

УДК 544.723.212

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.27

ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО СОРБЕНТУ ЦЕОЛІТ-ГУМІНОВІ КИСЛОТИ ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ ІОНІВ МІДІ З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

О. П. ХОХОТВА^{1*}, О. І. КОНДРАТЕНКО¹, К. О. ШКЕЛЬ²

¹ Кафедра екології та технології рослинних полімерів, інженерно-хімічний факультет, Національний технічний університет України "КПІ", Київ, УКРАЇНА

² Кафедра кафедра екобіотехнології та біоенергетики, факультет біотехнології і біотехніки, Національний технічний університет України "КПІ", Київ, УКРАЇНА

*email: khokhotva@bigmir.net

АНОТАЦІЯ Отримано композиційний сорбент шляхом осадження гумінових кислот на цеоліті. Досліджено вплив концентрації гуматів при синтезі сорбенту на ефективність вилучення іонів міді. Кінетика сорбції іонів міді на композиційному сорбенті і необробленому цеоліті описується рівняннями псевдо-першого і псевдо-другого порядків. Лімітуючою стадією сорбційного процесу є дифузія всередині зерен сорбентів. Покращення сорбційних властивостей відбуваються за рахунок гумінових кислот, осаджених у макропорах.

Ключові слова: цеоліти, гумінові кислоти, композиційний сорбент, сорбція, важкі метали, кінетика, дифузія, модель Вебера-Морріса.

THE APPLICATION OF COMPOSITE SORBENT ZEOLITE-HUMIC ACIDS FOR THE REMOVAL OF COPPER IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS

О. П. ХОХОТВА^{1*}, О. І. КОНДРАТЕНКО¹, К. ШКЕЛЬ²

¹ Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Faculty of Chemical Engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

² Department of Environmental Biotechnology and Bioenergy, Faculty of Biotechnology and Biotechnics, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Zeolite is a natural aluminosilicate material widely used as an inorganic ion-exchanger but having relatively low sorption capacity to heavy metal ions. The authors tried to improve its sorption properties via impregnation by humic acids solution. Humic acids themselves can bind metal ions in complexes but their application in pure form is not practical as they are in colloid form. The composite sorbent was obtained in the result of sorption of humates by zeolite at pH 9.5 followed by precipitation in acidic conditions. A range of concentrations of humates used for sorbent synthesis – 100-200 mg/dm³ - was determined for maximal removal of copper ions from model metal solutions. The lower concentrations did not provide a significant amount of active sites with a good affinity to heavy metals. The higher concentrations resulted in the worsening of copper sorption due to the filling of pore volume by humic acids and the reduction of sorption surface area. The application of composite sorbent provided 20% lower residual copper concentration compared to non-treated zeolite at sorption from 60 mg/l metal solution. Sorption process followed pseudo-first (Lagergren) and pseudo-second kinetic models. Calculated specific sorption values were close to experimental numbers. As defined from Weber-Morris diffusion model, the sorption process was limited by intraparticle diffusion. The improved sorption capacity could be attributed to humic acids were precipitated in macropores and provided additional sorption sites. Humic acids due to their large size did not penetrate to micropores of zeolite that's why diffusion coefficients for non-treated and modified sorption materials were equal.

Keywords: zeolites, humic acids, composite sorbent, sorption, heavy metals, kinetics, diffusion, Weber-Morris model.

Вступ

Процеси сорбції широко використовуються в різних галузях промисловості, в тому числі в очищенні стічних вод. Одним з найбільш поширених забруднювачів навколишнього середовища є іони важких металів, які надходять у природні води разом з недостатньо очищеними стічними водами гальванічних цехів, підприємств гірничодобувної промисловості, чорної і кольорової металургії, машинобудівних заводів. Особливий інтерес представляють недорогі і ефективні способи

очищення вод, засновані на використанні відходів промисловості, місцевої сировини і мінералів як сорбентів.

Природні мінеральні сорбенти, завдяки адсорбційним та іонообмінним властивостям, є перспективними для використання у різних галузях промисловості і, зокрема, у охороні навколишнього середовища. Цеоліт є природним алюмосилікатом каркасної будови [1, 2], має ряд унікальних властивостей – здатність до катіонного обміну, ситові властивості, висока хімічна і термічна стабільність, які використовують у процесах водоочистки.

© О. П. ХОХОТВА, О. І. КОНДРАТЕНКО, К. О. ШКЕЛЬ, 2016

Очищення вод від іонів важких металів найбільш ефективна і рентабельна при використанні сорбційних методів і матеріалів [3-7], таких як природні цеоліти різних типів, зокрема, клиноптилоліт.

Одним з методів поліпшення сорбційних властивостей природних адсорбентів є хімічна активація. Найбільш поширеними методами є модифікація алюмосилікатів кислотами й лугами [8-10]. Модифікацією поверхні природних цеолітів хітозаном та фероціанідами міді можна отримати сорбенти, що мають вищу селективність до окремих груп забруднюючих речовин, таких як, барвники, іони важких металів [11].

Гумінові кислоти (ГК) відносяться до складних природних сполук і є групою природних аморфних високомолекулярних органічних кислот, схожих за своєю будовою, які мають відмінності в залежності від типу вихідної сировини [12]. Один з основних напрямків використання гумінових кислот – застосування їх як сорбентів. У роботах [13-17] досліджена сорбція катіонів металів Cu^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Pb^{2+} з водних розчинів гуміновими речовинами, виділеними з бурого вугілля і торфу. Здатність гумінових кислот до іонного обміну і комплексоутворення створює широкі перспективи для поділу і вилучення катіонів металів з різних середовищ, очищення стічних вод.

Мета роботи

Одним з недоліків практичного використання гумінових кислот є складність їх відділення від очищеної води, тому у даній роботі був створений новий композиційний сорбент, який поєднує у собі переваги цеоліту (пориста структура, сорбційні властивості і доступність) і гумінових кислот (висока хімічна активність до іонів важких металів, широка сировинна база).

Метою роботи було дослідження сорбційних властивостей отриманого композиційного сорбенту цеоліт-гумінові кислоти.

Методика експерименту

Як об'єкти дослідження використовувалися гумінові кислоти, отримані екстракцією з торфу водним розчином NaOH , і цеоліт Сокирницького родовища фракції 3-5 мм.

Обробку цеоліту гуміновими кислотами проводили за наступною методикою: наважку цеоліту 10 г поміщали у 100 мл суспензії гуматів з концентрацією 10-500 мг/дм^3 при рН 9,5, витримували 24 години, після чого осаджували гумінові кислоти підкисленням розчином HCl до рН 4 з наступним промиванням отриманого модифікованого цеоліту і висушуванням на повітрі.

Сорбційну здатність отриманих зразків оцінювали по ефективності вилучення іонів Cu^{2+} з

розчинів 32,5 мг/дм^3 (рН 5) об'ємом 100 см^3 наважками сорбентів по 2 г протягом 1 год.

Дослідження з кінетики сорбції проводилися з розчинів Cu^{2+} з концентрацією 60 мг/дм^3 на наважках необробленого (НОЦ) обробленого і модифікованого гуміновими кислотами (Ц-ГК) цеоліти по 1 г.

Обговорення результатів

Залежність ефективності видалення іонів міді від концентрації гуматів, взятих для модифікації цеоліту, показана на рис. 1. За своїми іонообмінними властивостями гумінові кислоти близькі до слабокислотних катіонітів. Сорбційні властивості гумінових кислот, обумовлені наявністю іонообмінних карбоксильних груп і фенольних гидроксилів, залежать від рН середовища і природи кислот. Наявність в структурі гумінових кислот таких електрондонорних функціональних груп як >C=O , -COOH , -C-OH , Ar-OH , =N-H , \equiv N та ін. в різних поєднаннях і вільних орбіталей у сорбованих катіонів металів повинні сприяти утворенню комплексних сполук в процесі сорбції.

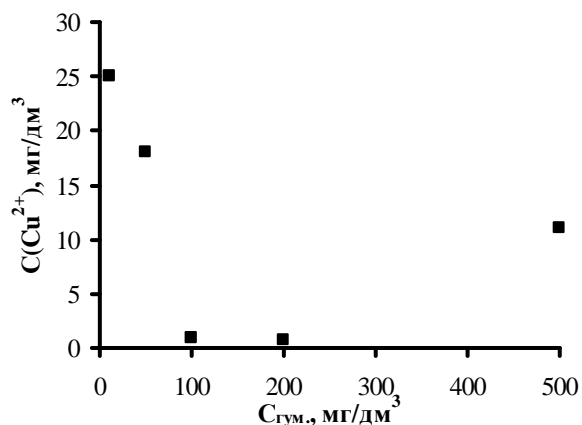


Рис. 1 – Залежність залишкової концентрації Cu^{2+} від концентрації гуматів при модифікації цеоліту

При сорбції катіонів металів гуміновими кислотами можливі наступні механізми: іонний обмін; комплексоутворення з електрондонорними функціональними групами; комплексоутворення з утворенням зв'язку Me^{z+} -гумінові кислоти за рахунок наявності на поверхні вільних π -електронів; реакції відновлення катіонів металів до елементарної форми. Існує припущення, що катіони металів взаємодіють з гуміновими кислотами за першим і другим механізмом [18, 19]. Крім реакцій іонного обміну за рахунок водню карбоксильних груп і фенольних гидроксилів, при яких утворюються розчинні і нерозчинні гумати металів, можливо одночасне протікання реакцій, що ведуть до утворення комплексних сполук.

При низьких концентраціях гуматів на поверхні цеоліту і у макропорах їх осідає невелика

кількість, тому ефективність вилучення іонів міді мала, яка зростає з підвищенням концентрації гуматів до певної межі – 100-200 мг/дм³. Подальший ріст концентрації модифікуючого розчину веде до росту залишкової концентрації міді, очевидно, в результаті різкого зменшення питомої сорбційної поверхні внаслідок заповнення макропор гуміновими кислотами.

Такі характеристики поглиначів, як сорбційна ємність, селективність, комплексоутворюючі властивості, мають важливе практичне і теоретичне значення. Для розуміння механізмів протікання процесу адсорбції необхідно знати його лімітуючу стадію. Кінетичні дослідження процесів вилучення і поглинання дозволяють визначити час, необхідний для досягнення адсорбційної рівноваги "адсорбент-адсорбат".

На рис. 2 показані залежності сорбції Cu²⁺ від часу на цеоліті до і після обробки його гуміновими кислотами.

Отримані дані були проаналізовані, використовуючи кінетичні моделі псевдо-першого, псевдо-другого порядків та дифузійної моделі Вебера-Морріса.

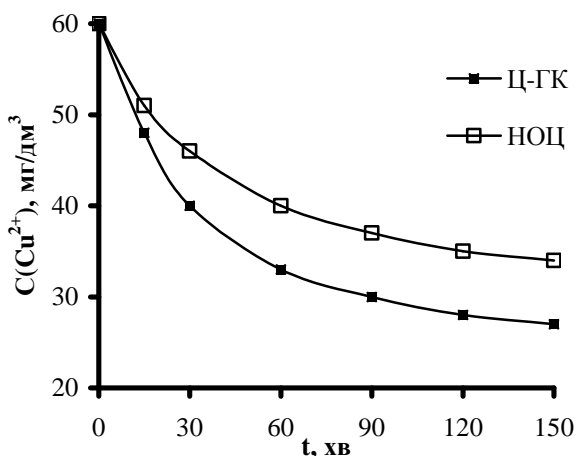


Рис. 2 – Зміна концентрації Cu²⁺ від часу сорбції обробленим (Ц-ГК) і не модифікованим (НОЦ) цеолітом

Графічне зображення кінетичних моделей псевдо-першого (1) і псевдо-другого (2) порядку у лінійному вигляді показані на рис. 3 і 4 відповідно.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (1)$$

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

де q_t – кількість Cu²⁺, адсорбованого в момент часу t , мг/г;

q_e – кількість адсорбованого Cu²⁺ у стані рівноваги, мг/г;

k_1 – константа Лагергрена швидкості реакції

псевдо-першого порядку, хв⁻¹;

k_2 – константа швидкості реакції псевдо-другого порядку, г/(мг·хв);

t – час адсорбції, хв.

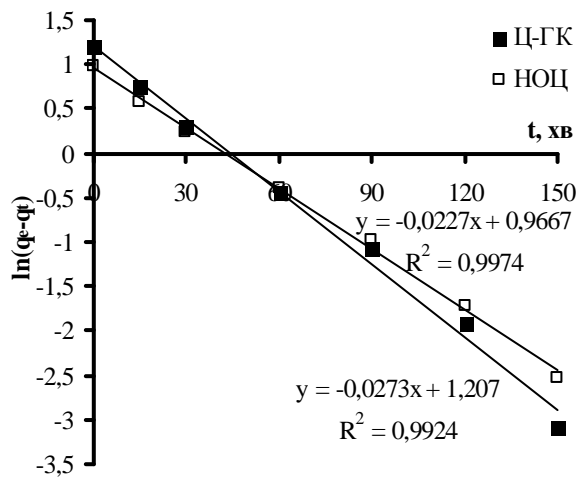


Рис. 3 – Графік у координатах $\ln(q_e - q_t) - t$ для кінетичної моделі псевдо-першого порядку

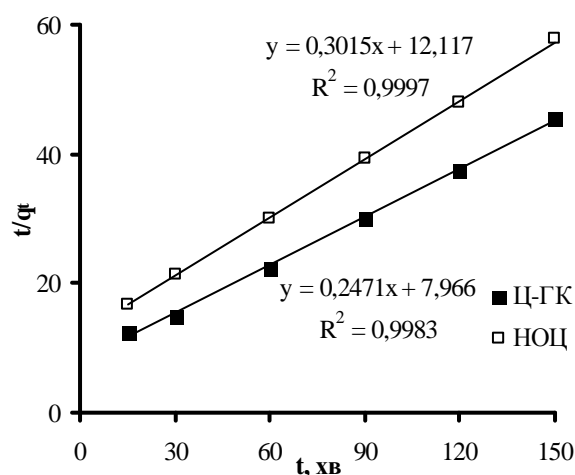


Рис. 4 – Графік у координатах $t/q_t - t$ для кінетичної моделі псевдо-другого порядку

Після відповідних розрахунків були отримані параметри кінетичних моделей для модифікованого і немодифікованого цеоліту, які наведено у табл. 1.

Константи сорбції розраховані з рівнянь лінійної апроксимації. Обчислені значення граничної питомої сорбції близькі до експериментальних. Для всіх модельних прямих коефіцієнт детермінації $R^2 > 0,99$, що свідчить про адекватність вказаних моделей. Початкова швидкість сорбції Cu²⁺ на ОЦ у півтора рази вища, ніж на НОЦ.

Поглинання іонів міді цеолітом відбувається у кілька стадій, загальний процес адсорбції може лімітуватися однією чи кількома стадіями: дифузією у тонкій плівці, дифузією у порах, адсорбцією на

поверхні сорбента. Для опису механізму процесу адсорбції іонів міді на композиційному сорбенті і

визначення його лімітуючої стадії була використана дифузійна модель Вебера-Морріса [20]:

Таблиця 1 – Параметри кінетичних моделей псевдо-першого і псевдо-другого порядків для сорбції іонів Cu^{2+} композиційним сорбентом цеоліт-гумінової кислоти і необробленим цеолітом

Цеоліт	$q_{\text{експ}}$ мг/г	Кінетична модель						
		псевдо-першого порядку			псевдо-другого порядку			
		$k_1, \text{хв}^{-1}$	$q_{\text{модель}}, \text{мг/г}$	R^2	$k_2, \text{г}/(\text{мг}\cdot\text{хв})$	$q_{\text{модель}}, \text{мг/г}$	$h, \text{мг}/(\text{г}\cdot\text{хв})$	R^2
Ц-ГК	3,35	0,0273	3,34	0,9924	0,007665	4,05	0,13	0,9983
НОЦ	2,68	0,0228	2,63	0,9974	0,007502	3,32	0,08	0,9997

$$q_t = k_{id}t^{0.5} + c,$$

де q_t – кількість міді, адсорбованої в момент часу t , мг/г;
 k_{id} – коефіцієнт внутрішньої дифузії адсорбції всередині зерен сорбенту, мг/г хв;
 t – час сорбції;
 c – константа, пов'язана з товщиною дифузійного шару.

На рис. 5 представлена залежність сорбційної ємності сорбентів в координатах моделі Вебера-Морріса.

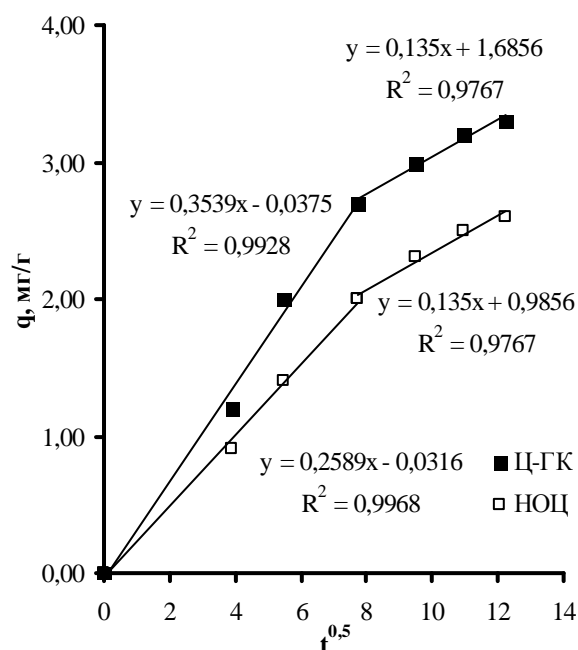


Рис. 5 – Модель Вебера-Морріса для сорбції іонів міді модифікованим (Ц-ГК) і необробленим (НОЦ) цеолітом

В результаті апроксимації експериментальних даних виразом лінійної функції для всіх досліджених іонів важких металів виділені два прямолінійних ділянки. Перша ділянка кривих проходить через початок координат, що є доказом відсутності зовнішнього приграничного шару на адсорбенті. Кут нахилу першої прямолінійної ділянки більше, ніж

другої. Це пояснюється тим, що швидкість адсорбції іонів важких металів на початковому етапі досить висока і відбувається всередині макро- і мезопор. Далі відбувається дифузія іонів металу вглиб мікропор, з подальшим встановленням в гетерофазній системі адсорбційної рівноваги (невеликий кут нахилу другої ділянки). Отже, можна припустити, що лімітуючою стадією процесу адсорбції іонів важких металів з водних розчинів цеолітом і композиційним сорбентом цеоліт-ГК є дифузія іонів всередині мікропористого простору сорбентів.

Очевидно, при обробці цеоліту гуматами, гумінової кислоти, як активні сорбційні центри для іонів міді, внаслідок великих розмірів молекул, осаджуються у макропорах, тому і спостерігається різниця у питомій сорбції саме в області макропор. У мікропори гумінової кислоти не проникають, тому коефіцієнт дифузії (з рівняння апроксимації більш пологих ділянок графіка) для обох сорбентів однаковий.

Висновки

Отриманий композиційний сорбент має покращені сорбційні властивості по відношенню до іонів важких металів (на прикладі іонів Cu^{2+}) при вилученні їх з розчинів з низькою концентрацією. Швидкість вилучення міді з водних розчинів вища за рахунок гумінових кислот, осаджених у макропорах. Там же вилучається основна частина металу. Процес сорбції лімітується дифузією в мікропорах.

Список літератури

- 1 Цицишвили, Г. В. Природные цеолиты / Г. В. Цицишвили, Т. Г. Анроникашвили, Г. Н. Киров, Л. Д. Филизова // М.: Химия. – 1985. – 224 с.
- 2 Тарасевич, Ю. И. Природные цеолиты в процессах очистки воды / Ю. И. Тарасевич // Химия и технология воды. – 1988. – Т. 10. №3. – С. 210-218.
- 3 Campos, V. The sorption of toxic elements onto natural zeolite, synthetic goethite and modified powdered block carbon / V. Campos // Environmental Earth Sciences. – 2009. – № 59(4). – P. 737-744. – doi:10.1007/s12665-009-0069-6
- 4 Kosobucki, P. Immobilization of selected heavy metals in sewage sludge by natural zeolites / P. Kosobucki, M. Kruk,

- B. Buszewski** // *Bioresour. Technol.* – 2008. – Vol. 99. – № 13. – P. 5972-5976. doi:10.1016/j.biortech.2007.10.023.
- 5 **Lihareva, N.** Investigation of Zn sorption by natural clinoptilolite and mordenite / **N. Lihareva, L. Dimova, O. Petrov, Y. Tzvetanova** // *Bulgarian Chemical Communications.* – 2009. – № 41(3). – P. 266-271.
 - 6 **Nyembe, D. W.** Adsorption mechanisms of Co^{2+} and Cu^{2+} from aqueous solutions using natural clinoptilolite: Equilibrium and kinetic studies / **D. W. Nyembe, B. B. Mamba, A. F. Mulaba-Bafubandi** // *Journal of Applied Sciences.* – 2010. – № 10(8). – P. 599-610.
 - 7 **Onthong, U.** The applications of natural zeolites for cadmium removal from sample water: Models on laboratory scale / **U. Onthong, P. Pungpo, W. Thongnueakhaeng** // *Advanced Materials Research.* – 2012. – Vol. 347-353. – P. 1930-1933. – doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.1930.
 - 8 **Jozefaciuk, G.** Effect of acid and alkali treatments on surface-charge properties of selected minerals / **G. Jozefaciuk** // *Clays Clay Minerals.* – 2002. – V. 50. – P. 647-656. – doi:10.1346/000986002320679378.
 - 9 **Breen, C.** Acid-activated organoclays: preparation, characterization and catalytic activity of polycation-treated bentonites / **C. Breen, R. Watson** // *Appl. Clay Sci.* – 1998. – V. 12. – P. 479-494. – doi:10.1016/S0169-1317(98)00006-4.
 - 10 **Комаров, В. С.** Адсорбенты: получение, структура, свойства. / **В. С. Комаров** // Минск: Беларус. Навука. – 2009. – 256 с.
 - 11 **Машкова, С. А.** Получение и исследование адсорбционных свойств модифицированных природных сорбентов / **С. А. Машкова, Н. П. Шапкин, Н. Н. Жамская, А. С. Скобун, С. В. Малкова, И. В. Тонких** // *Журнал Известия Вузов серия «Химия и химическая технология».* – 2005. – Т.48. №5. – С. 112-114.
 - 12 **Комиссаров, И. Д.** Структурная схема и моделирование макромолекул гуминовых кислот / **И. Д. Комиссаров, Л. Ф. Логинов** // *Гуминовые препараты: научные труды.* - Тюмень: Изд-во ТСХИ – 1971. – Т.8. – С. 131-142.
 - 13 **Калиниченко, И. Е.** Комплексообразование Cu (II) с гуминовыми кислотами в водных растворах / **И. Е. Калиниченко, И. В. Выщеревич, Л. Н. Демущая** // *Укр. хим. жс.* – 2013. – Т.79. – С. 3-4.
 - 14 **Дерхам, Х. М.** Взаимодействие ионов свинца и цинка с гуминовыми кислотами агростратоземов альфегумусовых / **Х. М. Дерхам, Г. В. Мотузова, Н. Н. Матинян** // М.: Наука. – 2011. – С. 81-88.
 - 15 **Дину, М. И.** Сравнение комплексообразующих способностей фульвокислот и гуминовых кислот в водной среде с ионами железа и цинка / **М. И. Дину** // *Сб. науч. тр. Института водных проблем Российской академии.* – 2010. – № 1. – С. 65-69.
 - 16 **Лиштван, И. И.** Взаимодействие гуминовых кислот с ионами металлов в водной среде / **И. И. Лиштван, Ю. Г. Янута, А. М. Абрамец, Г. С. Монич, Н. С. Глухова, В. Н. Алейникова** // *Химия и технология воды.* – 2012. – Т. 34, № 5. – С. 359-369.
 - 17 **Ho, Y. S.** Sorption of Cooper(II) from Aqueous Solution by Peat / **Y. S. Ho, G. McKay** // *Water, Air and Soil Pollution,* – 2004. – V. 158. – P. 77-97. – doi:10.1023/B:WATE.0000044830.63767.a3.
 - 18 **Ringqvist, L.** Copper and zinc adsorption onto poorly humified Sphagnum and Carex peat / **L. Ringqvist, I. Oborn** // *Water Research,* – 2002. – V. 36. № 9. – P. 2233-2242. – doi:10.1016/S0043-1354(01)00431-6.
 - 19 **Gossett, T.** Batch metal removal by peat. Kinetics and thermodynamics / **T. Gossett, J.-L. Trancart, D. R. Thevenot** // *Water Research,* – 1986. – V.20. – P. 21-26. – doi:10.1016/0043-1354(86)90209-5.
 - 20 **Weber, W. J.** Kinetics of adsorption on carbon from solutions / **W. J. Weber, J. C. Morris** // *J. Sanitary Engineering Division.* – 1963. – V.89. – P. 31-36.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Cicishvili, G. V., Anronikashvili, T. G., Kirov, G. N., Filizova, L. D.** Prirodnye ceolity [Natural zeolites]. Moscow: Himija. – 1985. – 224 p.
- 2 **Tarasevich, Ju.I.** Prirodnye ceolity v processah ochistki vody [Natural zeolites in water treatment processes]. *Himija i tehnologija vody [Chemistry and technology of water]*, 1988, **3**(10), 210-218.
- 3 **Campos, V.** The sorption of toxic elements onto natural zeolite, synthetic goethite and modified powdered block carbon. *Environmental Earth Sciences*, 2009, **59**(4), 737-744, doi:10.1007/s12665-009-0069-6.
- 4 **Kosobucki, P., Kruk, M., Buszewski, B.** Immobilization of selected heavy metals in sewage sludge by natural zeolites. *Bioresour. Technol.*, 2008, **13**(99), 5972-5976, doi:10.1016/j.biortech.2007.10.023.
- 5 **Lihareva, N., Dimova, L., Petrov, O., Tzvetanova, Y.** Investigation of Zn sorption by natural clinoptilolite and mordenite. *Bulgarian Chemical Communications*, 2009, **41**(3), 266-271.
- 6 **Nyembe, D. W., Mamba, B. B., Mulaba-Bafubandi, A. F.** Adsorption mechanisms of Co^{2+} and Cu^{2+} from aqueous solutions using natural clinoptilolite: Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Applied Sciences*, 2010, **10**(8), 599-610.
- 7 **Onthong, U., Pungpo, P., Thongnueakhaeng, W.** The applications of natural zeolites for cadmium removal from sample water: Models on laboratory scale. *Advanced Materials Research*, 2012, **347-353**, 1930-1933, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.1930.
- 8 **Jozefaciuk, G.** Effect of acid and alkali treatments on surface-charge properties of selected minerals, *Clays Clay Minerals*, 2002, **50**, 647-656, doi:10.1346/000986002320679378.
- 9 **Breen, C., Watson, R.** Acid-activated organoclays: preparation, characterization and catalytic activity of polycation-treated bentonites. *Appl. Clay Sci.*, 1998, **12**, 479-494, doi:10.1016/S0169-1317(98)00006-4.
- 10 **Komarov, V. S.** Adsorbenty: poluchenie, struktura, svojstva [Adsorbents: Preparation, Structure, Properties], Минск: Belarus. Navuka, 2009, 256 p.
- 11 **Mashkova, S. A., Shapkin, N. P., Zhamskaja, N. N., Skobun, A. S., Malkova, S. V., Razov, R. I., Tonkih, I. V.** Poluchenie i issledovanie adsorbicnyh svojstv modifitsirovannyh prirodnyh sorbentov [Preparation and study of the adsorption properties of modified natural sorbents] *Zhurnal Izvestija Vuzov serija «Himija i himicheskaja tehnologija» [Journal Proceedings of the universities series "Chemistry and chemical technology"]*, 2005, **5**(48), 112-114.
- 12 **Komissarov, I. D., Loginov, L. F.** Strukturnaja shema i modelirovanie makromolekul guminovyh kislot [The block diagram and the simulation of macromolecules of humic acids]. *Guminovye preparaty: nauchnye Trudy [Humic preparations: scientific works]*, Tjumen': Izd-vo TSHI, 1971, **8**, 131-142.

- 13 **Kalinichenko, I. E., Demuckaja, L. N., Vyshherevich, I. V.** Kompleksoobrazovanie Cu (II) s guminovymi kislotalami v vodnyh rastvorah [Complexing Cu (II) with humic acids in aqueous solutions] *Ukr. him. Zh [Ukr. Chem. Jour.]*, 2013, **79**, 3-4.
- 14 **Derham, H. M., Motuzova, G. V., Matinjan, N. N.** Vzaimodejstvie ionov svinca i cinka s guminovymi kislotalami agrostratozemov al'fegumusovyh [Interaction of lead and zinc ions with humic acids agrostratozemov al'fegumusovyh], Moscow: Nauka, 2011, 81-88.
- 15 **Dinu, M. I.** Sravnenie kompleksobrazujushchih sposobnostej ful'vokislot i guminovyh kislotal v vodnoj srede s ionami zheleza i cinka [Comparison of the complexing ability of fulvic and humic acids in aqueous medium with ions of iron and zinc] *Sb. nauch. tr. Instituta vodnyh problem Rossijskoj akademii [Coll. scientific. tr. Institute of Water Problems of the Russian Academy]*, 2010, **1**, 65-69.
- 16 **Lishtvan, I. I., Januta, Ju. G., Abramec, A. M., Monich, G. S., Gluhova, N. S., Alejnikova, V. N.** Vzaimodejstvie guminovyh kislotal s ionami metallov v vodnoj srede [Interaction of humic acids with metal ions in the aqueous medium]. *Himija i tehnologija vody [Chemistry and technology of water]*, 2012, **5(34)**, 359-369.
- 17 **Ho, Y. S., McKay, G.** Sorption of Cooper(II) from Aqueous Solution by Peat. *Water, Air and Soil Pollution*, 2004, **158**, 77-97, doi:10.1023/B:WATE.0000044830.63767.a3.
- 18 **Ringqvist, L., Oborn, I.** Copper and zinc adsorption onto poorly humified Sphagnum and Carex peat, *Water Research*, 2002, **9(36)**, 2233-2242, doi:10.1016/S0043-1354(01)00431-6.
- 19 **Gossett, T., Trancart, J.-L., Thevenot, D. R.** Batch metal removal by peat. Kinetics and thermodynamics. *Water Research*, 1986, **20**, 21-26, doi:10.1016/0043-1354(86)90209-5.
- 20 **Weber, W. J., Morris, J. C.** Kinetics of adsorption on carbon from solutions. *J. Sanitary Engineering Division*, 1963, **89**, 31-36.

Відомості про авторів (About authors)

Хохотва Олександр Петрович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів; м. Київ, Україна; e-mail: khokhotva@bigmir.net

Khokhotva Oleksandr – Ph. D., Docent, Associate Professor, Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: khokhotva@bigmir.net

Кондратенко Олександра Іванівна – студентка кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: sashunja_92@mail.ru

Kondratenko Oleksandra – student of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: sashunja_92@mail.ru

Шкель Катерина Олександрівна – студентка кафедри екобіотехнології та біоенергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: shkel.kateryna@gmail.com

Shkel Kateryna – student of Department of Environmental Biotechnology and Bioenergy, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: shkel.kateryna@gmail.com

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Хохотва, О. П. Використання композиційного сорбенту цеоліт-гумінові кислоти для вилучення іонів міді з водних розчинів / **О. П. Хохотва, О. І. Кондратенко, К. О. Шкель** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 180-185. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.27.

Please cite this article as:

Khokhotva, O., Kondratenko, O., Shkel, K. The application of composite sorbent zeolite-humic acids for the removal of copper ions from aqueous solutions. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 180-185, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.27.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Хохотва А. П. Использование композиционного сорбента цеолит-гуминовые кислоты для извлечения ионов меди из водных растворов / **А. П. Хохотва, А. И. Кондратенко, Е. А. Шкель** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 180-185. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.27.

АННОТАЦИЯ Получен композиционный сорбент путем осаждения гуминовых кислот на цеолите. Исследовано влияние концентрации гуматов при синтезе сорбента на эффективность извлечения ионов меди. Кинетика сорбции ионов меди на композиционном сорбенте и необработанном цеолите описывается уравнениями псевдо-первого и псевдо-второго порядков. Лимитирующей стадией сорбционного процесса является диффузия внутри зерен сорбентов. Улучшение сорбционных свойств происходит за счет гуминовых кислот, осажденных в макропорах.

Ключевые слова: цеолиты, гуминовые кислоты, композиционный сорбент, сорбция, тяжелые металлы, кинетика, диффузия, модель Вебера-Морриса.

Надійшла (received) 30.04.2016