

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИОНОВ МЕДИ(II) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 2-ЭТИЛИМИДАЗОЛАТА НИКЕЛЯ

В.А. Фуфаева, Д.В. Филиппов

Виктория Александровна Фуфаева *, Дмитрий Вячеславович Филиппов

Кафедра физической и коллоидной химии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр.,7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: victoriafufaeva@gmail.com *, filippov@isuct.ru

Получен и охарактеризован 2-этилимидазолат никеля, используемый в данной работе в качестве сорбента для извлечения ионов меди(II). Характеристика образца осуществлялась посредством обработки данных сканирующей электронной микроскопии, низкотемпературной адсорбции азота в порах 2-этилимидазолата никеля. При анализе морфологии образца установлено, что полученный сорбент представляет собой микрогетерогенный материал с размером отдельных частиц в пределах 0,4-0,7 мкм. Получены изотермы адсорбции азота в порах 2-этилимидазолата никеля. Обнаружено, что при обработке экспериментальных данных в линейных координатах ТОЗМ линейаризация достигается в координатах $\ln V - \ln P_s/P$, что указывает на преобладание в структуре 2-этилимидазолата никеля мезопор. Из линейных координат ТОЗМ определен общий объем пор, который составил 0,21 см³/г. При получении дифференциальной зависимости распределения пор по радиусам установлено, что наиболее вероятному среднему радиусу пор соответствует значение 7,5 нм. Одна из главных характеристик 2-этилимидазолат никеля как сорбента, а именно площадь поверхности, определена по методу А.В. Киселева и составила 703,56 м²/г. Проверка эффективности использования 2-этилимидазолата никеля в процессах извлечения ионов тяжелых металлов проведена на примере извлечения ионов меди(II) из водных растворов методом ограниченного объема раствора при различном времени контакта. В работе изучены кинетические закономерности сорбции ионов меди(II) на 2-этилимидазолате никеля путем обработки экспериментальных данных в линейных координатах первого и второго порядков. Установлено, что кинетика сорбции ионов меди(II) описывается моделью второго порядка, что указывает на протекание ионообменной адсорбции. Адсорбционное равновесие в системе сорбент-раствор достигается при времени контакта 90-120 мин.

Ключевые слова: металлоорганические каркасные структуры, удельная поверхность, сорбционная емкость, степень извлечения, ионы тяжелых металлов

HIGHLY EFFICIENT REMOVAL OF COPPER(II) IONS FROM AQUEOUS SOLUTION BY NICKEL 2-ETHYLIMIDAZOLATE

V.A. Fufaeva, D.V. Filippov

Victoria A. Fufaeva *, Dmitry V. Filippov

Department of Physical and Colloidal Chemistry, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Shere-metevskiy ave.,7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: victoriafufaeva@gmail.com *, filippov@isuct.ru

Nickel 2-ethylimidazolate was obtained and characterized, which is used in this work as a sorbent for the removal of copper (II) ions. The sample characterization was carried out by scanning electron microscopy, low-temperature nitrogen adsorption. It was found that the obtained sorbent is a microheterogeneous material with the size of individual particles in the range of 0.4-0.7 μm . Nitrogen adsorption isotherms in the pores of nickel 2-ethylimidazolate were obtained. It was found that when processing the experimental data in linear coordinates of TVFM, linearization is reached in coordinates $\ln V - \ln P_s/P$, which indicates the predominance of mesopores in the structure of nickel 2-ethylimidazolate. The total pore volume was determined from the TVFM linear

coordinates. It was 0.21 cm³/g. According to obtained differential pore size distribution, the most probable average pore radius corresponds to 7.5 nm. One of the main characteristics of nickel 2-ethylimidazolate as a sorbent, the surface area was determined by the A.V. Kiselev method and amounted to 703.56 m²/g. The efficiency verification of using nickel 2-ethylimidazolate in the heavy metal ions sorption processes was carried out by removal of copper(II) ions from aqueous solutions by the limited solution volume method at different contact times. The copper(II) sorption kinetics in the presence of nickel 2-ethylimidazolate was studied by processing experimental data in the first and second orders linear coordinates. It was found that the adsorption kinetics of copper(II) ions is described by a second order model, which indicated ion-exchange adsorption. Equilibrium adsorption capacity in the sorbent-solution system is reached at a contact time of 90-120 min.

Key words: metal-organic framework, specific surface area, sorption capacity, heavy metal ions, removal efficiency

Для цитирования:

Фуфаева В.А., Филиппов Д.В. Высокоэффективное извлечение ионов меди(II) из водных растворов с использованием 2-этилимидазолата никеля. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 5. С. 24–29

For citation:

Fufaeva V.A., Filippov D.V. Highly efficient removal of copper(II) ions from aqueous solution by nickel 2-ethylimidazolate. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 5. P. 24–29

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и создание материалов для адсорбционных процессов является одной из приоритетных задач междисциплинарных естественнонаучных сообществ [1-5]. Создаваемые для данных целей новые материалы должны удовлетворять таким требованиям как: простота получения и эксплуатации; постоянство функциональных свойств, таких как высокая удельная поверхность, радиус пор и объемная пористость [6-10]. Указанным требованиям соответствует относительно новый класс синтетических сорбентов, описанный как металлоорганические каркасные структуры [11-14]. Особое внимание в качестве эффективных сорбентов привлекают имидазолатные каркасные структуры (ИКС) не только благодаря высокой удельной поверхности, но и из-за возможности их получения в «мягких» условиях [15]. На данный момент получены каркасы, использование которых без дополнительных модификаций возможно в ряде адсорбционных процессов, в частности данные материалы демонстрируют большой потенциал в извлечении ионов тяжелых металлов. Имеется ряд работ, свидетельствующих об эффективности использования имидазолатных каркасных структур в извлечении ионов Cd(II), Cr(III, VI), As(III), Cu(II) [16-21]. Недостатками используемых в данных работах ИКС является низкая степень извлечения ионов тяжелых металлов и длительность установления адсорбционного равновесия в системе сорбент-раствор.

Цель работы – изучение кинетики сорбции ионов меди(II) с использованием полученного 2-этилимидазолата никеля.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Материалы: хлорид никеля гексагидрат (NiCl₂·6H₂O, х.ч.); 2-этилимидазол (Sigma Aldrich, > 98,0%); додецилдиметиламин-N-оксид (х.ч.); аммиак водный 20%-ый (NH₄OH, ч.д.а.); сульфат меди (CuSO₄·5H₂O, х.ч.). Все реактивы использовались без дополнительной очистки.

Получение 2-этилимидазолата никеля. 2-этилимидазолат никеля получают при соблюдении мольного соотношения 2-этилимидазол/Ni²⁺, равное 4. Хлорид никеля (II) растворяли в 30 мл дистиллированной воды, 2-этилимидазол растворяли в 30 мл дистиллированной воды совместно со 100 мкл 20%-го водного раствора аммиака. Раствор додецилдиметиламин-N-оксида (ДДАО) получали отдельно следующим образом: 150 мкл ДДАО растворяли в 40 мл дистиллированной воды при постоянном перемешивании (200 об/мин). Далее к водному раствору ДДАО совместно приливали приготовленные растворы нитрата никеля и 2-этилимидазола. Реакционную смесь выдерживали при комнатной температуре (25 ± 1 °С) и постоянном перемешивании (400 об/мин) в течение 30 мин. Далее образцы отделяли от раствора центрифугированием, трехкратно промывали изопропиловым спиртом и дистиллированной водой. Полученный 2-этилимидазолат никеля сушили в вакуум-сушильном шкафу при температуре 120 °С до постоянной массы.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ФГБОУ ВО «ИГХТУ».

Данные о морфологии 2-этилимидазолата никеля получали методом сканирующей электронной микроскопии с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH при ускоряющем напряжении 5 kV.

Расчет удельной поверхности и радиуса пор для 2-этилимидазолата никеля осуществляли путем обработки изотерм, полученных методом низкотемпературной адсорбции азота на приборе Sorbi-MS при температуре 77 К и давлении адсорбата 760 мм.рт.ст.

Эксперимент по сорбции ионов меди(II) проводили в статических условиях из водных растворов сульфата меди(II) при перемешивании и термостатировании при 298 К. Кинетику сорбции ионов меди (II) исследовали в условиях ограниченного объема раствора. Концентрацию ионов меди(II) до и после сорбции определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра 210 VGP.

Для построения дифференциальной кривой распределения пор по радиусам для 2-этилимидазолата никеля рассчитывали радиус пор (r , м) по формуле (1) и объем пор единицы массы адсорбента без учета толщины слоя адсорбата до начала конденсации (V , м³/кг) по формуле (2)

$$r = \frac{2 \cdot \sigma \cdot V_m}{RT \cdot \ln \frac{P_s}{P}}, \quad (1)$$

где: σ – поверхностное натяжение конденсата, Дж/м²; V_m – молярный объем конденсата м³/моль; R – универсальная газовая постоянная Дж/моль·К; T – абсолютная температура, К; P_s – давление насыщенного пара адсорбата над плоской поверхностью; P – давление насыщенного пара адсорбата над вогнутой поверхностью.

$$V = a \cdot V_m, \quad (2)$$

где: a – количество адсорбированного вещества, моль/кг; V_m – молярный объем конденсата м³/моль.

Площадь удельной поверхности 2-этилимидазолата никеля вычисляли по методу А.В. Киселева:

$$S_{уд} = \frac{RT}{\sigma} \int_{a_k}^{a_m} \ln \frac{P_s}{P} da \quad (3)$$

где: $\int_{a_k}^{a_m} \ln \frac{P_s}{P} da$ – площадь под десорбционной кривой

изотермы адсорбции, построенной в координатах $\ln P_s/P - a$; a_k и a_m – значения адсорбции, соответствующие началу и концу капиллярной конденсации, моль/кг.

Сорбционную емкость (q_t , мг/г) вычисляли по формуле (4):

$$q_t = \frac{C_0 - C_t}{m} \cdot V, \quad (4)$$

где: C_0 – начальная концентрация ионов меди(II), мг/л; C_t – концентрация ионов меди(II) по истечении заданного времени контакта; m – масса сорбента, г; V – объем раствора, мл.

Степень извлечения (α , %) ионов меди(II) из раствора оценивали по формуле (5):

$$\alpha = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \cdot 100 \quad (5)$$

Обработка кинетических кривых сорбции ионов меди(II) осуществлялась в рамках моделей первого порядка (6) и второго порядка (7):

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - k_1 \tau \quad (6)$$

$$\frac{\tau}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{\tau}{q_e} \quad (7)$$

где: k_1 – константа скорости процесса сорбции по модели первого порядка, мин⁻¹; k_2 – константа скорости процесса сорбции по модели второго порядка, мг·мин·г⁻¹, q_e – сорбционная емкость в момент равновесия, мг/г; q_t – сорбционная емкость в данный момент времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология 2-этилимидазолата никеля представлена на рис. 1. Образец представляет собой микрогетерогенный материал с размерами частиц 0,4-0,7 мкм. Отдельные частицы имеют форму ромбического додекаэдра.

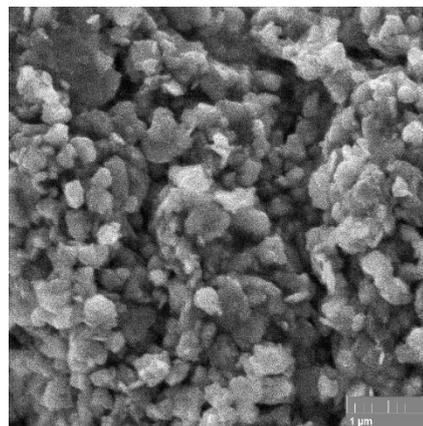


Рис. 1. Микрофотография 2-этилимидазолата никеля. Масштаб: 1 мкм

Fig. 1. SEM- image of nickel 2-ethylimidazolate. Scale is 1 μ m

При обработке изотерм адсорбции азота в линейных координатах ТОЗМ (теории объемного заполнения микропор) установлено, что линейаризация экспериментальных данных наблюдается в координатах $\ln V - \ln P_s/P$, что указывает на преоб-

ладание в структуре 2-этилимидазолата никеля мезопор. Также это подтверждается при построении дифференциальной кривой распределения пор по радиусам (рис. 2).

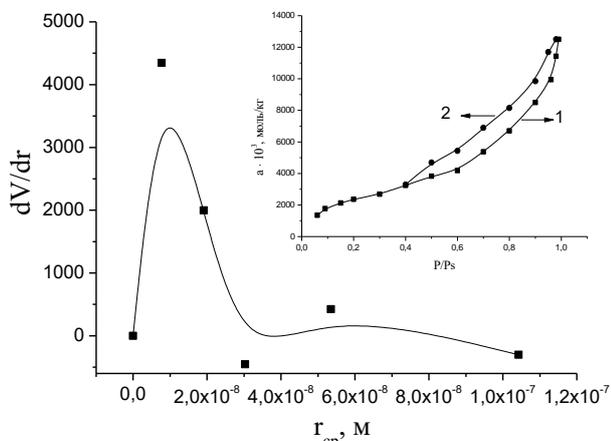


Рис. 2. Дифференциальная кривая распределения пор по радиусам, полученная путем обработки десорбционной ветви (2). Вставка: Изотерма адсорбции азота в порах 2-этилимидазолата никеля

Fig. 2. Differential pore radial distribution curve obtained by processing the desorption branch (2). Insert: nitrogen adsorption isotherm in the pores of nickel 2-ethylimidazolate

Для 2-этилимидазолата никеля характерно наличие мезопор со средним радиусом 7,5 нм. Общий объем пор, полученный из линейных координат ТОЗМ, составляет 0,21 см³/г. Рассчитанная по методу А.В. Киселева (3) площадь удельной поверхности составляет 703,56 м²/г.

Структурная формула полученного 2-этилимидазолата никеля представлена на схеме 1.

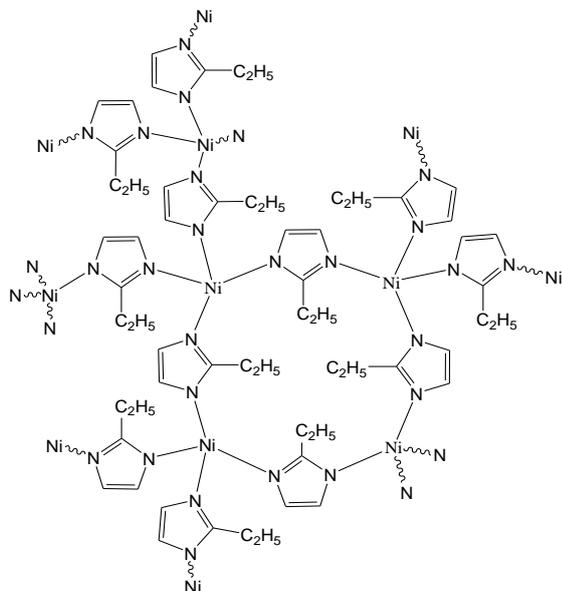


Схема 1. Структурная формула 2-этилимидазолата никеля
Scheme 1. Structural formula of nickel 2-ethylimidazolate

Определена эффективность применения мезопористого 2-этилимидазолата никеля в процессах сорбции ионов Cu(II). По изменению значений сорбционной емкости во времени установлено, что равновесие в системе «2-этилимидазолат никеля – раствор CuSO₄» достигается при времени контакта образца с раствором в интервале 90-120 мин. Следует отметить, что при извлечении тяжелых металлов известными имидазолатными каркасными соединениями, но с иными структурными звеньями, достижение сорбционного равновесия происходит при времени контакта 180-420 мин [16]. Значение степени извлечения для 2-этилимидазолата никеля составляет 92,55%.

Обработка кинетики сорбции ионов меди(II) 2-этилимидазолатом никеля проводилась в координатах первого и второго порядков. Все кинетические параметры определены графически (рис. 3).

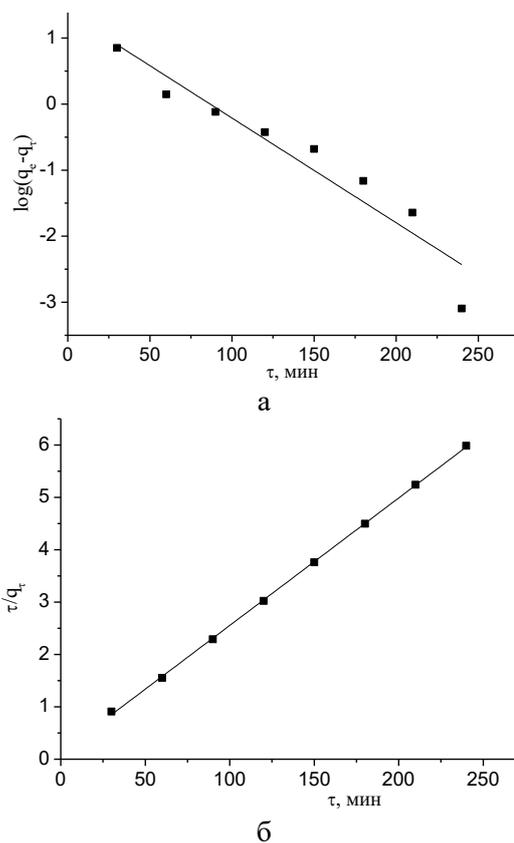


Рис. 3. Обработка кинетики сорбции ионов меди(II) в координатах первого (а) второго порядка (б)
Fig. 3. Processing of the kinetics of sorption of copper (II) ions in coordinates of the first (a) second order (b)

Коэффициенты корреляции в линейных координатах первого и второго порядков равны 0,83 и 0,99 соответственно. То есть, адсорбция ионов меди(II) на поверхности 2-этилимидазолата никеля

лучше всего описывается уравнением второго порядка. Значение равновесной сорбционной емкости q_e , рассчитанное в координатах второго порядка, составляет 36,25 мг/г и является близким к экспериментальному значению (36,06 мг/г). Константа скорости процесса адсорбции ионов меди(II), полученная из линейных координат второго порядка, равна 0,054 г/мг·мин. Таким образом, возможным этапом, определяющим скорость процесса извлечения ионов меди(II) из водного раствора, является обмен электронами между адсорбентом и адсорбатом в ходе протоннообменной Н-Мⁿ⁺ сорбции. Общеизвестным механизмом сорбции ионов тяжелых металлов [16] в порах имидазолатных каркасных соединений состоит в следующем (схема 2): в результате частичного разрушения Ni-N связей и образования групп Ni-OH происходит взаимодействие между адсорбентом и адсорбатом через формирование связи Ni-O-Cu. Также сорбция тяжелых металлов может протекать с участием NH-групп соединения.

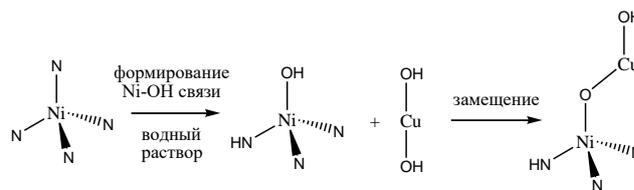


Схема 2. Общий вид потенциального механизма сорбции ионов меди(II) в присутствии 2-этилимидазолат никеля
Scheme 2. Potential sorption mechanism for copper(II) ions in presence of nickel 2-ethylimidazolate

ВЫВОДЫ

Получены сорбционные характеристики процесса извлечения ионов меди(II) из водных растворов для 2-этилимидазолат никеля. Показано, что достижение адсорбционного равновесия происходит при времени контакта сорбента с раствором 90-120 мин. Степень извлечения ионов меди(II) достигает 92,55%. Процесс сорбции ионов меди(II) для 2-этилимидазолат никеля описывается моделью кинетики второго порядка, что указывает на ионообменный характер адсорбции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пугачева И.Н., Карманов А.В., Зуева С.Б., DeMichelis I., Ferella F., Молоканова Л.В., Vegliò F. Удаление тяжелых металлов текстильными отходами на основе целлюлозы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 105-110. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6098.
2. Zhu Q.L., Xu Q. Metal-organic framework composites. *Chem. Soc. Rev.* 2014. V. 43. N 16. P. 5468-5512. DOI: 10.1039/C3CS60472A.
3. Bhattacharjee S., Jang M-S, Kwon H-J. Zeolitic Imidazolate Frameworks: Synthesis, Functionalization, and Catalytic/Adsorption Applications. *Catal. Surv. Asia*. 2014. V. 18. N 4. P. 101-127. DOI: 10.1007/s10563-014-9169-8.
4. Алиева А.Ф., Гусейнов Ф.Э., Эфендиева Н.Т., Шамилов Н.Т., Чырагов Ф.М. Сорбция ионов церия (III) на полимерном хелатообразующем сорбенте. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 8. С. 71-75. DOI: 10.6060/ivkkt.20196208.5898.
5. Kim J., Cho H.Y., Ahn W.S. Synthesis of metal-organic frameworks: A mini review. *Korean J. Chem. Eng.* 2013. V. 30. N 9. P. 1667-1680. DOI: 10.1007/s11814-013-0140-6.
6. Stock N., Biswas S. Synthesis of metal-organic frameworks (MOFs): routes to various MOF topologies, morphologies, and composites. *Chem. Rev.* 2012. V. 112. N 2. P. 933-969. DOI: 10.1021/cr200304e.
7. Курдюмов В.Р., Тимофеев К.Л., Мальцев Г.И. Сорбция ионов никеля (II) на катионите с хелатными группами ими-нодиуксусной кислоты. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 11. С. 63-71. DOI: 10.6060/ivkkt.20196211.5999.
8. Xu G.-R., An Z.-H., Xu K., Liu Q., Das R., Zhao H.-L. Metal organic framework (MOF)-based micro/nanoscaled materials for heavy metal ions removal: The cutting-edge study on designs, synthesis, and applications. *Coord. Chem. Rev.* 2021. V. 427. P. 213554. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213554.

REFERENCES

1. Pugacheva I.N., Karmanov A.V., Zueva S.B., De Michelis I., Ferella F., Molokanova L.V., Vegliò F. Heavy metal removal by cellulose-based textile waste product. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 2. P. 105-110. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6098.
2. Zhu Q.L., Xu Q. Metal-organic framework composites. *Chem. Soc. Rev.* 2014. V. 43. N 16. P. 5468-5512. DOI: 10.1039/C3CS60472A.
3. Bhattacharjee S., Jang M-S, Kwon H-J. Zeolitic Imidazolate Frameworks: Synthesis, Functionalization, and Catalytic/Adsorption Applications. *Catal. Surv. Asia*. 2014. V. 18. N 4. P. 101-127. DOI: 10.1007/s10563-014-9169-8.
4. Alieva A.F., Guseynov F.E., Afandieva N.T., Shamilov N.T., Chyragov F.M. Sorption of Cerium(III) ions onto chelating polymeric sorbent. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 8. P. 71-75. DOI: 10.6060/ivkkt.20196208.5898.
5. Kim J., Cho H.Y., Ahn W.S. Synthesis of metal-organic frameworks: A mini review. *Korean J. Chem. Eng.* 2013. V. 30. N 9. P. 1667-1680. DOI: 10.1007/s11814-013-0140-6.
6. Stock N., Biswas S. Synthesis of metal-organic frameworks (MOFs): routes to various MOF topologies, morphologies, and composites. *Chem. Rev.* 2012. V. 112. N 2. P. 933-969. DOI: 10.1021/cr200304e.
7. Kurdyumov V.R., Timofeev K.L., Maltsev G.I. Sorption of nickel (II) ions by chelating resin with iminodiacetate functionality. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 11. P. 63-71. DOI: 10.6060/ivkkt.20196211.5999.
8. Xu G.-R., An Z.-H., Xu K., Liu Q., Das R., Zhao H.-L. Metal organic framework (MOF)-based micro/nanoscaled materials for heavy metal ions removal: The cutting-edge study on designs, synthesis, and applications. *Coord. Chem. Rev.* 2021. V. 427. P. 213554. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213554.

9. **Cai X., Xie Z., Li D., Kassymova M., Zang S.-Q., Jiang H.-L.** Nano-sized metal-organic frameworks: Synthesis and applications. *Coord. Chem. Rev.* 2020. V. 417. P. 213366. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213366.
10. **Safaei M., Foroughi M.M., Ebrahimpoor N., Jahani S., Omidi A., Khatami M.** A review on metal-organic frameworks: Synthesis and Applications. *TrAC, Trends Analyt. Chem.* 2019. V. 118. P. 401-425. DOI: 10.1016/j.trac.2019.06.007.
11. **Younis S. A., Lim D.-K., Kim K.-H., Deep A.** Metalloporphyrinic metal-organic frameworks: Controlled synthesis for catalytic applications in environmental and biological media. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2020. V. 277. P. 102108. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102108.
12. **Wang Y., Li H.-Z., Li M.-Y., Wang F., Zhang J.** Facile method on the fast synthesis of hybrid zeolitic imidazolate frameworks. *Inorganica Chimica Acta.* 2020. V. 510. P. 119785. DOI: 10.1016/j.ica.2020.119785.
13. **Younis S. A., Bhardwaj N., Bhardwaj S. K., Kim K.-H., Deep A.** Rare earth metal-organic frameworks (RE-MOFs): Synthesis, properties, and biomedical applications. *Coord. Chem. Rev.* 2020. V. 6. P. 213620. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213620.
14. **Xiao T., Liu D.** The most advanced synthesis and a wide range of applications of MOF-74 and its derivatives. *Micropor. Mesopor. Mater.* 2019. V. 283. P. 88-103. DOI: 10.1016/j.micromeso.2019.03.002.
15. **Zhang Y., Jia Y., M. Li, Hou L.** Influence of the 2-methylimidazole/zinc nitrate hexahydrate molar ratio on the synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 crystals at room temperature. *Sci. Rep.* 2018. V. 8. N 1. P. 1–7. DOI: 10.1038/s41598-018-28015-7.
16. **Rasheed T., Ahmad A., Bilal M., Hussain T., Rizwan K.** Metal-organic frameworks based adsorbents: A review from removal perspective of various environmental contaminants from wastewater. *Chemosphere.* 2020. V. 259. P. 127369. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127369.
17. **Gao Q., Xu J., Bu X.H.** Recent advances about metal-organic frameworks in the removal of pollutants from wastewater. *Coord. Chem. Rev.* 2019. V. 378. P. 17–31. DOI: 10.1016/j.ccr.2018.03.015.
18. **Liu B., Jian M., Liu R., Yao J., Zhang X.** Highly efficient removal of arsenic(III) from aqueous solution by zeolitic imidazolate frameworks with different morphology. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2015. V. 481. P. 358–366. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.06.009.
19. **Liu B., Khan A., Kim K., Kukkar D., Zhang M.** The adsorptive removal of lead ions in aquatic media: Performance comparison between advanced functional materials and conventional materials. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2019. P. 1–43. DOI: 10.1080/10643389.2019.1694820.
20. **Liu C., Wang P., Liu X., Yi X., Liu D., Zhou Z.** Ultrafast Removal of Cadmium(II) by Green Cyclodextrin Metal-Organic-Framework-Based Nanoporous Carbon: Adsorption Mechanism and Application. *Chem. Asian J.* 2018. P. 261–268. DOI: 10.1002/asia.201801431.
21. **Shahrak N., Ghahramaninezhad M., Eydifarash M.** Zeolitic imidazolate framework-8 for efficient adsorption and removal of Cr(VI) ions from aqueous solution. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2017. V. 24. N 10. P. 9624–9634. DOI: 10.1007/s11356-017-8577-5.
9. **Cai X., Xie Z., Li D., Kassymova M., Zang S.-Q., Jiang H.-L.** Nano-sized metal-organic frameworks: Synthesis and applications. *Coord. Chem. Rev.* 2020. V. 417. P. 213366. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213366.
10. **Safaei M., Foroughi M.M., Ebrahimpoor N., Jahani S., Omidi A., Khatami M.** A review on metal-organic frameworks: Synthesis and Applications. *TrAC, Trends Analyt. Chem.* 2019. V. 118. P. 401-425. DOI: 10.1016/j.trac.2019.06.007.
11. **Younis S. A., Lim D.-K., Kim K.-H., Deep A.** Metalloporphyrinic metal-organic frameworks: Controlled synthesis for catalytic applications in environmental and biological media. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2020. V. 277. P. 102108. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102108.
12. **Wang Y., Li H.-Z., Li M.-Y., Wang F., Zhang J.** Facile method on the fast synthesis of hybrid zeolitic imidazolate frameworks. *Inorganica Chimica Acta.* 2020. V. 510. P. 119785. DOI: 10.1016/j.ica.2020.119785.
13. **Younis S. A., Bhardwaj N., Bhardwaj S. K., Kim K.-H., Deep A.** Rare earth metal-organic frameworks (RE-MOFs): Synthesis, properties, and biomedical applications. *Coord. Chem. Rev.* 2020. V. 6. P. 213620. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213620.
14. **Xiao T., Liu D.** The most advanced synthesis and a wide range of applications of MOF-74 and its derivatives. *Micropor. Mesopor. Mater.* 2019. V. 283. P. 88-103. DOI: 10.1016/j.micromeso.2019.03.002.
15. **Zhang Y., Jia Y., M. Li, Hou L.** Influence of the 2-methylimidazole/zinc nitrate hexahydrate molar ratio on the synthesis of zeolitic imidazolate framework-8 crystals at room temperature. *Sci. Rep.* 2018. V. 8. N 1. P. 1–7. DOI: 10.1038/s41598-018-28015-7.
16. **Rasheed T., Ahmad A., Bilal M., Hussain T., Rizwan K.** Metal-organic frameworks based adsorbents: A review from removal perspective of various environmental contaminants from wastewater. *Chemosphere.* 2020. V. 259. P. 127369. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127369.
17. **Gao Q., Xu J., Bu X.H.** Recent advances about metal-organic frameworks in the removal of pollutants from wastewater. *Coord. Chem. Rev.* 2019. V. 378. P. 17–31. DOI: 10.1016/j.ccr.2018.03.015.
18. **Liu B., Jian M., Liu R., Yao J., Zhang X.** Highly efficient removal of arsenic(III) from aqueous solution by zeolitic imidazolate frameworks with different morphology. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2015. V. 481. P. 358–366. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2015.06.009.
19. **Liu B., Khan A., Kim K., Kukkar D., Zhang M.** The adsorptive removal of lead ions in aquatic media: Performance comparison between advanced functional materials and conventional materials. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2019. P. 1–43. DOI: 10.1080/10643389.2019.1694820.
20. **Liu C., Wang P., Liu X., Yi X., Liu D., Zhou Z.** Ultrafast Removal of Cadmium(II) by Green Cyclodextrin Metal-Organic-Framework-Based Nanoporous Carbon: Adsorption Mechanism and Application. *Chem. Asian J.* 2018. P. 261–268. DOI: 10.1002/asia.201801431.
21. **Shahrak N., Ghahramaninezhad M., Eydifarash M.** Zeolitic imidazolate framework-8 for efficient adsorption and removal of Cr(VI) ions from aqueous solution. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2017. V. 24. N 10. P. 9624–9634. DOI: 10.1007/s11356-017-8577-5.

Поступила в редакцию 17.12.2020
Принята к опубликованию 30.03.2021

Received 17.12.2020
Accepted 30.03.2021