

ПРОЦЕССЫ ИОНООБМЕННОЙ СОРБЦИИ И ДЕСОРБЦИИ ИОНОВ Cu^{2+} И Zn^{2+} НА КОМПОЗИЦИОННОМ КАТИОНИТЕ

С.В. Натареев¹, Д.Е. Захаров², А.А. Рябиков¹

¹Кафедра технологических машин и оборудования, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская федерация, 153000

E-mail: natoret@mail.ru*, pluck612@gmail.com

²ОАО «Выксунский металлургический завод», ул. Братьев Баташевых, 45, г. Выкса, Нижегородская обл., Российская федерация, 607060

E-mail: dimazah16@ya.ru

Представлены результаты экспериментального исследования процессов ионообменной сорбции и десорбции ионов меди и цинка на композиционном сорбенте. Сорбент получен из модифицированных древесных опилок и хитозана при мольном соотношении 1:0,4. Средний размером частиц сорбента 1,6 мм. Сорбент имеет макропористую структуру и содержит карбоксильные, фенольные гидроксильные группы и аминокгруппы, способные к ионному обмену с ионами тяжелых металлов из растворов. Экспериментальное исследование представляет собой пропускание исходного раствора через неподвижный кольцевой слой сорбента и снятие выходных кривых ионного обмена. Сорбент объемом $9,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ помещали в кольцевой адсорбер между внутренней и наружной решетками. При исследовании прямого процесса ионного обмена использовали растворы сульфатов меди и цинка с концентрацией 0,05 N с объемной скоростью $8,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ и сорбент в Na-форме. Регенерацию сорбента от ионов тяжелых металлов проводили 0,08 N раствором гидроксида натрия с объемной скоростью $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. На основании выходных кривых ионного обмена рассчитывали полную обменную емкость сорбента, степень регенерации сорбента и удельный расход регенерационного раствора. Анализ экспериментальных данных показал на снижение обменной емкости сорбента при его многократном использовании. После пяти циклов сорбция-десорбция значение полной динамической обменной емкости сорбента снизилось по ионам меди на 30%, а по ионам цинка на 25%. Снижение обменной емкости связано с уменьшением количества в сорбенте карбоксильных и фенольных гидроксильных групп, а также с уплотнением его структуры и, следовательно, уменьшением доступности функциональных групп.

Ключевые слова: ионный обмен, композиционный сорбент, ионы тяжелых металлов

PROCESSES OF ION EXCHANGE SORPTION AND DESORPTION OF Cu^{2+} AND Zn^{2+} IONS ON A COMPOSITE SORBENT

S.V. Natareev¹, D.E. Zakharov², A.A. Ryabikov¹

¹Department of Chemical Engineering and Automation, Ivanovo State University of Chemical Technology, Sheremetevsky, 7, Ivanovo, Russian Federation, 153000

E-mail: natoret@mail.ru, pluck612@gmail.com

²Vyкса Steel Works, Brothers Batashev St., 45, Vyкса, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation, 607060

E-mail: dimazah16@ya.ru

The results of an experimental study of the processes of ion exchange sorption and desorption of copper and zinc ions on a composite sorbent are presented. The sorbent is obtained from modified sawdust and chitosan at a molar ratio of 1:0,4. The average particle size is 1,6 mm. The sorbent has a macroporous structure and contains carboxyl, phenolic hydroxyl groups and amino

groups capable of ion exchange with heavy metal ions from solutions. The experimental study is a passing the initial solution through a stationary annular sorbent layer and removing the output curves of ion exchange. The sorbent with a volume of $9,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ was placed in an annular adsorber between the inner and outer gratings. In the study of the direct ion exchange process, solutions of copper and zinc sulfates with a concentration of 0,05 N with volumetric velocity $8,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{c}$ and a sorbent in Na- form were used. Sorbent was regenerated from heavy metal ions with 0,08 N sodium hydroxide solution with volumetric velocity $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{c}$. The full exchange capacities of the sorbent, the degree of regeneration of the sorbent and the specific consumption of the regeneration solution were calculated based on the output curves of ion exchange. The analysis of experimental data showed a decrease in the exchange capacity of the sorbent during its repeated use. After five sorption-desorption cycles, the value of the total dynamic exchange capacity of the sorbent decreased for copper ions by 30% and for zinc ions by 25%. The decrease in the exchange capacity is associated with a decrease in the amount of carboxyl and phenolic hydroxyl groups in the sorbent, as well as with the compaction of its structure and, consequently, a decrease in the availability of functional groups.

Key words: ion exchange, composite sorbent, heavy metal ions

Для цитирования:

Натареев С.В., Захаров Д.Е., Рябиков А.А. Процессы ионообменной сорбции и десорбции ионов Cu^{2+} и Zn^{2+} на композиционном катионите. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2023. Т. LXVII. № 2. С. 45–51. DOI: 10.6060/RCJ.2023672.5.

For citation:

Natareev S.V., Zakharov D.E., Ryabikov A.A. Processes of ion exchange sorption and desorption of Cu^{2+} and Zn^{2+} ions on a composite sorbent. *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 2. P. 45–51. DOI: 10.6060/RCJ.2023672.5.

ВВЕДЕНИЕ

Экологические проблемы, связанные с загрязнением окружающей природной среды промышленными сточными водами, содержащими токсичные ионы тяжелых металлов (ИТМ), могут быть решены путем совершенствования технологических процессов их очистки. Одним из наиболее эффективных методов очистки таких сточных вод является метод ионного обмена. В качестве ионообменных материалов используются, как правило, синтетические иониты, которые имеют достаточно высокую стоимость. Экономически выгодно и экологически целесообразно использовать для получения сорбентов отходы сельскохозяйственного производства [1–5] и деревообрабатывающей промышленности [6–10], неорганические силикатные материалы [11–16] и другие природные материалы [17–19]. Нативные природные вещества в той или иной мере проявляют сорбционную способность по отношению к ИТМ. С целью повышения сорбционных свойств природные материалы подвергаются химическому, термическому, плазменной и другим методам модифицирования [20–23]. Полученные таким образом природные сорбенты должны также удовлетворять следующим потребительским свойствам: иметь однородный грануло-

метрический состав, обладать высокой механической прочностью и осматической стабильностью, сохранять сорбционные свойства при многократной регенерации др. В работах [24, 25] авторами приведены результаты исследования процессов ионообменной сорбции ИТМ на гранулированном композиционном катионите (ГКК), полученном на основе модифицированных древесных опилок и хитозана, при мольном соотношении 1:0,4. Средний размер частиц сорбента 1,6 мм. Он имеет макропористую структуру и содержит карбоксильные, фенольные гидроксильные группы и аминоксильные группы, способные к ионному обмену с ИТМ из растворов. Проведенные исследования показали на возможность замены дорогих синтетических катионитов полученным природным ионитом. Данная работа является продолжением вышеуказанных исследований и посвящена изучению регенерации ГКК от ИТМ с целью повторного его использования.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование процессов сорбции-десорбции ИТМ на ГКК проводили на ионообменной установке, основным элементом которой являлся кольцевой адсорбер [24, 25]. Аппарат представлял собой цилиндрический сосуд с плоскими крышкой и днищем, внутри которого размещался неподвиж-

ный кольцевой слой катионита с наружным диаметром 0,11 м, внутренним диаметром 0,05 м и высотой 0,13 м. Рабочий объем аппарата составлял $9,8 \cdot 10^{-4}$ м³. В аппарат помещали катионит в Na-форме и заливали его дистиллированной водой. При изучении прямого процесса ионного обмена использовали 0,05 N растворы сульфата меди и цинка с объемной скоростью $8,1 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Исследование процесса очистки воды от ИТМ катионитом заключалось в снятии выходных кривых ионного обмена. Для этого через определенные промежутки времени на выходе из аппарата собирали фильтрат порциями по 10 мл и определяли в нем содержание сорбируемых ионов. Раствор продолжали пропускать через аппарат до выравнивания концентраций целевого компонента в поступающем в аппарат растворе и вытекающем из него растворе. На основании выходных кривых ионного обмена рассчитывали значение полной динамической обменной емкости E_0 по формуле (1) [26].

$$E_0 = \frac{CV_0 - \sum V_{\Pi} C_{\Pi}}{\bar{V}}, \text{ кг-экв/м}^3 \quad (1),$$

где C – концентрация исходного раствора, кг-экв/м³; C_{Π} – концентрация раствора в порциях фильтрата после появления ионов исходного раствора, кг-экв/м³; V_0 – объем фильтрата до полного насыщения ионита поглощаемым ионом, м³; V_{Π} – объем порций фильтрата после появления ионов исходного раствора, м³; \bar{V} – объем набухшего катионита в аппарате, м³.

После стадии насыщения катионита его отмывали дистиллированной водой с удельной нагрузкой $8,4$ м³/(м³·ч) в течение 20 мин.

Методика исследования процесса регенерации катионита практически не отличалась от методики исследования процесса очистки растворов от ИТМ. Восстановление обменной емкости катионита проводили 0,08 N раствором гидроксида натрия, который подавался в аппарат с объемным расходом $3,2 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

При изучении десорбции ИТМ из сорбента рассчитывали степень его регенерации $\eta_{\text{рег}}$ по формуле (2).

$$\eta_{\text{рег}} = \frac{E_{\text{в}}}{E_0} 100, \% \quad (2),$$

где $E_{\text{в}} = S/\bar{V}$ – восстановленная обменная емкость сорбента, кг-экв/м³; S – площадь под выходной кривой регенерации сорбента, кг-экв; значение S находили графическим способом.

Удельный расход регенерационного раствора λ определяли по формуле (3).

$$\lambda = \frac{C_{\text{вх.рег}} Q_{\text{рег}} \tau}{E_0 \bar{V}}, \text{ экв/экв}. \quad (3),$$

где $C_{\text{вх.рег}}$ – исходная концентрация регенерационного раствора, кг-экв/м³; $Q_{\text{рег}}$ – расход регенерационного раствора, м³/с; τ – продолжительность процесса регенерации катионита, с.

После стадии регенерации катионита его отмывали от остатков щелочи дистиллированной водой с удельной нагрузкой $8,4$ м³/(м³·ч) в течение 20 мин. Затем повторяли процесс очистки воды от ИТМ. Всего проводили 5 циклов сорбция-десорбция.

Для определения в растворе ионов меди использовали йодометрический метод. Титрование проводили раствором тиосульфата натрия при добавлении в анализируемый раствор роданисто-йодистой смеси и раствора серной кислоты [27].

Для определения в растворе ионов цинка использовали комплексонометрический метод. Данный метод основан на титровании ионов цинка трилоном Б в присутствии аммиачного буфера и индикатора хромоген черного рабочим раствором трилона Б до перехода вишневой окраски раствора в голубую [27].

Определение концентрации гидроксида натрия проводили методом кислотно-основного титрования в присутствии индикатора метилового оранжевого [27].

С целью изучения химической структуры сорбента, выявления функциональных групп, участвующих в ионном обмене, и исследования изменения его структуры в ходе ионообменных процессов были сняты инфракрасные спектры сорбента.

Инфракрасную спектроскопию исследуемого адсорбента проводили на ИК-Фурье спектрометре Avatar 360 FT-IR ESP (Япония) в диапазоне волновых чисел от 4000 до 400 см⁻¹. Материал предварительно высушивали до постоянной массы при температуре 90 °С. Спектры снимались для таблеток, приготовленных путем тщательного перетирания в ступке тонкоизмельченного адсорбента с бромидом калия до получения гомогенного порошка и последующего прессования данной смеси в пресс-форме [28].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 – 4 показаны выходные кривые ионообменной сорбции и десорбции ИТМ в кольцевом адсорбере с загрузкой ГКК при проведении 5 циклов сорбция-десорбция ($n_{\text{рег}} = 1, 2, \dots, 5$).

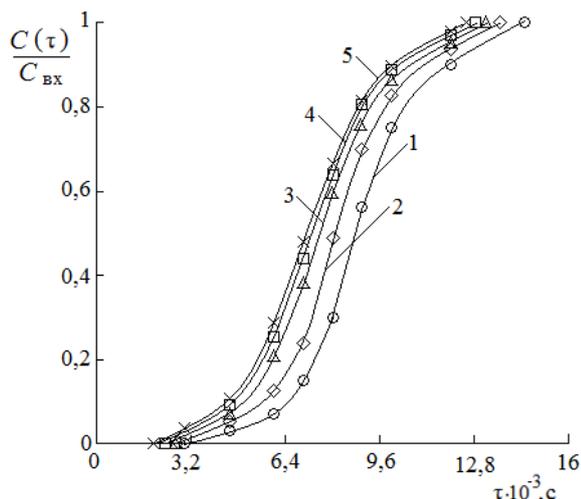


Рис. 1. Выходные кривые сорбции ионов Cu^{2+} катионитом при различных циклах сорбция-десорбция: $n_{\text{рег}}$ 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5 циклов

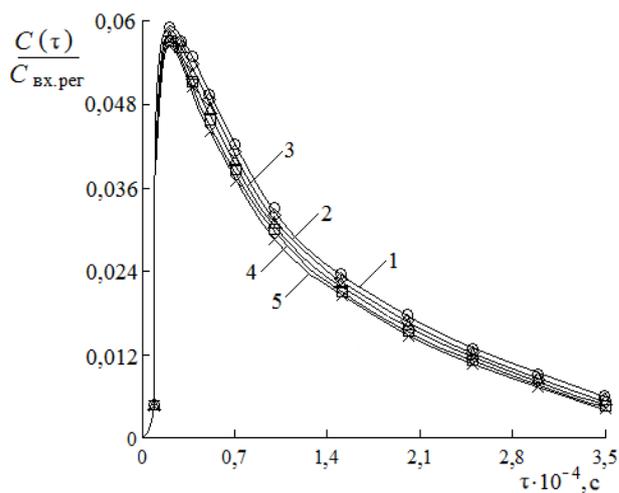


Рис. 4. Выходные кривые десорбции ионов Zn^{2+} из катионита при различных циклах сорбция-десорбция: $n_{\text{рег}}$ 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5 циклов

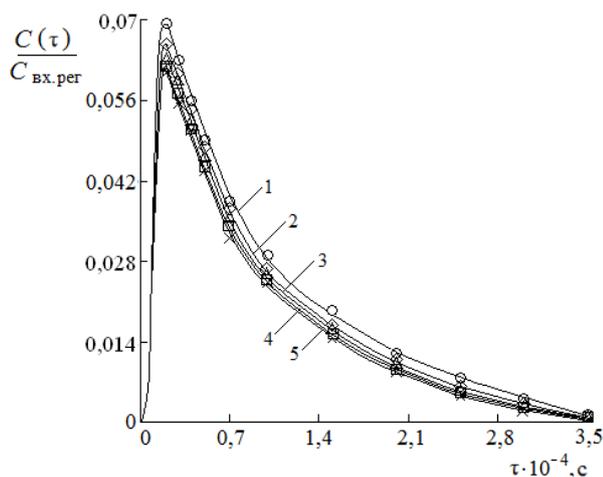


Рис. 2. Выходные кривые десорбции ионов Cu^{2+} из катионита при различных циклах сорбция-десорбция: $n_{\text{рег}}$ 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5 циклов

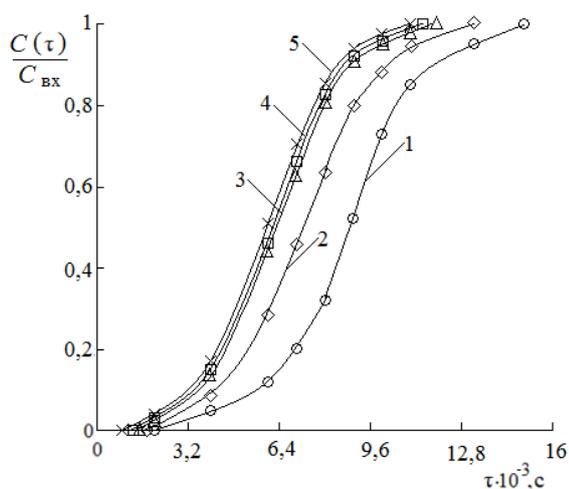


Рис. 3. Выходные кривые сорбции ионов Zn^{2+} катионитом при различных циклах сорбция-десорбция: $n_{\text{рег}}$ 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5 циклов

Выходные кривые прямого процесса ионного обмена имеют классический S-образный вид. Их анализ позволяет приблизительно оценить преобладающий механизм кинетики процесса. Обостренные начальные и размытые конечные участки графиков функции $N(\tau)$ косвенно свидетельствуют о доминировании внутридиффузионной стадии массопереноса на скорость обменного процесса. Установлено, что после первой очистки растворов на свежеприготовленном сорбенте величина полной динамической обменной емкости катионита по ионам меди составляет $0,195 \text{ кг-экв/м}^3$, а по ионам цинка – $0,176 \text{ кг-экв/м}^3$. При этом время защитного действия слоя катионита при сорбции меди равно 150 с , а цинка – 100 с . При одинаковых условиях проведения процесса десорбция ионов Zn^{2+} протекает менее интенсивно, чем ионов Cu^{2+} . При первой регенерации катионита на 85% наблюдается достаточно высокий удельный объем регенеранта λ , который для обмена $\text{Na}^+ - \text{Cu}^{2+}$ составляет 20 экв/экв . Для обмена $\text{Na}^+ - \text{Zn}^{2+}$ на 1 экв десорбируемых ионов Zn^{2+} расходуется 25 экв щелочи. Выходные кривые прямого процесса на свежеприготовленном сорбенте после первой регенерации и последующих регенерациях имеют практически одинаковые углы наклона и степень размытия, что указывает на одинаковый кинетический механизм обмена ионов на ГКК. Установлено, что полная динамическая емкость сорбента по ИТМ снижается после первой регенерации в среднем на 12% , но затем при второй и последующих регенерациях она стабилизируется и практически не изменяется. После 5 циклов сорбция-десорбция значение E_0 составило по ионам Cu^{2+} $0,15 \text{ кг-экв/м}^3$, а по ионам Zn^{2+} – $0,14 \text{ кг-экв/м}^3$.

Определенные изменения химической структуры сорбента, связанные с проведением процесса его регенерации, можно увидеть на рис. 5.

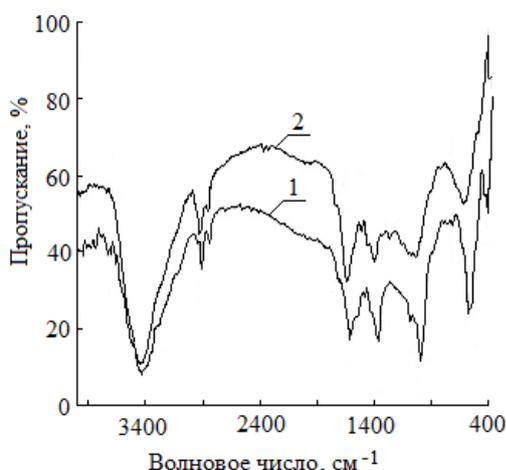


Рис. 5. ИК спектры сорбента до сорбции (1) и после регенерации (2)

Полосы поглощения в интервале 3650–3200 см^{-1} обусловлены колебаниями –ОН групп, включенных в межмолекулярные водородные связи. Полосы поглощения при 2900 см^{-1} следует отнести к валентным колебаниям связей С–Н. Характерные пики отмечаются в области от 1800 до 1600 см^{-1} . Отчетливые полосы при 1741 см^{-1} и 1647 см^{-1} связаны с валентными колебаниями карбонильных групп С=О, что позволяет сделать предположение о возможности сорбции ИТМ сорбентом по механизму ионного обмена. Различие в спектрах исходного сорбента и отрегенированного сорбента наблюдается в интервале 1400–1020 см^{-1} , где проявляются деформационные колебания С–О–Н (в группах СООН) и ОН–групп целлюлозы. Например, в результате регенерации адсорбента исчез пик 1028 см^{-1} . Снижение сорбционной емкости катионита, по-видимому, связано с частичной деструкцией целлюлозы раствором гидроксида натрия, а также вымыванием из сорбента гемицеллюлоз и лигнина регенерирующим раствором. Это приводит к снижению количества в сорбенте карбоксильных и фенольных гидроксильных групп, а также к уплотнению его структуры и, следовательно, уменьшению доступности функциональных групп для ионообменной сорбции ИТМ.

С целью повышения эффективности процесса регенерации сорбента целесообразно использовать следующие рекомендации: 1) рациональное сочетание статического и динамического режимом, при котором сначала сорбент выдерживают определенное время в неподвижном регенерационном растворе, а затем проводят фильтрацию реге-

неранта через слой сорбента; 2) повторное использование отработанного регенерационного раствора. При этом первый объем регенерационного раствора, соответствующий стехиометрическому расходу реагента, выводится из процесса на утилизацию, а последующие объемы (обычно 1–4 объема) находятся в рециркуляции; 3) восстановление обменной емкости ионита не более, чем на 75–80%; 4) противоточная регенерация неподвижного слоя ионита, когда регенерационный раствор и очищаемая вода движутся в противоположных направлениях. С учетом выполнения вышеуказанных рекомендаций предложенный катионит может быть рекомендован для очистки сточных вод от ионов меди и цинка.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа выходных кривых сорбции ионов меди и цинка сделан вывод о доминировании внутридиффузионной стадии массопереноса в процессе ионного обмена и установлена полная динамическая емкость катионита на основе древесных опилок и хитозана, которая по меди составила 0,15 кг–экв/ м^3 , а по цинку – 0,14 кг–экв/ м^3 .

2. При проведении циклического процесса сорбция-десорбция ионов тяжелых металлов в аппарате с кольцевым слоем природного катионита установлено снижение полной динамической обменной емкости сорбента после 5 цикла по ионам меди на 30 %, а по ионам цинка на 25%.

3. Снижение сорбционной емкости катионита связано с частичной деструкцией целлюлозы регенерационным раствором гидроксида натрия, а также вымыванием из сорбента гемицеллюлоз и лигнина регенерирующим раствором. Это приводит к снижению количества в сорбенте карбоксильных и фенольных гидроксильных групп, а также к уплотнению его структуры и, следовательно, уменьшению доступности функциональных групп для ионообменной сорбции ИТМ.

4. Даны рекомендации по повышению эффективности работы адсорбера на стадии регенерации, с учетом которых полученный катионит может быть рекомендован для очистки сточных вод от ионов меди и цинка.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Sharma P.K., Ayub S., Tripathi C.N. Agro and Horticultural International Refereed Journal of Engineering and Science. 2013. V. 2. N 8. P. 18–27.
2. Lakshmiathy R., Sarada N.C., Jayaprakash N. International Journal of ChemTech Research. 2015. V. 8. N 5. P. 25–31.
3. Acharya J., Kumar U., Mahammed. P.R. International Journal of Current Engineering and Technology. 2018. V. 8. N 3. P. 526–530. DOI:10.1016/j.biortech.2007.06.011.
4. Wan Ngah W.S., Hanafiah M.A.K.M. Bioresource Technology. 2008. V. 99. N 10. P. 3935–3948. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.06.011.
5. Hegazi H.A. HBRC Journal. 2013. N 9. P. 276–282. DOI.org/10.1016/j.hbrj.2013.08.004.
6. Sahmoune M.N., Yeddou A.R. Desalination and Water Treatment. 2016. V. 57. N 50. P. 1–16. DOI:10.1080/19443994.2015.1135824.
7. Argun M.E., Dursun S., Ozdemir C., Karatas M. Journal of hazardous materials. 2007. V. 6. N 1. P. 77–85. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.095.
8. Meez E., Rahdar A., Kyzas G.Z. Molecules. 2021. V. 26. N 14. P. 4318–4328. DOI: org/10.3390/molecules26144318.
9. Yang, L., Tan W.-F., Mumford K., Ding L., Lv J.-W., Zhang X.-W., Wang H.-Q. Sep. Sci. Technol. 2018. N 53. P. 2704–2716. DOI: 10.1002/adma.201104714.
10. Jianfui C., Sarjadi M.S., Musta B., Sarkar M.S., Rahman M.L. ChemistrySelect. 2019. N 4. P. 2991–3001.
11. Salman H., Shaheen H, Abbas G., Khalouf N. Journal of Entomology and Zoology Studies. 2017. V. 5. N 4. P. 452–461.
12. Belviso C. Processes. 2020. V. 8. N 7. DOI:org/10.3390/pr8070820.
13. Halimoon N., Yin R.G.S. Environment Asia. 2010. N 3. P 124–130. DOI: 10.14456/ea.2010.51.
14. Hamadi A., Nabih K. Journal of Chemistry. 2018. N 3. P. 1–12. DOI: 10.1155/2018/6207910.
15. Гордина Н.Е. Прокофьев В.Ю., Борисова Т.Н., Елизарова А.М. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2019. Т. 62. Вып. 7. С. 99–106. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5725.
16. Гордина Н.Е. Российский химический журнал. 2018. Т. LXII. № 4. С. 89–109.
17. Силина Ю.А., Спиридонов Б.А., Битюцких М.Ю., Кучменко Т.А. Вестник ВГУИТ. 2013. № 3. С. 138–142.
18. Ugwu I.M., Igbokwe O.I. Sorption of Heavy Metals on Clay Minerals and Oxides: A Review. In book: Edebal S. Advanced Sorption Process Applications. Great Britain: IntechOpen. 2019. 218 P. DOI: 10.5772/intechopen.80989.
19. Carolin CF, Kumar PS, Saravanan A, Joshiba GJ, Naushad M. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2017. V. 5. N 3. P. 2782–2799. DOI: 10.1016/j.jece.2017.05.029.
20. Murzakassymova N.C., Bektenov N.A., Gavrilenko M.A. News of NAS RK. Series of chemistry and technologies. 2021. V. 1. N 445. P. 75–79. DOI: 10.32014/2021.2518–1491.9.
21. Anuzyte E., Vaisis V. Energy Procedia. 2018. V. 147. P. 295–300. DOI: org/10.1016/j.egypro.2018.07.09.
22. Qingnan Xu., Hao Yuan, Hongli Wang, Yong Xu, Dezheng Yang. A Catalysts. 2022. V. 12. N 4. P. 398–415. DOI: org/10.3390/catal12040398.

REFERENCES

1. Sharma P.K., Ayub S., Tripathi C.N. Agro and Horticultural International Refereed Journal of Engineering and Science. 2013. V. 2. N 8. P. 18–27.
2. Lakshmiathy R., Sarada N.C., Jayaprakash N. International Journal of ChemTech Research. 2015. V. 8. N 5. P. 25–31.
3. Acharya J., Kumar U., Mahammed. P.R. International Journal of Current Engineering and Technology. 2018. V. 8. N 3. P. 526–530. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.06.011.
4. Wan Ngah W.S., Hanafiah M.A.K.M. Bioresource Technology. 2008. V. 99. N 10. P. 3935–3948. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.06.011.
5. Hegazi H.A. HBRC Journal. 2013. N 9. P. 276–282. DOI: 10.1016/j.hbrj.2013.08.004.
6. Sahmoune M.N., Yeddou A.R. Desalination and Water Treatment. 2016. V. 57. N 50. P. 1–16. DOI: 10.1080/19443994.2015.1135824.
7. Argun M.E., Dursun S., Ozdemir C., Karatas M. Journal of hazardous materials. 2007. V. 6. N 1. P. 77–85. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.095.
8. Meez E., Rahdar A., Kyzas G.Z. Molecules. 2021. V. 26. N 14. P. 4318–4328. DOI: org/10.3390/molecules26144318.
9. Yang, L., Tan W.-F., Mumford K., Ding L., Lv J.-W., Zhang X.-W., Wang H.-Q. Sep. Sci. Technol. 2018. N 53. P. 2704–2716. DOI: 10.1002/adma.201104714.
10. Jianfui C., Sarjadi M.S., Musta B., Sarkar M.S., Rahman M.L. ChemistrySelect. 2019. N 4. P. 2991–3001.
11. Salman H., Shaheen H, Abbas G., Khalouf N. Journal of Entomology and Zoology Studies. 2017. V. 5. N 4. P. 452–461.
12. Belviso C. Processes. 2020. V. 8. N 7. DOI:org/10.3390/pr8070820.
13. Halimoon N., Yin R.G.S. Environment Asia. 2010. N 3. P 124–130. DOI: 10.14456/ea.2010.51.
14. Hamadi A., Nabih K. Journal of Chemistry. 2018. N 3. P. 1–12. DOI: 10.1155/2018/6207910.
15. Gordina N.E., Prokof'ev V.Yu., Borisova T.N., Elizarova A.M. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.] 2019. V. 62. N 7. P. 99–106. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5725. (in Russian).
16. Gordina N.E. Rus.Chem.J. 2018. V. LXII. N 4. P. 89–109 (in Russian).
17. Silina Yu.A., Spiridonov B.A., Bityutskikh M.Yu., Kuchmenko T.A. Vestnik VSUIT. 2013. N 3. P. 138–142 (in Russian).
18. Ugwu I.M., Igbokwe O.I. Sorption of Heavy Metals on Clay Minerals and Oxides: A Review. In book: Edebal S. Advanced Sorption Process Applications. Great Britain: IntechOpen. 2019. 218 P. DOI: 10.5772/intechopen.80989.
19. Carolin CF, Kumar PS, Saravanan A, Joshiba GJ, Naushad M. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2017. V. 5. N 3. P. 2782–2799. DOI: 10.1016/j.jece.2017.05.029.
20. Murzakassymova N.C., Bektenov N.A., Gavrilenko M.A. News of NAS RK. Series of chemistry and technologies. 2021. V. 1. N 445. P. 75–79. DOI: 10.32014/2021.2518–1491.9.
21. Anuzyte E., Vaisis V. Energy Procedia. 2018. V. 147. P. 295–300. DOI: org/10.1016/j.egypro.2018.07.09.
22. Qingnan Xu., Hao Yuan, Hongli Wang, Yong Xu, Dezheng Yang. A Catalysts. 2022. V. 12. N 4. P. 398–415. DOI: org/10.3390/catal12040398.

23. Мельников А.А., Гордина Н.Е., Тюканова К.А., Гусев Г.И., Гушчин А.А., Румянцев Р.Н. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. Вып. 8. С. 63–71. DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6422.
24. Натарëев С.В., Захаров Д.Е., Снегирев М.Ю. Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение. 2022. № 3 (71). С. 67–71.
25. Захаров Д.Е., Натарëев С.В., Снегирев Д.Г. Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 4 (37). С. 56–61.
26. Селеменев В.Ф., Славинская Г.В., Хохлов В.Ю., Иванов В.А., Горшков В.И., Тимофеевская В.Д. Практикум по ионному обмену. Воронеж: ВГУ. 2004. 160 с.
27. Алексеев В.Н. Количественный анализ. М.: Альянс. 2007. 504 с.
28. Редькин Н.А. ИК-Фурье спектроскопия и масспектроскопия в идентификации органических соединений. Самара: СУ. 2019. 92 с.
23. Melnikov A.A., Gordina N.E., Tyukanova K.A., Gusev G.I., Gushchin A.A., Rummyantsev R.N. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2021. V. 64. N 8. P. 63–71. DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6422. (in Russian).
24. Natarëev S.V., Zakharov D.E., Snigirev M.Yu. Modern high technologies. Regional application. Ivanovo. 2022. N 3 (71). P. 67–71 (in Russian).
25. Zaharov D.E., Natarëev S.V., Snegirev D. G. The journal modern problems of civil protection. 2020. N 4 (37). P. 56–61 (in Russian).
26. Selemenëv V.F., Slavinskaya G.V., Khokhlov V.Yu., Ivanov V.A., Gorshkov V.I., Timofëevskaya V.D. Workshop on ion exchange. Voronezh: VSU. 2004. 160 p. (in Russian).
27. Alekseev V.N. Quantitative analysis. M.: Alliance. 2007. 504 p. (in Russian).
28. Redkin N.A. IR-Fourier spectroscopy and mass spectroscopy in the identification of organic compounds. Samara: SU. 2019. 92 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 03.04.23
Принята к опубликованию 30.05.23*

*Received 03.04.23
Accepted 30.05.23*