

Л. А. ФРОЛОВА

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технології неорганічних речовин та екології
Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0001-7970-2264

Н. І. ПРОКОПЕНКО

аспірантка кафедри технології неорганічних речовин та екології
Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0002-9862-0613

О. О. ФРОЛОВ

молодший науковий співробітник кафедри технології неорганічних речовин та екології
Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0007-8484-775X

ВПЛИВ УМОВ ПЛАЗМОВОГО СИНТЕЗУ НА ПОГЛИНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ФЕРИТУ $\text{Co}_y\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$

Наночастинки феритів кобальту та нікелю привернули увагу науковців в останні десятиліття завдяки їх активним застосуванням у магнітному записі високої щільності, магнітних рідинах, зберіганні даних, сонячних батареях, датчиках та фотокаталізі. Ферит кобальту, модифікований катіонами нікелю, широко вивчався завдяки високим електромагнітним характеристикам, хімічній стабільності, механічній твердості та високій магнітокристалічній анізотропії. Оскільки більшість магнітних властивостей фериту $\text{Co}_y\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ значно залежить не тільки від вмісту нікелю, але і від розміру та форми наночастинок, розробка новітніх методів отримання феритів кобальту є важливою науковою задачею. В представленій роботі виконано синтез $\text{Co}_y\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ плазмовим методом. За допомогою повного факторного експерименту, що базується на результатах отриманих методом електронної парамагнітної резонансної (ЕПР) спектроскопії, рентгенофазового аналізу, було визначено вплив рН реакційного середовища, температури і тривалості плазмової обробки на функції відгуку. В якості функцій відгуку використовували резонансне поле з ЕПР спектру, коефіцієнт поглинання з ЕПР спектрів, розмір кристалітів. Фазовий склад зразків визначався методом рентгенофазового аналізу. Спектри ЕПР були отримані за допомогою радіоспектрометра Radiopan SE/X-2543. Статистичний аналіз дав змогу кількісно оцінити вплив параметрів синтезу на обрані функції відгуку. Математичні рівняння адекватно описують отримані залежності. Результати показали, що при збільшенні часу обробки інтенсивність піків на ЕПР спектрах значно зменшується, що корелює з результатами рентгенофазового аналізу та пов'язано з утворенням немагнітних фаз $\alpha\text{-FeOOH}$, $\alpha\text{-CoOOH}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$. При цьому асиметрія спектрів ЕПР зростає. Однокомпонентний і досить вузький ЕПР спектр зразків може бути пояснений однофазною структурою. Найбільші значення коефіцієнту поглинання відповідають високим значенням температури у всьому діапазоні рН та поєднанню високих значень температури та нетривалої плазмової обробки.

Ключові слова: ферит, плазмовий синтез, рентгенофазовий аналіз, ЕПР-спектроскопія, планування експерименту.



L. A. FROLOVA

Sc. D., Professor,

Professor at the Department of Inorganic Substances Technology
and EcologyEducational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology"
of the Ukrainian State University of Science and Technologies

ORCID: 0000-0001-7970-2264

N. I. PROKOPENKO

Postgraduate Student at the Department of Inorganic Substances Technology
and EcologyEducational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology"
of the Ukrainian State University of Science and Technologies

ORCID: 0009-0002-9862-0613

O. O. FROLOV

Junior Researcher at the Department of Inorganic Substances Technology
and EcologyEducational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology"
of the Ukrainian State University of Science and Technologies

ORCID: 0009-0007-8484-775X

INFLUENCE OF PLASMA SYNTHESIS CONDITIONS ON THE ABSORPTION PROPERTIES OF $\text{Co}_y\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ FERRITE

Cobalt and nickel ferrite nanoparticles have attracted the attention of scientists in recent decades due to their active applications in high-density magnetic recording, magnetic fluids, data storage, solar cells, sensors, and photocatalysis. Cobalt ferrite modified with nickel cations has been widely studied due to its high electromagnetic characteristics, chemical stability, mechanical hardness, and high magnetocrystalline anisotropy. Since most of the magnetic properties of $\text{Co}_y\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ferrite significantly depend not only on the nickel content, but also on the size and shape of the nanoparticles, the development of new methods for obtaining cobalt ferrites is an important scientific task. In the presented work, the synthesis of $\text{Co}_y\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ by the plasma method was performed. Using a full factorial experiment based on the results obtained by electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy and X-ray phase analysis, the influence of the pH of the reaction medium, temperature, and duration of plasma treatment was determined. The resonance field from the EPR spectrum and the absorption coefficient from the EPR spectra, crystallite size were used as response functions. The phase composition of the dried powders was determined by the X-ray phase analysis method. The EPR spectra were obtained using a Radiopan SE/X-2543 radio spectrometer. Statistical analysis made it possible to quantitatively assess the influence of synthesis parameters on the selected response functions. Mathematical equations adequately describe the obtained dependencies. The results showed that with increasing treatment time, the intensity of peaks in the EPR spectra decreases significantly, which correlates with the results of X-ray phase analysis and is associated with the formation of non-magnetic phases $\alpha\text{-FeOOH}$, $\alpha\text{-CoOOH}$, $\text{Fe}_3\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$. At the same time, the asymmetry of the EPR spectra increases. The single-component and rather narrow EPR spectrum of the samples can be explained by the single-phase structure. The highest values of the absorption coefficient correspond to high temperatures in the entire pH range and to the combination of high temperatures and short-term plasma treatment.

Key words: ferrite, plasma synthesis, X-ray phase analysis, EPR spectroscopy, experimental design

Постановка проблеми

Феритні наночастинки привернули велику увагу науковців в останні десятиліття завдяки їх активним застосуванням у магнітному записі високої щільності, радіопоглинаючих покриттях для захисту електроніки від електромагнітних перешкод, антикорозійному захисті в агресивних середовищах, магнітних рідинах, зберіганні даних, сонячних батареях, датчиках та фотокаталізі [1–3]. Серед магнітних наночастинок ферит кобальту, модифікований катіонами нікелю, широко вивчався завдяки високим електромагнітним характеристикам, хімічній стабільності, механічній твердості та високій магнітокристалічній анізотропії [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більшість функціональних властивостей фериту $\text{Co}_y\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ значно залежить не тільки від вмісту нікелю, але і від розміру та форми наночастинок [5,6], які залежать від способу отримання. Для отримання кобальт-нікелевого фериту використовуються різні технології. Наприклад, золь-гель метод, мікроемulsійний, метод зворотних міцел, метод хімічного співосадження, «зелений» синтез. Однак більшість з цих методів не можуть бути економічно доцільними у великому масштабі, оскільки вимагають дорогих і часто токсичних реагентів, складних

етапів синтезу, високих температур реакції та тривалого часу реакції. Це не тільки призводить до витрати енергії, але і завдає шкоди довкіллю [7-10].

Як відомо, метод хімічного співсадженьня зазвичай використовується для синтезу феритів завдяки своїй простоті і можливості контролювати розмір кристалітів [11, 12]. Однак у попередніх роботах зазначалася можливість утворення небажаних додаткових фаз, які призводили до зниження магнітних властивостей та спотворення форми отриманих частинок фериту $\text{Co}_y\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – встановлення закономірностей впливу параметрів плазмової технології (температури, тривалості обробки та рН) на мікроструктуру, магнітні характеристики феритів для оптимізації їх радіопоглинаючих властивостей у X-діапазоні.

Завдання роботи:

- виконати аналітичний огляд літератури з одержання та використання феритів;
- дослідити вплив умов плазмової обробки на мікроструктуру (розмір кристалітів);
- дослідити вплив параметрів синтезу модифікованого методу хімічного співсадженьня (з використанням плазмового розряду) на властивості наночастинок фериту $\text{Co}_y\text{Ni}_{1-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($y=0.5$), побудувати експериментально-статистичні моделі;
- визначити коефіцієнт поглинання та визначити оптимальні умови процесу отримання феритів з високими поглинальними характеристиками щодо електромагнітного випромінювання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Отримання співсаджених сполук здійснювалося шляхом зливання при безперервному перемішуванні розчинів 0,5 М розчинів кобальт(II) сульфату, ферум(II) сульфату та нікель сульфату з мольним співвідношенням катіонів кобальту і нікелю до катіонів феруму 1:2. Необхідне рН отримували шляхом додавання розчину 3М NaOH, з подальшою обробкою плазмовим розрядом. Опис плазмового реактору наведено на рисунку 1. Катод, виконаний з нержавіючої сталі марки 12X18H10T, анод – з вольфраму, і розташовувався над поверхнею рідини, на відстані 1,5-2 см. Напруга підпалу складала 12000-15000 В, тривалість імпульсу 1,0-1,5 мс.

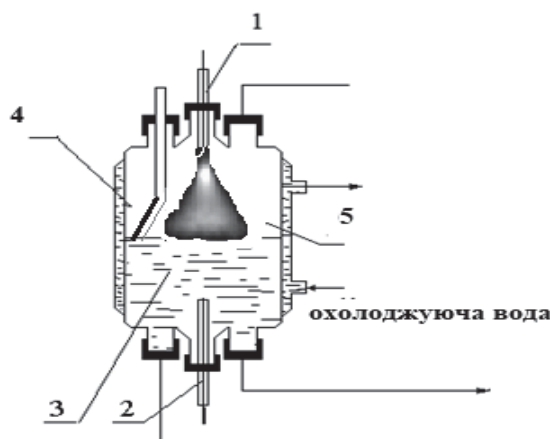


Рис. 1. Плазмохімічна установка

1 – анод; 2 – катод; 3 – розчин; 4 – провідбірник, 5 – плазмовий розряд

Концентрація катіонів кобальту та нікелю в отриманих зразках визначалася комплексометрично та фотометрично, катіонів феруму – перманганатним методом. Для контролю ходу реакції реактор був оснащений електродною системою, що включає скляний електрод ЕСЛ 43-07 для вимірювання рН, платиновий електрод для вимірювання окисно-відновного потенціалу і електрод порівняння ЕВЛ-1М3. Всі осадки промивали до негативної реакції на сульфат-іон. Після витримки осадок відокремлювали шляхом магнітної сепарації. Відмиті і відфільтровані осадки сушили за температури 180°C.

Відносні магнітні властивості визначали за допомогою вібраційного магнітометру. Намагніченість насичення і коерцитивну силу визначали з побудованої петлі гістерезису. Фазовий склад висушених порошків визначався методом рентгенофазового аналізу (ДРОН-2.0). Рентгенофазовий аналіз проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3. Ідентифікацію сполук проводили шляхом порівняння міжплощинних відстаней (d , Å) і відносних інтенсивностей (I/I_0) експериментальної кривої за даними електронної картки PCPDFWIN.

Спектри ЕПР були отримані за допомогою радіоспектрометра Radiopan SE/X-2543. Для характеристики сигналів ЕПР використовували резонансне поле з ЕПР спектру, питоме поглинання з ЕПР спектру.

На підставі попередніх експериментів, були обрані в якості основних технологічних параметрів, що впливають на поглинальні властивості, вихідне рН розчину, час обробки плазмовим розрядом, температура проведення процесу.

В якості граничних умов були запропоновані наступні значення впливових чинників (табл. 1).

Таблиця 1

Впливові чинники та їх значення в кодованому та реальному вигляді

Фактор	Назва	Одиниця вимірювання	Значення		
			максимум	мінімум	Нульовий рівень
X ₁	температура	°C	40	20	30
X ₂	Час проведення процесу	хв	20	5	12,5
X ₃	pH		12,0	8,0	10,0

Було побудовано план повного трифакторного експерименту типу 2³ для вивчення впливу параметрів синтезу на функціональні характеристики CoNi фериту, отриманого за допомогою плазмового розряду (таблиця 2). У таблиці 2, (-1), (+1) представляють собою закодовані значення факторів для мінімального і максимального рівнів, відповідно. На основі даних статистичного аналізу будували математичну модель, що описує процес для обраних рівнів.

Для повного трифакторного експерименту математичне рівняння, що описує цю систему, має вигляд:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (1)$$

де y_i – залежна змінна (y₁-резонансне поле з ЕПР спектру, мТл,

y₂- питома поглинання електромагнітного випромінювання, відносні одиниці, y₃- середній розмір кристалітів),

β₀, β₁, β₂, β₃- коефіцієнти, відповідні незалежним змінним,

β₁₂, β₂₃, β₁₃ – коефіцієнти при парних взаємодіях незалежних змінних,

β₁₂₃ – коефіцієнти при потрійній взаємодії незалежних змінних.

Розрахунок коефіцієнтів експериментально-статистичних моделей виконувались за допомогою програми STATISTICA 10.0. Для отриманих моделей проводили розрахунок коефіцієнту кореляції та перевірку адекватності за вбудованою програмою ANOVA.

При побудованні графіків залежності функції відгуку від двох параметрів синтезу, значення третього параметру фіксувалося на нульовому рівні (таблиця 1).

В даний час відомі фактори (склад, концентрація вихідних розчинів, послідовність зливання розчинів, співвідношення реагентів та ін.), які дають можливість змінювати як фазовий склад осадів, так і розмір частинок, що утворюються, і, відповідно, функціональні властивості кінцевого продукту. Одним з таких факторів може бути також швидкість феритизації, яка регулюється різними способами.

Таблиця 2

План повного трифакторного експерименту 2³ та експериментальні результати щодо функціональних властивостей зразків, отриманих під дією плазмового розряду

N	t, °C	, хв	pH	H _{рез} , мТл	A, відн.од.	L _{ер} , А	Фазовий склад та намагніченість насичення, А м ² /кг
1	1	1	1	315	0,236	550	Co _{0,5} Ni _{0,5} Fe ₂ O ₄ , α-FeOOH, 48,169
2	-1	1	1	258	0,105	459	Co _{0,5} Ni _{0,5} Fe ₂ O ₄ , α-FeOOH, α-CoOOH, 35,88
3	1	-1	1	306	0,531	597	Co _{0,5} Ni _{0,5} Fe ₂ O ₄ , 93,11
4	-1	-1	1	248	0,0395	469	Co _{0,5} Ni _{0,5} Fe ₂ O ₄ , 28,4
5	1	1	-1	239	0,171	162	Co _{0,5} Ni _{0,5} Fe ₂ O ₄ , α-FeOOH, α-CoOOH, Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O, 29,12
6	-1	1	-1	331	0,0181	171	Co _{0,5} Ni _{0,5} Fe ₂ O ₄ , α-FeOOH, α-CoOOH, Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O, 3,29
7	1	-1	-1	224	0,422	204	Co _{0,5} Ni _{0,5} Fe ₂ O ₄ , α-FeOOH, α-CoOOH, Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O, 20,87
8	-1	-1	-1	209	0,154	210	Co _{0,5} Ni _{0,5} Fe ₂ O ₄ , α-FeOOH, α-CoOOH, Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O, 46,00

На рис. 2 представлені ЕПР спектри синтезованих зразків згідно з таблицею 2. Зі збільшенням рН вихідного розчину відбувається кардинальна зміна форми та інтенсивності спектрів зразків ЕПР (рис. 2а та 2б). Спектри ЕПР зразків 1-4 мають вигляд, що відповідає наявності феритної фази. Для зразка 3 спостерігається найбільший пік, що зумовлено присутністю найбільш магнітної фази і більшою кристалічністю (табл. 2).

При збільшенні часу обробки інтенсивність піків значно зменшується, що корелює з результатами рентгенофазового аналізу та пов'язано з утворенням немагнітних фаз α-FeOOH, α-CoOOH, Fe₂O₃·H₂O. При цьому асиметрія спектрів ЕПР зростає. Однокомпонентний і досить вузький (порівняно зі спектрами інших зразків) ЕПР спектр зразка 3 може бути пояснений утворенням кристалічного Co_{0,5}Ni_{0,5}Fe₂O₄.

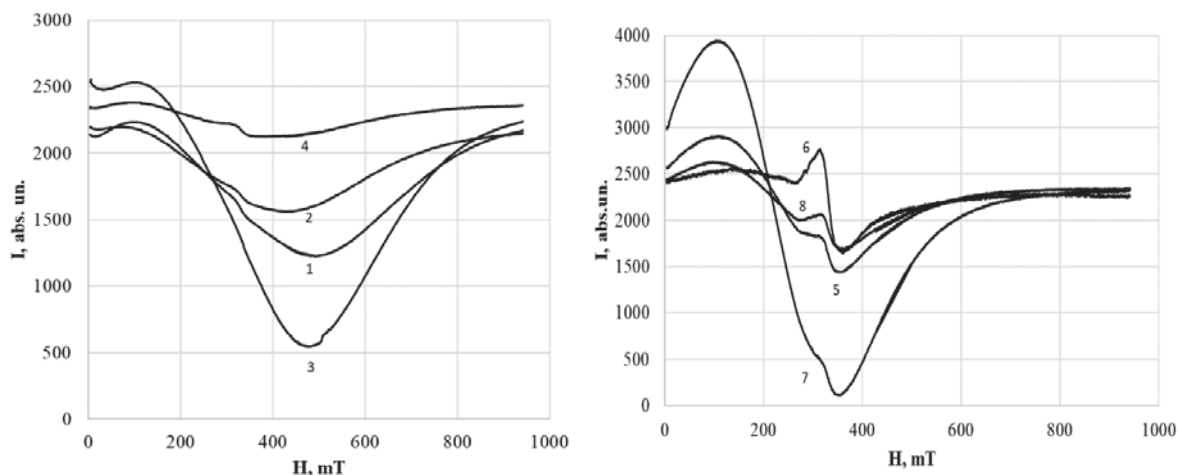


Рис. 2. ЕПР спектри зразків (нумерація згідно з таблицею 2)

Для другої серії зразків (5–8) інтегральна інтенсивність (площа) значно нижча, ніж у першій. Це підтверджує те, що у другій партії зразків сформувалося набагато менше магнітної фази фериту кобальт-нікелю.

У таблиці 2 показана матриця для проведення повного факторного експерименту, яка використовувалася для вивчення впливу плазмового розряду і значення функцій відгуку (резонансне поле, питоме поглинання), отримані для закодованих умов, прийнятих в кожному досліді, і порядковий номер зразків. Фазовий склад зразків, отриманих дією плазмового розряду, узгоджуються з тими результатами, які були отримані раніше з використанням гідрофазних методів отримання нікель кобальтового фериту.

Залежність значення $H_{рез}$ від перерахованих вище факторів при обробці плазмовим розрядом описується рівнянням:

$$Y_1 = 266,2 + 4,75 \cdot t + 19,5 \cdot \tau + 15,5 \cdot pН - 13,5 \cdot t \cdot \tau + 24,1 \cdot t \cdot pН - 14,25 pН \cdot \tau + 13,25 \cdot t \cdot pН \cdot \tau \quad (2)$$

Всі досліджувані фактори впливають на значення резонансного поля. Індивідуальні фактори – рН і час – мають позитивний вплив на $H_{рез}$.

Найбільш впливовими чинниками є час обробки та вихідне рН. У разі подвійних ефектів збільшення рН та часу обробки негативно впливають на значення $H_{рез}$.

Тіснота взаємодії змінних при впливі на магнітні властивості краще візуалізується за допомогою ізоліній. З рис. 3 видно, що в контурних лініях функції відгуку є значна кривизна, а функція відгуку має вигляд гіперболічного параболоїда (а, в), або «сідловидну» форму, що вказує на нелінійну взаємодію між змінними (температурою і рН, рН і часом, часом і температурою).

Зміна резонансного поля зумовлена додатковим утворенням оксигідроксидів та оксидів. Гетит при кімнатній температурі зазвичай є слабким феромагнетиком. Його наявність знижує намагніченість основної фази фериту, що створює додаткові внутрішні поля напруги, які можуть спричинити зсув резонансу у бік менших полів.

Залежність відносного поглинання електромагнітного випромінювання від перерахованих вище факторів при обробці плазмовим розрядом описується рівнянням:

$$Y_2 = 0,21 + 0,13 \cdot t - 0,077 \cdot \tau + 0,018 \cdot pН - 0,06 \cdot t \cdot \tau + 0,025 \cdot t \cdot pН + 0,019 pН \cdot \tau - 0,03 \cdot t \cdot pН \cdot \tau \quad (3)$$

Аналіз рівняння, отриманого для коефіцієнту поглинання, показує, що воно нелінійне, основними впливовими факторами є температура і час обробки. Зі збільшенням рН і температури коефіцієнт поглинання (А) збільшується (рис. 4).

На рисунку 4 представлені ізолінії, які відповідають різним значенням коефіцієнту поглинання в різних координатах. Взаємний вплив рН і температури показує, що у всьому діапазоні температури ізолінії паралельні осі ординат, тобто коефіцієнт поглинання слабо залежить від рН. Найбільші значення коефіцієнту поглинання відповідають високим значенням температури у всьому діапазоні рН та поєднанню високих значень температур та нетривалої плазмової обробки.

Залежність розміру кристалітів від перерахованих вище факторів при обробці плазмовим розрядом адекватно описується рівнянням:

$$Y_3 = 352,75 + 25,5 \cdot t - 17,25 \cdot \tau + 166,0 \cdot pН - 5,0 \cdot t \cdot \tau + 29,25 \cdot t \cdot pН + 3,0 pН \cdot \tau - 4,25 \cdot t \cdot pН \cdot \tau \quad (4)$$

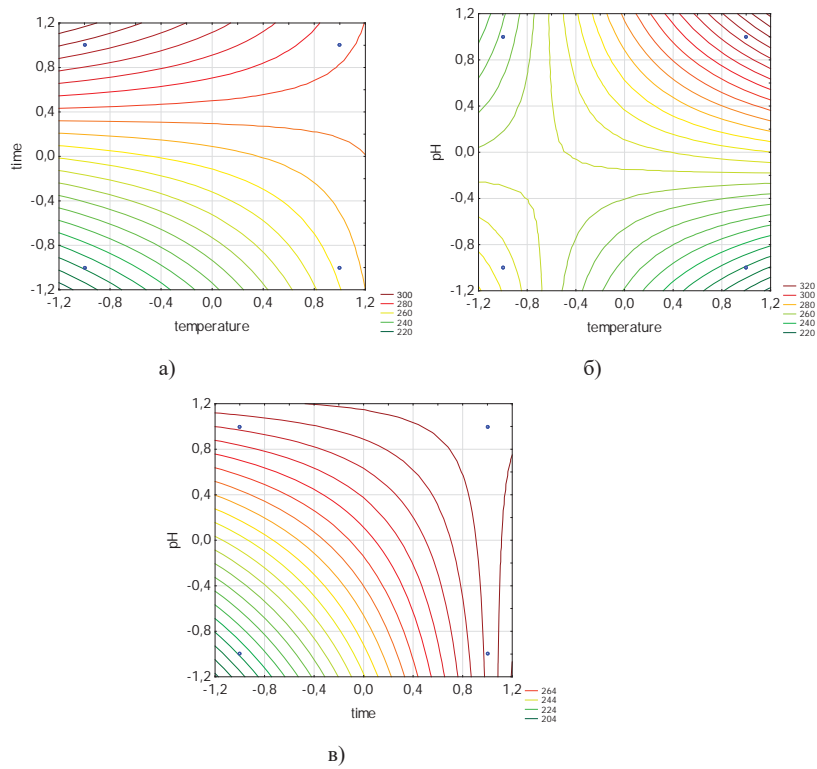


Рис. 3. Залежність резонансного поля H_{res} від впливових факторів
 а – $H_{res}=f(\tau,t)$, б – $H_{res}=f(pH,t)$, в – $H_{res}=f(pH, \tau)$

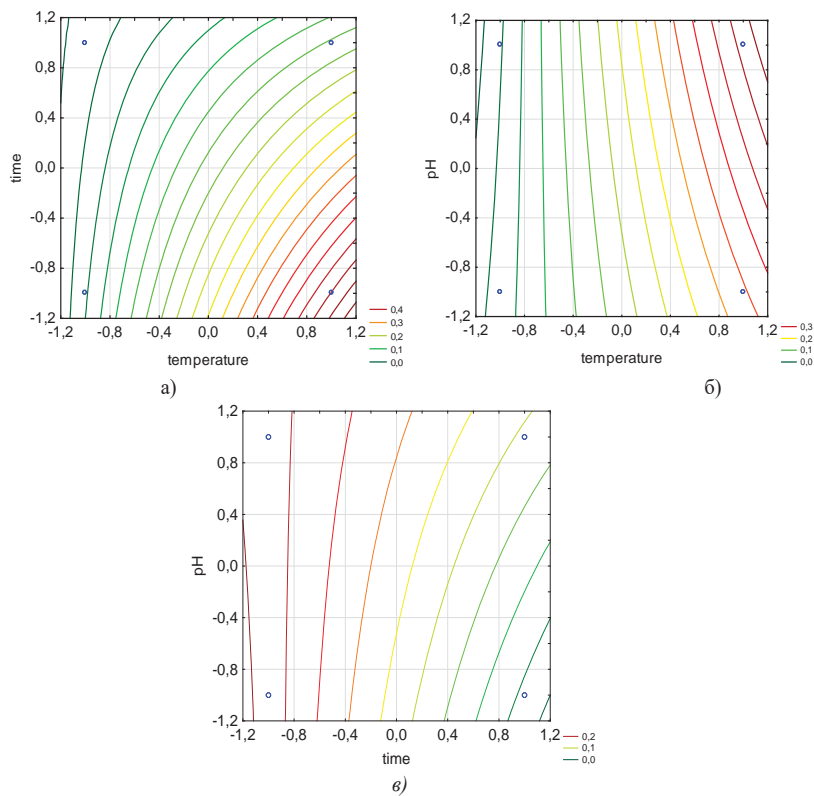
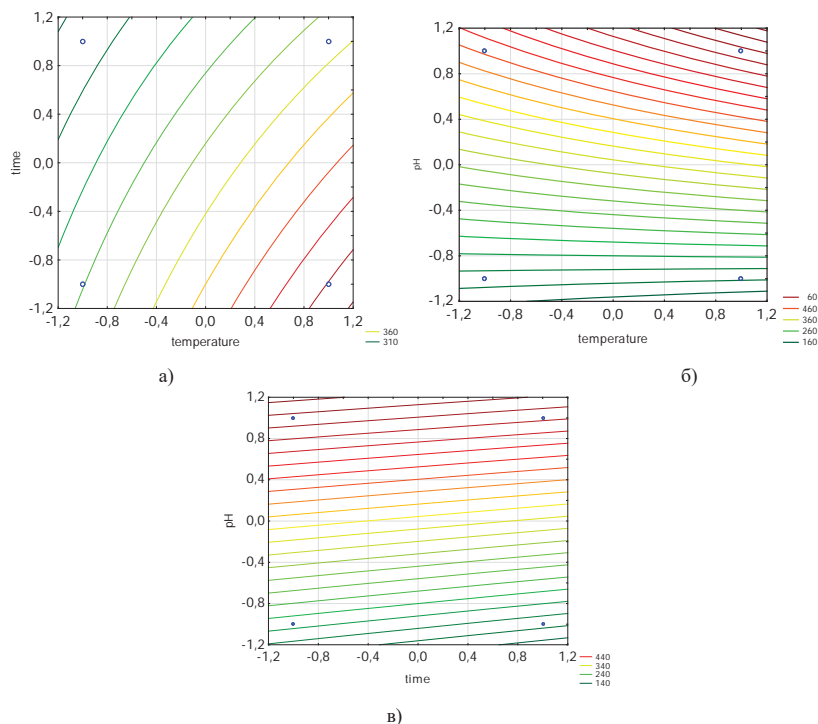


Рис. 4. Залежність поглинання електромагнітного випромінювання від впливових факторів
 а – $A=f(\tau,t)$, б – $A=f(pH,t)$, в – $A=f(pH, \tau)$



**Рис. 5. Залежність середнього розміру кристалітів від впливових факторів
а – $L=f(\tau, t)$, б – $L=f(\text{pH}, t)$, в – $L=f(\text{pH}, \tau)$**

З рисунку (5а) видно, що обидва фактори – і температура, і час – відіграють важливу роль. Нахил ліній вказує на те, що фактори впливають на розмір кристалітів майже в рівній мірі, але в різних напрямках: При збільшенні температури значення розмірів кристалітів зростає. Максимальні значення знаходяться в нижньому правому куті діаграми (при високій температурі та короткотривалій обробці). Мінімальні значення спостерігаються при низькій температурі та тривалому часі обробки.

Параметр рН є основним впливовим фактором щодо розміру кристалітів (5 б, в). На це вказує висока густина контурних ліній уздовж осі Y (рис. 5 в). Збільшення часу обробки також впливає на розмір кристалітів, але його внесок значно менший. Це видно з невеликого нахилу ліній: зі збільшенням часу значення відгуку зростають повільно. Ізолнії майже прямі і паралельні, тобто. взаємодія між рН та часом слабка. Ефект зміни рН залишається майже однаковим незалежно від зміни часу. Максимальне значення (~440 А) спостерігається у верхній частині графіка, при високих значеннях рН (+1,2 кодованих змінних) і при максимальному часі плазмової обробки. Область мінімальних значень (~140 А) знаходиться в нижній частині, при низькому рН та мінімальному часі обробки.

Висновки

Встановлено, що використання плазмової обробки дає змогу синтезувати CoNi ферити. Досліджено вплив ключових факторів (рН, температури, часу обробки) на фазовий склад та функціональні характеристики кінцевого продукту на основі повного трифакторного експерименту. Цей підхід забезпечує повну інформацію про умови, необхідні для отримання кінцевого продукту з заданими характеристиками, шляхом проведення обмеженої кількості експериментів.

Результати експериментального дослідження показали, що поглинальні властивості змінюються в залежності від температури розчину та часу обробки.

Максимальне значення поглинання ЕМВ відповідає зразку, отриманому за температури 40 ° С, рН 12, тривалість обробки 12,5 хвилин.

Список використаної літератури

1. Aghrich K., Abdellaoui M., Mamouni N., Bellaouchou A., Fekhaoui M., Hlil E. K., Mounkachi O. Experimental and first-principles study of the origin of the magnetic properties of CoFe_2O_4 spinel ferrite. *Applied Physics A*. Vol. 126(12). 2020. P. 940.
2. Gálvez-Barbosa S., González L. A., Bretado L. A., Vento-Lujano E., Rosas G. Photocatalytic performance of dual Z-scheme $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Co}_3\text{O}_4$ ternary heterojunction composite synthesized by Pechini method. *Optical Materials*. Vol. 154. 2024. P. 115726.

3. Ismail M. M., Rafeeq S. N., Sulaiman J. M., Mandal A. Electromagnetic interference shielding and microwave absorption properties of cobalt ferrite CoFe_2O_4 /polyaniline composite. *Applied Physics A*. Vol. 124(5). 2018. P. 380.
4. Rajender T., Naidu K. C. B., Basha D. B., Samanta S., Reddy L. S. S. Magnetic, dielectric and thermal study of $\text{CoNiFe}_2\text{O}_4$ nanoparticles. *Nano-Structures & Nano-Objects*. Vol. 38. 2024. P. 101167.
5. Ateia E. E., Fouad S., Mohamed A. T. Characterization of spinel ferrite nano composites: from synthesis to applications. *Applied Physics A*. Vol. 131(12). 2025. P. 980.
6. Dhaka S., Shukla A., Poonia K., Kumar S. Unveiling electronic structure and magnetic properties of AFe_2O_4 (A = Co, Ni, Zn, and Mg): Synergizing experimentation with DFT investigation. *Solid State Communications*. Vol. 382. 2024. P. 115459.
7. Verma H. K., Srivastava R. C., Joshi C. S. Synthesis of nickel-cobalt ferrite/graphene oxide nanocomposites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Vol. 599. 2024. P. 172081.
8. Rafiq M. A., Javed A., Rasul M. N., Khan M. A., Hussain A. Understanding the structural, electronic, magnetic and optical properties of spinel MFe_2O_4 (M = Mn, Co, Ni) ferrites. *Ceramics International*. Vol. 46(4). 2020. P. 4976–4983.
9. Hossain A., Sarker M. S. I., Khan M. K. R., Rahman M. M. Spin effect on electronic, magnetic and optical properties of spinel CoFe_2O_4 : A DFT study. *Materials Science and Engineering: B*. Vol. 253. 2020. P. 114496.
10. Khan M. Z., Inam-ul-Haq M., Bo R., Zhou W. Electrical characterization of graphene doped $\text{Co}_{0.25}\text{Cd}_{0.5}\text{Ni}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel nano ferrites fabricated by sol-gel auto combustion. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. Vol. 116(1). 2025. P. 483–492.
11. Habiba O., Alam M. S., Hassan M. N., Hossain M. A. F., Chawdhury A. M. R., Islam M. S., Al-Mamun M. Hydrothermal vs. sol-gel auto combustion: A comparative study of structural and magnetic properties in graphene oxide- $\text{CoNiFe}_2\text{O}_4$ nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*. Vol. 356. 2026. P. 132278.
12. Yakob M., Putra R. A. Nanoparticle fabrication of $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (x = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0) using co-precipitation method at low temperature. *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. Vol. 11(2). 2019. P. 52–56.

References

1. Aghrich K., Abdellaoui M., Mamouni N., Bellaouchou A., Fekhaoui M., Hlil E. K., Mounkachi O. (2020) Experimental and first-principles study of the origin of the magnetic properties of CoFe_2O_4 spinel ferrite. *Applied Physics A*, Vol. 126(12), pp.940. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04114-z>
2. Gálvez-Barbosa S., González L. A., Bretado L. A., Vento-Lujano E., Rosas G. (2024) Photocatalytic performance of dual Z-scheme $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{Co}_3\text{O}_4$ ternary heterojunction composite synthesized by Pechini method. *Optical Materials*, Vol. 154, pp.115726. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115726>
3. Ismail M. M., Rafeeq S. N., Sulaiman J. M., Mandal A. (2018) Electromagnetic interference shielding and microwave absorption properties of cobalt ferrite CoFe_2O_4 /polyaniline composite. *Applied Physics A*, Vol. 124(5), pp.380. <https://doi.org/10.1007/s00339-018-1808-x>
4. Rajender T., Naidu K. C. B., Basha D. B., Samanta S., Reddy L. S. S. (2024) Magnetic, dielectric and thermal study of $\text{CoNiFe}_2\text{O}_4$ nanoparticles. *Nano-Structures & Nano-Objects*, Vol. 38, pp.101167. <https://doi.org/10.1016/j.nanos.2024.101167>
5. Ateia E. E., Fouad S., Mohamed A. T. (2025) Characterization of spinel ferrite nano composites: from synthesis to applications. *Applied Physics A*, Vol. 131(12), pp.980. <https://doi.org/10.1007/s00339-025-09020-w>
6. Dhaka S., Shukla A., Poonia K., Kumar S. (2024) Unveiling electronic structure and magnetic properties of AFe_2O_4 (A= Co, Ni, Zn, and Mg): Synergizing experimentation with DFT investigation. *Solid State Communications*, Vol. 382, pp.115459. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2024.115459>
7. Verma H. K., Srivastava R. C., Joshi C. S. (2024) Synthesis of nickel-cobalt ferrite/graphene oxide nanocomposites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 599, pp.172081. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2024.172081>
8. Rafiq M. A., Javed A., Rasul M. N., Khan M. A., Hussain A. (2020) Understanding the structural, electronic, magnetic and optical properties of spinel MFe_2O_4 (M= Mn, Co, Ni) ferrites. *Ceramics International*, Vol. 46(4), pp.4976-4983. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.237>
9. Hossain A., Sarker M. S. I., Khan M. K. R., Rahman M. M. (2020) Spin effect on electronic, magnetic and optical properties of spinel CoFe_2O_4 : A DFT study. *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 253, pp.114496. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114496>
10. Khan M. Z., Inam-ul-Haq M., Bo R., Zhou W. (2025) Electrical characterization of graphene doped $\text{Co}_{0.25}\text{Cd}_{0.5}\text{Ni}_{0.25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ spinel nano ferrites fabricated by sol gel auto combustion. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Vol. 116(1), pp.483-492. <https://doi.org/10.1007/s10971-025-06787-5>
11. Habiba O., Alam M. S., Hassan M. N., Hossain M. A. F., Chawdhury A. M. R., Islam M. S., Al-Mamun M. (2026) Hydrothermal vs. sol-gel auto combustion: A comparative study of structural and magnetic properties in graphene oxide- $\text{CoNiFe}_2\text{O}_4$ nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 356, pp.132278. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2026.132278>
12. Yakob M., Putra R. A. (2019) Nanoparticle fabrication of $\text{Co}_x\text{Ni}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (x= 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0) using co-precipitation method at low temperature. *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, Vol. 11(2), pp.52-56. <https://doi.org/10.18860/neu.v11i2.7261>

Дата першого надходження статті до видання: 11.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 26.05.2026