



IV ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.58.66.009

УДК 544.723.21:628.316.12

© О.В. Салищева, Е.Н. Неверов, 2022

О.В. САЛИЩЕВА

д-р хим. наук, доцент
доцент кафедры
КемГУ, г. Кемерово
e-mail: salishchevaov@mail.ru

Е.Н. НЕВЕРОВ

д-р техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой
КемГУ, г. Кемерово
e-mail: neverov42@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В КАЧЕСТВЕ АДСОРБЕНТОВ

Несмотря на различные технологические достижения, проблеме очистки сточных вод от тяжелых металлов уделяется особое внимание ученых во всем мире, поскольку загрязнение воды и почвы несет серьезную угрозу для экосистемы и здоровья человека. Адсорбционный способ с применением сырьевых отходов в качестве сорбентов широко используется в области очистки сточных вод. Получены кинетические и равновесные данные по адсорбции ионов тяжелых металлов железа (III), кобальта (III), меди (II), никеля (II) различными природными материалами: перегородкой грецкого ореха, шелухой кедровой шишки, кожурой граната. Было показано, что отходы от переработки растительного углеродсодержащего сырья являются перспективным ресурсом для производства дешевых адсорбционных материалов, применяемых для извлечения различных тяжелых металлов, содержащихся в синтетических сточных водах. Экспериментальные данные хорошо описываются моделями адсорбции Фрейндлиха и Ленгмюра.

Ключевые слова: АДСОРБЦИЯ, ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ, АДСОРБЕНТ, СТОЧНЫЕ ВОДЫ, ВРЕМЯ КОНТАКТА, МОДЕЛИ ФРЕЙНДЛИХА И ЛЕНГМЮРА.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение воды тяжелыми металлами — глобальная проблема. Высокая растворимость соединений металлов-токсикантов в воде, способность образовывать прочные

химические связи с белковыми веществами превращают соединения тяжелых металлов в потенциальную угрозу для здоровья человека, а также для флоры и фауны [1]. Дополнительное воздействие магнитных полей, ультразвуку-

ка и прочих факторов усиливают диффузию, растворение и химическое взаимодействие тяжелых металлов в биосистемах [2]. Несмотря на различные технологические достижения и прорывы, проблеме очистки сточных вод уделяется особое внимание ученых во всем мире [3].

Известные методы, используемые для удаления тяжелых металлов из воды, должны характеризоваться специфичностью и эффективностью, для чего требуется знать механизм процесса как связывания, так и извлечения. Для удаления ионов-токсикантов из водного раствора применяют различные технологии, включая мембранную фильтрацию: осмос, коагуляцию, электрохимические методы, адсорбцию, био- и фотодеграцию, флокуляцию и др.

Среди различных методов удаления металлов-токсикантов адсорбция считается наиболее предпочтительным методом из-за простоты эксплуатации адсорбционных установок, высокой эффективности, рентабельности, легкой регенерации и возможности повторного использования адсорбента [4, 5]. Адсорбционная очистка эффективно применяется в качестве доочистки воды после использования реагентов-осадителей.

Несомненно, главную роль в адсорбции играют активные угли, полученные путем переработки биомассы растений и органических отходов [6]. Их используют в разных отраслях промышленности, в том числе для очистки сточных вод из-за значительной адсорбционной способности по отношению к ионам тяжелых металлов. Преимущества активных углей: большая площадь поверхности, высокая пористость, возможность модификации поверхности путем внедрения подходящих поверхностных функциональных групп, возможность регенерации. Большое число работ посвящено изучению модификации активированного угля с использованием физических, химических, органических и неорганических методов обработки для улучшения адсорбционных характеристик [7]. Не следует забывать, что каждый из полученных адсорбентов должен показывать большую площадь

поверхности, большую механическую прочность и высокую химическую инертность. Исследование различных новых материалов либо модификация уже изученных адсорбентов показывают высокую эффективность в удалении ионов тяжелых металлов.

В качестве сорбентов можно использовать природные пористые углеродосодержащие материалы: как промышленные отходы, так и модифицированное дешевое углеродное сырье. Используют для этих целей золу, кокосовую мелочь, торф, активированный уголь, активную глину, био- и фитосорбенты, сельскохозяйственные отходы (рис, ячмень, пшеничная шелуха, ореховая скорлупа, жмых и др.) [8–11].

Авторами работы [4] приведен сравнительный анализ некоторых адсорбентов со специфическим сходством к ионам тяжелых металлов. Это ковалентные органические каркасы, многослойные углеродные нанотрубки, цеолиты, хитозаны, графен. Все они широко используются в водоочистных системах. Однако каждый адсорбционный материал имеет различные недостатки, такие как низкая степень очистки, невозможность повторного использования и небиоразлагаемость, трудность отделения от среды. Следовательно, все еще актуальной является задача по разработке новых доступных и дешевых пористых адсорбирующих материалов для улучшения способности поглощения ионов металлов из водного раствора.

Увеличение спроса на адсорбенты доказывает широкое использование адсорбционного метода очистки во всех отраслях промышленности, в технологии пищевых производств, при подготовке воды для различных целей, включая водоподготовку для бытовых нужд. «Широкий ассортимент по составу, происхождению и качеству доказывает сложность подбора адсорбента, но в то же время позволяет производить его индивидуальный подбор в зависимости от возможностей предприятия в плане регенерации или утилизации отработанного сорбента» [12].

В работе [13] проведено сравнение адсорбции тяжелых металлов Cu, Co, Ni и Pb с

использованием природной глины в качестве потенциального адсорбента для очистки синтетических сточных вод. Природная глина была охарактеризована и идентифицирована с помощью анализа дифракции рентгеновских лучей. Установлены факторы, влияющие на процесс очистки: масса адсорбента, время адсорбции, pH раствора, начальное содержание ионов. Оптимальное время контакта, необходимое для полной очистки исследованных тяжелых металлов, составило от 80 до 90 минут. Более полному извлечению способствовало подщелачивание растворов до pH около 9. Экспериментальные данные хорошо описываются моделями Фрейндлиха и Ленгмюра. Полнота извлечения тяжелых металлов, Cu, Co, Ni и Pb с использованием изученной природной глины составила 86, 85,5, 84 и 85 % соответственно.

В качестве биосорбента для удаления ионов тяжелых металлов Cr, Pb, Zn, присутствующих в водных растворах, в работе [14] рассмотрена возможность применения рисовой шелухи. Биосорбент был приготовлен из порошка рисовой шелухи с последующей модификацией раствором HCl для внедрения функциональных групп и увеличения удельной поверхности. Максимальная эффективность процесса очистки достигается при pH 6,0 и продолжительностью контакта 60 минут. Ионы металлов Cr, Pb и Zn с использованием порошка рисовой шелухи удаляются до 87,12 %, 88,63 % и 99,28 % соответственно. Таким образом, порошок рисовой шелухи можно рассматривать как недорогой адсорбент для очистки сточных вод от тяжелых металлов.

В работе [12] изучена адсорбционная емкость верхового торфа и древесных опилок. Эффективность адсорбционной очистки воды от ионов хрома (VI) с применением торфа составила 90 %, от ионов железа (III) — 98 % при продолжительности процесса 20 минут. Время наступления адсорбционного равновесия в случае применения древесных опилок составило 40–60 минут, степень очистки составила 80 %.

В исследовании [15] для повышения эффективности процесса адсорбционной очист-

ки была проведена модификация мезопористых кремнеземов с помощью декстринов. Большая степень связывания металлов была достигнута за счет наличия гидроксильных групп и проявления хелатирующего эффекта.

Исследован механизм связывания ионов металлов с пектиновыми веществами дикорастущих ягодных кустарников Сибири [16], гибридными и композиционными материалами на основе пектина [17]. Удаление ионов тяжелых металлов происходит в основном за счет поверхностной координации многочисленными карбоксильными и гидроксильными функциональными группами.

В исследовании [18] представлены данные по применению технологии ремедиации почвы, подверженной загрязнению тяжелыми металлами — это территории вблизи угольных шахт и углетранспортных линий с использованием сорбентов из экологически чистых природных материалов в качестве иммобилизаторов токсичных элементов и соединений.

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель настоящей работы заключалась в исследовании адсорбционной способности природных материалов по отношению к ионам металлов. В задачи исследования входили: изучение возможности извлечения из водных растворов катионов тяжелых металлов с помощью природных адсорбентов (перегородок грецкого ореха, шелухи и жмыха кедровой шишки, кожуры граната); увеличение адсорбционной способности природного сырья по отношению к ионам тяжелых металлов за счет термической модификации материалов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили: перегородки грецкого ореха, шелуха кедровой шишки, кожура граната, растворы солей металлов Fe (III), Co (III), Cu (II), Ni (II).

Природные материалы измельчали в ступке, промывали горячей водой, высушивали в печи при 100–110 °C до постоянной массы.

Модельные растворы исследуемых солей были приготовлены объемно-весовым ме-

тодом. Калибровочные растворы известной концентрации солей металлов готовили последовательным разбавлением. Температура растворов при анализе составляла 20 ± 2 °С.

Методы исследования: для определения равновесной концентрации ионов металлов в модельных растворах использовали метод спектрофотометрии в видимой области. Предварительно проводили калибровку по стандартным растворам солей известной концентрации. Концентрацию соли в исследуемом растворе определяли с помощью калибровочной прямой.

Измерение коэффициента инстинкции растворов проводили с использованием спектрофотокориметра КФК-3-ЗОМ при длине волны, соответствующей максимальному светопоглощению для исследуемого раствора, при толщине светопропускающего слоя 1 см относительно контрольного раствора. В качестве контрольного раствора брали фильтрат, полученный после контакта воды с адсорбентом в отсутствие солей ионов металлов.

Изучение адсорбции ионов тяжелых металлов на исследуемых адсорбентах основано на определении концентрации раствора до контакта с адсорбентом (C_0) и после наступления адсорбционного равновесия ($C_{\text{равн}}$). Количество адсорбированного вещества рассчитывали по разности концентрации иона металла в растворе до и после адсорбции, учитывая объём раствора (V), из которого идёт адсорбция [19]. Величину удельной адсорбционной емкости (A) выражали через количество вещества, адсорбированного единицей массы сорбента (m):

$$A = \frac{n}{m} = \frac{(C_0 - C_{\text{равн}}) \cdot V}{m}$$

Адсорбционные процессы были исследованы в статических условиях, в результате были получены кинетические кривые адсорбции и изотермы адсорбции в области изученных концентраций.

Эффективность очистки рассчитывали как отношение разности концентраций ионов металла в растворе до и после адсорбции к исходному содержанию иона металла.

Модифицированные образцы адсорбционных материалов получали путем спекания исходных материалов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Постоянству концентраций ионов тяжелых металлов в растворе соответствует время установления адсорбционного равновесия, которое составило около 45 минут. На рис. 1 приведены кинетические кривые по адсорбции ионов кобальта (III) различными видами природных адсорбционных материалов. Следует отметить, что в случае разбавления модельных растворов время наступления адсорбционного равновесия уменьшается. Так, при концентрации соли кобальта, равной $0,02$ моль/дм³, постоянная концентрация в растворе ионов Co^{3+} при извлечении на шелухе кедровой шишки установилась через 40 минут. При концентрации соли кобальта, равной $0,002$ моль/дм³, равновесное состояние было достигнуто через 20 минут.

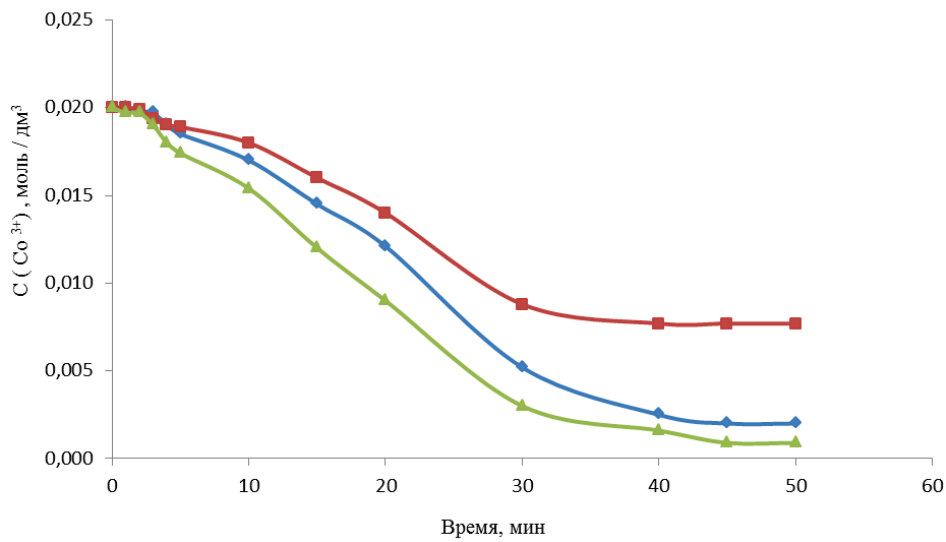


Рис. 1. Кинетические кривые адсорбции ионов кобальта:
■ — шелуха кедровой шишки, ◆ — перегородки грецкого ореха, ▲ — кожура граната

Результаты исследований выявили высокую адсорбционную способность отходов кедровой шишки и грецкого ореха по отношению к ионам кобальта и железа.

Путем изменения свойств поверхности исходного сырья можно увеличить адсорбционную емкость природных материалов. Применяя физическую или химическую модификацию, адсорбционная способность растет за счет создания дополнительных активных центров адсорбции или за счет введения функциональных групп, способных к ион-координа-

ционному взаимодействию с ионами тяжелых металлов.

Степень очистки модельных водных растворов повысилась на 20–60 % в результате физической модификации путем спекания исследуемого сырья (табл. 1). При проведении декарбонизации углерод, находящийся в исходном сырье, частично выгорает, при этом формируется более развитая пористая структура образующегося модифицированного материала.

Таблица 1

Эффективность извлечения ионов металлов

Материал для адсорбции	Степень извлечения ионов, %			
	Fe ³⁺	Co ³⁺	Ni ²⁺	Cu ²⁺
Перегородки ореха грецкого	64	54	78	74
Перегородки ореха грецкого после спекания	100	100	100	100
Шелуха шишки кедровой	84	79	76	72
Шелуха шишки кедровой после спекания	100	100	100	100
Кожура граната	46	38	35	32
Кожура граната после спекания	66	53	98	96

Результаты адсорбции катионов железа, кобальта, никеля и меди на отходах кедровой шишки приведены на рис. 2. Среди исследованных катионов наилучшую адсорбционную

способность показала шелуха кедровой шишки по отношению к ионам железа. Наименьшую связывающую способность проявили отходы граната.

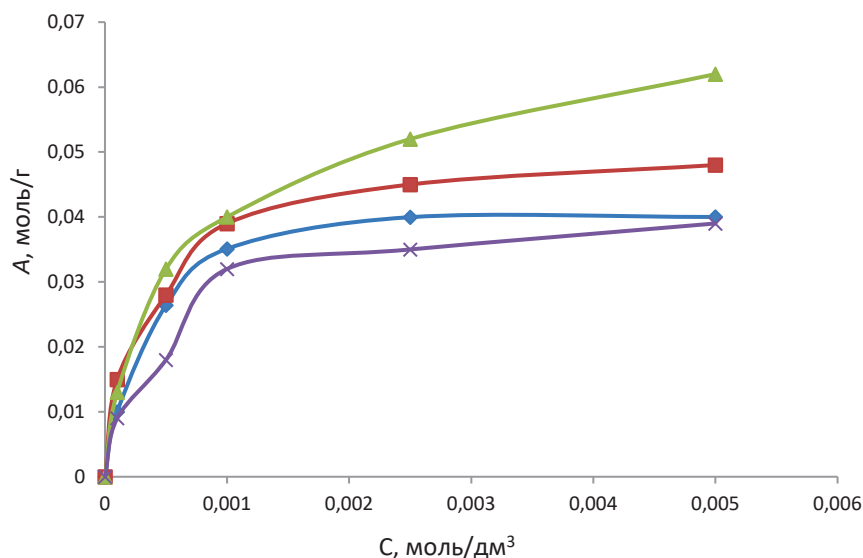


Рис. 2. Изотерма адсорбции ионов металлов на шелухе кедровой шишки:
 —▲— Fe³⁺, —■— Co³⁺, —◆— Ni²⁺, —×— Cu²⁺

Полученные равновесные кривые для разбавленных растворов солей хорошо описываются классическими моделями Фрейндлиха и Ленгмюра. На рис. 3 представлены изотермы адсорбции, построенные в координатах линейной зависимости уравнения Ленгмюра, с указанием линейного уравнения и коэффици-

циента достоверности (R²).

На рис. 4 представлены изотермы адсорбции, построенные в координатах линейной зависимости уравнения Фрейндлиха, с указанием линейного уравнения и коэффициента достоверности (R²).

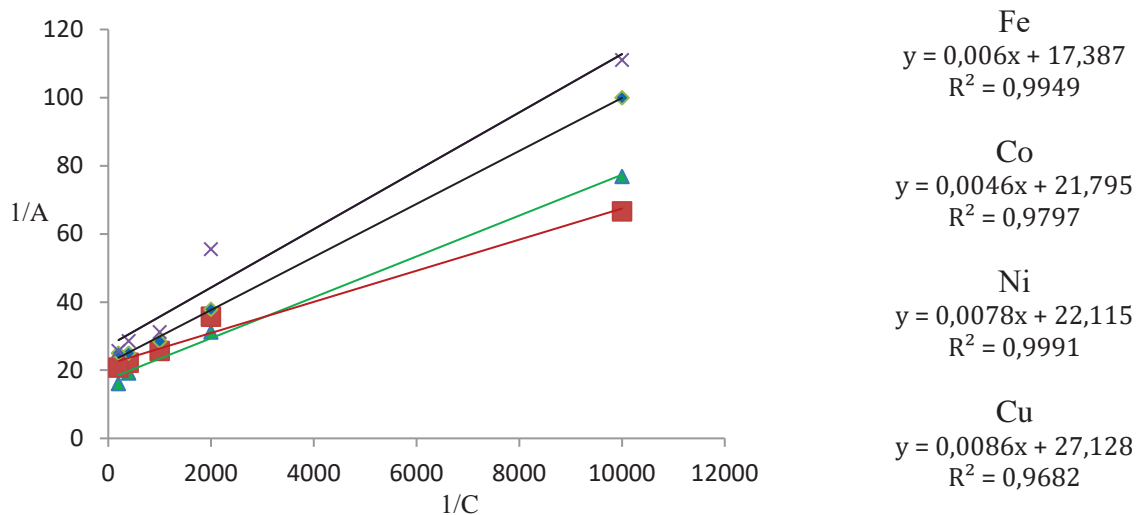


Рис. 3. Изотерма Ленгмюра адсорбции ионов металлов на шелухе кедровой шишки — линейный вид:
 —▲— Fe³⁺, —■— Co³⁺, —◆— Ni²⁺, —×— Cu²⁺

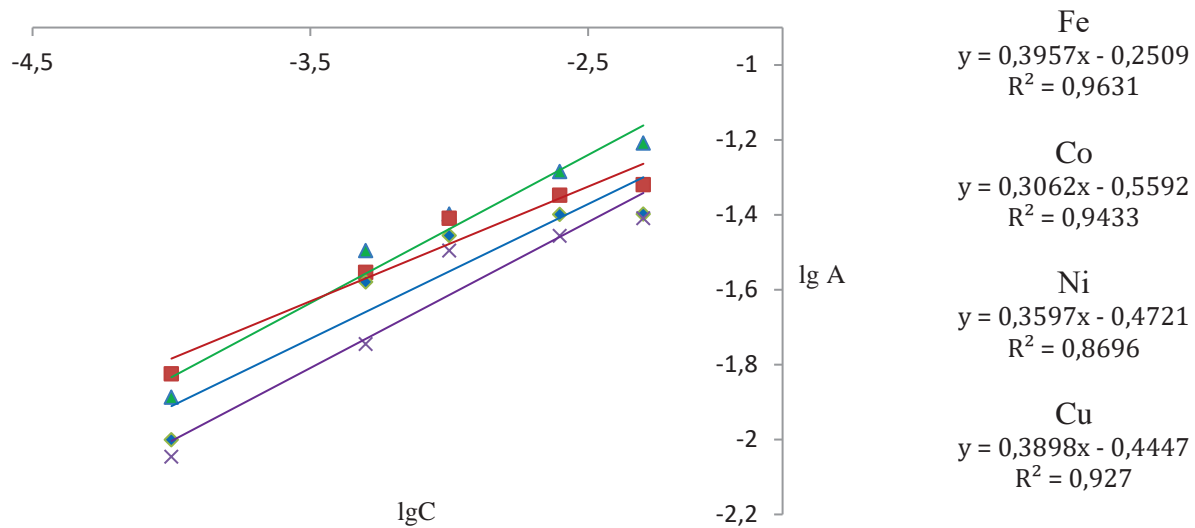


Рис. 4. Изотерма Фрейндлиха адсорбции ионов металлов на шелухе кедровой шишки — линейный вид:
 ▲ — Fe³⁺, ■ — Co³⁺, ◆ — Ni²⁺, × — Cu²⁺

Модель Фрейндлиха, используемая для описания адсорбции ионов-токсикантов на исследуемых природных материалах, «свидетельствует о том, что адсорбционные центры на поверхности данных материалов энергетически неэквивалентны, и поверхность природных сорбентов неоднородна» [20].

Полученные кинетические и равновесные данные по адсорбции ионов тяжелых металлов показали, что природные отходы от переработки растительного углеродсодержащего сырья являются перспективным ресурсом для производства дешевых адсорбционных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное направление в разработке адсорбентов заключается в широком использовании отходов сельского хозяйства или промысла. Адсорбция на природных биосорбентах постепенно применяется в области очистки сточных вод на малых предприятиях, поскольку она показывает хороший адсорбционный эффект при удалении тяжелых металлов. Количественный анализ механизма адсорбции тяжелых металлов и утилизация отработанного материала требуют даль-

нейших исследований до масштабирования во избежание экологических рисков.

Значительное количество исследований, представленных в литературе, выявило значительное увеличение адсорбционной способности всех модифицированных углеродсодержащих материалов по сравнению с немодифицированными, что демонстрирует многообещающий потенциал модифицированного отходного материала для удаления тяжелых металлов в промышленности при очистке сточных вод.

Работа выполнена в рамках КНТП полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в области разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» распоряжением правительства от 11.05.2022, № 1144-р, мероприятие 13 «Инновационная технология очистки сточных вод на предприятиях по добыче угля открытым способом».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mariana M., Khalil A., Mistar E.M., Yahya E.B., Alfatah T., Danish M., Amayreh M. Recent advances in activated carbon modification techniques for enhanced heavy metal adsorption // *Journal of Water Process Engineering*. 2021. Vol. 43. P. 102221.
2. Bredihin S.A., Andreev V.N., Martekha A.N., Schenzle M.G., Korotkiy I.A. Erosion potential of ultrasonic food processing // *Foods and Raw Materials*. 2021. Vol. 9(2). P. 335–344.
3. Chai W.S., Cheun J.Y., Kumar P.S., Mubashir M., Majeed Z., Banat F., Ho Sh.-H., Show P.L. A review on conventional and novel materials towards heavy metal adsorption in wastewater treatment application // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 296. P. 126589.
4. Hashmi Z., Jatoi A.S., Nadeem S. et al. Comparative analysis of conventional to biomass-derived adsorbent for wastewater treatment: a review // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2022.
5. Salishcheva O.V., Tarasova Yu.V., Lashitskiy S.S., Moldagulova N.E. Analysis of kinetic and equilibrium adsorption of heavy metals by natural materials // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. «International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials Technology of Processing, Storage and Recycling of Plant Crops». 2021. P. 062007.
6. Babich O., Krieger O., Chupakhin E., Kozlova O. Miscanthus plants processing in fuel, energy, chemical and microbiological industries // *Foods and Raw Materials*. 2019. Vol. 7(2). P. 403–411.
7. Патент 2696447 С1 RU, МПК С01В 32/354. Способ получения модифицированного активного угля / Соловьева Ю.В., Краснова Т.А., Бокова Т.И., Васильцова И.В., Коваль Ю.И., Полякова Н.П., Дмитриенко А.К., Кондратьев С.С.; заявители и патентообладатель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет». — № 2018147810; заявл. 29.12.2018; опубл. 01.08.2019. — Бюл. № 22.
8. Gorgievski M., Božić D., Stanković V., Strbac N., Serbula S. Kinetics, equilibrium and mechanism of Cu^{2+} , Ni^{2+} and Zn^{2+} ions biosorption using wheat straw // *Ecological Engineering*. 2013. Vol. 58. P. 113122.
9. Jalali M., Aboulghazi F. Sunflower stalk, an agricultural waste, as an adsorbent for the removal of lead and cadmium from aqueous solutions // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2013. Vol. 15. P. 548–555.
10. Alekseeva O.V., Bagrovskaya N.A., Noskov A.V. Sorption of heavy metal ions by cellulose modified with fullerene // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015. Vol. 88(3). P. 436–441.
11. Imamoglu M., Yildiz H., Altundag H., Turhan Y. Efficient Removal of Cd (II) from Aqueous Solution by Dehydrated Hazelnut Husk Carbon // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2015. Vol. 36(2). P. 284–290.
12. Дремичева Е.С. Использование торфа и древесных опилок для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2021. № 3. С. 80–91.
13. Es-sahbany H., Hsissou R., El Hachimi M.L., Allaoui M., Nkhili S., Elyoubi M.S. Investigation of the adsorption of heavy metals (Cu, Co, Ni and Pb) in treatment synthetic wastewater using natural clay as a potential adsorbent (Sale-Morocco) // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45(8). P. 7290–7298.
14. Priya A.K., Yogeshwaran V., Rajendran S., Hoang T.K.A., Soto-Moscoco M., Ghfar A.A., Bathula Ch. Investigation of mechanism of heavy metals (Cr^{6+} , Pb^{2+} and Zn^{2+}) adsorption from aqueous medium using rice husk ash: Kinetic and thermodynamic approach // *Chemosphere*. 2022. Vol. 286(3). P. 131796.
15. Gupta R., Pathak D.D. Surface functionalization of mesoporous silica with maltodextrin for efficient adsorption of selective heavy metal ions from aqueous solution // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. Vol. 631. P. 127695.
16. Salishcheva O., Donya D. A study of the complexing and gelling abilities of pectic substances //

Foods and Raw Materials. 2014. Vol. 1(2). P. 76–84.

17. Li J., Yang Z.-l., Ding T., Song Y.-J., Li H.-Ch., Li De-q., Chen Sh., Xu F. The role of surface functional groups of pectin and pectin-based materials on the adsorption of heavy metal ions and dyes // Carbohydrate Polymers. 2022. Vol. 276. P. 118789.

18. Drozdova M.Yu., Pozdnyakova A.V., Osintseva M.A., Burova N.V., Minina V.I. The microorganism-plant system for remediation of soil exposed to coal mining // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9(2). P. 406–418.

19. Гельфман М.И., Кирсанова Н.В., Ковалевич О.В., Салищева О.В. Практикум по коллоидной химии: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2005. 256 с.

20. Dzhigola L.A., Sadomtseva O.S., Shakirova V.V., Kargina K.V., Syutova E.A., Razgovorov P.B., Nagornov R.S. Application of adsorption models for description of equilibria in systems cations of copper (II) and lead (II) — natural materials of Astrakhan region // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya. 2018. Vol. 61(9–10). P. 105–112.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.58.66.009

UDC 544.723.21:628.316.12

© O.V. Salishcheva, E.N. Neverov, 2022

O.V. SALISHCHEVA

Doctor of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department
KemSU, Kemerovo
e-mail: salishchevaov@mail.ru

E.N. NEVEROV

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
Head of the Department
KemSU, Kemerovo
e-mail: neverov42@mail.ru

INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF PROCESS OF ADSORPTION TREATMENT OF WASTE WATER USING NATURAL MATERIALS AS ADSORBENTS

Despite various technological advances, the problem of heavy metal wastewater treatment is given special attention by scientists around the world, as water and soil pollution poses a serious threat to the ecosystem and human health. Adsorption method using raw waste as sorbents is widely used in the field of waste water treatment. Kinetic and equilibrium data on the adsorption of heavy metal ions of iron (III), cobalt (III), copper (II), nickel (II) with various natural materials were obtained: walnut partitions, cedar cone husk, pomegranate peel. It has been shown that waste from processing plant carbonaceous raw materials is a promising resource for the production of cheap adsorption materials used to extract various heavy metals contained in synthetic wastewater. Experimental data are well described by the Freundlich and Langmuir adsorption models.

Keywords: ADSORPTION, HEAVY METALS, ADSORBENT, WASTE WATER, CONTACT TIME, FREUNDLICH AND LANGMUIR MODELS.

REFERENCES

1. Mariana M., Khalil A., Mistar E.M., Yahya E.B., Alfatah T., Danish M., Amayreh M. Recent advances in activated carbon modification techniques for enhanced heavy metal adsorption // Journal of Water Process Engineering. 2021. Vol. 43. P. 102221.

2. Bredihin S.A., Andreev V.N., Martekha A.N., Schenzle M.G., Korotkiy I.A. Erosion potential of ultrasonic food processing // *Foods and Raw Materials*. 2021. Vol. 9(2). P. 335–344.
3. Chai W.S., Cheun J.Y., Kumar P.S., Mubashir M., Majeed Z., Banat F., Ho Sh.-H., Show P.L. A review on conventional and novel materials towards heavy metal adsorption in wastewater treatment application // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 296. P. 126589.
4. Hashmi Z., Jatoi A.S., Nadeem S. et al. Comparative analysis of conventional to biomass-derived adsorbent for wastewater treatment: a review // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2022.
5. Salishcheva O.V., Tarasova Yu.V., Lashitskiy S.S., Moldagulova N.E. Analysis of kinetic and equilibrium adsorption of heavy metals by natural materials // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. «International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials Technology of Processing, Storage and Recycling of Plant Crops». 2021. P. 062007.
6. Babich O., Krieger O., Chupakhin E., Kozlova O. Miscanthus plants processing in fuel, energy, chemical and microbiological industries // *Foods and Raw Materials*. 2019. Vol. 7(2). P. 403–411.
7. Patent 2696447 C1 RU, IPC C01B 32/354. Method of obtaining modified activated carbon / Solovyova Yu.V., Krasnova T.A., Bokova T.I., Vasiltsova I.V., Koval Yu.I., Polyakova N.P., Dmitrienko A.K., Kondratiev S.S.; applicants and patent holder of the Novosibirsk State Agrarian University. — No. 2018147810; application. 29.12.2018; publ. 01.08.2019. — Bulletin No. 22. [In Russ.].
8. Gorgievski M., Bozić D., Stanković V., Strbac N., Serbula S. Kinetics, equilibrium and mechanism of Cu²⁺, Ni²⁺ and Zn²⁺ ions biosorption using wheat straw // *Ecological Engineering*. 2013. Vol. 58. P. 113122.
9. Jalali M., Aboulghazi F. Sunflower stalk, an agricultural waste, as an adsorbent for the removal of lead and cadmium from aqueous solutions // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2013. Vol. 15. P. 548–555.
10. Alekseeva O.V., Bagrovskaya N.A., Noskov A.V. Sorption of heavy metal ions by cellulose modified with fullerene // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015. Vol. 88(3). P. 436–441.
11. Imamoglu M., Yildiz H., Altundag H., Turhan Y. Efficient Removal of Cd (II) from Aqueous Solution by Dehydrated Hazelnut Husk Carbon // *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2015. Vol. 36(2). P. 284–290.
12. Dremicheva E.S. The use of peat and sawdust for wastewater treatment from heavy metal ions // *Bulletin of the Scientific Center of VostNII on Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoj bezopasnosti]*. 2021. No. 3. P. 80–91. [In Russ.].
13. Es-sahbany H., Hsissou R., El Hachimi M.L., Allaoui M., Nkhili S., Elyoubi M.S. Investigation of the adsorption of heavy metals (Cu, Co, Ni and Pb) in treatment synthetic wastewater using natural clay as a potential adsorbent (Sale-Morocco) // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45(8). P. 7290–7298.
14. Priya A.K., Yogeshwaran V., Rajendran S., Hoang T.K.A., Soto-Moscoso M., Ghfar A.A., Bathula Ch. Investigation of mechanism of heavy metals (Cr⁶⁺, Pb²⁺ and Zn²⁺) adsorption from aqueous medium using rice husk ash: Kinetic and thermodynamic approach // *Chemosphere*. 2022. Vol. 286(3). P. 131796.
15. Gupta R., Pathak D.D. Surface functionalization of mesoporous silica with maltodextrin for efficient adsorption of selective heavy metal ions from aqueous solution // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. Vol. 631. P. 127695.
16. Salishcheva O., Donya D. A study of the complexing and gelling abilities of pectic substances // *Foods and Raw Materials*. 2014. Vol. 1(2). P. 76–84.

17. Li J., Yang Z.-l., Ding T., Song Y.-J., Li H.-Ch., Li De-q., Chen Sh., Xu F. The role of surface functional groups of pectin and pectin-based materials on the adsorption of heavy metal ions and dyes // *Carbohydrate Polymers*. 2022. Vol. 276. P. 118789.

18. Drozdova M.Yu., Pozdnyakova A.V., Osintseva M.A., Burova N.V., Minina V.I. The microorganism-plant system for remediation of soil exposed to coal mining // *Foods and Raw Materials*. 2021. Vol. 9(2). P. 406–418.

19. Gelfman M.I., Kirsanova N.V., Kovalevich O.V., Salishcheva O.V. Workshop on colloidal chemistry: textbook. Saint Petersburg: Lan, 2005. 256 p. [In Russ.].

20. Dzhigola L.A., Sadomtseva O.S., Shakirova V.V., Kargina K.V., Syutova E.A., Razgovorov P.B., Nagornov R.S. Application of adsorption models for description of equilibria in systems cations of copper (II) and lead (II) — natural materials of Astrakhan region // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2018. Vol. 61(9–10). P. 105–112.