



Ukrainian Journal of Natural Sciences  
№ 13  
Український журнал природничих наук  
№ 13

ISSN: 2786-6335 print  
ISSN: 2786-6343 online

## ХІМІЯ

УДК 544.723:544.77

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.19>

### ПРОЦЕСИ АДСОРБЦІЇ КОНГО ЧЕРВОНОГО З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕЮ КУПРУМ-ІТРІЄВОГО ГРАНАТУ

О. М. Камінський<sup>1</sup>, Р. О. Денисюк<sup>2</sup>, С. В. Кучерук<sup>3</sup>, С. В. Авдєєв<sup>4</sup>, О. С. Євдоченко<sup>5</sup>

У роботі здійснено синтез купрум-ітрієвого гранату зі структурою шпінелі золь-гель методом Печіні та досліджено його морфологію набором фізико-хімічних методів. Для визначення структури одержаного купрум-ітрієвого гранату і кількісного співвідношення між компонентами проведено рентгенофлуоресцентний спектральний аналіз, за даними якого встановлено, що купрум-ітрієвий гранат має склад: 9,4% Купруму, 67,5% Ітрію та 23,1% Оксигену, що відповідає найпростішій формулі  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$ . Методами ІЧ-Фур'є спектроскопії показано, що за  $1600\text{--}1400\text{ см}^{-1}$  відбуваються валентні коливання  $\text{Si} - \text{OH}$  зв'язків поверхні купрум-ітрієвого гранату зі структурою шпінелі. За  $800\text{--}700\text{ см}^{-1}$  виявлено валентні коливання  $\text{Y} - \text{O}$  зв'язків додекаедрів координованого Ітрію (елементарної комірки ітрієвого гранату), що характерно для гранатів зі структурою шпінелі. У процесі дослідження адсорбційної активності поверхні купрум-ітрієвого гранату щодо барвника конго червоного з розчинів виявлено, що максимальний ступінь вилучення 54,6% досяга-

<sup>1</sup> кандидат хімічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: alexkamin@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-1971-8437

<sup>2</sup> кандидат хімічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: denisuknet@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-3077-3795

<sup>3</sup> доктор філософії з галузі знань Хімічна та біоінженерія,  
доцент кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: snezhunka1107@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-5978-487X

<sup>4</sup> старший викладач кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: Avdieiev-S@zu.edu.ua  
ORCID: 0009-0001-0340-3150

<sup>5</sup> доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка,  
доцент кафедри хімії  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: evdochenko\_lena@ukr.net  
ORCID: 0000-0001-6338-5372

ється для маси адсорбента 0,08 г. Показано, що ступінь вилучення барвника 43,5% досягається за перші 30 хвилин від початку адсорбції, а максимального значення досягає після 120 хвилин від початку взаємодії на межі поділу адсорбат-адсорбент. Характер кривої вказує на нерівноважні адсорбційні процеси, в яких процеси адсорбції на межі поділу фаз переважають над процесами десорбції барвника з поверхні. Установлено, що адсорбційна ємність становить 1,59 мг/г, а коефіцієнт розподілу за максимальної концентрації барвника ( $C_0 = 10$  мг/л) – 432,06 мл/г. Це означає, що спорідненість цього барвника до поверхні купрум-ітрієвого гранату є незначною. Характер кривої ізотерми нагадує прямолінійні криві ізотерм Генрі відповідно до класифікації Гільса. Такий тип ізотерм вказує на те, що міжмолекулярна взаємодія адсорбат-адсорбент переважає над міжмолекулярною взаємодією в розчині між молекулами конго червоного. Ізотерма адсорбції конго червоного задовільно описується моделлю Тьомкіна, в порівнянні з іншими моделями, про що свідчить коефіцієнт кореляції ( $R^2 = 0,854$ ), тобто адсорбція барвника відбувається на потенційно неоднорідних поверхнях, на яких здійснюється рівномірний розподіл адсорбційних центрів за енергією. Розрахована величина енергії адсорбції становить 2,162 кДж/моль, що вказує на чисто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні гранату.

**Ключові слова:** купрум-ітрієвий гранат, ізотерми адсорбції, енергія адсорбції, моделі ізотерм, конго червоний, хімія поверхні, фізична та колоїдна хімія.

## PROCESSES OF ADSORPTION OF CONGO RED FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY THE SURFACE OF COPPER-YTTRIUM GARNET

O. M. Kaminskiy, R. O. Denysiuk, S. V. Kucheruk, S. V. Avdieiev, O. S. Yevdochenko

In this work, the synthesis of copper-yttrium garnet with a spinel structure was carried out by the Pechini method and its morphology was studied using a set of physicochemical methods. X-ray fluorescence spectral analysis was performed to determine the structure of the obtained copper-yttrium garnet and the quantitative ratio between the components. According to the X-ray fluorescence spectral analysis, it was found that the copper-yttrium garnet has a composition of: 9.4% Copper, 67.5% Yttrium and 23.1% Oxygen, which corresponds to the simplest formula  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$ . IR-Fourier spectroscopy methods showed that at 1600-1400  $\text{cm}^{-1}$ , stretching vibrations of Cu – OH bonds of the surface of copper-yttrium garnet with a spinel structure occur. At 800-700  $\text{cm}^{-1}$ , stretching vibrations of Y – O bonds of coordinated Yttrium dodecahedra (unit cell of yttrium garnet) were detected, which is typical for garnets with a spinel structure. In the process of studying the adsorption activity of the surface of copper-yttrium garnet with respect to the Congo red dye from solutions, it was found that the maximum degree of extraction of 54.6% is achieved for an adsorbent mass of 0.08 g. It was shown that the degree of extraction of the dye of 43.5% is achieved in the first 30 minutes from the beginning of adsorption, and reaches its maximum value after 120 minutes from the beginning of interaction at the adsorbate-adsorbent interface. The nature of the curve indicates non-equilibrium adsorption processes, in which the adsorption processes at the phase interface prevail over the processes of desorption of the dye from the surface. It was established that the adsorption capacity is 1.59 mg/g, and the distribution coefficient at the maximum concentration of the dye ( $C_0 = 10$  mg/l) is 432.06 ml/g. This means that the affinity of this dye to the surface of copper-yttrium garnet is insignificant. The character of the isotherm curve resembles the rectilinear Henry isotherm curves according to the Giles classification. This type of isotherm indicates that the intermolecular interaction of the adsorbate-adsorbent prevails over the intermolecular interaction in the solution between the Congo red molecules. The adsorption isotherm of Congo red is satisfactorily described by the Tiomkin model, in comparison with other models, as evidenced by the correlation coefficient ( $R^2 = 0.854$ ), i.e. the adsorption of the dye occurs on potentially inhomogeneous surfaces, on which there is a uniform distribution of adsorption centers in terms of energy. The calculated value of the adsorption energy is 2.162 kJ/mol, which indicates a purely physical adsorption of the dye molecules on the garnet surface.

**Key words:** copper-yttrium garnet, adsorption isotherms, adsorption energy, isotherm models, Congo red, surface chemistry, physical and colloidal chemistry.

### Вступ

У сучасних умовах розвитку науки та індустріалізації забруднення довкілля, зокрема водних ресурсів, стало однією з найгостріших глобальних екологічних проблем. За останній час рівень забруднення значно

підвищився й досяг критичної межі, що становить серйозну загрозу для живих організмів. Шкідливі речовини негативно впливають на навколишнє середовище, включаючи воду, ґрунт, рослинність і тваринний світ. Відповідно до Угоди про асоціацію з ЄС та

затвердженої Директиви ЄС (Directive ..., 2020) воду визнано головним харчовим продуктом, тому пошук ефективних методів очищення води до якості питної залишається не розв'язаною глобальною проблемою сьогодення. Також слід зазначити, що однією з ключових цілей на 2030 рік є гарантування доступності та довгострокового забезпечення водопостачання та санітарії для всіх, як це вказано в шостій цілі сталого розвитку (ЦСР) (Ahmad et al., 2025).

Серед поширених забруднювачів водойм можна виділити синтетичні барвники. Надмірне застосування синтетичних барвників часто призводить до їх неконтрольованого потрапляння у водойми, зокрема через промислові стоки, що є шкідливим для навколишнього середовища. Штучні барвники широко застосовуються в таких галузях, як харчова, паперова, текстильна, шкіряна, фармацевтична та лакофарбова промисловості, й після завершення виробничих процесів можуть забруднювати водні ресурси (Boumya et al., 2024). Згідно з наявними світовими оцінками, щороку у світі виготовляють близько 700 тисяч тон барвників і пігментів, які включають приблизно 1000 різновидів (Din et al., 2021, Khan et al., 2024). Потрапляння канцерогенних барвників у водне середовище призводить до негативних змін у структурі екосистем. Вони спричиняють гіпертрофію, що знижує рівень насичення води киснем, унаслідок чого морські організми зазнають серйозної шкоди, а водна флора та фауна – значних втрат (Chenab et al., 2020). Наприклад, синтетичний барвник конго червоний (Congo Red, CR) – аніонний азобарвник, що широко використовується в текстильній, паперовій, гумовій, полімерній та друкарській промисловості, а також у гістології для фарбування амілоїдних фібрил і клітинних структур (Gao et al., 2021). Сам барвник, хоч безпосередньо може не бути високотоксичним, продукує токсичні метаболіти, мутагенні та канцерогенні сполуки, що негативно впливають на здоров'я ссавців, впливаючи на нирки, шкіру, легені, репродуктивну систему тощо (Quintanilla-Villanueva et al., 2025, Karadayi et al., 2025).

Натепер розроблено чимало методів очищення водних об'єктів від барвників. Серед найрезультативніших варто зазначити хімічне відновлення, мембранну фільтрацію, коагуляцію та флокуляцію, фотокаталітичне окиснення, іонообмінні технології та інші способи (Boushehrian et al., 2020,

Khan et al., 2025). Однак серед перспективних методів очищення забруднених водойм нині залишаються процеси адсорбції. Так, наприклад у роботі (Wang et al., 2012) досліджено, як впливає початкова концентрація барвника конго червоного (в межах 50–150 мг/л) на адсорбційні властивості різних феритів. Виявлено, що зі зростанням концентрації барвника підвищується і адсорбційна ємність матеріалів: для  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – від 16,7 до 30,6 мг/г; для  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  – від 50,2 до 71,3 мг/г; для  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  – від 35,5 до 68,0 мг/г; для  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  – від 82,6 до 170,0 мг/г. Було встановлено, що процес адсорбції є інтенсивним на початкових етапах, однак згодом його швидкість зменшується. Це явище пов'язане з тим, що початково на поверхні феритів наявна велика кількість активних центрів, тоді як потім заповнення залишкових поверхневих ділянок ускладнюється через електростатичне відштовхування між уже адсорбованими молекулами барвника й тими, що залишаються в розчині. У роботі (Semwal et al., 2023) синтезовано нанокмпозити  $\text{Ag-Cu-CeO}_2$  зі структурою флюориту, методом співосадження з розміром кристалітів у діапазоні 6,00–6,87 нм. Синтезовані нанокмпозити використано як адсорбенти конго червоного (CR). Установлено, що вищі швидкості адсорбції досягаються за значень pH 2 для всіх трьох нанокмпозитів:  $\text{Ag-Cu-CeO}_2$  (10:20:70),  $\text{Ag-Cu-CeO}_2$  (15:15:70) та  $\text{Ag-Cu-CeO}_2$  (20:10:70). Адсорбційна ємність барвника CR становила 53,93, 54,71 та 37,80 мг/г для кожного складу відповідно, за таких умов: маса адсорбенту 0,1 г, температура 20°C, час адсорбції 180 хв. Показано, що для опису процесів адсорбції найкраще підходить ізотерма адсорбції Фрейндліха та кінетична модель псевдодругого порядку, а негативні значення ентальпії адсорбції (–27,57, –26,43 та –16,73 кДж/моль відповідно) вказують на те, що адсорбція була спонтанною та екзотермічною. Найімовірнішим механізмом адсорбції CR є електростатичне притягання, утворення координаційних комплексів та взаємодії, що включають водневі зв'язки на межі поділу фаз.

Авторами (Duhan et al., 2025) як адсорбенти барвника конго червоного (CR), а також для сенсорних застосувань під час виявлення ціанокобаламіну використано оксиди неодиму та ітрію (NYO). Показано, що процеси адсорбції ефективно проявляються за pH 5, масі адсорбенту 0,01 г, об'ємі розчину барвника 30 мл. За цих умов досяг-

нуто вилучення барвника на рівні 90,9%. Ізотерма адсорбції ефективно описується моделлю Ленгмюра, а кінетика адсорбції належить до псевдодругого порядку. Виявлено, що механізми, які зумовлюють адсорбцію барвника, включають взаємодії Ван-дер-Ваальса, водневі зв'язки та електростатичні взаємодії. Показано, що наноматеріали можна використовувати повторно протягом шести циклів, зберігаючи ефективність адсорбції 68,5%. Однак дослідження процесів адсорбції конго червоного з водних розчинів поверхнею купрум-ітрієвого гранату мало вивчені.

#### Матеріал і методи

З метою вивчення процесів адсорбції конго червоного з розчинів поверхнею купрум-ітрієвого гранату проведено синтез адсорбенту золь-гель методом за участю автогоріння (метод Печіні) за методикою, описаною в роботах (Бушкова та ін., 2013, Shanmugavel et al., 2014). Зважували 2,42 г  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  марки «Ч.д.а.»; 7,66 г  $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  марки «Ч.д.а.» та 6,3 г  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$  марки «Ч.д.а.». Суміш нітратів металів та лимонної кислоти розчиняли в 50 мл дистильованої води. До одержаного розчину додавали 15 мл 25% розчину амоніаку (марки «Ч.д.а.») для підтримання  $\text{pH} \approx 8$  (перевіряли за допомогою універсального індикаторного паперу). Розчин перенесли в широку 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 гра-

нату). Після закінчення реакції автогоріння одержану масу синтезованого купрум-ітрієвого гранату розтирали в ступці, промивали 5–7 разів невеликою кількістю дистильованої води до нейтральної реакції та висушували на повітрі. На рис. 1 зображено синтетичний купрум-ітрієвий гранат. Вихід кінцевого продукту становив 2,56 г.



Рис. 1. Фотографія синтезованого купрум-ітрієвого гранату

Для встановлення кількісного співвідношення між компонентами у структурі купрум-ітрієвого гранату проведено рентгенофлуоресцентний спектральний аналіз за допомогою енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного спектрометра «ELVAX» Model SER-01». Оброблення отриманих результатів здійснювалось за допомогою програми ElvaX Software ver. 4.1.8 за методом фундаментальних параметрів (точність визначення  $\pm 0,1\%$ ). На рис. 2 показано рентгеноспектрограму зразка купрум-ітрієвого гранату.

На основі результатів рентгенофлуоресцентного спектрального аналізу було визначено, що синтезований купрум-ітрієвий гранат містить 9,4% міді, 67,5% ітрію та

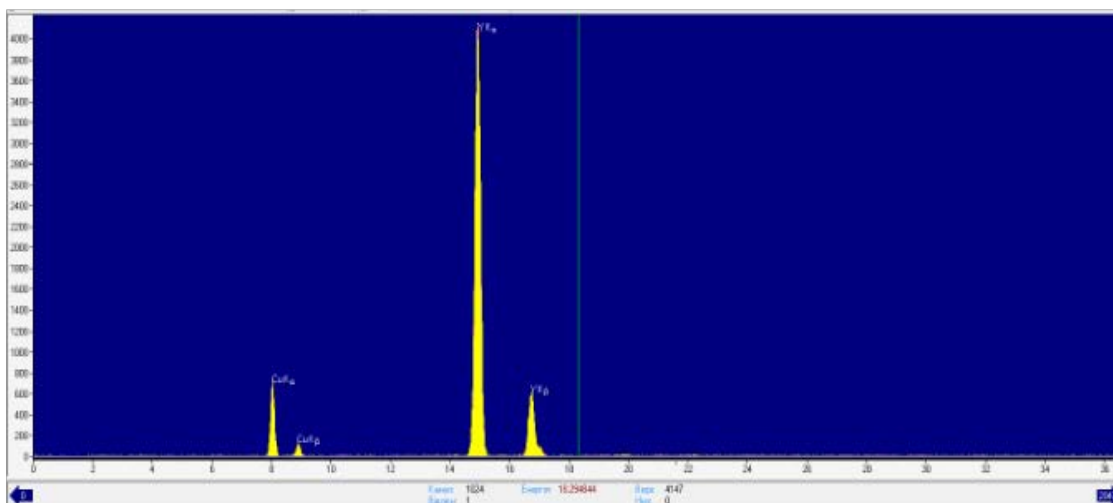


Рис. 2. Рентгеноспектрограма синтезованого купрум-ітрієвого гранату

23,1% кисню. Відповідно до отриманих даних, його найпростіша хімічна формула має вигляд  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$ .

З метою ідентифікації основних рефлексів поверхневих груп купрум-ітрієвого гранату виконано ІЧ-Фур'є спектроскопічні дослідження на спектрофотометрі з перетворенням Фур'є «AGILENT CARY 630» у спектральному діапазоні  $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ . На рис. 3 показано ІЧ-Фур'є спектр купрум-ітрієвого гранату. Визначено, що дублет за  $2400\text{--}2300\text{ см}^{-1}$  відповідає валентним симетричним коливанням  $\text{--OH}$  груп адсорбованих молекул  $\text{H}_2\text{O}$  (Chukanov & Chervonnyi, 2016). За  $1600\text{--}1400\text{ см}^{-1}$  відбуваються валентні коливання  $\text{Cu--OH}$  зв'язків поверхні купрум-ітрієвого гранату зі структурою шпінелі. Наявність цієї інтенсивної смуги поглинання вказує на високу активність поверхневих  $\text{OH}$  груп мікрочастинок зі структурою шпінелі, що також сприяє проходженню адсорбції (Frolova & Hrydnieva, 2020).

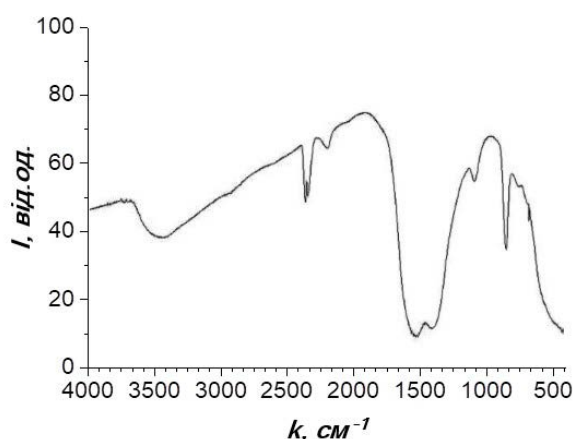


Рис. 3. ІЧ-Фур'є спектр  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$

За  $800\text{--}700\text{ см}^{-1}$  виявлено валентні коливання  $\text{Y--O}$  зв'язків додекаедрів координованого ітрію (елементарної комірки ітрієвого гранату), що характерно для гранатів зі структурою шпінелі (Modi et al., 2004), а за  $600\text{--}550\text{ см}^{-1}$  виявлено валентні коливання  $\text{Cu--O}$  зв'язків.

Для дослідження впливу маси адсорбенту на ступінь вилучення барвника проводили зважування  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$  на електронних вагах у кількостях 0,04; 0,08; 0,10 та 0,12 г. До кожної навішеної проби додавали по 25 мл розчину барвника з початковою концентрацією 6 мг/л. Суміші піддавали помірного перемішуванню на лабораторному шейкері (ЛАБ ПУ 02) протягом 90 хвилин. Концентрацію барвника до та після адсор-

бції визначали за допомогою КФК-2 за довжини хвилі 490 нм. Для розчину порівняння використовували дистильовану воду.

Для дослідження залежності ступеня вилучення барвника від часу контакту відважували по 0,08 г зразків, додавали 25 мл розчину барвника з  $C_0 = 6\text{ мг/л}$  та перемішували на шейкері. Діапазон часу контакту між розчином та адсорбентом становив: 5, 10, 30, 45, 60 та 90 хв. Температура, за якої проводилось дослідження, становила 293К. Для дослідження процесів адсорбції барвника конго червоного з водних розчинів поверхнею купрум-ітрієвого гранату готували розчини барвника з концентраціями 2–10 мг/л шляхом розведення аліквоти, відібраної з вихідного розчину (50 мг/л).

Адсорбцію барвника з водних розчинів здійснювали в статичному режимі за кімнатної температури. Для побудови кривих ізотерм адсорбції барвника з водних розчинів використано діапазон концентрацій розчинів барвника: 2, 4, 6, 8 та 10 мг/л. Маса зразків адсорбентів становили 0,08 г кожен, об'єм розчину барвника – 25 мл, час контакту між адсорбатом і адсорбентом становив 90 хв.

Смність сорбенту  $A$  (мг/г) розраховували за формулою:

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

де  $C_0$  і  $C_p$  – концентрація вихідного розчину 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:

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

Коефіцієнт розподілу  $E$  (мл/г) розраховували за формулою:

$$E = \frac{A}{C_p} \cdot 1000 \quad (3)$$

Для оброблення одержаних ізотерм адсорбції барвника з водних розчинів використано математичні моделі сорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича, фізичний зміст яких описано в роботі (Камінський та ін., 2023).

### Результати та їх обговорення

Для встановлення оптимальної маси адсорбенту побудовано експериментальну залежність ступеня вилучення барвника від маси адсорбенту (рис. 4).

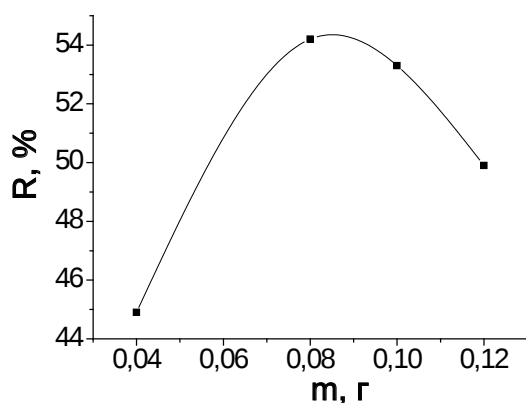


Рис. 4. Залежність ступеня вилучення конго червоного від маси адсорбенту

Як видно з рисунку, максимальний ступінь вилучення 54,6% досягається для маси адсорбента 0,08 г. Встановлено, що подальше збільшення маси адсорбенту збільшує величину адсорбції, що, ймовірно, пов'язано з особливостями міжмолекулярних взаємодій на межі поділу фаз та адсорбційно-десорбційною рівновагою цього процесу.

На рис. 5 показано залежність ступеня вилучення барвника від часу контакту між компонентами. Було з'ясовано, що впродовж перших 30 хвилин адсорбції ступінь вилучення барвника становить 43,5%, а максимального рівня (54,6%) досягає через 120 хвилин від початку контакту системи «адсорбат – адсорбент». Форма отриманої кінетичної кривої свідчить про перебіг нерівноважних адсорбційних процесів, в яких поглинання барвника на межі поділу фаз переважає над десорбцією з поверхні адсорбенту. Імовірний механізм адсорбції буде детально розглянуто авторами в наступних етапах дослідження.

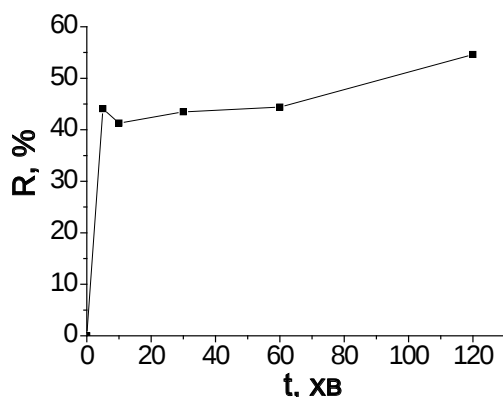


Рис. 5. Залежність ступеня вилучення барвника від часу контакту між компонентами

На рис. 6 показано ізотерму адсорбції конго червоного з розчинів поверхнею  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$ .

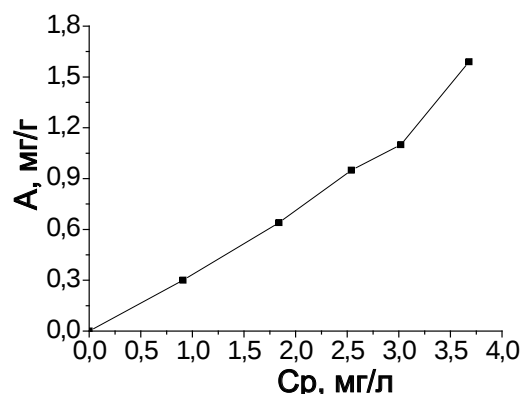


Рис. 6. Ізотерма адсорбції конго червоного з розчинів поверхнею  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$

Згідно з отриманими даними, адсорбційна ємність (A) становить 1,59 мг/г, а коефіцієнт розподілу (E) за початкової концентрації барвника 10 мг/л дорівнює 432,06 мл/г. Це свідчить про відносно слабку афінність барвника до поверхні купрум-ітрієвого гранату. Форма ізотерми адсорбції відповідає лінійному типу, подібному до ізоTERM Генрі за класифікацією Гільса. Така поведінка системи вказує на переважання взаємодії між адсорбованими молекулами і поверхнею адсорбенту над міжмолекулярними зв'язками між самими молекулами адсорбату, що відрізняє її від характерної моделі Ленгмюра.

У таблиці 1 наведено експериментальні дані адсорбції конго червоного поверхнею  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$ .

Таблиця 1  
Експериментальні дані адсорбції конго червоного поверхнею  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$

| $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$ |       |         |
|-----------------------------|-------|---------|
| A, мг/г                     | R, %  | E, мл/г |
| 1,59                        | 54,60 | 432,06  |

ІзоТЕРМИ адсорбції проаналізовано відповідно до моделей адсорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича. Визначено, що ізоТЕРМА адсорбції конго червоного задовільно описується моделлю Тьомкіна, в порівнянні з іншими моделями, про що свідчить коефіцієнт кореляції ( $R^2 = 0,854$ ). Це означає, що адсорбція барвника відбувається на потенційно неоднорідних поверхнях, на яких відбувається рівномірний розподіл адсорбційних центрів за енергією.

Використовуючи рівняння Дубініна-Радушкевича, розраховано величину енергії адсорбції ( $E$ ), яка становить 2,162 кДж/моль, що вказує на чисто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні купрум-ітрієвого гранату.

#### Висновки

У процесі дослідження було здійснено синтез купрум-ітрієвого гранату з кристалічною структурою шпінелі методом золь-гель з автокаталітичним горінням (так званий метод Печіні). Результати рентгенофлуоресцентного спектрального аналізу свідчать про те, що вміст основних елементів у зразку становить: 9,4% Cu, 67,5% Y та 23,1% O, що відповідає емпіричній формулі  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$ .

ІЧ-Фур'є спектроскопія виявила, що в області 1600–1400  $\text{cm}^{-1}$  спостерігаються валентні коливання зв'язків Cu–OH, що притаманні поверхні купрум-ітрієвого гранату зі структурою шпінелі. Водночас у діапазоні 800–700  $\text{cm}^{-1}$  зафіксовано коливання зв'язків Y–O, характерні для додекаедричної координації Ітрію, типової для шпінелевих структур.

Під час вивчення адсорбційної активності встановлено, що максимальне вилучення барвника конго червоного з розчину становить 54,6% і досягається за викори-

стання маси адсорбенту 0,08 г. Подальше збільшення кількості сорбенту не призводить до покращення ефективності процесу. Також виявлено, що вже за перші 30 хвилин ступінь вилучення досягає 43,5%, а максимальне значення спостерігається після 120 хвилин взаємодії системи «адсорбат – адсорбент».

Адсорбційна ємність матеріалу становить 1,59 мг/г, тоді як коефіцієнт розподілу за початкової концентрації барвника 10 мг/л сягає 432,06 мл/г, що вказує на відносно слабку афінність барвника до поверхні отриманого гранату. Ізотерма адсорбції має лінійний характер і відповідає типу Генрі згідно з класифікацією Гільса. Такий профіль свідчить про те, що переважну роль у процесі відіграє взаємодія молекул барвника з активними центрами поверхні, а не міжмолекулярні зв'язки між самими молекулами адсорбату, як це характерно для ізотерми Ленгмюра.

Крім того, ізотерму адсорбції конго червоного успішно описано моделлю Тьомкіна, що вказує на присутність енергетично неоднорідних адсорбційних центрів із рівномірним розподілом їх енергій. Розрахована енергія адсорбції підтверджує, що поглинання барвника відбувається шляхом фізичної, а не хімічної взаємодії з поверхнею  $\text{CuY}_5\text{O}_{10}$ .

#### Список використаної літератури

- Бушкова В.С., Остафійчук Б.К., Копаєв О.В. Особливості синтезу складних оксидних систем з використанням ЗГА-методу. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2013. Т. 15. № 1. С. 182–185.
- 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 нанокompозитів, модифікованих гідроксиапатитом. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 5. С. 70–79. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.8>.
- Ahmad N., Kameda T., Rahman M. T., Rahman F., Lesbani A. Preparation of a new hybrid MgALDH@Magnetite activated charcoal by hydrothermal method for stability and adsorption mechanism of congo red. *Results in Surfaces and Interfaces*. 2025. Vol. 18. 100440. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2025.100440>.
- Boumya W., Khnifira M., Farid Z., et al. Comparative study of cationic Nile blue and anionic methyl orange dyes adsorption in water on the (110) surface of metal chlorides by DFT and MD approaches. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2024. Vol. 185. 111738. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2023.111738>.
- Boushehrian M.M., Esmaeili H., Foroutan R. Ultrasonic assisted synthesis of Kaolin/ $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  nanocomposite for removing cationic dyes from aqueous media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020. Vol. 8, Is. 4. 103869. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103869>.
- Chenab K.K., Sohrabi B., Jafari A., Ramakrishna S. Water treatment: functional nanomaterials and applications from adsorption to photodegradation. *Materials Today Chemistry*. 2020. Vol. 16. 100262. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100262>.
- Chukanov N.V., Chervonnyi A.D. IR Spectra of Minerals and Related Compounds, and Reference Samples' Data. In: *Infrared Spectroscopy of Minerals and Related Compounds*. Springer Mineralogy. Springer, Cham. 2016. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-25349-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25349-7_2).
- Din M.I., Khalid R., Najeeb J., Hussain Z. Fundamentals and photocatalysis of methylene blue dye using various nanocatalytic assemblies- a critical review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 298. 126567. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126567>.

Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2020/2184> (дата звернення: 01.05.2025).

Duhan J., Dhuva B., Obrai S. Dual functional neodymium-yttrium binary oxide for adsorption of Congo red dye and as well as optical detection of cyanocobalamin. *Journal of Water Process Engineering*. 2025. Vol. 75. 107974. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107974>.

Frolova L.A., Hrydnieva T.V. Synthesis, structural, magnetic and photocatalytic properties of  $\text{MFe}_2\text{O}_4$  (M=Co, Mn, Zn) ferrite nanoparticles obtained by plasmachemical method. *Journal of Chemistry and Technologies*. 2020. Vol. 28(2). P. 202–210. <https://dx.doi.org/10.15421/082022>.

Gao H.J., Wang S.F., Fang L.M., et al. Nanostructured spinel-type  $\text{M}(\text{M} = \text{Mg}, \text{Co}, \text{Zn})\text{Cr}_2\text{O}_4$  oxides: novel adsorbents for aqueous Congo red removal. *Materials Today Chemistry*. 2021. Vol. 22. 100593. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100593>.

Karadayı M., Güllüce E., Gülşahin Y., et al. Molecular docking assisted toxicity assessment of Congo Red and detoxification potential of *Fraxinus excelsior* L. (Oleaceae) biosorbent application. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06842-9>.

Khan M.A., Kuldeep, Yadav S., Singh N., Basheed G.A. Enhanced adsorption of congo red dye using dried chitosan functionalized  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$  viscoelastic fluid. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025. Vol. 709, Part 2. 136166. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136166>.

Khan Z.A., Elwakeel K.Z., Mashabi R.A., Elgarahy A.M. Adsorption of anionic dyes onto 1,5-Diphenylcarbazine functionalized magnetic hybrid polymer: Impact of water salinity and surfactants on adsorption isotherms. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2024. Vol. 131. P. 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.10.061>.

Modi K.B., Vara R.P., Vora H.G., Chhantbar M.C., Joshia H.H. Infrared spectroscopic study of  $\text{Fe}^{3+}$  substituted yttrium iron garnet. *Journal of materials science*. 2004. Vol. 39. P. 2187–2189 <https://doi.org/10.1023/B:JMSE.0000017784.45403.5b>.

Semwal N., Mahar D., Chatti M., et al. Adsorptive removal of Congo Red dye from its aqueous solution by Ag-Cu-CeO<sub>2</sub> nanocomposites: Adsorption kinetics, isotherms, and thermodynamics. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, Is. 11. e22027. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22027>.

Shanmugavel T., Gokul Raj S., Ramesh Kumar G., Rajarajana G. Synthesis and Structural Analysis of Nanocrystalline  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ . *Physics Procedia*. 2014. Vol. 54. P. 159–163. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.10.053>.

Quintanilla-Villanueva G.E., Sicardi-Segade A., Luna-Moreno D., et al. Recent Advances in Congo Red Degradation by TiO<sub>2</sub>-Based Photocatalysts Under Visible Light. *Catalysts*. 2025. Vol. 15, Is. 84. <https://doi.org/10.3390/catal15010084>.

Wang L., Li J., Wang Y., Zhao L., Jiang Q. Adsorption capability for Congo red on nanocrystalline  $\text{MFe}_2\text{O}_4$  (M = Mn, Fe, Co, Ni) spinel ferrites. *Chemical Engineering Journal*. 2012. Vol. 181. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.088>.

## References

Bushkova, V.S., Ostafiyuk, B.K., & Kopayev, A.V. (2013). Osoblyvosti syntezu skladnykh oksydneykh system z vykorystannyam ZHA-metodu [Features of Synthesis of Complex Oxide Systems by Means of SGA-Method]. *Fizyka i khimiya tverdoho tila [Physics and chemistry of solid state]*, 15 (1), 182–185. [in Ukrainian]

Kaminsky, O.M., Denysyuk, R.O., Chayka, M.V., Pysarenko, S.V., & Panasyuk, D.Yu. (2023). Sorbtsiya yonnykh form Tsynku(II) z vodnykh rozchyniv poverkhnyamy mahnitochutlyvykh nanokompozytiv, modyfikovanykh hidroksyapatytom [Sorption of ionic forms of Zinc(II) from aqueous solutions by the surfaces of magnetically sensitive nanocomposites modified with hydroxyapatite]. *Ukrayinskyi zhurnal pryrodnychych nauk [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, 5, 70–79. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.8> [in Ukrainian]

Ahmad, N., Kameda, T., Rahman, M. T., Rahman, F., & Lesbani, A. (2025). Preparation of a new hybrid MgAlLDH@Magnetite activated charcoal by hydrothermal method for stability and adsorption mechanism of congo red. *Results in Surfaces and Interfaces*, 18, 100440. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2025.100440> [in English].

Boumya, W., Khnifra, M., & Farid, Z., et al. (2024). Comparative study of cationic Nile blue and anionic methyl orange dyes adsorption in water on the (110) surface of metal chlorides by DFT and MD approaches. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 185, 111738. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2023.111738> [in English].

- Boushehrian, M.M., Esmaceli, H., & Foroutan, R. (2020). Ultrasonic assisted synthesis of Kaolin/CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocomposite for removing cationic dyes from aqueous media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8 (4), 103869. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103869> [in English].
- Chenab, K.K., Sohrabi, B., Jafari, A., & Ramakrishna, S. (2020). Water treatment: functional nanomaterials and applications from adsorption to photodegradation. *Materials Today Chemistry*, 16, 100262. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100262> [in English].
- Chukanov, N.V., & Chervonnyi, A.D. (2016). IR Spectra of Minerals and Related Compounds, and Reference Samples' Data. In: *Infrared Spectroscopy of Minerals and Related Compounds*. Springer Mineralogy. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-25349-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25349-7_2) [in English].
- Din, M.I., Khalid, R., Najeeb, J., & Hussain, Z. (2021). Fundamentals and photocatalysis of methylene blue dye using various nanocatalytic assemblies- a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126567. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126567> [in English].
- Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption. [Electronic resource]. URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2020/2184> (access date 01.05.2025) [in English].
- Duhan, J., Dhuva, B., & Obrai, S. (2025). Dual functional neodymium-yttrium binary oxide for adsorption of Congo red dye and as well as optical detection of cyanocobalamin. *Journal of Water Process Engineering*, 75, 107974. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107974> [in English].
- Frolova, L.A., & Hrydniewa, T.V. (2020). Synthesis, structural, magnetic and photocatalytic properties of MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M=Co, Mn, Zn) ferrite nanoparticles obtained by plasmachemical method. *Journal of Chemistry and Technologies*, 28 (2), 202–210. <https://dx.doi.org/10.15421/082022>
- Gao, H.J., Wang, S.F., & Fang, L.M., et al. (2021). Nanostructured spinel-type M(M = Mg, Co, Zn)Cr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> oxides: novel adsorbents for aqueous Congo red removal. *Materials Today Chemistry*, 22, 100593. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100593> [in English].
- Karadayı, M., Güllüce, E., & Gülşahin, Y., et al. (2025). Molecular docking assisted toxicity assessment of Congo Red and detoxification potential of *Fraxinus excelsior* L. (Oleaceae) biosorbent application. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-025-06842-9> [in English].
- Khan, M.A., Kuldeep, Yadav, S., Singh, N., & Basheed, G.A. (2025). Enhanced adsorption of congo red dye using dried chitosan functionalized MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> viscoelastic fluid. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 709 (2), 136166. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136166> [in English].
- Khan, Z.A., Elwakeel, K.Z., Mashabi, R.A., & Elgarahy, A.M. (2024). Adsorption of anionic dyes onto 1,5-Diphenylcarbazine functionalized magnetic hybrid polymer: Impact of water salinity and surfactants on adsorption isotherms. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 131, 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.10.061> [in English].
- Modi, K.B., Vara, R.P., Vora, H.G., Chhantbar, M.C., & Joshia, H.H. (2004). Infrared spectroscopic study of Fe<sup>3+</sup> substituted yttrium iron garnet. *Journal of materials science*, 39, 2187–2189. <https://doi.org/10.1023/B:JMSC.0000017784.45403.5b> [in English].
- Semwal, N., Mahar, D., & Chatti, M., et al. (2023). Adsorptive removal of Congo Red dye from its aqueous solution by Ag-Cu-CeO<sub>2</sub> nanocomposites: Adsorption kinetics, isotherms, and thermodynamics. *Heliyon*, 9 (11), e22027. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22027> [in English].
- Shanmugavel, T., Gokul Raj, S., Ramesh Kumar, G., & Rajarajana, G. (2014). Synthesis and Structural Analysis of Nanocrystalline MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Physics Procedia*, 54, 159–163. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.10.053> [in English].
- Quintanilla-Villanueva, G.E., Sicardi-Segade, A., & Luna-Moreno, D., et al. (2025). Recent Advances in Congo Red Degradation by TiO<sub>2</sub>-Based Photocatalysts Under Visible Light. *Catalysts*, 15 (84). <https://doi.org/10.3390/catal15010084> [in English].
- Wang, L., Li, J., Wang, Y., Zhao, L., & Jiang, Q. (2012). Adsorption capability for Congo red on nanocrystalline MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M = Mn, Fe, Co, Ni) spinel ferrites. *Chemical Engineering Journal*, 181, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.088> [in English].

Отримано: 22.07.2025  
Прийнято: 27.08.2025  
Опубліковано: 17.10.2025

