

О. М. КАМІНСЬКИЙ

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-1971-8437

Р. О. ДЕНИСЮК

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-3077-3795

М. В. ЧАЙКА

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0001-5356-9856

С. В. ПИСАРЕНКО

доктор філософії з галузі знань хімічна та біоінженерія,
асистент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0002-5978-487X

О. С. ЄВДОЧЕНКО

доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0001-6338-5372

О. В. АНІЧКІНА

кандидат педагогічних наук, доцент,
завідувач кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-4843-0707

О. Ю. АВДЄЄВА

доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0001-6550-0776

Ю. В. ЛИСЕЦЬКА

асистент, старший викладач кафедри англійської філології та перекладу
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0002-6747-5858

АДСОРБЦІЯ КОНГО ЧЕРВОНОГО З РОЗЧИНУ ПОВЕРХНЕЮ НІКЕЛЬ-ІТРІЄВОГО ГРАНАТУ

На сучасному етапі розвитку нанохімії та нанотехнологій складнооксидні матеріали зі структурою шпінелі викликають великий інтерес у дослідників. До таких матеріалів належать ітрієві гранати. Завдяки ізоморфним заміщенням, широко дозволеним у структурі гранатів, можна отримати матеріали із унікальним набором фізико-хімічних властивостей шляхом включення нових елементів, наприклад Ni.

Для дослідження процесів адсорбції конго червоного з водних розчинів синтезовано нікель-ітрієвий гранат золь-гель методом автогоріння (Печіні). Отримані зразки досліджено методами рентгенофлуоресцентної та ІЧ-Фур'є спектроскопії. На основі елементного аналізу визначено, що формула нікель-ітрієвого гранату становить $Ni_2Y_9O_{14}$, а утворені частинки схильні до агрегації.

У роботі проведено адсорбцію конго червоного з водних розчинів поверхнею нікель-ітрієвого гранату. Встановлено, що ступінь вилучення барвника понад 78% за температури 293 К досягається за перші 30 хвилин від початку контакту адсорбат-адсорбент. Адсорбційна рівновага на межі поділу задовільно описується кінетичною моделлю псевдо-другого порядку. Визначено, що адсорбційна ємність становить 3,14 мг/г, а характер кривої ізотерми нагадує криві ізотерм Ленгмюра (L3-тип) відповідно до класифікації Гільса, без виходу на насичення. Такий тип ізотерм характерний для адсорбентів з малою енергією взаємодії адсорбат-адсорбент.

Показано, що ізотерми адсорбції задовільно описуються моделлю мономолекулярної адсорбції Фрейндліха, в порівнянні з іншими моделями, про що свідчить коефіцієнт кореляції ($R^2 = 0,973$). Це означає, що адсорбція барвника проходить на гетерогенних (нерівноцінних) центрах поверхні, на яких відбувається нерівномірний розподіл за енергіями.

Розраховано, що для адсорбції конго червоного величина енергії адсорбції становить 2,06 кДж/моль, що вказує на суто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні.

Ключові слова: нікель-ітрієвий гранат, наноадсорбент, адсорбція барвників, конго червоний, ізотерми адсорбції, моделі ізотерм.

O. M. KAMINSKIY

Ph.D. in Chemistry,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-1971-8437

R. O. DENYSIUK

Ph.D. in Chemistry,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-3077-3795

M. V. CHAYKA

Ph.D. in Chemistry,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-5978-487X

S. V. PYSARENKO

Ph.D. in the Field of Knowledge "Chemical and Bioengineering",
Assistant at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-5978-487X

O. S. YEVDCHENKO

Ph.D. in the Field of Knowledge 01 Education/Pedagogy,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0001-6338-5372

O. V. ANICHKINA

Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-4843-0707

O. YU. AVDIEIEVA

Ph.D. in the Field of Knowledge 01 Education/Pedagogy,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0001-6550-0776

YU. V. LYSETSKA

Assistant,
Senior Lecturer at the Department of English Philology and Translation
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-6747-5858

ADSORPTION OF CONGO RED FROM A NICKEL-YTTRIUM GARNET SURFACE SOLUTION

At the current stage of development of nanochemistry and nanotechnology, complex oxide materials with a spinel structure are of great interest to researchers. Such materials include yttrium garnets. Thanks to the isomorphous substitutions widely allowed in the structure of garnets, it is possible to obtain materials with a unique set of physicochemical properties by incorporating new elements, such as Ni.

To study the processes of adsorption of Congo red from aqueous solutions, nickel-yttrium garnet sol-gel was synthesized by the self-combustion method (Pechini). The obtained samples were investigated by the methods of X-ray fluorescence and IR-Fourier spectroscopy. On the basis of elemental analysis, it was established that the formula of nickel-yttrium garnet is $Ni_2Y_9O_{14}$, and the formed particles are prone to aggregation.

In the work, the adsorption of Congo red from aqueous solutions on the surface of nickel-yttrium garnet was carried out. It was established that the degree of dye extraction of more than 78% at a temperature of 293 K is achieved in the first 30 minutes from the beginning of adsorbate-adsorbent contact. The adsorption equilibrium at the separation boundary is satisfactorily described by the pseudo-second-order model. It was determined that the adsorption capacity is 3.14 mg/g, and the character of the isotherm curve resembles the Langmuir isotherm curves (L3-type) according to the Giles classification, without reaching saturation. This type of isotherm is typical for adsorbents with low energy of adsorbent-adsorbate interaction.

It is shown that the adsorption isotherms are satisfactorily described by the Freundlich monomolecular adsorption model, compared to other models, as evidenced by the correlation coefficient ($R^2 = 0.973$). This means that dye adsorption occurs on heterogeneous (unequal) centers of the surface, on which there is an uneven energy distribution.

It was calculated that for the adsorption of Congo red, the value of the adsorption energy is 2.06 kJ/mol, which indicates a purely physical adsorption of dye molecules on the surface.

Key words: nickel-yttrium garnet, nanoadsorbent, adsorption of dyes, Congo red, adsorption isotherms, isotherm models.

Постановка проблеми

Адсорбційна активність ітрієвих наноматеріалів зі структурою шпінелі може бути корисною у різних сферах людської діяльності, наприклад для медичних досліджень (вилучення токсинів або лікування захворювань шляхом видалення шкідливих сполук з організму). Широка варіативність методів синтезу матеріалів на основі Ітрію дають можливість використовувати їх у якості нових каталізаторів, наноматеріалів та високоефективних адсорбентів.

Конго червоний – це синтетичний аніонний азобарвник, який використовується в багатьох галузях промисловості, і стічні води, що містять його, необхідно належним чином очищати перед скиданням у навколишнє середовище, оскільки цей барвник може метаболізуватися до бензидину, що є канцерогеном для людини [1-3].

Вилучення конго червоного зі стічних вод є актуальною та важливою проблемою очистки навколишнього середовища та водойм, тому саме цей барвник обрано у якості об'єкта для досліджень. Зазначимо, що сполуки зі структурою шпінелі є перспективними адсорбентами для вилучення барвників з водних розчинів, в тому числі конго червоного [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Авторами у роботі [5] проведено сольватотермічний синтез мікро/наноstrukturованих мікросфер нікель гідроксиду карбонату з використанням етиленгліколю. Хімічний склад зразків визначено методами рентгенівської дифракції (XRD), інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR), рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (EDX) та термогравіметричного аналізу (TGA). Після прожарювання виготовлено мезопористі мікро/наноstrukturовані мікросфери NiO з великою площею поверхні 185,1 м²/г. Адсорбційну активність вивчено на прикладі барвника конго червоного (CR). Показано, що ізотерма адсорбції CR описується моделлю Ленгмюра, а максимальна адсорбційна ємність становить 456,8 мг/г. Кінетику адсорбції конго червоного описано моделлю псевдо-другого порядку та показано, що протягом однієї хвилини вилучається понад 99,41% CR з розчину за початкової концентрації барвника 300 мг/л. Розраховано термодинамічні параметри (зміну ентальпії, зміну вільної енергії Гіббса, зміну ентропії) та відмічено, що адсорбція CR на мікросферах NiO є самочинним ендотермічним процесом.

Авторами [6] вилучено барвник конго червоний з імітованого розчину стічної води для текстилю за допомогою летючої золи з місцевої електростанції. Зразки адсорбенту досліджено методами скануючої електронної мікроскопії (SEM), EDX, XRD, FTIR, BET-площі поверхні та TGA. Проаналізовано вплив чотирьох параметрів (час контакту, початкової концентрації, дози адсорбенту та температури) на адсорбційну здатність золи. Показано, що адсорбційна рівновага описується кінетичною моделлю псевдо-другого порядку з лімітуючою стадією хемосорбції. Ізотерму адсорбції описано моделлю Ленгмюра з максимальною адсорбційною ємністю 22,12 мг/г.

Однак, джерел, що описують процеси адсорбції конго червоного з водних розчинів поверхнями нікель-ітрієвого гранату зустрічається дуже мало, що підтверджує актуальність даної роботи.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є вивчення процесів адсорбції барвника конго червоного з водних розчинів поверхнею нанорозмірного нікель-ітрієвого гранату.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для дослідження процесів адсорбції синтезовано нікель-ітрієвий гранат зі структурою шпінелі золь-гель методом автогоріння (Печіні) за подібною методикою, що описано у роботі [7]:

Суміш солей $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ марки «ч.», масою 2,91 г; $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ марки «ч.д.а.», масою 7,72 г; та 6,3 г лимонної кислоти ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) марки «ч.д.а.» розчиняли в 50 мл дистильованої води. До одержаного розчину додавали 12 мл 25% розчину амоніаку (марки «ч.д.а.») порціями по 2 мл для підтримання $\text{pH} \approx 8$. Розчин перенесли у високу склянку на 250 мл і нагрівали на електричній плитці до повного випаровування розчинника з утворенням густого гелю, який після висихання самоспалахував (відбувалося автогоріння з утворенням пухкої маси нанодисперсного гранату).

Після закінчення реакції автогоріння одержану масу синтезованого нікель-ітрієвого гранату розтирали в ступці, промивали 5–7 разів невеликою кількістю дистильованої води до нейтральної реакції середовища та висушували на повітрі.

Для визначення структури одержаного нікель-ітрієвого гранату та кількісного співвідношення між компонентами проведено рентгенофлуоресцентний спектральний аналіз за допомогою енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного спектрометра «ELVAX» Model SER-01». Обробка отриманих результатів здійснювалась за допомогою програми ElvaX Software ver. 4.1.8 за методом фундаментальних параметрів (точність визначення $\pm 0,1\%$).

На рис. 1 показано рентгеноспектрограму зразка нікель-ітрієвого гранату.

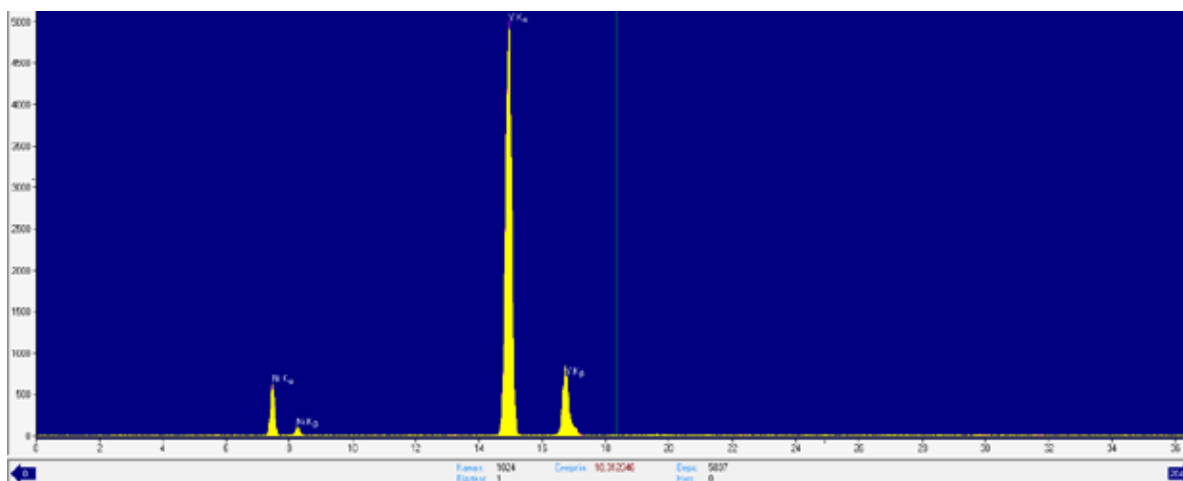


Рис. 1. Рентгеноспектрограма синтезованого нікель-ітрієвого гранату.

За даними рентгенофлуоресцентного спектрального аналізу встановлено, що нікель-ітрієвий гранат має такий усереднений склад: 69,8% Ітрію, 10,4% Ніколу та 19,8% Оксигену. Таким чином формула синтезованого нікель-ітрієвого гранату становить: $\text{Ni}_2\text{Y}_9\text{O}_{14}$.

Методами ІЧ-Фур'є спектроскопії з використанням спектрофотометра з перетворенням Фур'є «AGILENT CARY 630» в спектральному діапазоні $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ ідентифіковано зв'язки у структурі нікель-ітрієвого гранату.

Виявлено СП при $800\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ валентних коливань $\text{Y} - \text{O}$ зв'язків додекаедрів координованого Ітрію (елементарної комірки ітрієвого гранату), що характерно для гранатів зі структурою шпінелі [8].

Для вивчення процесів адсорбції конго червоного з розчинів готували розчини з концентраціями 2–12 мг/л шляхом кількісного розведення маточного розчину (50 мг/л) та доведення відібраного об'єму дистильованою водою до мітки у мірній колбі на 250 мл.

Для проведення кінетичних досліджень відважували на електронних вагах по 0,06 г зразків, додавали 25 мл розчину барвника з $C_0 = 6\text{ mg/l}$ та перемішували на шейкері. Час контакту між розчином та адсорбентом обрано: 5, 10, 30, 60 та 90 хв. Температура, за якої проводилось дослідження, становила 293К.

Адсорбцію здійснювали у статичному режимі. Для побудови кривих ізотерм адсорбції використано діапазон концентрацій розчинів барвника: 2, 4, 6, 8 та 10 мг/л. Маса зразків адсорбенту становили 0,06 г кожен, об'єм розчину барвника – 25 мл, час контакту між адсорбатом і адсорбентом становив 90 хв.

Концентрацію конго червоного до та після адсорбції визначали за допомогою КФК-2 за довжини хвилі 490 нм. У якості розчину порівняння використовували дистильовану воду.

Адсорбційну ємність A (мг/г) на поверхні нікель-ітрієвого гранату розраховували за формулою:

$$A = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

де C_0 і C_p – концентрація вихідного розчину барвника та розчину після адсорбції (мг/л), V – об'єм розчину (л), m – наважка адсорбенту (г).

Ступінь вилучення R , % конго червоного з водних розчинів розраховували за формулою:

$$R = \frac{(C_0 - C_p)}{C_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

Для обробки одержаних ізотерм адсорбції барвника використано математичні моделі адсорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича [9–11].

На рис. 2 показано залежність ступеня вилучення конго червоного з розчину поверхнею нікель-ітрієвого гранату від часу контакту.

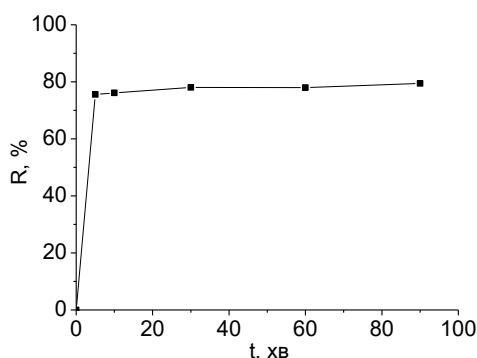


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення конго червоного з розчину поверхнею нікель-ітрієвого гранату від часу контакту

Визначено, що ступінь вилучення барвника за перші 30 хвилин від початку адсорбції становить 78,05%, а максимального значення (79,47%) досягає після 90 хвилин від початку взаємодії адсорбат-адсорбент. Адсорбційна рівновага настає протягом 20 хвилин від початку контакту на межі поділу фаз та задовільно описується моделлю псевдо-другого порядку, що вказує на міжчастинкову взаємодію між молекулами адсорбату в об'ємі розчину. Лімітуючою стадією в даному випадку є хімічна реакція обміну між частинками на межі поділу адсорбат-адсорбент.

На рис. 3 зображено ізотерму адсорбції барвника поверхнею нікель-ітрієвого гранату.

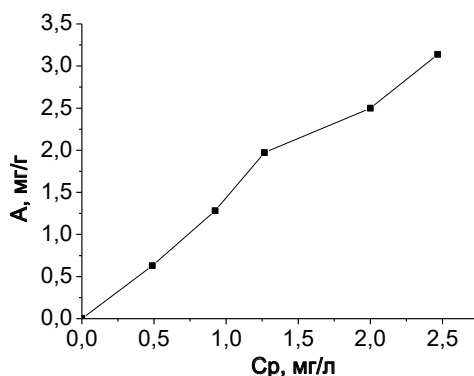


Рис. 3. Ізотерма адсорбції конго червоного з розчину поверхнею нікель-ітрієвого гранату

Як видно з рис. 3, характер кривої ізотерми нагадує криві ізотерм Ленгмюра (L3-тип) відповідно до класифікації Гільса, без виходу на насичення. Такий тип ізотерм характерний для адсорбентів з малою енергією взаємодії адсорбент-адсорбат. Адсорбційна ємність становить 3,14 мг/г.

Одержані експериментальні дані проаналізовано відповідно до моделей ізотерм Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича.

Показано, що ізотерма адсорбції конго червоного задовільно описується моделлю Фрейндліха, в порівнянні з іншими моделями, про що свідчить коефіцієнт кореляції ($R^2 = 0,973$). Це означає, що адсорбція барвника відбувається на гетерогенних (нерівноцінних) центрах поверхні, на яких відбувається нерівномірний розподіл за енергіями.

Для адсорбції конго червоного величина енергії адсорбції E (кДж/моль) становить 2,06 кДж/моль, що вказує на суто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні.

Висновки

У роботі проведено синтез нікель-ітрієвого гранату золь-гель методом автогоріння (Печіні). Методами рентгенофлуоресцентного спектрального аналізу встановлено формулу синтезованого нікель-ітрієвого гранату – $Ni_2Y_9O_{14}$. Методами ІЧ-Фур'є спектроскопії ідентифіковано зв'язки Y – O додекаедрів координованого Ітрію, що характерно для гранатів зі структурою шпінелі.

Проведено адсорбцію барвника конго червоного з водних розчинів поверхнею нікель-ітрієвого гранату. Визначено, що ступінь вилучення барвника за перші 30 хвилин від початку адсорбції становить 78,05%, а максимального значення (79,47%) досягає після 90 хвилин від початку взаємодії адсорбат-адсорбент. Адсорбційна рівновага настає протягом 20 хвилин від початку контакту та задовільно описується кінетичною моделлю псевдо-другого порядку. Визначено, що адсорбційна ємність становить 3,14 мг/г. Показано, що ізотерма адсорбції конго червоного задовільно описується моделлю Фрейндліха. Це означає, що адсорбція барвника відбувається на гетерогенних (нерівноцінних) центрах поверхні, на яких відбувається нерівномірний розподіл за енергіями. Для адсорбції конго червоного величина енергії адсорбції становить 2,06 кДж/моль, що вказує на суто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні. Показано перспективність використання нікель-ітрієвого гранату у якості наноадсорбенту для очистки води від барвника конго червоного.

Список використаної літератури

1. Liu S., Ding Y., Li P., et al. Adsorption of the anionic dye Congo red from aqueous solution onto natural zeolites modified with N,N-dimethyl dehydroabietylamine oxide. *Chemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 248. P. 135-144. DOI: 10.1016/j.cej.2014.03.026.
2. Yang Q., Song H., Li Y., et al. Flower-like core-shell $Fe_3O_4@MnO_2$ microspheres: Synthesis and selective removal of Congo red dye from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*. 2017. Vol. 234. P. 18-23. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.03.028.
3. Xiong Z., Zheng H., Hu Y., et al. Selective adsorption of Congo red and Cu(II) from complex wastewater by core-shell structured magnetic carbon@zeolitic imidazolate frameworks-8 nanocomposites. *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 277. 119053. DOI:10.1016/j.seppur.2021.119053.
4. Liu J., Wang N., Zhang H., Baeyens J. Adsorption of Congo red dye on $Fe_xCo_{3-x}O_4$ nanoparticles. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 238. P. 473-483. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.03.009.
5. Jia Y., Ni J., Wu P.-Y., Fang F., Zhang Y.-X. Fast removal of Congo red from aqueous solution by adsorption onto micro/nanostructured NiO microspheres. *Materials Science and Engineering: B*. 2021. Vol. 270. 115228. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115228.
6. Harja M., Buema G., Bucur D. Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. 115228. DOI: 10.1038/s41598-022-10093-3.
7. Бушкова В. С., Остафійчук Б. К., Копаєв О.В. Особливості синтезу складних оксидних систем з використанням ЗГА-методу. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. Т. 15, № 1. С. 182-185. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PhKhTT_2014_15_1_29.
8. Modi K. B., Vara R. P., Vora H. G., Chhantbar M. C., Joshia H. H. Infrared spectroscopic study of Fe^{3+} substituted yttrium iron garnet. *Journal of materials science*. 2004. Vol. 39. P. 2187-2189.
9. Tripathy S., Raichur A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, No 3. P. 1043-1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100
10. Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No 2. P. 341-350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038.
11. Камінський О. М., Денисюк Р. О., Чайка М. В., Писаренко С. В., Панасюк Д. Ю. Сорбція йонних форм Цинку(II) з водних розчинів поверхнями магніточутливих нанокомпозитів, модифікованих гідроксиапатитом. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 5. С. 70-79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.8.

References

1. Liu S., Ding Y., Li P., et al. (2014) Adsorption of the anionic dye Congo red from aqueous solution onto natural zeolites modified with N,N-dimethyl dehydroabietylamine oxide. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 248. P. 135-144. DOI: 10.1016/j.cej.2014.03.026.

2. Yang Q., Song H., Li Y., et al. (2017) Flower-like core-shell Fe₃O₄@MnO₂ microspheres: Synthesis and selective removal of Congo red dye from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*. Vol. 234. P. 18-23. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.03.028.
3. Xiong Z., Zheng H., Hu Y., et al. (2021) Selective adsorption of Congo red and Cu(II) from complex wastewater by core-shell structured magnetic carbon@zeolitic imidazolate frameworks-8 nanocomposites. *Separation and Purification Technology*. Vol. 277. 119053. DOI:10.1016/j.seppur.2021.119053.
4. Liu J., Wang N., Zhang H., Baeyens J. (2019) Adsorption of Congo red dye on Fe_xCo_{3-x}O₄ nanoparticles. *Journal of Environmental Management*. Vol. 238. P. 473-483. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.03.009.
5. Jia Y., Ni J., Wu P.-Y., Fang F., Zhang Y.-X. (2021) Fast removal of Congo red from aqueous solution by adsorption onto micro/nanostructured NiO microspheres. *Materials Science and Engineering: B*. Vol. 270. 115228. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115228.
6. Harja M., Buema G., Bucur D. (2022) Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*. Vol. 12. 115228. DOI: 10.1038/s41598-022-10093-3.
7. Bushkova V. S., Ostafiychuk B. K., Kopayev O.V. (2014) Osoblyvosti syntezy skladnykh oksydneykh system z vykorystanniam ZHA-metodu. [Peculiarities of the synthesis of complex oxide systems using the ZHA method]. *Fizyka i khimiya tverdoho tila*. T. 15, № 1. C. 182-185. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PhKhTT_2014_15_1_29. [in Ukrainian]
8. Modi K. B., Vara R. P., Vora H. G., Chhantbar M. C., Joshia H. H. (2004) Infrared spectroscopic study of Fe³⁺ substituted yttrium iron garnet. *Journal of materials science*. Vol. 39. P. 2187-2189.
9. Tripathy S., Raichur A. (2008) Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 153, No 3. P. 1043-1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100
10. Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. (2004) Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 279, No 2. P. 341-350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038.
11. Kaminskyi O. M., Denysiuk R. O., Chaika M. V., Pysarenko S. V., Panasiuk D. Yu. (2023) Sorbttsiia yonnykh form Tsynku(II) z vodnykh rozchyniv poverkhniamy mahnitochutlyvykh nanokompozytiv, modyfikovanykh hidroksyapatytom [Sorption of ionic forms of Zinc (II) from aqueous solutions by surfaces of magneto-sensitive nanocomposites modified with hydroxyapatite]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychyykh nauk*. № 5. S. 70-79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.8. [in Ukrainian]