

УДК 661.11

doi:10.20998/2413-4295.2019.02.12

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРИТІВ В СИСТЕМІ NiO-CoO-ZnO

Л. А. ФРОЛОВА

кафедра технології неорганічних речовин та екології, ДВНЗ УДХТУ, УКРАЇНА  
e-mail: 19kozak83@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Оксидні системи, що містять катіони перехідних металів, мають важливі технологічні властивості. Так, наприклад, ферити кобальту, нікелю, мангану, цинку використовують в магнітних, електричних матеріалах, як каталізатори ряду реакцій. Технологічні схеми одержання таких сполук вимагають використання високотемпературної термообробки та складного обладнання. Застосування гідروفазних хімічних методів синтезу є основою одержання феритів перехідних металів із заданим комплексом властивостей. Характерною тенденцією останнього часу є розробка технологій одержання саме нанодисперсних феритів. В роботі вивчено залежність магнітних характеристик феритів від складу в системі CoO-NiO-ZnO симплексним методом. Ферити Ni-Zn, Co-Zn, Co-Ni синтезували у вигляді наночастинок з використанням контактної нерівноважної низькотемпературної плазми. Кристалічна мікроструктура зразків була з'ясована з використанням рентгеноструктурного та рентенофлюорографічного аналізу. Встановлено, що для шпінельних феритів, зокрема, вибір двовалентного катіона безпосередньо визначає їх магнітну поведінку. Симплексним методом визначено ефект взаємного впливу вмісту різних катіонів на намагніченість насичення і коерцитивну силу. Магнітні дослідження з використанням вібраційного магнетометру показали, що за даних умов синтезу спостерігаються низькі значення намагніченості для Ni-Zn феритів і високі для всього ряду Co-Zn, Co-Ni феритів. Збільшення вмісту катіонів кобальту призводить до збільшення коерцитивної сили у всіх складах. Також було виявлено позитивний вплив катіонів нікелю на значення намагніченості насичення феритів по стороні трикутника Ni-Zn і протилежне по стороні Ni-Co. Спектри ЕПР показали, що значення резонансного поля і ширини лінії відповідає значенню магнітного насичення.

**Ключові слова:** ферит кобальту; ферит цинку; ферит нікелю; симплексний метод; ферит кобальту; магнітна наночастинка; рентгенівська дифракція

## RESEARCH OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF FERITES IN THE NiO-CoO-ZnO SYSTEM

L. FROLOVA

Department of Inorganic Materials Technology and Ecology, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, UKRAINE

**ABSTRACT** Oxide systems containing transition metal cations possess important technological properties. So, for example, ferrites of cobalt, nickel, manganese, zinc are used in magnetic, electrical materials as catalysts for a number of reactions. Technological schemes for producing such compounds require the use of high-temperature heat treatment and sophisticated equipment. The use of hydrophase chemical synthesis methods is the basis for producing ferrites of transition materials with a given set of properties. A characteristic recent trend is the development of technologies for producing nanodispersed ferrites. The dependence of the magnetic characteristics of ferrites in the CoO-NiO-ZnO system by the simplex method was studied. Ferrites Ni-Zn, Co-Zn, Co-Ni were synthesized in the form of nanoparticles using the method of processing contact nonequilibrium low-temperature plasma. The crystalline microstructure of the samples was elucidated using X-ray diffraction and X-ray diffraction methods. It has been established that for spinel ferrites, in particular, the choice of a divalent cation directly determines their magnetic behavior. The effect of the mutual influence of the content of various cations on the saturation magnetization and the coercive force by the simplex method is determined. Magnetic studies using a vibrating magnetometer showed that under these synthesis conditions, low magnetization values are observed for Ni-Zn ferrites and high for the entire series of Co-Zn, Co-Ni ferrites. An increase in the content of cobalt cations leads to an increase in coercive force in all compositions. A positive effect of nickel cations on the value of saturation magnetization of ferrites on the side of the Ni-Zn triangle and the opposite on the side of Ni-Co, EPR spectra showed that the value of the resonance field and line width corresponds to the value of magnetic saturation.

**Keywords:** cobalt ferrite; zinc ferrite; nickel ferrite; simplex method; cobalt ferrite; magnetic nanoparticles; X-ray diffraction

### Вступ

Оксидні системи, що містять катіони перехідних металів володіють важливими технологічними властивостями. Так, наприклад, ферити кобальту, нікелю, мангану, цинку використовують в магнітних, електричних матеріалах, як каталізатори ряду реакцій [1-4]. Технологічні схеми одержання таких сполук вимагають, загалом, використання високотемпературної термообробки та складного обладнання. Це стосується традиційних

методів. Наприклад, при синтезі фериту нікелю, кобальту і цинку використовують гідротермальні методи, мікрохвильову обробку [4-8]. Застосування гідروفазних хімічних методів синтезу є основою одержання феритів перехідних металів із заданим комплексом властивостей. Характерною тенденцією останнього часу є саме розробка технологій одержання нанодисперсних феритів.

Відомо, що нанорозмірні ферити-шпінелі проявляють властивості, які неможливі для консолідованих систем [1,2]. Так, перехід феритів

металів зі змінною валентністю в нанорозмірний стан супроводжується значною зміною їх магнітних властивостей (коерцитивна сила, велика намагніченість, кристалографічна анізотропія, температура Кюрі). Автори [8-11] показують, що на властивості дуже впливають значні енергетичні ефекти у випадку додаткового застосування високоенергетичних короточасних впливів. Створення адекватних моделей магнітного стану подібних матеріалів є однією з актуальних задач матеріалознавства. Пов'язано це як з широкими можливостями їх практичного використання, так і з необхідністю розвитку теоретичної уяви про вплив розміру та структури частинок на магнітні властивості. Єдиної теорії, що пояснює значні магнітні властивості у нанодисперсних магнітних матеріалів немає. В даний час існують основні гіпотези, що пояснюють ефект, який виникає при намагнічуванні нанодисперсних частинок. Наприклад, „оболонкова” модель, що дає якісне пояснення ефектів та теорія Нееля. Теорія Нееля встановлює залежність намагніченості від розподілу катіонів по підграткам.

Таким чином, макроскопічні характеристики магнітних матеріалів залежать від атомної структури. Розуміння особливостей кристалічної структури необхідно для синтезу магнітних наноматеріалів з оптимальними властивостями. Для шпінельних феритів, зокрема, вибір двовалентного катіона і його розподіл між тетраедричних і октаедричних позицій безпосередньо визначають їх магнітну поведінку. Ефект взаємного впливу вмісту різних катіонів на намагніченість насичення і коерцитивну силу доцільно досліджувати з використанням симплексного методу.

В даній роботі, властивості плазмової обробки були використані для синтезу складних неорганічних сполук в системі NiO-CoO-ZnO. Технології синтезу феритів за допомогою дії контактної низькотемпературної нерівноважної плазми (КНП) докладно розглянуті в роботах [9,11]. Отримані результати потребують подальших досліджень, що встановлюють залежності магнітних властивостей від складу.

### Мета роботи

Метою даної роботи є вивчення взаємозв'язку між магнітними характеристиками феритів та складом феритів загального виду  $MeFe_2O_4$  (Me - Ni, Co, Zn), отриманих при використанні плазмової технології.

### Методика проведення експерименту

В якості прекурсорів використовувалися водні 0,5М розчини ферум(II) сульфату і кобальт(II) сульфату, цинк сульфату та 2М розчин натрій гідроксиду. Підготовка нанорозмірного фериту проводилася на лабораторній плазмовій хімічній установці, що детально описана в роботі [11]. Для дослідження впливових компонентів на властивості феритів використовували симплекс-решітчасте планування, що вимагає мінімальну кількість

експериментів для визначення впливу факторів за вибраними функціями відгуку. В якості факторів  $x_1$   $x_2$   $x_3$  були обрані мольні концентрації катіонів кобальту, нікелю і цинку відповідно. Отриманий продукт промивали і сушили для подальшого дослідження. Фазовий склад і структуру зразків фериту вивчали з використанням рентгенівського дифрактометра ДРОН-2 с Cu-K $\alpha$  випромінюванням. Дані рентгенофазового аналізу використовували для характеристики розміру частинок і морфології отриманих зразків. Параметр кристалічної решітки, розмір кристалітів визначали виходячи з експериментальних рентгенівських дифрактограм за методом Селякова- Шеррера.

Магнітні властивості кінцевого порошку вивчалися з використанням вібраційного магнітометра. План проведення експериментів показаний у табл. 1.

Функції відгуку були обрані наступні: коерцитивна сила ( $H_c$ ); намагніченість насичення ( $M_s$ ), резонансне поле ( $S$ ), ширина піка спектра електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) ( $\Delta H_{max}$ ), інтенсивність піку ЕПР спектра ( $I$ ).

Поверхня відгуку на діаграмах «склад-властивості» зображена з допомогою ізоліній.

Таблиця 1 - Матриця планування симплекс-решітчастого плану {3,3}

№	Co	Ni	Zn	y
1	1,0	0,0	0,0	$y_1$
2	0,0	1,0	0,0	$y_2$
3	0,0	0,0	1,0	$y_3$
4	0,333	0,667	0,0	$y_{112}$
5	0,667	0,333	0,0	$y_{122}$
6	0,0	0,667	0,333	$y_{223}$
7	0,0	0,333	0,667	$y_{233}$
8	0,333	0,0	0,667	$y_{133}$
9	0,667	0,0	0,333	$y_{113}$
10	0,333	0,333	0,333	$y_{123}$

### Результати та їх обговорення

Відомо, що магнітні властивості феритів, отриманих плазмовим методом залежать від початкового рН розчину солі ферум(II) або суспензії  $Fe(OH)_2$ , температури, початкової концентрації іонів феруму(II) у розчині або ферум(II) гідроксиду в суспензії [10,11]. Одним із найголовніших факторів є катіонний склад феритів. У відповідності з симплексним методом були синтезовані десять зразків і досліджені їх властивості.

Проведеними дослідженнями було встановлено, що магнітні показники феритів в системах CoO-NiO-ZnO, залежать від складу. Підвищення вмісту кобальту в системі приводить до збільшення коерцитивної сили та намагніченості. Збільшення вмісту в феритах CoO від 0,25 - 0,75 мол. частин, обумовлює значний ріст коерцитивної сили від 0 до 1140 Ое. Отримані результати представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Характеристики феритів Co-Zn-Ni

№ складу	Hc	Ms	Резонансне поле S, мТ	I, від. од.	ΔH, мТ
1.	1124	105,4	547	2700	398,7
2.	955	48,76	530	2242	383,65
3.	503	27,80	445	3325	384
4.	2	26,05	364	2429	141,5
5.	7	19,00	359	3824	63
6.	9	7,70	345	3693	29,71
7.	19	3,93	342	3008	21,83
8.	1	37,26	382	2538	156
9.	70	74,94	501	1121	366
10.	37	5,37	358	3189	122

Даний факт підтверджується також зміщенням значень параметрів кристалічної решітки d (8,35 нм) у бік менших значень (8,32 нм) (рис. 3), також зменшується показник ширини полоси на ЕПР спектрі.

Математична обробка експериментальних даних дозволила отримати рівняння регресії, які адекватно описують взаємозв'язок магнітних показників зі складом дослідних зразків.

$$H_c = 1124,0x_1 + 749,81x_1x_2 - 2409,19x_1x_3 + 523,69x_1x_2(x_1 - x_2) - 2023,50x_1x_3(x_1 - x_3) - 4305,38x_1x_2x_3$$

$$M_s = 106x_1 + 26x_2 - 125x_1x_2 + 57911x_2x_3 - 173732x_1x_2x_3$$

Отримані рівняння регресії використовували для побудови ізоліній магнітних характеристик феритів в досліджуваному факторному просторі (рис. 1 та рис. 2).

Найбільший показник коерцитивної сили відповідає складу, що вміщує максимальну кількість катіонів кобальту. Збільшення вмісту катіонів кобальту призводить до збільшення коерцитивної сили у всіх складах. Також було виявлено позитивний вплив катіонів нікелю на значення намагніченості насичення феритів по стороні трикутника Ni-Zn і протилежне по стороні Ni-Co (рис. 1). Причому, значення намагніченості насичення в більшій мірі залежить від вмісту катіонів кобальту. Найбільші магнітні показники відповідають максимальному вмісту кобальту. Таким чином, магнітні ферити з підвищеною коерцитивною силою відповідають складам 1,2,3, а магнітні ферити з низькою коерцитивною силою складам 4,5,6,7. На діаграмах можна відокремити рівносторонній трикутник з координатами вершин Co(1,0,0)-Ni(0,75,0,0)-Zn(0,25,0,0), якому відповідає область більш високих значень намагніченості насичення.

Зіставлення основних характеристик на ЕПР спектрах з магнітними властивостями дозволяє пояснити механізм дії і встановити внесок присутності феримагнітних катіонів і ступеня оберненості шпінелі. Рентгенофазовий аналіз показав, що зразки містять феромагнітну фазу ймовірно,  $MeFe_2O_4$  і антиферомагнітний  $\alpha-Fe_2O_3$ .

Магнітні характеристики відповідають даним рентгенофазового аналізу і даними ЕПР (рис. 1, 2, 4).

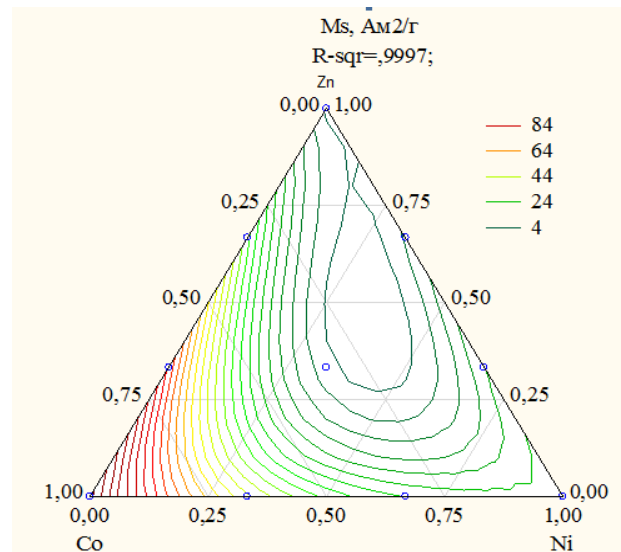


Рис. 1 – Залежність намагніченості насичення від складу

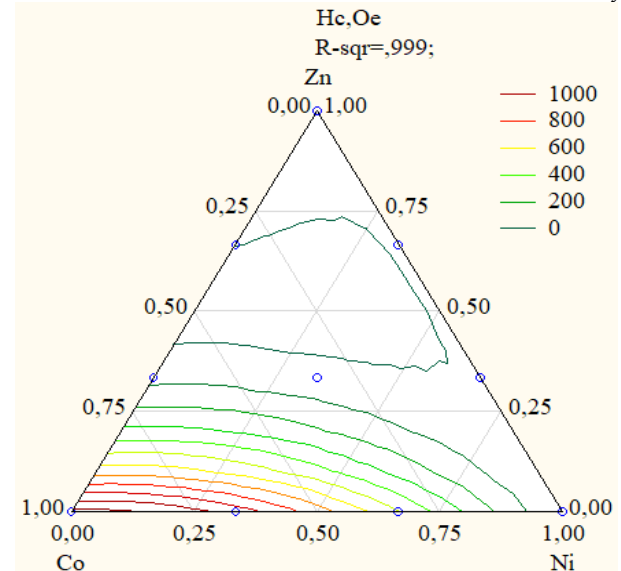


Рис. 2 – Залежність коерцитивної сили від складу

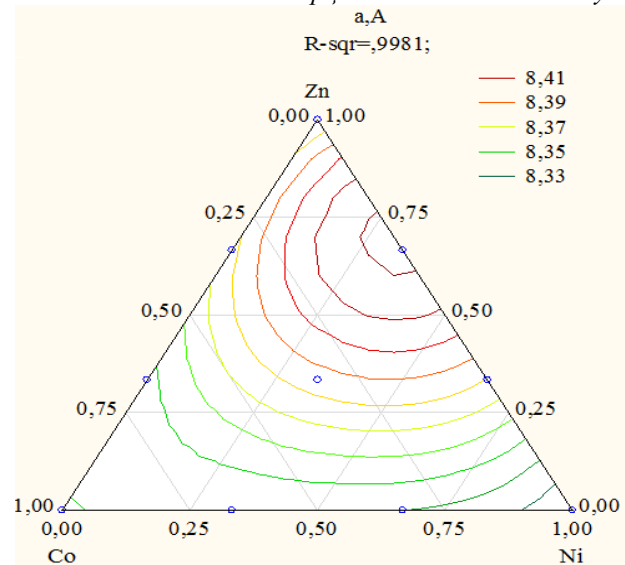


Рис. 3 – Залежність параметра кристалічної решітки від складу

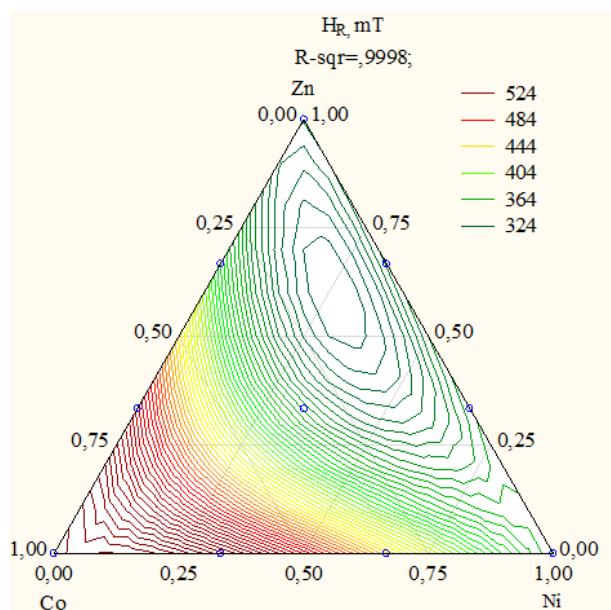


Рис. 4 – Залежність резонансного поля  $H_R$  від складу

Всі ЕПР спектри мають симетричний широкий резонансний сигнал, але їх ширина лінії ( $\Delta H_{pp}$ ) і резонансне магнітне поле ( $H_R$ ) сильно відрізняються (табл. 2). З рис. 4 видно, що існує збільшення резонансного поля і зміна ширини лінії зі збільшенням мольної концентрації катіонів кобальту і нікелю. Видно, що  $\Delta H_{pp}$  є вузькою, інтенсивність піків більше для більш високої концентрації Zn. Спектр зразка фериту кобальту показує досить широкий сигнал ( $\Delta H_{pp} = 398,7$  мТ).

#### Висновок

Таким чином, в результаті проведених експериментальних досліджень синтезовано ряд феритів системи NiO-CoO-ZnO з використанням контактної низькотемпературної нерівноважної плазми. Симплексним методом визначено ефект взаємного впливу вмісту різних катіонів на намагніченість насичення і коерцитивну силу. Встановлено, що низькі значення намагніченості спостерігаються для Ni-Zn феритів і високі для всього ряду Co-Zn, Co-Ni феритів. Збільшення вмісту катіонів кобальту призводить до збільшення коерцитивної сили у всіх складах.

Отримані математичні моделі дають можливість регулювати значення намагніченості насичення і коерцитивної сили змінюючи склад феритів.

#### Список літератури

1. Sugimoto, M. The past, present, and future of ferrites / M. Sugimoto // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1999. – Vol. 82. – № 2. – P. 269-280. – doi: 10.1111/j.1551-2916.1999.tb20058.x.
2. Thanigai, Arul K. Novel polyvinyl alcohol polymer based nanostructure with ferrites co-doped with nickel and cobalt ions for magneto- sensor application / Arul K. Thanigai et al. // *Polymer International*. – 2016. – Vol. 65. – № 12. – P. 1482-1485. – doi: 10.1002/pi.5242.

3. Ren, B. Ferrites as Photocatalysts for Water Splitting and Degradation of Contaminants / B. Ren et al. // *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*. – American Chemical Society. – 2016. – P. 79-112. – doi: 10.1021/bk-2016-1238.ch003.
4. Ibrahim, I. Synthesis of magnetically recyclable spinel ferrite ( $MFe_2O_4$ , M = Zn, Co, Mn) nanocrystals engineered by sol gel-hydrothermal technology: High catalytic performances for nitroarenes reduction / I. Ibrahim, I. O. Ali, Vol. M. Salama, A. A. Bahgat, M. M. Mohamed // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2016. – №181. – P. 389-402. – doi: 10.1016/j.apcatb.2015.08.005.
5. Ferreira, T. A. S. Structural and morphological characterization of  $FeCo_2O_4$  and  $CoFe_2O_4$  spinels prepared by a coprecipitation method / T. A. Ferreira et al. // *Solid State Sciences*. – 2003. – Vol. 5. – № 2. – P. 383-392. – doi: 10.1016/S1293-2558(03)00011-6.
6. Deng, Y. Hematite mesocrystals templated by hydrolyzed and aminolyzed glycidyl methacrylate, and their application in photocatalytic Fenton reaction / Y. Deng et al. // *CrystEngComm*. – 2019. – № 21. – № 10. – P. 1579-1586. – doi: 10.1039/C8CE01631C.
7. Melo, R. Hydrothermal synthesis of nickel doped cobalt ferrite nanoparticles: optical and magnetic properties / R. Melo, P. Banerjee, A. Franco // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2018. – №18. – P. 1-11. – doi: 10.1007/s10854-018-9602-2.
8. Frolova, L. A. Investigation of conditions for ultrasound-assisted preparation of nickel ferrite / L. A. Frolova, A. A. Pivovarov // *High Energy Chemistry*. – 2015. – Vol. 49.1. – P. 10-15. – doi: 10.1134/S001814391501004X.
9. Manikandan, A. Synthesis, optical and magnetic properties of pure and Co-doped  $ZnFe_2O_4$  nanoparticles by microwave combustion method / A. Manikandan et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2014. – Vol. 349. – P. 249-258. – doi: 10.1016/j.jmmm.2013.09.013.
10. Frolova, L. A. Structure and properties of nickel ferrites produced by glow discharge in the  $Fe^{2+}Ni^{2+}SO_4^{2-}OH^-$  system / L. A. Frolova et al. // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2014. – Vol. 87.8. – P. 1054-1059. – doi: 10.1134/S1070427214080084.
11. Frolova, L. A. The Effect of Contact Non-equilibrium Plasma on Structural and Magnetic Properties of  $Mn_xFe_{3-x}O_4$  Spinel / L. A. Frolova, M. P. Derhachov // *Nanoscale Research Letters*. – 2017. – Vol. 12. – № 1. – P. 505. – doi: 10.1186/s11671-017-2268-5.

#### References (transliterated)

1. Sugimoto, M. The past, present, and future of ferrites. *Journal of the American Ceramic Society*, 1999, 82, 2, 269-280, doi: 10.1111/j.1551-2916.1999.tb20058.x.
2. Thanigai, Arul K. et al. Novel polyvinyl alcohol polymer based nanostructure with ferrites co-doped with nickel and cobalt ions for magneto- sensor application. *Polymer International*, 2016, 65, 12, 1482-1485, doi: 10.1002/pi.5242.
3. Ren, B. et al. Ferrites as Photocatalysts for Water Splitting and Degradation of Contaminants. *Ferrites and Ferrates: Chemistry and Applications in Sustainable Energy and Environmental Remediation*, American Chemical Society, 2016, 79-112, doi: 10.1021/bk-2016-1238.ch003.
4. Ibrahim, I., Ali, I. O., Salama, Vol. M., Bahgat, A. A., Mohamed, M. M. Synthesis of magnetically recyclable spinel ferrite ( $MFe_2O_4$ , M = Zn, Co, Mn) nanocrystals

- engineered by sol gel-hydrothermal technology: High catalytic performances for nitroarenes reduction. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, **181**, 389-402, doi: 10.1016/j.apcatb.2015.08.005.
5. **Ferreira, T. A. S. et al.** Structural and morphological characterization of  $\text{FeCo}_2\text{O}_4$  and  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  spinels prepared by a coprecipitation method. *Solid State Sciences*, 2003, **5**, 2, 383-392, doi: 10.1016/S1293-2558(03)00011-6.
  6. **Deng, Y. et al.** Hematite mesocrystals templated by hydrolyzed and aminolyzed glycidyl methacrylate, and their application in photocatalytic Fenton reaction. *CrystEngComm*, 2019, **21**, 10, 1579-1586, doi: 10.1039/C8CE01631C.
  7. **Melo, R. S., P. Banerjee, A. Franco.** Hydrothermal synthesis of nickel doped cobalt ferrite nanoparticles: optical and magnetic properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2018, **18**, 1-11, doi: 10.1007/s10854-018-9602-2.
  8. **Frolova, L. A., Pivovarov, A. A.** Investigation of conditions for ultrasound-assisted preparation of nickel ferrite. *High Energy Chemistry*, 2015, **49**, 1, 10-15, doi: 10.1134/S001814391501004X.
  9. **Manikandan, A. et al.** Synthesis, optical and magnetic properties of pure and Co-doped  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles by microwave combustion method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2014, **349**, 249-258, doi: 10.1016/j.jmmm.2013.09.013.
  10. **Frolova, L. A. et al.** Structure and properties of nickel ferrites produced by glow discharge in the  $\text{Fe}^{2+}\text{Ni}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-OH}^-$  system. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, **87**, 8, 1054-1059, doi: 10.1134/S1070427214080084.
  11. **Frolova, L. A., Derhachov, M. P.** The Effect of Contact Non-equilibrium Plasma on Structural and Magnetic Properties of  $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$  Spinels. *Nanoscale research letters*, 2017, **12**, 1, 505, doi: 10.1186/s11671-017-2268-5.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Фролова Лілія Анатоліївна** - кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», кафедра технології неорганічних речовин та екології, м. Дніпро, Україна; e-mail: 19kozak83@gmail.com.

**Liliya Frolova** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Affiliation, Department of inorganic substances technology and ecology, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine; e-mail: 19kozak83@gmail.com.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

**Фролова, Л. А.** Дослідження магнітних властивостей феритів в системі  $\text{NiO-CoO-ZnO}$  / **Л. А. Фролова** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 81-85. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.12.

Please cite this article as:

**Frolova, L.** Research of the magnetic properties of ferrites in the  $\text{NiO-CoO-ZnO}$  system. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **2**, 81-85, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.12.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Фролова, Л. А.** Исследование магнитных свойств ферритов в системе  $\text{NiO-CoO-ZnO}$  / **Л. А. Фролова** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 81-85. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.12.

**АННОТАЦИЯ** Оксидные системы, содержащие катионы переходных металлов обладают важными технологическими свойствами. Так, например, ферриты кобальта, никеля, марганца, цинка используют в магнитных, электрических материалах, как катализаторы ряда реакций. Технологические схемы получения таких соединений требуют использования высокотемпературной термообработки и сложного оборудования. Применение гидрофазных химических методов синтеза является основой получения ферритов переходных металлов с заданным комплексом свойств. Характерной тенденцией последнего времени является разработка технологий получения именно нанодисперсных ферритов. В работе изучена зависимость магнитных характеристик ферритов в системе  $\text{CoO-NiO-ZnO}$  симплексным методом. Ферриты  $\text{Ni-Zn}$ ,  $\text{Co-Zn}$ ,  $\text{Co-Ni}$  синтезировали в виде наночастиц с использованием контактной неравновесной низкотемпературной плазмы. Кристаллическая микроструктура образцов была выяснена с использованием рентгеноструктурного и рентгенофазового методов. Установлено, что для шпинельной ферритов, в частности, выбор двухвалентного катиона непосредственно определяет их магнитное поведение. Определен эффект взаимного влияния содержания различных катионов на намагниченность насыщения и коэрцитивную силу симплексным методом. Магнитные исследования с использованием вибрационного магнетометра показали, что при данных условиях синтеза наблюдаются низкие значения намагниченности для  $\text{Ni-Zn}$  ферритов и высокие для всего ряда  $\text{Co-Zn}$ ,  $\text{Co-Ni}$  ферритов. Увеличение содержания катионов кобальта приводит к увеличению коэрцитивной силы во всех составах. Также было выявлено положительное влияние катионов никеля на значение намагниченности насыщения ферритов на стороне треугольника  $\text{Ni-Zn}$  и противоположное по стороне  $\text{Ni-Co}$ . Спектры ЭПР показывают, что значение резонансного поля и ширины линии соответствует значению магнитного насыщения.

**Ключевые слова:** феррит кобальта; феррит цинка; феррит никеля; симплексный метод феррит кобальта; магнитная наночастицы; рентгеновская дифракция

Поступила (received) 01.10.2019