

УДК 661.183.6

Краткое сообщение

Сорбционная очистка растворов синтетическими цеолитами

С.А. Бибанаева, В.М. Скачков, Н.А. Сабирзянов

*ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»
620108, Россия, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91
bibanaeva@mail.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.584

Аннотация: Работа посвящена изучению возможности применения синтетических цеолитов, нанодисперсного гидроксиапатита и механоактивированной смеси гидроксиапатит-цеолит в соотношении 1:1 в качестве сорбентов ионов хрома и никеля из кислых водных растворов. Изучен химический качественный и количественный состав, морфология исходных реагентов и полученных растворов. Установлено, что синтетический цеолит и смесь гидроксиапатит-цеолит проявляют высокую сорбционную активность и сорбционную емкость в отношении ионов хрома (степень извлечения 99,96%), при этом нанодисперсный гидроксиапатит позволяет получить степень извлечения 98,73. При сорбции никеля из раствора показано, что максимальная степень извлечения достигается при использовании сорбента гидроксиапатит-цеолит (63,83%). Проведенные исследования позволяют рекомендовать полученные образцы для применения в качестве сорбентов для очистки промышленных сточных растворов от токсичных примесей, а также для дальнейших исследований с целью применения его не только для извлечения различных ионов из водных растворов, но и применения в различных отраслях.

Ключевые слова: очистка, синтетический цеолит, гидроксиапатит, сорбция, тяжелые металлы, алюмосиликат, никель, хром.

1. Введение

Поиск новых методов и внедрение малоотходных и безотходных технологий и процессов, повышение качества очистки газообразных выбросов и сточных вод, внедрение замкнутых производственных циклов – вот пути снижения экологической нагрузки на окружающую среду. Среди опасных загрязнителей сточных вод заслуживают пристального внимания хром и никель.

Никель и хром находят широкое применение во многих отраслях промышленности, вследствие чего часто присутствует в сточных водах и попадают в природные водные объекты. Они относятся к группе тяжелых металлов, характеризуются канцерогенным и мутагенным действием. Способны вызывать аллергические реакции у человека, обладают общетоксическим действием для живых организмов.

Для удаления тяжелых металлов из сточных вод были разработаны физические, химические и биологические методы.

Распространенным способом селективного извлечения никеля из промышленных растворов является сорбция на смолах [1].

Использование в качестве коагулянта хлорида железа (III) позволяет очищать загрязнённые растворы не только от нерастворимых грубодисперсных и коллоидных примесей, но также и от присутствующих

в них ионов никеля [2].

Недорогой, эффективный и безопасный метод удаления тяжелых металлов из водных растворов, основанный на окислении-коагуляции-адсорбции при оптимизированном pH показывает положительные результаты и в отношении никеля и хрома [3].

Биоуголь, который является побочным продуктом пиролиза биомассы, обладает множеством физико-химических свойств, облегчающих адсорбцию и фиксацию тяжелых металлов из воды, используемой в качестве адсорбента. Микро- и нанопоры, ароматические структуры, центры поверхностной адсорбции и ионы биоугля проявляют сильную способность к адсорбции тяжелых металлов [4, 5].

Альтернативой химической коагуляции является электрокоагуляция, которая оказалась эффективным методом осаждения загрязнителей промышленных сточных вод [6, 7, 8, 9, 10].

Еще одним из эффективных способов очистки растворов от тяжелых металлов является применение растительных сорбентов, таких как картофельные очистки [11].

Несмотря на то, что задокументирован ряд методов очистки сточных вод, адсорбция по-прежнему является простым, адаптируемым, практичным, нечувствительным к вредным веществам подходом и коммерчески жизнеспособным.

Таким образом, целью данной работы было продолжение исследований сорбционных свойств моно- и композиционных сорбентов на основе синтетических алюмосиликатных цеолитов и наноразмерного гидроксиапатита $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, полученного осаждением из раствора [12].

2. Материалы и методы

Для эксперимента в качестве фильтра для очистки кислых растворов от примесей тяжелых металлов применяли синтезированный алюмосиликатный цеолит состава % масс.: Na – 11,6, Al – 25,8, Si – 24,2, Ca – 38,3, наноразмерный гидроксиапатит (ГАП) $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, (площадь удельной поверхности S_{red} – 98,8 м²/г; плотность ρ – 2,93 г/см³; средний диаметр частиц $d_{cal} \sim 20$ нм, полученный методом осаждения из раствора, а также механоактивированная смесь цеолита и ГАП в соотношении 1:1 (см. рис. 1). Сильнокислые водные растворы, содержащие катионы металлов никеля в количестве 69 мг/л и хрома в количестве 261 мг/л. Очистку растворов от примесей проводили в воронке с металлическими вкладками, между которыми была помещена навеска цеолита. Навеску сорбента массой 5 г. заливали раствором объемом 50 мл

(опыт 1). Фильтрацию проводили при температуре 25°C, атмосферном давлении до полного просачивания раствора через фильтр. Раствор отбирали на анализ и определяли содержание примесей. Далее эту же навеску заливали еще 50 мл раствора (опыт 2). Навеску сушили, раствор отбирали для определения содержания примесей. Эффективность сорбции оценивали по изменению содержания примесей в исходном и отфильтрованном растворе титриметрическим способом, а также по изменению pH раствора.

Полученные продукты взаимодействия исследовались различными физико-химическими методами:

- определение фазового состава – рентгенофазовый анализ (Shimadzu XRD 700);

- исследование морфологии – сканирующая электронная микроскопия на микроскопе Tescan Vega Compact (коэффициент увеличения от $\times 2$ до $\times 1000000$);

- подтверждение соответствия состава образцов заданной стехиометрии – энергодисперсионный рентгеновский анализ с использованием анализатора EX-23010BU;

- химический количественный анализ растворов - масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой (Spectromass 2000);

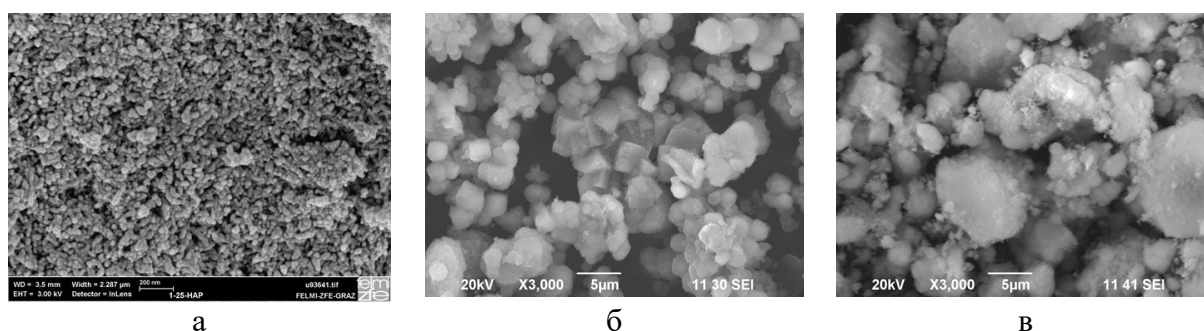


Рис. 1. СЭМ изображение сорбентов; а – наноразмерный гидроксиапатит – $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, б – синтетический цеолит, в – механоактивированная смесь цеолита и ГАП.

3. Результаты и обсуждение

В литературе описаны способы сорбции тяжелых металлов посредством природных цеолитов [13], а также гидроксиапатитов [14].

Ранее нами были проведены исследования по изучению сорбционных свойств синтетических цеолитов и ГАП в водных растворах в отношении меди, железа и цинка [15, 16].

В продолжении работы были проведены исследования сорбционных свойств синтетических цеолитов, ГАП и механоактивированной смеси ГАП-цеолит (см. рис. 1) в кислых растворах в отношении Cr^{3+} и Ni^{2+} .

Химический состав растворов после сорбции указан в Таблице 1 и Таблице 2. Показано, что все образцы сорбентов имеют высокую сорбционную активность и емкость при сорбции хрома. При проведении сорбции синтетическим цеолитом степень извлечения после опыта 1 достигла 99,84%, при этом в растворе зафиксировано увеличение содержания ионов кальция, алюминия и натрия, а также увеличения значения pH с 1,37 до 8,1 (см. Таблицу 3). После опыта 2 степень извлечения составила 99,96%, увеличилось содержание кальция и натрия, а также значение $pH = 7,91$.

Таблица 1. Химический состав растворов после сорбции хрома.

Раствор	Элемент, мг/л					Степень извлечения, %
	Cr^{3+}	Ca^{2+}	Al^{3+}	Na^{+}	P^{5+}	
Исх. раствор	261,4	<0,1	4,4	0,4	1,6	–
Цеолит – опыт 1	0,4	72	100	560	2,4	99,84
Цеолит – опыт 2	0,1	445,5	~10	280	0,5	99,96
ГАП – опыт 1	26,1	556,7	<0,1	2,5	83,5	90,0
ГАП – опыт 2	3,3	961,6	<0,1	8	143,6	98,73
ГАП–цеолит – опыт 1	0,3	257,6	1,4	440	<0,1	99,88
ГАП–цеолит – опыт 2	<0,1	621,1	<0,03	95	<0,1	99,96

Таблица 2. Химический состав растворов после сорбции никеля.

Раствор	Элемент, мг/л					Степень извлечения, %
	Ni^{2+}	Ca^{2+}	Al^{3+}	Na^{+}	P^{5+}	
Исх. раствор	69,4	<0,1	3,3	0,5	2,8	-
Цеолит – опыт 1	57,6	259,9	90,8	378,7	7,7	17,0
Цеолит – опыт 2	44,9	681,2	82,9	551,7	8,8	35,3
ГАП – опыт 1	57,7	1294	15	3,5	54,1	16,85
ГАП – опыт 2	65	670,5	0,1	2,2	463,7	6,34
ГАП–цеолит – опыт 1	25,1	905,8	0,6	458,7	8,8	63,83
ГАП–цеолит – опыт 2	42,9	846,3	<0,1	186,6	13,2	38,18

Сорбция хрома с использованием ГАП после опыта 1 характеризуется повышением содержания в растворе кальция и фосфора, степень извлечения 90%, при этом значение pH изменилось с 1,37 до 3,31. После опыта 2 значительно увеличилось содержание в растворе кальция и фосфора, степень извлечения достигла 98,73%, а значение $pH = 4,22$. Сложносоставный сорбент ГАП-цеолит позволил получить растворы после сорбции с содержанием хрома менее 0,1мг/г, что соответствует степени извлечения 99,96%. После опыта 1 в растворе также сильно повышается содержание кальция и натрия, при этом значение $pH = 8,03$, а после опыта 2 значительно увеличивается содержание кальция при незначительном увеличении натрия, при этом фосфор в растворе практически отсутствует,

значение $pH = 7,46$.

При контакте сорбента с сильноокислым раствором происходит взаимодействие, при котором часть кальция и натрия из цеолита переходят в раствор, происходит нейтрализация раствора и повышение pH , при этом снижение содержания хрома в растворе может говорить об ионообменном характере процесса сорбции хрома.

При сорбции никеля из сильноокислого раствора $pH = 0,85$ (см. Таблицу 4) лучшие показатели сорбции показал сорбент ГАП-цеолит со степенью извлечения 63,83%. Что касается моносорбентов синтетического цеолита и ГАП, то они показали низкие показатели сорбции со степенью извлечения 35,3% и 16,85% соответственно.

Таблица 3. Изменение pH растворов после сорбции хрома.

	Цеолит	ГАП	ГАП-цеолит
исх. раствор	1,37	1,37	1,37
опыт 1	8,1	3,31	8,03
опыт 2	7,91	4,22	7,46

Таблица 4. Изменение pH растворов после сорбции никеля.

	Цеолит	ГАП	ГАП-цеолит
исх. раствор	0,85	0,85	0,85
опыт 1	1,26	1,36	7,62
опыт 2	1,8	1,0	5,62

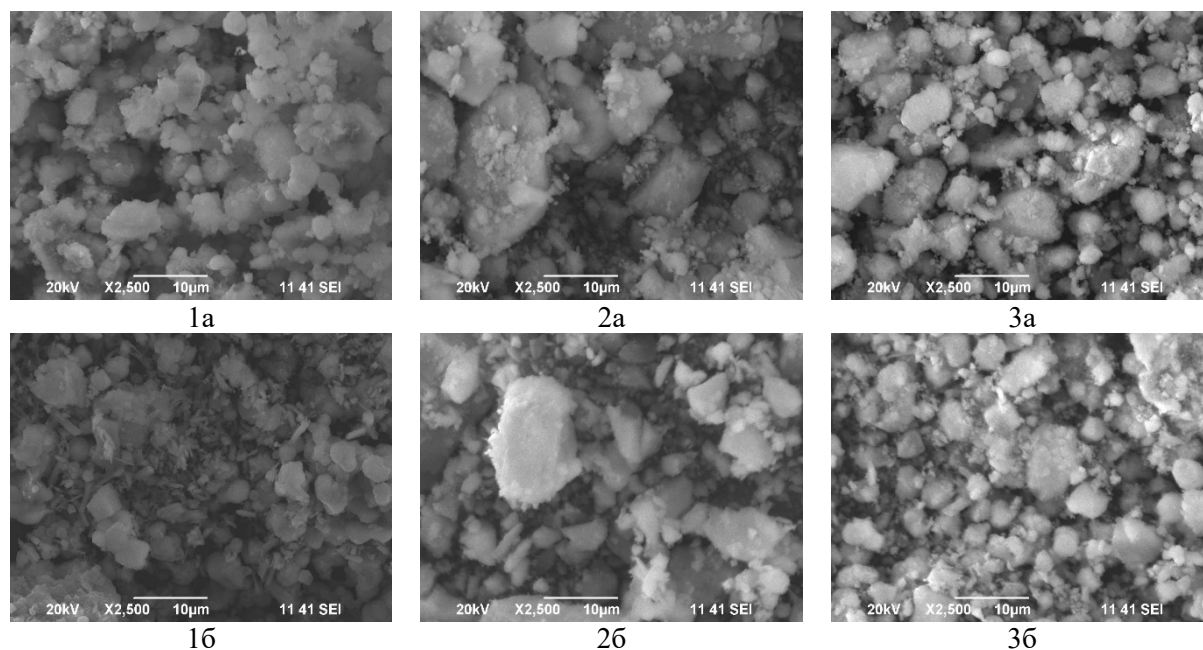


Рис. 2. СЭМ изображение сорбентов после сорбции. 1 – синтетический цеолит, 2 – наноразмерный гидроксиапатит – $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$, 3 – механоактивированная смесь цеолита и ГАП; а – после сорбции хрома, б – после сорбции никеля. Увеличение $\times 2500$ раз.

Особенности ионообменных свойств цеолитов связаны со строением

их кристаллической решетки и распределением обменных катионов по различным возможным позициям в каналах или полостях разнообразных кристаллических структур, при этом, при совместном использовании ГАП-цеолит в качестве сорбента наблюдается синергетический эффект(повышается степень извлечения и емкость сорбента), природу которого предстоит еще выяснить авторам.

4. Заключение

Селективность по отношению к отдельным катионам, которую проявляют цеолиты, не укладывается в рамки закономерностей, установленных для других неорганических и органических ионообменников. Специфический характер ионообменных процессов на цеолитах (селективность по отношению к отдельным катионам, наличие ситового эффекта) обусловлен особенностями их кристаллической структуры. Проведенные исследования по изучению сорбционных свойств синтетического цеолита, ГАП и комплексного сорбента $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ –цеолит позволяют рекомендовать их как сорбенты широкого спектра применения, а в частности для очистки водных растворов от примесей хрома.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием и планами НИР ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН».

Библиографический список:

1. Тимофеев, К.Л. Сорбционная очистка никелевых растворов от металлов-примесей / К.Л. Тимофеев, С.А. Краюхин, Г.И. Мальцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 157-165. DOI: 10.14529/met160123.
2. Линников, О.Д. Очистка растворов от ионов никеля при использовании в качестве коагулянта хлорида железа(III) / О.Д. Линников, И.В. Родина // Российский химический журнал. – 2021. – Т. 65. – №2. – С. 83-89. DOI: 10.6060/rcj.2021652.7.
3. Bora, A.J. Removal of metals (Pb, Cd, Cu, Cr, Ni, and Co) from drinking water by oxidation-coagulation-absorption at optimized pH / A.J. Bora, R.K. Dutta // Journal of Water Process Engineering. – 2019. – V. 31. – Art. № 100839. – 9 p. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100839.
4. Ye, Q. Removal of heavy metals from wastewater using biochars: adsorption and mechanisms / Q. Ye, Q. Li, X. Li // Environmental Pollutants and Bioavailability. – 2022. – V. 34. – I. 1. – P. 385-394. DOI: 10.1080/26395940.2022.2120542.
5. Kobya, M. Removal of Cr (VI) from aqueous solutions by adsorption onto hazelnut shell activated carbon: kinetic and equilibrium studies / M.Kobya // Bioresource Technology. – 2004. – V. 91. – I. 3. – P. 317-321. DOI: 10.1016/j.biortech.2003.07.001.
6. Al-Shannag, M. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: kinetic study and process performance / M. Al-Shannag, Z. Al-Qodah, K. Bani-Melhem et al. // Chemical Engineering Journal. – 2015. –V. 260. – P. 749-756. DOI: 10.1016/j.cej.2014.09.035.
7. Dermentzis, K. Nickel removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum electrodes / K. Dermentzis, E. Valsamidou, A. Lazaridou, N. Kokkinos // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 2011. –V. 4. – I. 2. –P. 188-192. DOI: 10.25103/JESTR.042.12.
8. Kim, T. Removal mechanism of heavy metal (Cu, Ni, Zn, and Cr) in the presence of cyanide during electrocoagulation using Fe and Al electrodes / T. Kim, T-K. Kim, K-D. Zoh // Journal of Water Process Engineering. – 2020. –V. 33. – Art. № 101109. – 9 p. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.101109.
9. Narayanan, N.V. Use of adsorption using granular activated carbon (GAC) for the enhancement of removal

- of chromium from synthetic wastewater by electrocoagulation / N.V. Narayanan, M. Ganesan // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. –V. 161. – I. 1. – P. 575-580. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.113.
10. **Ait Ouaisa, Y.** Removal of Cr (VI) from model solutions by a combined electrocoagulation sorption process/ Y. Ait Ouaisa, M. Chabani, A. Amrane, A. Bensmaili // *Chemical Engineering and Technology*. – 2013. –V. 36. – I. 1. – P. 147-155. DOI: 10.1002/ceat.201200375.
11. **Mutongo, F.** Removal of Cr (VI) from aqueous solutions using powder of potato peelings as a low cost sorbent / F. Mutongo, O. Kuipa, P.K. Kuipa // *Bioinorganic Chemistry and Applications*. – 2014. –V. 2014. – I. 1. – 7 p. DOI: 10.1155/2014/973153.
12. **Bogdanova, E.A.** Formation of nanodimensional structures in precipitated hydroxyapatite by fluorine substitution / E.A. Bogdanova, V.M. Skachkov, I.S. Medyankina et al. // *SN Applied Sciences*. – 2020. – V. 2. – I. 9. – Art. № 1565. – 7 p. DOI: 10.1007/s42452-020-03388-5.
13. **Velarde, L.** Adsorption of heavy metals on natural zeolites: a review/ L. Velarde, M.S. Nabavi, E. Escalera et al. // *Chemosphere*. – 2023. –V. 328. – Art. № 138508. – 16 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138508.
14. **Ain, Q.U.** Facile fabrication of hydroxyapatite-magnetite-bentonite composite for efficient adsorption of Pb (II), Cd (II), and crystal violet from aqueous solution/ Q.U. Ain, H. Zhang, M. Yaseen et al. // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. –V. 247. – Art. № 119088. – 52 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119088.
15. **Бибанаева, С.А.** Сорбция тяжелых металлов из водных растворов синтетическими цеолитами / С.А. Бибанаева, В.М. Скачков // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2023. – Вып. 15. – С. 924-929. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.924.
16. **Бибанаева, С.А.** Синтез и исследование функциональных характеристик композиционных материалов на основе наноразмерного гидроксиапатита и синтетических цеолитов / С.А. Бибанаева, Е.А. Богданова, В.М. Скачков // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2023. – Вып. 15. – С.913-923. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.913.

References:

1. Timofeev K.L., Krayukhin S.A., Mal'tsev G.I. Sorbtionnaya ochistka nikel'nykh rastvorov ot metallov-primesej [Sorption purification of nickel solutions of metal impurities], *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»* [South Ural State University Bulletin. Series «Metallurgy»], 2016, vol. 16, no. 1, pp. 157-165. DOI: 10.14529/met160123. (In Russian).
2. Linnikov O.D., Rodina I.V. Ochistka rastvorov ot ionov nikelya pri ispol'zovanii v kachestve koagulyanta khlorida zheleza(III) [Purification of solutions from nickel ions using iron(III) chloride as a coagulant], *Rossiiskij khimicheskij zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2021, vol. 65, no.2, pp. 83-89. DOI: 10.6060/rcj.2021652.7. (In Russian).
3. Bora A.J., Dutta R.K. Removal of metals (Pb, Cd, Cu, Cr, Ni, and Co) from drinking water by oxidation-coagulation-absorption at optimized pH, *Journal of Water Process Engineering*, 2019, vol. 31, art. no. 100839, 9 p. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100839.
4. Ye Q., Li Q., Li X. Removal of heavy metals from wastewater using biochars: adsorption and mechanisms, *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 2022, vol. 34, issue 1, pp. 385-394. DOI: 10.1080/26395940.2022.2120542.
5. Kobya M. Removal of Cr (VI) from aqueous solutions by adsorption onto hazelnut shell activated carbon: kinetic and equilibrium studies, *Bioresource Technology*, 2004, vol. 91, issue. 3, pp. 317-321. DOI: 10.1016/j.biortech.2003.07.001.
6. Al-Shannag M., Al-Qodah Z., Bani-Melhem K. et al. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: kinetic study and process performance, *Chemical Engineering Journal*, 2015, vol. 260, pp. 749-756. DOI: 10.1016/j.cej.2014.09.035.
7. Dermentzis K., Valsamidou E., Lazaridou A., Kokkinos N. Nickel removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum electrodes, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2011, vol. 4, issue. 2, pp. 188-192. DOI: 10.25103/JESTR.042.12.
8. Kim T., Kim T-K., Zoh K-D. Removal mechanism of heavy metal (Cu, Ni, Zn, and Cr) in the presence of cyanide during electrocoagulation using Fe and Al electrodes, *Journal of Water Process Engineering*, 2020, vol. 33, art. no.101109, 9 p. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.101109.
9. Narayanan N.V., Ganesan M. Use of adsorption using granular activated carbon (GAC) for the enhancement of removal of chromium from synthetic wastewater by electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 161, issue 1, pp. 575-580. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.113.
10. Ait Ouaisa Y., Chabani M., Amrane A., Bensmaili A. Removal of Cr (VI) from model solutions by a combined electrocoagulation sorption process, *Chemical Engineering & Technology*, 2013, vol. 36, issue 1, pp. 147-155. DOI: 10.1002/ceat.201200375.

11. Mutongo F., Kuipa O., Kuipa P.K. Removal of Cr (VI) from aqueous solutions using powder of potato peelings as a low cost sorbent, *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2014, vol. 2014, issue 1, 7 p. DOI: 10.1155/2014/973153.
12. Bogdanova E.A., Skachkov V.M., Medyankina I.S. et al. Formation of nanodimensional structures in precipitated hydroxyapatite by fluorine substitution, *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, issue 9, art. no. 1565, 7 p. DOI: 10.1007/s42452-020-03388-5.
13. Velarde L., Nabavi M.S., Escalera E. et al. Adsorption of heavy metals on natural zeolites: a review, *Chemosphere*, 2023, vol. 328, art. no. 138508, 16 p. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138508.
14. Ain Q.U., Zhang H., Yaseen M. et al. Facile fabrication of hydroxyapatite-magnetite-bentonite composite for efficient adsorption of Pb (II), Cd (II), and crystal violet from aqueous solution, *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 247, art. no. 119088, 52 p. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.119088.
15. Bibanaeva S.A., Skachkov V.M. Sorbtsiya tyazhelykh metallov iz vodnykh rastvorov sinteticheskimi tseolitami [Sorption of heavy metals from aqueous solutions with synthetic zeolites], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue.15, pp. 924-929. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.924. (In Russian).
16. Bibanaeva S.A., Bogdanova E.A., Skachkov V.M. Sintez i issledovanie funktsional'nykh kharakteristik kompozitsionnykh materialov na osnove nanorazmernogo gidroksiapatita i sinteticheskikh tseolitov [Synthesis and investigation of functional characteristics of composite materials based on nanoscale hydroxyapatite and synthetic zeolites], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue.15, pp.913-923. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.913. (In Russian).

Short Communication

Sorption purification of solutions with synthetic zeolites

S.A. Bibanaeva, V.M. Skachkov, N.A. Sabirzyanov

Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.584

Abstract: The work is devoted to studying the possibility of using synthetic zeolites (nanodispersed hydroxyapatite and mechanically activated hydroxyapatite-zeolite mixture in a ratio of 1:1) as sorbents of chromium and nickel ions from the acidic aqueous solutions. The chemical qualitative and quantitative composition, morphology of the initial reagents and the obtained solutions were studied. It was found that the synthetic zeolite and the hydroxyapatite-zeolite mixture exhibit high sorption activity and sorption capacity with respect to chromium ions (the extraction degree of 99,96%), while nanodispersed hydroxyapatite allows obtaining the extraction degree of 98,73. As for the sorption of nickel from a solution, it was shown that the maximum extraction degree is achieved using the hydroxyapatite-zeolite sorbent (63,83%). The conducted studies allow us to recommend the obtained samples for use as sorbents for cleaning industrial waste solutions from toxic impurities, as well as for further studies with the aim of introducing it not only for the extraction of various ions from aqueous solutions, but also for use in various industries.

Keywords: *purification, synthetic zeolite, hydroxyapatite, sorption, heavy metals, aluminosilicate, nickel, chromium.*

Бибанаева Светлана Александровна – научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

Скачков Владимир Михайлович – к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

Сабирзянов Наиль Аделевич – д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории химии гетерогенных процессов, ФГБУН «Институт химии твердого тела Уральского отделения РАН»

Svetlana A. Bibanaeva – Researcher, Laboratory of Heterogeneous Processes in Chemistry, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS

Vladimir M. Skachkov – Ph.D., Senior Researcher, Laboratory of Heterogeneous Processes in Chemistry, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS

Nail A. Sabirzyanov – D. Sc., Chief Researcher, Laboratory of Heterogeneous Processes in Chemistry, Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS

Поступила в редакцию/received: 30.08.2024; после рецензирования/revised: 25.09.2024; принята/accepted 29.09.2024.