

УДК 544.723:546.74:547.625

[https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13\(54\)-2163-2173](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13(54)-2163-2173)

Камінський Олександр Миколайович кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, <https://orcid.org/0000-0003-1971-8437>

АДСОРБЦІЯ КОНГО ЧЕРВОНОГО ПОВЕРХНЕЮ НІКЕЛЕВОГО ХРОМІТУ

Анотація. Хроміти – це клас складнооксидних матеріалів загальною формулою MeCr_2O_4 . Вони знаходять широке застосування у різних галузях сучасної технології, наприклад нікелевий хроміт використовується у якості електродів для виробництва суперконденсаторів, показуючи хорошу ємність та стабільність циклів. Проте завдяки добре розвиненій поверхні його можна використовувати у якості каталізаторів різноманітних процесів та адсорбції. У даній роботі проведено золь-гель цитратний синтез за участю автогоріння нанорозмірного нікелевого хроміту зі структурою шпінелі. Методами ІЧ-Фур'є спектроскопії виявлено, що при $1600\text{--}1400\text{ см}^{-1}$ відбувається валентні коливання Ni-OH зв'язків поверхні нікелевого хроміту, а також смугу поглинання в області 530 см^{-1} , яку можна віднести до коливальних мод шпінелі NiCr_2O_4 .

Досліджено процеси адсорбції барвника конго червоного з водних розчинів поверхнею нікелевого хроміту. Встановлено, що ступінь вилучення барвника на рівні 27,2 % досягається протягом перших 30 хвилин від початку адсорбційного процесу, тоді як максимальне значення 28,3 % спостерігається після 60 хвилин взаємодії системи «адсорбат-адсорбент». Форма кінетичної кривої свідчить про перебіг нерівноважних адсорбційних процесів, за яких упродовж першої години переважає адсорбція на межі поділу фаз над десорбцією барвника з поверхні адсорбенту. Подальше збільшення часу контакту призводить до зміщення адсорбційної рівноваги в бік посилення процесів десорбції на межі поділу фаз.

Визначено, що адсорбційна ємність становить 1,2 мг/г за максимальної концентрації барвника ($C_0 = 10\text{ мг/л}$). Отримані значення свідчать про низьку спорідненість досліджуваного барвника до поверхні нікелевого хроміту. Форма ізотерми адсорбції відповідає S-типу згідно з класифікацією Гільса.

Встановлено, що ізотерма адсорбції конго червоного задовільно описується моделлю Фрейндліха, в порівнянні з іншими моделями, про що свідчить коефіцієнт кореляції ($R^2 = 0,974$). Розраховано величину енергії

адсорбції адсорбції, яка становить 2,294 кДж/моль, що вказує на чисто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні.

Ключові слова: нікелевий хроміт, золь-гель синтез, ІЧ-Фур'є спектроскопія, штучні барвники, конго червоний, адсорбція, ізотерми адсорбції, хімія поверхні.

Kaminskyi Oleksandr Mykolaiovych Candidate of Chemical Sciences (Ph. D.), an associate professor, an associate professor of the Chemistry department, Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, <https://orcid.org/0000-0003-1971-8437>

ADSORPTION OF CONGO RED ON THE SURFACE OF NICKEL CHROMEITE

Abstract. Chromites are a class of complex oxide materials with the general formula MeCr_2O_4 . They are widely used in various fields of modern technology, for example, nickel chromite is used as electrodes for the production of supercapacitors, showing good capacity and cycle stability. However, due to its well-developed surface, it can be used as catalysts for various processes and adsorption. In this work, sol-gel citrate synthesis involving autocombustion of nanosized nickel chromite with a spinel structure was carried out. IR-Fourier spectroscopy methods revealed that at $1600\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$, stretching vibrations of Ni-OH bonds of the nickel chromite surface occur, as well as an absorption band in the region of 530 cm^{-1} , which can be attributed to the vibrational modes of the spinel NiCr_2O_4 .

The processes of adsorption of Congo red dye from aqueous solutions by the nickel chromite surface were studied. It was found that the degree of dye extraction at the level of 27.2% is achieved within the first 30 minutes from the beginning of the adsorption process, while the maximum value of 28.3% is observed after 60 minutes of interaction of the "adsorbate-adsorbent" system. The shape of the kinetic curve indicates the course of non-equilibrium adsorption processes, in which during the first hour adsorption at the phase interface prevails over desorption of the dye from the adsorbent surface. Further increase in the contact time leads to a shift of the adsorption equilibrium towards the strengthening of desorption processes at the phase interface.

It was determined that the adsorption capacity is 1.2 mg/g at the maximum dye concentration ($C_0 = 10\text{ mg/l}$). The obtained values indicate a low affinity of the studied dye to the surface of nickel chromite. The shape of the adsorption isotherm corresponds to the S-type according to the Giles classification.

It was found that the adsorption isotherm of Congo red is satisfactorily described by the Freundlich model, in comparison with other models, as evidenced

by the correlation coefficient ($R^2 = 0.974$). The adsorption energy of adsorption was calculated to be 2.294 kJ/mol, which indicates a purely physical adsorption of dye molecules on the surface.

Keywords: nickel chromite, sol-gel synthesis, FTIR spectroscopy, artificial dyes, Congo red, adsorption, adsorption isotherms, surface chemistry.

Постановка проблеми.

Проблема якості води є однією з глобальних проблем людства, яка як ніколи гостро впливає на суспільство, що також зазначено в Директиві ЄС [1]. Якість водних ресурсів зазнала суттєвого погіршення внаслідок інтенсивного промислового розвитку, що спричинило загострення глобальної проблеми дефіциту прісної води. Значна кількість промислових виробництв, зокрема текстильна, шкіряна, фармацевтична, поліграфічна та харчова галузі, утворюють стічні води, які містять барвники. Синтетичні барвники належать до найбільш поширених забруднювачів довкілля та чинять негативний вплив на здоров'я людини і водні екосистеми. Окрім цього, органічні барвники можуть містити сполуки з канцерогенними властивостями, що становлять небезпеку для людини та інших живих організмів.

Так, наприклад, синтетичний барвник конго червоний – це аніонний барвник, який нерозчинний у кислотах та основах, а тому його важко видалити після потрапляння в природні водойми. Даний барвник не тільки здатний пригнічувати ріст і розвиток рослин і тварин, але й впливати на процеси травлення, кров та серцево-судинну систему людини різною мірою [2].

Наразі з метою зниження ризику забруднення довкілля особливого значення набуває необхідність ретельного очищення відходів перед їх скиданням у навколишнє середовище. Внаслідок інтенсивного забарвлення та складної молекулярної будови барвники, як правило, не піддаються ефективному видаленню за допомогою традиційних методів очищення, що застосовуються для усунення інших типів забруднювачів [3-4].

Для видалення органічних барвників було запропоновано та розроблено широкий спектр методів і технологій, зокрема: мембранні процеси, адсорбційні методи, електрохімічні технології, біологічні підходи, іонний обмін, фотокаталітичні процеси тощо. Водночас кожен із зазначених методів характеризується певними перевагами та обмеженнями, у зв'язку з чим проблема пошуку ефективних і сучасних способів очищення водних об'єктів від барвників залишається актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Процеси адсорбції барвників, у тому числі конго червоного, мають ряд переваг, у порівнянні з іншими технологіями очистки забруднених водойм, серед яких можна виділити: відносну простоту методу, значну економічність

адсорбційних матеріалів та можливість їх швидкої регенерації, високу ефективність адсорбції та інше.

Авторами у роботі [5] було досліджено ефективність адсорбції конго червоного (CR) з водних розчинів на наносорбентах з подвійним гідроксидом MgAl (MgAl-LDH). MgAl-LDH синтезовано гідротермічним методом, а фізико-хімічна характеристика була проведена за допомогою порошкової рентгенівської дифракції, просвічувальної електронної мікроскопії високої роздільної здатності, інфрачервоного аналізу з перетворенням Фур'є та вимірюванням дзета-потенціалу. Показано, що на процеси адсорбції CR впливають маса адсорбенту, pH розчину, час контакту та початкова концентрація адсорбату, змінюються залежно від кінетики адсорбції та механізму ізотерми. Досліджено, що швидка адсорбція барвника CR з водних розчинів на MgAl-LDH відбувається протягом перших 30 хвилин, а рівновага настає через 180 хвилин з концентрацією барвника 50 мг/100 мл та масою адсорбенту MgAl-LDH 0,05 г. Встановлено, що експериментальні дані адсорбції адекватно узгоджуються з моделлю ізотерми Ленгмюра та найкраще відповідають кінетичній моделі псевдо-другого порядку. Зміна дзета-потенціалу підтвердила ефективну адсорбційну взаємодію між позитивно зарядженим MgAl-LDH та негативно зарядженими молекулами CR з електростатичними взаємодіями. Приготований MgAl-LDH продемонстрував високу адсорбційну здатність до аніонного барвника CR з максимальною адсорбційною здатністю 769,23 мг/г.

Композити на основі магнетиту та активованого вугілля (AC-Fe₃O₄) синтезовано методом спільного осадження та використано у якості адсорбента барвника конго червоного [6]. Досліджено вплив маси адсорбенту, температури та початкової концентрації барвника. Показано, що збільшення маси адсорбенту призвело до збільшення адсорбційної здатності барвника, і оптимальна доза становила 2 г/л. Збільшення температури мало дещо негативний вплив на адсорбцію, що свідчить про екзотермічний характер процесу адсорбції. Початкова концентрація барвника також мала значний вплив на процес адсорбції, оскільки адсорбційна здатність адсорбентів AC-Fe₃O₄ зменшувалася зі збільшенням концентрації барвника. Показано, що отримані дані адсорбції узгоджуються з ізотермою адсорбції Ленгмюра, і максимальна адсорбційна здатність адсорбенту AC-Fe₃O₄ становила близько 129,87 мг/г. Загалом, результати свідчать про те, що синтезовані композити AC-Fe₃O₄ мають значний потенціал для використання у якості адсорбентів для видалення органічних забруднювачів з водних розчинів.

У роботі авторами [7] синтезовано у два етапи методом співосадження композит поліпірол/ZnO/ZnCr₂O₄ та використано у якості адсорбента конго червоного (CR). Спочатку композит цинк оксид/цинк хроміт (ZnO/ZnCr₂O₄) синтезовано за допомогою методу співосадження.

Потім композит $\text{ZnO}/\text{ZnCr}_2\text{O}_4$ модифіковано поліпіролом (PPy). Одержаний адсорбент охарактеризовано методами рентгенівської дифракції (XRD), інфрачервоного спектроскопічного аналізу з перетворенням Фур'є (FT-IR), скануючої електронної мікроскопії (SEM) та енергодисперсійного рентгенівського аналізу (EDXA). Композит PPy/ $\text{ZnO}/\text{ZnCr}_2\text{O}_4$ продемонстрував чудові адсорбційні властивості відносно конго червоного (CR), у порівнянні з немодифікованими адсорбентами ZnO та $\text{ZnO}/\text{ZnCr}_2\text{O}_4$. Визначено оптимальні параметри адсорбції (час контакту, різні значення pH, температури та маси адсорбенту). Дослідження кінетики вилучення CR з розчину вказує на те, що механізм адсорбції можна описати кінетичною моделлю псевдо-другого порядку. Показано, що ізотерма адсорбції Ленгмюра краще описує адсорбцію, ніж ізотерма Фрейндліха.

У дослідженні авторами [8] синтезовано новий матеріал $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{BTCA}$ шляхом іммобілізації 1,2,4,5-бензолтетракарбонової кислоти (BTCA) на поверхні наночастинок Fe_3O_4 , які одержано золь-гель методом співсадження. Методами P-XRD, FE-SEM та TEM підтверджено, що Fe_3O_4 має сферичну кристалічну структуру із середнім діаметром 15 нм, який після функціоналізації за допомогою BTCA збільшується до 20 нм. Функціоналізація також збільшує площу поверхні та поверхневий заряд матеріалу, що підтверджено аналізом BET та дзета-потенціалу відповідно. Процеси адсорбції поверхнею $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{BTCA}$ досліджено для трьох поширених барвників: конго червоного (CR), метиленового синього (MB) та кристалічного фіолетового (CV). Визначено, що матеріал швидко та селективно адсорбує барвник CR з дуже високою адсорбційною здатністю (630 мг/г), що пояснюється сильною здатністю BTCA до утворення водневих зв'язків з барвником CR, що показано дослідженням механізму адсорбції. Матеріал також демонструє чудову перероблюваність без значної втрати адсорбційної здатності. Досліджено, що ізотерми адсорбції та кінетики вказують на те, що адсорбція відбувається за моделлю адсорбції Ленгмюра та відповідає кінетиці адсорбції псевдо-другого порядку.

Проте слід відмітити, що мало існує джерел, що описують адсорбцію конго червоного поверхнею нікелевого хроміту, що обумовило актуальність даного дослідження.

Мета статті – дослідження процесів адсорбції барвника конго червоного з водних розчинів поверхнею нікелевого хроміту.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження процесів адсорбції конго червоного з водних розчинів у даній роботі проведено золь-гель цитратний синтез нікелевого хроміту за подібною методикою, описаною у роботах [9-11].

Суміш нікель (II) нітрату, хром (III) нітрату марок «ч.д.а.» та лимонної кислоти, взятих у кількісному співвідношенні 1:2:3, розчиняли в 50 мл

дистильованої води. До одержаного розчину додавали 17 мл 25 % розчину аміаку (марки «ч.д.а.») порціями по 2 мл для підтримання $\text{pH} \approx 9$ (перевіряли за допомогою універсального індикаторного паперу). Розчин переносили у високу склянку на 250 мл і нагрівали на електричній плитці до повного випаровування розчинника з утворенням густого гелю, який після висихання самоспалахував.

Після закінчення реакції автогоріння одержану масу синтезованого нікелевого хроміту розтирали в ступці, промивали 5-7 разів невеликою кількістю дистильованої води до нейтральної реакції та висушували на повітрі.

Для підтвердження будови нікелевого хроміту проведено ІЧ-спектроскопічні дослідження на спектрофотометрі з перетворенням Фур'є «AGILENT CARY 630» в спектральному діапазоні $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$.

На рис. 1. зображено ІЧ-Фур'є спектр синтезованого NiCr_2O_4 .

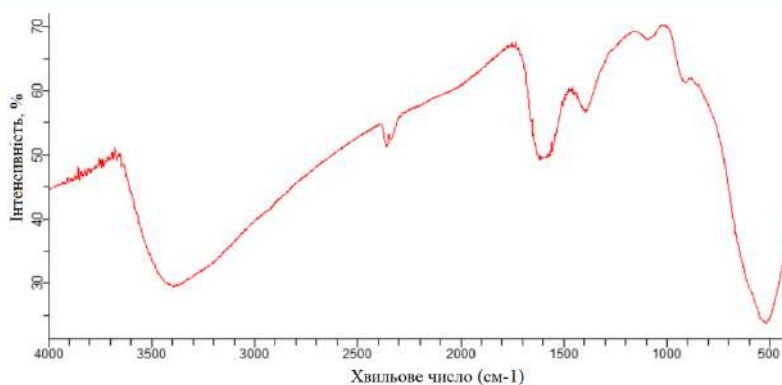


Рис. 1. ІЧ-Фур'є спектр синтезованого NiCr_2O_4

Визначено, що при $1600-1400 \text{ см}^{-1}$ відбувається валентні коливання Ni-OH зв'язків поверхні нікелевого хроміту, що має структуру шпінелі. Як зазначають автори [12], наявність цієї смуги на ІЧ-Фур'є спектрі може свідчити про потенційну активність поверхневих гідроксильних (ОН) груп, оскільки присутність зв'язків такого типу сприяє перебігу адсорбційних процесів.

Крім того, зафіксовано смугу поглинання в області 530 см^{-1} , яку можна віднести до коливальних мод шпінелі NiCr_2O_4 , що є характерною ознакою хромітів зі шпінельною структурою [13].

Для проведення кінетичних досліджень на електронних вагах відважували по 0,08 г зразків, до яких додавали 25 мл розчину барвника з початковою концентрацією $C_0 = 6 \text{ мг/л}$, після чого суміші перемішували на шейкері. Час контакту між розчином і адсорбентом становив 5, 10, 30, 45, 60 та 90 хв.

Дослідження здійснювали за температури 293 К. Концентрацію барвника до та після адсорбції визначали фотометрично за допомогою КФК-2 за довжини хвилі 490 нм та з використанням калібрувального графіку.

Для побудови ізотерм адсорбції розчину барвника з концентраціями 2, 4, 6, 8, та 10 мг/л готували з маточного розчину $C_0 = 50$ мг/г, шляхом відбирання необхідного об'єму розчину мірною піпеткою та доведення його до мітки дистиллятом в мірній колбі на 100 мл. Маса адсорбента становила 0,08 г, час контакту 90 хв за температури 293 К. Адсорбцію здійснювали в статичному режимі.

Ємність адсорбенту 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 барвника та розчину після адсорбції (мг/л), V – об'єм розчину (л), m – наважка адсорбенту (г).

Ступінь вилучення R , % барвника з водних визначали за формулою:

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

На рис. 2 показано графік залежності ступеня вилучення конго червоного від часу контакту з поверхнею нікелевого хроміту.

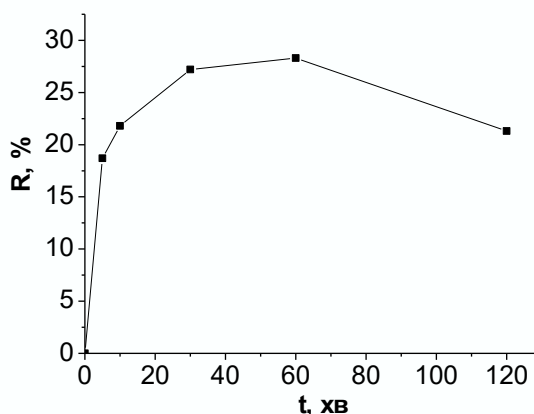


Рис. 2. Графік залежності ступеня вилучення конго червоного від часу контакту з поверхнею нікелевого хроміту

Встановлено, що ступінь вилучення барвника на рівні 27,2 % досягається протягом перших 30 хвилин від початку адсорбційного процесу, тоді як максимальне значення 28,3 % спостерігається після 60 хвилин взаємодії системи «адсорбат-адсорбент». Форма кінетичної кривої свідчить про перебіг нерівноважних адсорбційних процесів, за яких упродовж першої години переважає адсорбція на межі поділу фаз над десорбцією барвника з поверхні адсорбенту. Подальше збільшення часу контакту призводить до зміщення адсорбційної рівноваги в бік посилення процесів десорбції на межі поділу фаз.

На рис. 3 зображено ізотерму адсорбції конго червоного з водних розчинів.

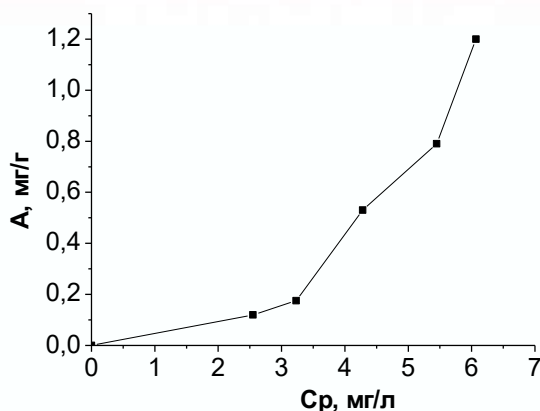


Рис. 3. Ізотерма адсорбції конго червоного з водних розчинів

Визначено, що адсорбційна ємність (A) становить 1,2 мг/г за максимальної концентрації барвника ($C_0 = 10$ мг/л). Отримані значення свідчать про низьку спорідненість досліджуваного барвника до поверхні нікелевого хроміту. Форма ізотерми адсорбції відповідає S-типу згідно з класифікацією Гільса [14], що вказує на домінування міжмолекулярних взаємодій у розчині над силами взаємодії на межі поділу «адсорбат-адсорбент».

Також одержану ізотерму проаналізовано відповідно до моделей ізотерм адсорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радускевича.

Встановлено, що ізотерма адсорбції конго червоного задовільно описується моделлю Фрейндліха, в порівнянні з іншими моделями, про що свідчить коефіцієнт кореляції ($R^2 = 0,974$).

Це означає, що мономолекулярна адсорбція барвника відбувається на гетерогенних центрах поверхні, на яких відбувається нерівномірний розподіл за енергіями. Розраховано величину енергії адсорбції (E), яка становить 2,294 кДж/моль, що вказує на чисто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні.

Висновки. У даній роботі проведено золь-гель цитратний синтез за участю автогоріння нанорозмірного нікелевого хроміту зі структурою шпінелі. Методами ІЧ-Фур'є спектроскопії виявлено, що при $1600-1400$ cm^{-1} відбувається валентні коливання Ni-OH зв'язків поверхні нікелевого хроміту, а також смугу поглинання в області 530 cm^{-1} , яку можна віднести до коливальних мод шпінелі NiCr_2O_4 .

Досліджено процеси адсорбції барвника конго червоного з водних розчинів поверхнею нікелевого хроміту. Встановлено, що ступінь вилучення барвника на рівні 27,2 % досягається протягом перших 30 хвилин від початку адсорбційного процесу, тоді як максимальне значення 28,3 % спостерігається після 60 хвилин взаємодії системи «адсорбат-адсорбент». Форма кінетичної

кривої свідчить про перебіг нерівноважних адсорбційних процесів, за яких упродовж першої години переважає адсорбція на межі поділу фаз над десорбцією барвника з поверхні адсорбенту. Подальше збільшення часу контакту призводить до зміщення адсорбційної рівноваги в бік посилення процесів десорбції на межі поділу фаз.

Визначено, що адсорбційна ємність становить 1,2 мг/г за максимальної концентрації барвника ($C_0 = 10$ мг/л). Отримані значення свідчать про низьку спорідненість досліджуваного барвника до поверхні нікелевого хроміту. Форма ізотерми адсорбції відповідає S-типу згідно з класифікацією Гільса.

Встановлено, що ізотерма адсорбції конго червоного задовільно описується моделлю Фрейндліха, в порівнянні з іншими моделями, про що свідчить коефіцієнт кореляції ($R^2 = 0,974$). Розраховано величину енергії адсорбції адсорбції, яка становить 2,294 кДж/моль, що вказує на чисто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні.

Показано перспективність використання нікелевого хроміту у якості адсорбенту конго червоного з водних розчинів.

Література:

1. 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. Режим доступу до ресурсу: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2020/2184>
2. Hua Zh., Pana Y., Hong Q. Adsorption of Congo red dye in water by orange peel biochar modified with CTAB. RSC Advances. 2023. Vol. 13. P. 12502-12508. <https://doi.org/10.1039/D3RA01444D>
3. Shafiq F., Liu Ch., Zhou H., et. al. Adsorption mechanism and synthesis of adjustable hollow hydroxyapatite spheres for efficient wastewater cationic dyes adsorption. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2023. Vol. 672. 131713. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131713>
4. Meigoli Boushehrian M., Esmacili H., Foroutan R. Ultrasonic assisted synthesis of Kaolin/CuFe₂O₄ 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>
5. Farghali M. A., Selim A. M., Khater H. F., et al. Optimized adsorption and effective disposal of Congo red dye from wastewater: Hydrothermal fabrication of MgAl-LDH nanohydroxalite-like materials. Arabian Journal of Chemistry. 2022. Vol. 15, Is. 11. 104171. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104171>
6. Nafis M., Ludan Y., Rahaf M., Abdelbaki B. Adsorption of Congo Red Dye Using Activated Carbon-Fe₃O₄ Composite. 2nd International Conf. on Civil Infrastructure and Construction (CIC 2023), 5-8 February, 2023 Qatar University, Doha, Qatar. 2023. P. 1317-1323. <https://doi.org/10.29117/cic.2023.0163>
7. Rasouli N., Khalili A. Enhanced adsorption capability of Congo red dye onto novel Polypyrrole/ZnO/ZnCr₂O₄ composite. Chemistry Research Journal. 2017. Vol. 2(3). P. 98-107. URL: <https://chemrj.org/download/vol-2-iss-3-2017/chemrj-2017-02-03-98-107.pdf>

8. Chatterjee S., Guha N., Krishnan S., et al. Selective and Recyclable Congo Red Dye Adsorption by Spherical Fe₃O₄ Nanoparticles Functionalized with 1,2,4,5-Benzenetetracarboxylic Acid. *Sci Rep.* 2020. Vol. 10. 111. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57017-2>

9. 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 (2014). С. 182-185

10. Остафійчук Б. К., Бушкова В. С., Мокляк В. В., Ільницький Р. В. Синтез та магнітна мікроструктура наночастинок магнієвих феритів, заміщених цинком. *Укр. фіз. журн.* 2015. Т. 60, № 12. С. 1236-1244

11. Shanmugavel T., Gokul Raj S., Kumar Ramesh G., Rajarajana G. Synthesis and Structural Analysis of Nanocrystalline MnFe₂O₄. *Physics Procedia.* 2014. Vol. 54. P. 159-163. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.10.053>

12. Frolova L. A., Hrydnieva T. V. Synthesis, structural, magnetic and photocatalytic properties of MFe₂O₄ (M=Co, Mn, Zn) ferrite nanoparticles obtained by plasmachemical method. *J. of Chem. and Techn.* 2020. Vol. 28(2). P. 202-210. <https://dx.doi.org/10.15421/082022>

13. Yazdanbakhsh M., Khosravi I., Goharshadi E. K., Youssefi A. Fabrication of nanospinel ZnCr₂O₄ using sol-gel method and its application on removal of azo dye from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials.* 2010. Vol.184, Is. 1-3. P. 684-689. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.092>

14. Giles C. H., MacEwan T. H., Nakhwa S. N., Smith D. Studies in Adsorption: Part XI. A System of Classification of Solution Adsorption Isotherms and Its Use in Diagnosis of Adsorption Mechanisms and in Measurement of Specific Surface Area Solids. *Journal of the Chemical Society.* 1960. Vol. 14. P. 3973-3993. <http://dx.doi.org/10.1039/jr9600003973>

References:

1. 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. URL: <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2020/2184>

2. Hua Zh., Pana Y., Hong Q. (2023). Adsorption of Congo red dye in water by orange peel biochar modified with CTAB. *RSC Advances*, 13., 12502-12508. <https://doi.org/10.1039/D3RA01444D>

3. Shafiq F., Liu Ch., Zhou H., et. al. (2023). Adsorption mechanism and synthesis of adjustable hollow hydroxyapatite spheres for efficient wastewater cationic dyes adsorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 672, 131713. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131713>

4. Meigoli Boushehrian M., Esmaeili H., Foroutan R. (2020). Ultrasonic assisted synthesis of Kaolin/CuFe₂O₄ 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>

5. Farghali M. A., Selim A. M., Khater H. F., et al. (2022). Optimized adsorption and effective disposal of Congo red dye from wastewater: Hydrothermal fabrication of MgAl-LDH nanohydroxalcalite-like materials. *Arabian Journal of Chemistry*, 15 (11), 104171. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104171>

6. Nafis M., Ludan Y., Rahaf M., Abdelbaki B. (2023). Adsorption of Congo Red Dye Using Activated Carbon-Fe₃O₄ Composite. *2nd International Conf. on Civil Infrastructure and Construction (CIC 2023)*, 5-8 February, 2023 Qatar University, Doha, Qatar, 1317-1323. <https://doi.org/10.29117/cic.2023.0163>

7. Rasouli N., Khalili A. (2017). Enhanced adsorption capability of Congo red dye onto novel Polypyrrole/ZnO/ZnCr₂O₄ composite. *Chemistry Research Journal*, 2 (3), 98-107. URL: <https://chemrj.org/download/vol-2-iss-3-2017/chemrj-2017-02-03-98-107.pdf>

8. Chatterjee S., Guha N., Krishnan S., et al. (2020). Selective and Recyclable Congo Red Dye Adsorption by Spherical Fe₃O₄ Nanoparticles Functionalized with 1,2,4,5-Benzenetetracarboxylic. *Acid. Sci Rep*, 10, 111. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57017-2>

9. Bushkova V. S., Ostafiyuk B. K., Kopayev O.V. (2013). Osoblyvosti syntezu skladnykh oksydneykh system z vykorystannyam ZHA-metodu [Features of the synthesis of complex oxide systems using the ZGA method]. *Fizyka i khimiya tverdogo tila – Solid State Physics and Chemistry*. 2013, 15 (1), (2014), 182-185 [in Ukrainian]

10. Ostafiyuk B. K., Bushkova V. S., Moklyak V. V., Il'nyts'kyy R. V. (2015). Syntez ta mahnitna mikrostruktura nanochastynok mahniyevykh ferytiv, zamishchenykh tsynkom [Synthesis and magnetic microstructure of magnesium ferrite nanoparticles substituted with zinc]. *Ukr. fiz. zhurn Ukr. – Phys. Journal*, 60 (12), 1236-1244 [in Ukrainian]

11. Shanmugavel T., Gokul Raj S., Kumar Ramesh G., Rajarajana G. (2014). Synthesis and Structural Analysis of Nanocrystalline MnFe₂O₄. *Physics Procedia*, 54, 159-163. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.10.053>

12. Frolova L. A., Hrydnieva T. V. (2020). Synthesis, structural, magnetic and photocatalytic properties of MFe₂O₄ (M=Co, Mn, Zn) ferrite nanoparticles obtained by plasmachemical method. *J. of Chem. and Techn*, 28(2), 202-210. <https://dx.doi.org/10.15421/082022>

13. Yazdanbakhsh M., Khosravi I., Goharshadi E. K., Youssefi A. (2010). Fabrication of nanospinel ZnCr₂O₄ using sol-gel method and its application on removal of azo dye from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 184 (1-3), 684-689. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.092>

14. Giles C. H., MacEwan T. H., Nakhwa S. N., Smith D. (1960). Studies in Adsorption: Part XI. A System of Classification of Solution Adsorption Isotherms and Its Use in Diagnosis of Adsorption Mechanisms and in Measurement of Specific Surface Area Solids. *Journal of the Chemical Society*, 14, 3973-3993. <http://dx.doi.org/10.1039/jr9600003973>