнению с другими методами. Простые условия эксплуатации, недорогое производство, широкий рабочий диапазон pH и особенно замечательная способность связывания металлов являются одними из преимуществ, в то время как образование твердых отходов и низкая селективность являются ограничениями. Атомы, ионы или молекулы (адсорбат) из любого источ-

*Святченко Анастасия Владимировна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленной экологии. E-mail: sv.anastasiaa@mail.ru*  
*Сапронова Жанна Ануаровна, доктор технических наук, и.о. зав. кафедрой промышленной экологии. E-mail: sapronova.2016@yandex.ru*  
*Свергузова Светлана Васильевна, доктор технических наук, профессор кафедры промышленной экологии. E-mail: pe@intbel.ru*



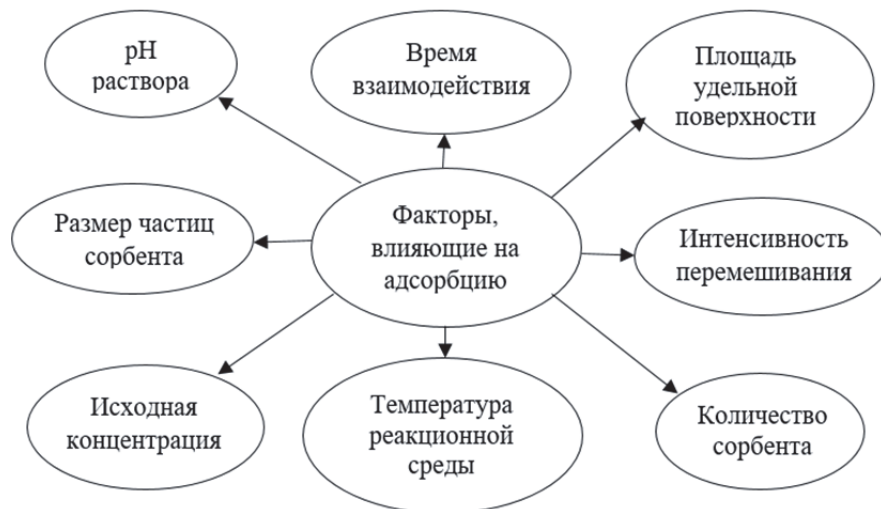
**Рис. 1.** Тяжелые металлы в водах рек:  
 1 – р. Охта, черта г. Санкт-Петербург, штук ПДК; 2 – р. Хауки-лампи-йоки, г. Заполярный;  
 3 – р. Северная Двина, г. Красавино; 4 – р. Волга, 5,5 км ниже Астрахани; 5 – р. Ока ниже г. Коломна;  
 6 – р. Чусова, 1,7. км ниже г. Первоуральска; 7 – р. Белая, 10,5 км ниже г. Стерлитамака;  
 8 – р. Обь ниже г. Салехард; 9 – р. Лена, г. Якутск; 10 – р. Колыма, пос. Усть-Среднекан

ника отходов, который может быть газом, жидкостью или растворенным твердым веществом, будут прилипать к активному центру адсорбента, образуя слой на поверхности адсорбента. Расположение молекул может быть многослойным или монослойным в зависимости от свойств адсорбента и адсорбата. Процесс адсорбции широко используется в промышленности, включая системы очистки воды, производство катализаторов, синтез смол и т. д. [6].

В дополнение к абсорбирующим характеристикам, таким как высокая концентрация углерода или кислорода, желательными качествами абсорбента являются большая площадь поверх-

ности с пористой структурой, превосходная стойкость к истиранию и термическая стабильность. Исходная концентрация тяжелого металла, pH раствора, период контакта и дозировка адсорбента являются факторами, влияющих на сорбционные взаимодействия и их эффективность (рисунок 2) [7].

«Зеленые» адсорбенты получают из нескольких источников, таких как сельскохозяйственные отходы, глинистые минералы, природные полимеры, биологические материалы и т. д. Различные растительные материалы и отходы были исследованы в качестве адсорбентов: рисовые и пшеничные отруби, хлопковая шелуха, скорлупа



**Рис. 2.** Ключевые факторы, оказывающие влияние на процесс адсорбции

желудей, кукурузные початки, кожура манго и т. д. Преимущества их использования заключаются в том, что они экономичны и легко доступны.

Большинство изученных до сих пор биосорбентов не тестировались в полномасштабных системах, что затрудняет оценку их заявленной эффективности на уровне конечного пользователя [1,8].

В последнее время появилось много сообщений об использовании термообработанных растительных материалов для удаления тяжелых металлов. Биоуголь получают нагреванием биомассы в условиях низкого содержания кислорода или даже его отсутствия. Благодаря своей высокой ароматичности он считается эффективным абсорбентом как органических, так и неорганических загрязнителей [9].

Адсорбенты из отходов сельскохозяйственного производства могут быть получены методом пиролиза. Синтез высокопористых адсорбентов из сельскохозяйственных отходов может осуществляться с помощью различных методов пиролиза, таких как каталитический пиролиз, активационный пиролиз, быстрый пиролиз, копирилиз и паровой пиролиз. Биоуголь является эффективным адсорбентом для удаления ионов металлов благодаря его высокой удельной поверхности, пористой структуре и ионному обмену [8].

В работе [10] активированный уголь, полученный из растительных остатков макадамии, использовался для удаления отдельных тяжелых металлов из проб сточных вод. Выбранные тяжелые металлы включают Pb (II), Fe (III), Cd (II) и Zn (II). Используемый в работе активированный уголь был модифицирован  $KMnO_4$  и  $HNO_3$  для увеличения содержания кислородсодержащих функциональных групп на поверхности адсорбента. Адсорбенты как с немодифицированным активированным углем, так и с модифицированным активированным углем использовались на протяжении всего исследования для сравнительных целей в мультиметаллической системе. Общая эффективность удаления была зарегистрирована на уровне 87,39 % для модифицированного активированного угля.

Биоадсорбенты на основе рисовой соломы использовались для удаления тяжелых металлов из сточных вод. Модифицированные адсорбенты показали превосходную эффективность удаления по сравнению с адсорбентом на основе сырой рисовой соломы. Среди всех испытанных модифицированных адсорбентов из рисовой соломы материал на основе биоугля продемонстрировал лучший процент удаления по сравнению с другими [11].

**Цель работы:** провести анализ эффективности использования сорбционного материала, полученного термической модификацией целлюлозосодержащего отхода в отношении таких тяжелых металлов, как медь и никель.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований являлись листья *Aësculus hippocastanum* L. Термообработку измельченного материала осуществляли при температуре 400 °С в муфельной печи Loip LF-7/13-G2 (Россия) в течение 20 мин.

В эксперименте использовали модельные медь-, никель- и цинксодержащие растворы.

Очистку модельных растворов проводили в статическом одноступенчатом режиме. Длительность контакта 20 мин с модельными растворами составляла 20 мин, объем модельных растворов, взятых для очистки, составлял 100 мл, температура 25 °С.

Концентрацию ионов  $Ni^{2+}$  в растворах до и после очистки определяли фотоколориметрическим методом с диметилглиоксимом при длине волны 445 нм по методике РД 52.24.494-2006. Содержание ионов  $Cu^{2+}$  в модельных сточных водах анализировалось по ПНД Ф 14.1:2:4.48-96 «Методика измерений массовой концентрации ионов меди в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с диэтилдитиокарбаматом свинца».

Для построения изотерм адсорбции ионов  $Cu^{2+}$  и  $Ni^{2+}$  нативным и обожженным при температуре 400 °С ЛК использовались растворы, содержащие ионы меди и никеля в концентрациях 0,78 ммоль/дм<sup>3</sup>; к объему модельного раствора добавляли 1; 2; 3; 6; 9; 12 г/дм<sup>3</sup> сорбционного материала ЛКт. Содержимое реакционной колбы вместимостью 250 см<sup>3</sup> встряхивались при постоянной температуре 20 С° для достижения динамического равновесия в течение 120 мин. Затем сорбционный материал отфильтровывали, а остаточный раствор анализировали. Все эксперименты имели трехкратную повторяемость.

По полученным значениям, начальных и конечных концентраций ионов  $Cu^{2+}$  и  $Ni^{2+}$  в растворе определялась сорбционная емкость материала ЛКт по формуле:

$$A = \frac{(c_n - c_p) \cdot 100}{m \cdot 1000},$$

где  $C_n$  – начальная концентрация, ммоль/дм<sup>3</sup>;  $C_p$  – конечная концентрация, ммоль/дм<sup>3</sup>;  $m$  – масса адсорбента, г.

По полученным значениям сорбционной емкости (А) материала ЛКт и равновесным концентрациям ионов  $Cu^{2+}$  и  $Ni^{2+}$  строились изотермы адсорбции.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Изотермы адсорбции представляют собой равновесные соотношения между концентрациями адсорбированного металла и металла в растворе при данной температуре. Они позво-

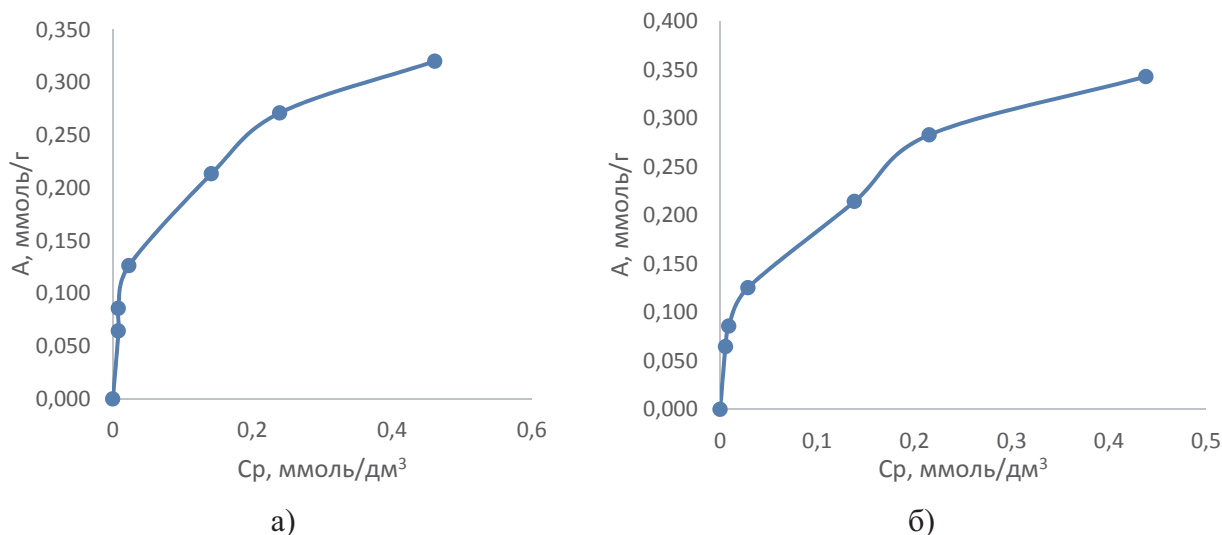


Рис. 3. Изотермы адсорбции ионов металлов материалом ЛК:  
а)  $\text{Cu}^{2+}$ ; б)  $\text{Ni}^{2+}$

ляют получить данные о процессах, протекающих при извлечении ионов тяжелых металлов на границе «жидкость-твёрдое тело». Форма кривой даёт представление о структуре сорбента, а применение математических моделей позволяет узнать, каким образом молекулы сорбата располагаются на его поверхности. Изотермы адсорбции ионов меди и никеля отображены на рисунке 3.

Полученные кривые можно отнести к изотермам I типа согласно классификации Международного союза теоретической и прикладной химии (IUPAC). Такой тип изотерм указывает на наличие микропор в сорбционном материале [12]. Величина сорбционной емкости для материала ЛК<sub>400</sub> по ионам  $\text{Cu}^{2+}$  составила 0,320 ммоль/г, для никеля 0,342 ммоль/г.

За последние несколько десятилетий были разработаны различные математические модели изотерм адсорбции, чтобы обобщить отношения термодинамического равновесия между адсорбатом и адсорбентом при постоянных

температурах. Результаты обработки изотерм согласно математическим моделям Ленгмюра и Фрейндлиха представлены на рисунках 4-5 и в таблице 1.

Изотерма Ленгмюра представляет собой эмпирическую модель, в которой адсорбция происходит на идентичных и эквивалентных определенных локализованных участках с толщиной адсорбированного слоя в одну молекулу. В 1916 г. Ленгмюр предложил эту концепцию для описания газо-твёрдофазной адсорбции при следующих допущениях: (I) монослойная адсорбция; (II) равномерная адсорбционная сила на поверхности гомогенного адсорбента; и (III) отсутствие стерических затруднений или латерального взаимодействия между адсорбированными молекулами даже на соседних участках. Позже его стали применять к жидким системам, просто заменив парциальное давление адсорбата его эквивалентным значением концентрации. Когда монослой адсорбированного материала адсорбируется на однородной поверхности

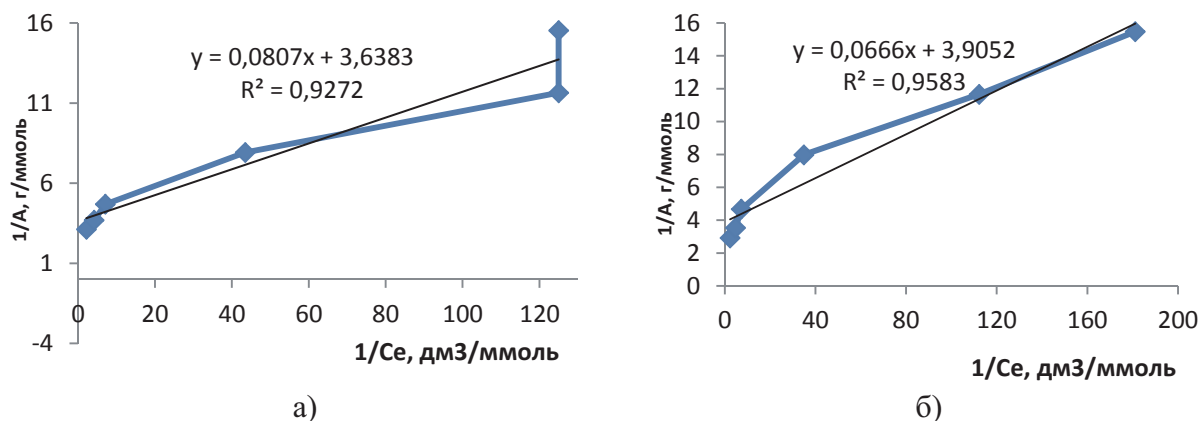


Рис. 4. Изотермы Ленгмюра для:  
а)  $\text{Cu}^{2+}$ ; б)  $\text{Ni}^{2+}$  м адсорбции

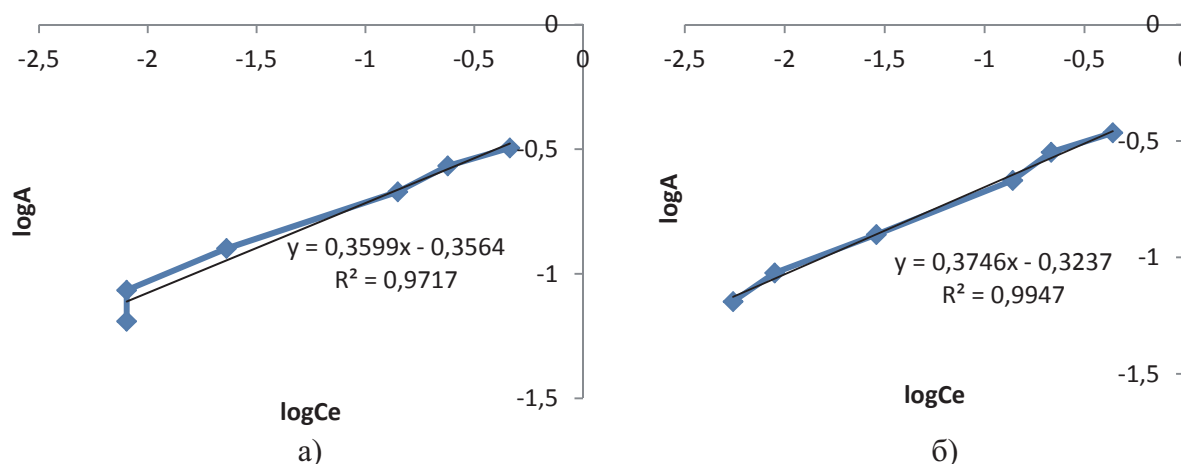


Рис. 5. Изотермы Фрейндлиха для: а)  $\text{Cu}^{2+}$ ; б)  $\text{Ni}^{2+}$

Таблица 1. Результаты обработки изотерм адсорбции

Модель	Уравнение	R <sup>2</sup>	Коэффициенты
Для ионов меди			
Ленгмюра	$y = 0,0807x + 3,6383$	0,9272	$K_L = 45,08$
Фрейндлиха	$y = 0,3599x - 0,3564$	0,9717	$KF = 0,44; n = 2,78$
Для ионов никеля			
Ленгмюра	$y = 0,0666x + 3,9052$	0,9583	$K_L = 58,64$
Фрейндлиха	$y = 0,3746x - 0,3237$	0,9947	$KF = 0,47; n = 2,67$

адсорбента, константа равновесия определяет распределение соединений между двумя фазами. Следовательно, скорости адсорбции и десорбции в равновесии равны.

Модель Фрейндлиха предполагает, что адсорбент имеет неоднородную поверхность, состоящую из нескольких типов адсорбционных центров, действующих одновременно, каждый с различной свободной энергией сорбции. Согласно этой точке зрения, адсорбированное количество вещества представляет собой сумму адсорбции на всех центрах до тех пор, пока энергия адсорбции не уменьшится экспоненциально в конце процесса адсорбции. Модель Фрейндлиха, в отличие от модели изотермы Ленгмюра, не ограничивается однослойной адсорбцией и может также применяться к многослойной адсорбции [13-16].

По коэффициентам аппроксимации уравнений, представленных в таблице 1 можно заключить, что сорбционные взаимодействия на поверхности материала  $\text{LK}_{400}$  лучше всего описывается моделью Фрейндлиха. Таким образом, при взаимодействии ионов металлов с поверхностью сорбента имеет место многослойная адсорбция, материал  $\text{LK}_{400}$  имеет неоднородную поверхность с различными типами активных центров. Значение коэффициента  $n$  в случае обоих металлов находится в диапазоне от 1 до 10, что указывает на физическую адсорбцию [17].

## ВЫВОДЫ

Целлюлозосодержащий листовый материал является экологически безопасным, экономичным и доступным на местном уровне адсорбентом для адсорбции ионов металлов из сточных вод. Адсорбция является поверхностным явлением, когда молекулы адсорбата занимают определенные места на адсорбенте, т.е. активные центры.

Построенные по экспериментальным данным изотермы по классификации Международного союза теоретической и прикладной химии можно отнести к I типу, что указывает на наличие микропор в  $\text{LK}_{400}$ .

Максимальная сорбционная емкость по ионам  $\text{Cu}^{2+}$  составила 0,320 ммоль/г, по ионам  $\text{Ni}^{2+}$  0,342 ммоль/г. Обработка изотермы с использованием моделей Ленгмюра и Фрейндлиха указывает на явления многослойной адсорбции, на материале, имеющем различные активные сорбционные центры с неравнозначной энергией адсорбции. Сорбция ионов металлов в проведенном исследовании носит физический характер.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sequestration of heavy metal ions from multi-metal simulated wastewater systems using processed agricultural biomass / M. Bansal, R. Garg b, V.K. Garg,

- R. Garg, D. Singh // *Chemosphere*. 2022. No. 296 (133966) - 10 p.
2. Priya A.K., Jalil A.A., Vadivel S. Heavy metal remediation from wastewater using microalgae: Recent advances and future trends // *Chemosphere*. 2022. No. 305 (135375) – 11 p.
  3. A critical and recent developments on adsorption technique for removal of heavy metals from wastewater-A review / S. Rajendran, A. K. Priya, P. S. Kumar, T. K. A. Hoang, K. Sekar, K. Y. Chong, K. Sh. Khoo, H. Suan Ng, P. L. Show // *Chemosphere*. 2022. No. 303 (135146) – 14p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135146
  4. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. 684 с.
  5. Heavy metal-contained wastewater in China: Discharge, management and treatment / Q.-G. Li, G.-H. Liu, L. Qi, H.-Ch. Wang, Z.-F. Ye, Q.-L. Zhao // *Science of the Total Environment*. 2022. No. 808 (152091) – 15 p. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152091
  6. Copper modified activated bamboo charcoal to enhance adsorption of heavy metals from industrial wastewater / R. Thotagamuge, M.R.R Kooh, A. H. Mahadi, Ch.M. Lim // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2021. No. 16(5) (100562) – 9 p. 10.1016/j.enmm.2021.100562
  7. Topare N. S., Wadgaonkar V. S. A review on application of low-cost adsorbents for heavy metals removal from wastewater // *Materials Today: Proceedings*. 2011. No. 9. - 11 p.
  8. Green adsorbents for the removal of heavy metals from Wastewater: A review / A. K. Thakur, R. Singh, R.T. Pulella, V. Pundir // *Materials Today: Proceedings*. 2022. No. 57. P. 1468–1472
  9. Roy A., Bharadvaja N. Efficient removal of heavy metals from artificial wastewater using biochar // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2021. No. 16 (100602) – 5 p.
  10. Chimanlal I., Lesaoana M., Richards H. Chemical modification of Macadamia-derived activated carbon for remediation of selected heavy metals from wastewater // *Minerals Engineering*. 2022. No. 184 (107663) – 14 p.
  11. Preparation of modified rice straw-based bio-adsorbents for the improved removal of heavy metals from wastewater / P. Bhadoria, M. Shrivastava, A. Khandelwal, R. Das, S. Langyan, B. Rohatgi, R. Singh // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2022. No. 29 (2) (100742) – 12 p. DOI:10.1016/j.scp.2022.100742
  12. Reporting physisorption data for gas/solid system / W. Sing K. S., D. H. Everett, R. A. W. Haul, L. Moscou, R. A. Pierotti, J. Rouquerol, T. Siemieniowska // *Pure & App. Chem*. 1985. Vol. 57, No. 4. P. 603–619.
  13. Campbell L.S., Davies B.E. Soil sorption of caesium modelled by the Langmuir and Freundlich isotherm equations // *Applied Geochemistry*. 1995. Vol. 10. P. 715-723.
  14. Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review / X. Chen, M. F. Hossain, Ch. Duan, J. Lu, Y. F. Tsang, M. S. Islam, Y. Zhou // *Chemosphere*. 2022. No 307 (135545) – 14 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135545.
  15. Святченко, А.В. Целлюлозосодержащий сорбент для очистки сточных вод от нефти и ионов меди / А.В. Святченко, Ж.А. Сапронова, С.В. Свергузова, Р.Н. Ястребинский // *Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина*. 2021. № 2 (303). С. 106-119.
  16. Святченко, А.В. Адсорбция ионов никеля термомодифицированным листовым каштановым опадом / А.В. Святченко, Ж.А. Сапронова, А.В. Четвериков // *Chemical Bulletin*. – 2021. – Т. 4. – № 4. – С. 48-59.
  17. Desta M.B. Batch Sorption Experiments: Langmuir and Freundlich Isotherm Studies for the Adsorption of Textile Metal Ions onto Teff Straw (*Eragrostis tef*) Agricultural Waste // *Journal of Thermodynamics*. 2013. No. 1 – 6 p. DOI:10.1155/2013/375830.

#### ANALYSIS OF THE FEATURES OF MODEL WATERS PURIFICATION FROM COPPER AND NICKEL IONS BY HEAT-TREATED CELLULOSE-CONTAINING MATERIAL

© 2023 A.V. Svyatchenko, Zh.A. Saproнова, S.V. Sverguzova

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russia

Adsorption is known as one of the traditional wastewater treatment methods, which is considered effective against heavy metals. At present, plant wastes are often studied as a raw material for inexpensive sorbents obtaining. The article analyzes the effectiveness of a sorption material use obtained by cellulose-containing waste thermal modification in relation to copper and nickel ions. It was established that sorption has a physical character, the maximum sorption capacity for Cu<sup>2+</sup> ions was 0.320 mmol/g, for Ni<sup>2+</sup> ions 0.342 mmol/g. The processing of the isotherm using the mathematical models of Langmuir and Freundlich indicates the phenomena of multilayer adsorption on a material that has various active sorption centers with unequal energies.

*Key words:* plant waste, sorbents, nickel, copper, purification efficiency

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-174-180

EDN: BDTBUR

## REFERENCES

1. Sequestration of heavy metal ions from multi-metal simulated wastewater systems using processed agricultural biomass / *M. Bansal, R. Garg b, V.K. Garg, R. Garg, D. Singh* // *Chemosphere*. 2022. No. 296 (133966) - 10 p.
2. *Priya A.K., Jalil A.A., Vadivel S.* Heavy metal remediation from wastewater using microalgae: Recent advances and future trends // *Chemosphere*. 2022. No. 305 (135375) – 11 p.
3. A critical and recent developments on adsorption technique for removal of heavy metals from wastewater-A review / *S. Rajendran, A. K. Priya, P. S. Kumar, T. K. A. Hoang, K. Sekar, K. Y. Chong , K. Sh. Khoo, H. Suan Ng, P. L. Show* // *Chemosphere*. 2022. No. 303 (135146) – 14p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135146
4. O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj Federacii v 2021 godu. Gosudarstvennyj doklad. — M.: Minprirody Rossii; MGU imeni M.V. Lomonosova, 2022. 684 s.
5. Heavy metal-contained wastewater in China: Discharge, management and treatment / *Q.-G. Li, G.-H. Liu, L. Qi, H.-Ch. Wang, Z.-F. Ye, Q.-L. Zhao* // *Science of the Total Environment*. 2022. No. 808 (152091) – 15 p. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152091
6. Copper modified activated bamboo charcoal to enhance adsorption of heavy metals from industrial wastewater / *R. Thotagamuge, M.R.R. Kooh, A. H. Mahadi, Ch.M. Lim* // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2021. No. 16(5) (100562) – 9 p. 10.1016/j.enmm.2021.100562
7. *Topare N. S., Wadgaonkar V. S.* A review on application of low-cost adsorbents for heavy metals removal from wastewater // *Materials Today: Proceedings*. 2011. No. 9. - 11 p.
8. Green adsorbents for the removal of heavy metals from Wastewater: A review / *A. K. Thakur, R. Singh, R.T. Pallela, V. Pundir* // *Materials Today: Proceedings*. 2022. No. 57. P. 1468–1472
9. *Roy A., Bharadvaja N.* Efficient removal of heavy metals from artificial wastewater using biochar // *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2021. No. 16 (100602) – 5 p.
10. *Chimanlal I., Lesaoana M., Richards H.* Chemical modification of Macadamia-derived activated carbon for remediation of selected heavy metals from wastewater // *Minerals Engineering*. 2022. No. 184 (107663) – 14 p.
11. Preparation of modified rice straw-based bio-adsorbents for the improved removal of heavy metals from wastewater / *P. Bhadoria, M. Shrivastava, A. Khandelwal, R. Das, S. Langyan, B. Rohatgi, R. Singh* // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2022. No. 29 (2) (100742) – 12 p. DOI:10.1016/j.scp.2022.100742
12. Reporting physisorption data for gas/solid system / *W. Sing K. S., D. H. Everett, R. A. W. Haul, L. Moscou, R. A. Pierotti, J. Rouquerol, T. Siemieniowska* // *Pure & App. Chem*. 1985. Vol. 57, No. 4. P. 603–619.
13. *Campbell L.S., Davies B.E.* Soil sorption of caesium modelled by the Langmuir and Freundlich isotherm equations // *Applied Geochemistry*. 1995. Vol. 10. P. 715-723.
14. Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review / *X. Chen, M. F. Hossain, Ch. Duan, J. Lu, Y. F. Tsang, M. S. Islam, Y. Zhou* // *Chemosphere*. 2022. No 307 (135545) – 14 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135545.
15. *Svyatchenko, A.V.* Cellyulozoderzhashchij sorbent dlya ochistki stochnyh vod ot nefti i ionov medi / *A.V. Svyatchenko, Zh.A. Sapronova, S.V. Sverguzova, R.N. YAstrebinskij* // *Trudy Rossijskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I.M. Gubkina*. 2021. № 2 (303). S. 106-119.
16. *Svyatchenko, A.V.* Adsorbciya ionov nikelya termomodificirovannym listovym kashtanovym opadom / *A.V. Svyatchenko, Zh.A. Sapronova, A.V. CHetverikov* // *Chemical Bulletin*. – 2021. – T. 4. – № 4. – S. 48-59.
17. *Desta M.B.* Batch Sorption Experiments: Langmuir and Freundlich Isotherm Studies for the Adsorption of Textile Metal Ions onto Teff Straw (*Eragrostis tef*) Agricultural Waste // *Journal of Thermodynamics*. 2013. No. 1 – 6 p. DOI:10.1155/2013/375830.

*Anastasia Svyatchenko, Candidate of Technics, Senior Lecturer. E-mail: sv.anastasiaa@mail.ru*

*Zhanna Sapronova, Doctor of Sciences in Technology, Head at the Industrial Ecology Department.*

*E-mail: sapronova.2016@yandex.ru*

*Svetlana Sverguzova, Doctor of Sciences in Technology, Professor at the Industrial Ecology Department.*

*E-mail: pe@intbel.ru*