

УДК 661.11

doi:10.20998/2413-4295.2018.45.31

## ПЛАЗМОХІМІЧНИЙ СИНТЕЗ ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОДИСПЕРСНИХ ФЕРИТІВ КОБАЛЬТУ

Л. А. ФРОЛОВА\*, А. В. ДЕРИМОВА

кафедра технології неорганічних речовин та екології, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, УКРАЇНА

\*e-mail: 19kozak83@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Останнім часом, коли наноматеріали відкрили нову еру в галузі матеріалознавства, вивчення впливу умов синтезу на фазовий склад вимагає більшої уваги. Феритні наночастинки продемонстрували величезну популярність у галузі біомедицини завдяки їх широкому застосуванню для розділення клітин, контрастних агентів, засобів для магнітоіндукованої гіпертермії, зокрема щодо лікування пухлин. Хімічні методи розглядаються як основні в технології отримання наноматеріалів. У цій роботі нанодисперсний ферит кобальту був синтезований двостадійним способом, що складався з співосадження та подальшої обробки контактною низькотемпературною нерівноважною плазмою (КНП). Оскільки розчини, оброблені плазмою, містять радикали, пероксиди, які мають окислювальні властивості, такі плазмохімічно "активовані" розчини можна використовувати для одержання феритів кобальту. Сформовані окислювальні агенти, ініціюють утворення ферум(III) оксидів та кобальт оксидів. Таким чином, встановлено, що під впливом контактної плазми перекис водню в розчинах швидко реагує з формуванням фериту кобальту. Досліджено вплив обробки КНП на структурні та магнітні властивості фериту кобальту. Для визначення структурних та магнітних властивостей використовували рентгенівський дифракційний аналіз, інфрачервону Фур'є спектроскопію (ІЧ) та вібраційну магнітометрію (за кімнатної температури). Інфрачервона спектроскопія в діапазоні від 400 до 4000  $\text{cm}^{-1}$  підтвердила внутрішні катіонні коливання структури шпінелі. ІЧ спектри показали наявність поглинання за 3414, 1617, 592 та 420  $\text{cm}^{-1}$ . Останні дві смуги можна приписати до коливань катіонів в тетраедричних та октаедричних позиціях у шпінелі  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ . Рентгенофазовий аналіз показав утворення кобальтового фериту як єдиної фази. Рентгеноструктурним аналізом та ПЕМ було встановлено, що отриманий ферит кобальту нанорозмірного діапазону. Середній розмір частинок, вимірний за допомогою ПЕМ-мікроскопії, становив 30-50 нм. Намагніченість насичення 58-61  $\text{Am}^2/\text{g}$  відповідає результатам інших авторів. Коерцитивність складає близько 450 Ерстед, що вище, ніж для дисперсних матеріалів, отриманих іншими гідрофазними методами.

**Ключові слова:** ферит кобальту; магнітна наночастинка; рентгенівська дифракція; ІЧ спектри; коерцитивність; намагніченість

## PLASMOCHEMICAL SYNTHESIS AND MAGNETIC PROPERTIES OF NANODISPERSEY FERRITES OF COBALT

L. FROLOVA, A. DERIMOVA

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

**ABSTRACT** Currently, when nanomaterials have opened a new era in materials science, the study of the influence of synthesis conditions on the phase composition requires more attention. Ferrite nanoparticles have demonstrated immense popularity in the field of biomedicine due to their widespread use for cell separation, contrast agents, means for magnetically induced hyperthermia, in particular in the treatment of tumors. Chemical methods are considered as basic in the technology of nanomaterials production. In this work, nano-dispersed cobalt ferrite was synthesized by a two-stage method of coprecipitation and subsequent treatment with contact low-temperature nonequilibrium plasma (CNP). Since solutions treated with plasma, containing radicals, peroxides, have oxidizing properties, such chemically "activated" solutions can be used to produce cobalt ferrites. Formed oxidizing agents, initiate the formation of oxides of iron and cobalt. Thus, it has been established that, under the influence of contact plasma, hydrogen peroxide in solutions rapidly reacts with the formation of cobalt ferrite. The influence of the processing of CNP on the structural and magnetic properties of cobalt ferrite has been investigated. X-ray diffraction analysis, infrared Fourier transform spectroscopy (IR), and vibrational magnetometry (at room temperature) were used to determine the structural and magnetic properties. Infrared spectroscopy in the range from 400 to 4000  $\text{cm}^{-1}$  confirmed the internal cationic vibrations of the spinel structure. The IR spectra showed the presence of absorption at 3414, 1617, 592 and 420  $\text{cm}^{-1}$ . The last two bands can be attributed to cation oscillations in tetrahedral and octahedral positions in  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  spinel. X-ray phase analysis showed the formation of cobalt ferrite as a single phase. X-ray diffraction analysis and TEM showed that the resulting cobalt ferrite was obtained in the nano range. The average particle size, measured using TEM microscopy, was 30-50 nm. The saturation magnetization 58-61  $\text{Am}^2/\text{g}$  corresponds to the estimate of other authors. The coercivity is about 450 Oe, which is higher than for dispersed materials obtained by other methods.

**Keywords:** cobalt ferrite; magnetic nanoparticle; X-ray diffraction; IR spectra; coercivity; magnetization of saturation

### Вступ

Інтерес до феритних наночастинок значно збільшився протягом останніх десяти років.

Нанодисперсний ферит кобальту є цікавим матеріалом завдяки магнітокристалічній анізотропії, високій коерцитивності, зносостійкості та електроізоляції.

Ці властивості, поряд з їх фізичною та хімічною стабільністю, дають змогу застосовувати наночастинки  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  у багатьох галузях промисловості. Їх успішно використовують у радіотехніці, мікрохвильовій технології, HD-технологіях, в обчислювальних та моделюючих пристроях, вимикачах та підсилювачах. Високодисперсний ферит кобальту є одним з вихідних матеріалів для виробництва магнітних порошків, що використовуються як компонент в аудіо та відео носіях. Магнітні наночастинки продемонстрували величезну популярність у галузі біомедицини завдяки їх широкому застосуванню для розділення клітин, контрастних агентів, засобів для магнітоіндукованої гіпертермії, зокрема щодо лікування пухлин.

Одним із способів поліпшення магнітних властивостей феритних порошків є вдосконалення структури вихідного матеріалу [1-3].

Аналіз останніх публікацій та патентів щодо синтезу дисперсних наносистем або магнітних рідин показав, що продовжуються спроби знайти більш дешеві способи виробництва, враховуючи постійно зростаючі обсяги їх споживання [5,6].

Властивості  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  залежать від таких факторів, як розмір частинок, ступінь кристалічності та хімічна чистота. Дослідники намагаються оптимізувати ці фактори шляхом вибору методу синтезу та умов експерименту.

Тому ферити широко вивчаються і з точки зору технології їх отримання. Саме вивчення впливу умов синтезу на фазовий склад вимагає більшої уваги дослідників. Традиційні керамічні методи вимагають великих витрат енергії та високотемпературного синтезу. Таким чином, отримані ферити грубодисперсні. Вони мають непостійний склад та відповідні аніонні домішки.

Хімічні методи розглядаються як основні в технологіях отримання наноматеріалів. Контроль розміру і форми наноферитів є основним фактором, що впливає на їх властивості, а потім, і можливе використання. Гідрофазні методи дозволяють регулювати склад, кристалічність і морфологію частинок. Найсучаснішими з них є співосадження, гідротермальний метод, метод зворотних міцел, високоенергетичні рідкофазні технології [7-10].

Співосадження є універсальним методом, придатним для синтезу великих партій матеріалів із заданим складом і розміром частинок [7-9]. Незважаючи на те, що вивченню комбінованих методів співосадження останнім часом приділялася велика увага, існують розбіжності в механізмі формування феритів і характеристиках кінцевого продукту.

На даний час для інтенсифікації багатьох хімічних процесів розчини обробляють ультразвуком, контактною низькотемпературною нерівноважною плазмою, НВЧ-випромінюванням [12] і т. ін. Такі перспективні технології дозволяють інтенсифікувати

синтез, регулювати склад та властивості кінцевого продукту.

### Мета роботи

Мета роботи полягає у одержанні феритів кобальту за допомогою КНП, з відповідними магнітними властивостями.

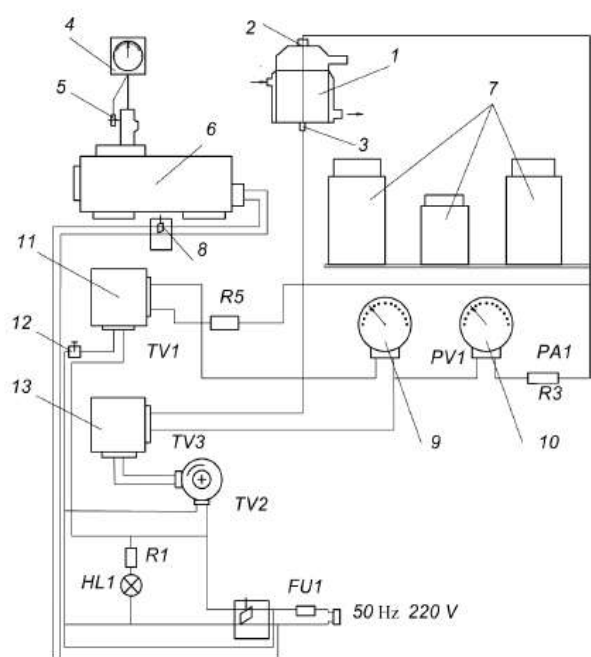
### Виклад основного матеріалу

Приготування нанорозмірного фериту кобальту проводилося на лабораторній плазмохімічній установці, що складалася з плазмового реактора дискретного типу, з посилюючим трансформатором, трансформатором запалення та вакуумним насосом.

Гідроксиди отримували шляхом поступового додавання луку при безперервному перемішуванні суміші сульфатів, взятих у стехіометричному співвідношенні як у фериті. В якості вихідних речовин служили 0,5н розчини ферум (II) сульфату та кобальт сульфату. Осадження проводили 1н натрій гідроксидом при перемішуванні протягом 15 хв при 20° С. рН контролювали за допомогою йонміра рН-150, а температуру – термометром ТЛ-4. Для ідентифікації кристалічних фаз, присутніх у зразках одержували рентгенограми на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2 з  $\text{CoK}\alpha$  монохроматором.

Просвічуюча електронна мікроскопія проводилася з використанням ПЕМ-У (Україна). Інфрачервоні спектри нанопорошків за кімнатної температури були отримані за допомогою інфрачервоного спектрометра Фур'є-перетворювача Nicolet iS10 в діапазоні від 400 до 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Відносні магнітні властивості (насичення намагніченості  $M_s$  ( $\text{Am}^2/\text{г}$ ), коерцитивна сила  $H_c$  (Ерстед) оцінювалися вібраційним магнітометром. Суспензії обробляли на лабораторній установці, що показана на рис. 1.

Лабораторна плазмохімічна установка складалася з плазмового дискретного типу реактора об'ємом 0,4  $\text{дм}^3$ , підсилювального трансформатора, трансформатора запалення та вакуумного насоса. Реактор був виготовлений з молібденового скла. Роль робочого нерухомого електроду (катоду) відіграла полірована горизонтальна пластина з нержавіючої сталі, загвинчена на струмовий провід з електропровідного матеріалу і розташована в нижній частині реактора. Інший мобільний електрод з тугоплавкого матеріалу встановлювали над суспензією, що заливали в реактор, на відстані 1,5 см від її поверхні. Початкова напруга подавалася на підсилювальний трансформатор. Він змінював струм від вторинної котушки до мосту випрямляча, а потім, пульсуюча напруга, прямувала через баластний резистор до реакторних електродів. Пристрій запалювання додатково був підключений до анода. Цей пристрій утворював імпульси з амплітудою до 15 кВ з шириною 1,5 мс.



1 - реактор; 2, 3 - електроди; 4 - вакуумметр; 5 - кран; 6 - насос; 7 - фільтруючі елементи; 8 - перемикач; 9 - вольтметр; 10 - амперметр; 11 - трансформатор; 12 - перемикач; 13 - трансформатор напруги

Рис. 1 – Схема плазмохімічної установки

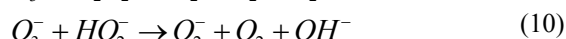
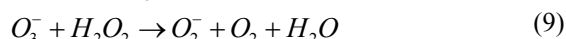
Імпульси жорстко синхронізовані з фазою пульсуючої напруги. У момент утворення запального імпульсу відбувався пробій між електродами реактора у вакуумному просторі, утвореному розрядженням до 0,06-0,08 МПа. Опір різко падав, а виникаючий струм аноду створював розряд. Напруга залишалася практично незмінною – 750-900 В. Струм в розрядному проміжку відзначався стійкістю до плазми та напруги, прикладеної до системи, що утворена плазмовим розрядом та баластним контролером. Напруга регулювалася за принципом фазового методу, тобто середня напруга аноду, накладена на реактор, залежала від фази пульсуючої напруги на аноді та від моменту, коли імпульс запалювання подавався. Плазма з'являлась в момент запалення і гасилася, коли пульсації напруги аноду закінчувалися. Частота повторення процесу складала 100 Гц.

Струм розряду регулювався шляхом зміни моменту запалення відносно фази пульсацій напруги аноду з синхронізуючим пристроєм. Реактор служив в якості пристрою керування потужністю. Реактор охолоджували зворотним холодильником.

Можливість впливу різного роду чинників на хімічні реакції, обумовлюють складність процесів, що перебігають у плазмохімічному реакторі.

Процеси на границі рідина-газ, що індуковані контактною нерівноважною плазмою, виражаються

можливими реакціями, що виникають при обробці розчинів КНП:



Таким чином, у водному середовищі утворюються кисневі, водневі та гідроксильні радикали. Відповідно до отриманих даних також утворюються поліоксиди водню. У всіх випадках сформовані окислювальні агенти, ініціюють утворення ферум (III) оксиду, кобальт (III) оксиду, кобальт (II) оксиду.

Одним з перспективних застосувань контактної низькотемпературної плазми є одержання складних ферум та кобальт оксидів плазмохімічною обробкою суспензій гідроксидів. Згідно реакцій 1-11 суспензії, оброблені плазмою, містять сполуки та радикали, які володіють потужними окислювальними властивостями. Такі плазмохімічно "активовані" розчини можна використовувати для одержання феритів нікелю, кобальту, мангану, хрому тощо. Можна припустити, що під впливом КНП в розчинах швидко в наслідок складних гетерогенних реакцій формується ферит.

Таким чином, дослідження процесу отримання фериту кобальту за плазмохімічною технологією має теоретичний та практичний інтерес.

### Обговорення результатів

Дифрактограми порошоків, синтезованих під дією КНП, представлені на рис. 2.

Шляхом обробки КНП отримували однофазний шпінельний гідроферит, про що свідчить відсутність будь-яких додаткових рефлексів на рентгенограмах одержаного зразка. Дані рентгенофазового аналізу добре узгоджуються зі стандартними значеннями для  $CoFe_2O_4$  (JCPDS: 22-1086).

На рис. 3 показані зображення ПЕМ зразка. Можна помітити значну агломерацію частинок з середнім розміром частинок 30-50 нм. Важливо підкреслити, що на відміну від високотемпературних технологій спостерігається агрегація частинок, але можна побачити різницю розміру між окремими частинками.

Отримані ІЧ спектри феритних наночастинок у діапазоні довжини хвилі 4000–400  $\text{cm}^{-1}$  показані на рис. 4. Чітко видно сильні поглинання при 3414, 1617, 592 та 420  $\text{cm}^{-1}$ . Останні дві смуги можна віднести до коливань  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  катіонів в тетраедричних та октаедричних позиціях у шпінелі  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ .

Таблиця 1 – Магнітні властивості фериту кобальту

Технологія синтезу	Намагніченість насичення $\text{Am}^2/\text{г}$	Коерцитивна сила, Ерстед
Співосадження	58.4	286
Піроліз полімеру	-	1100
Метод прямих емульсій	12.6	23.7
Метод зворотних емульсій	29.6	25.2
КНП	61.2	452

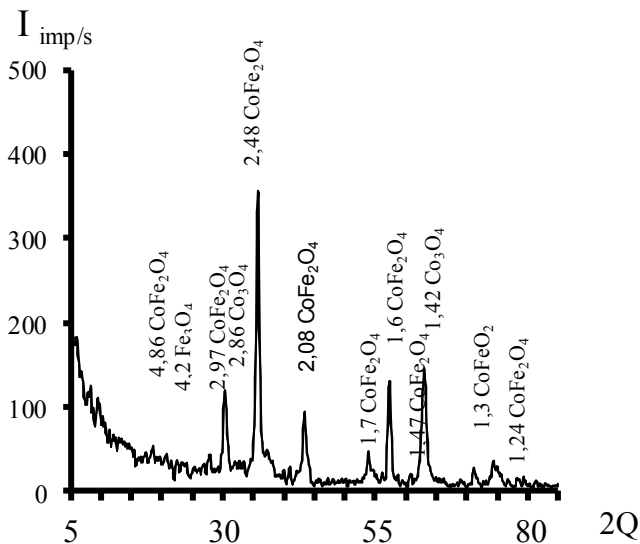


Рис. 2 – Рентгенограма нанодисперсного фериту кобальту

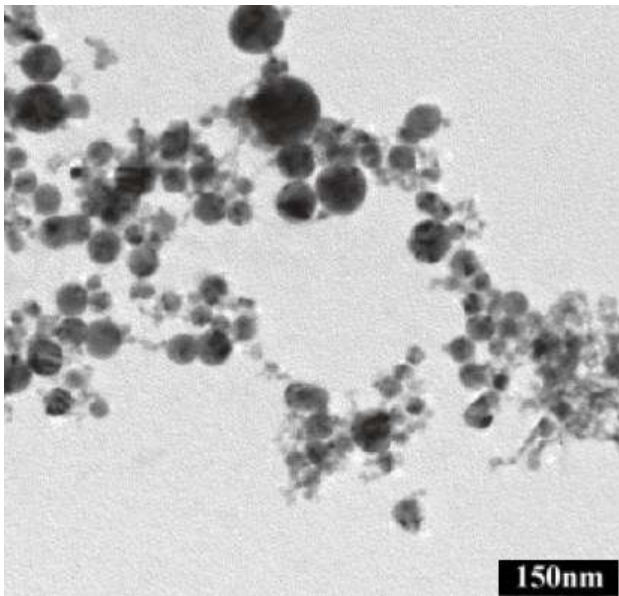


Рис. 3 – ПЕМ зображення наночастинок фериту кобальту

На рис. 5 показані петлі гістерезису за кімнатної температури для отриманого зразка. Магнітні параметри, такі як намагніченість насичення ( $M_s$ ), коерцитивність ( $H_c$ ) визначені з петлі гістерезису, наведені в табл. 1.

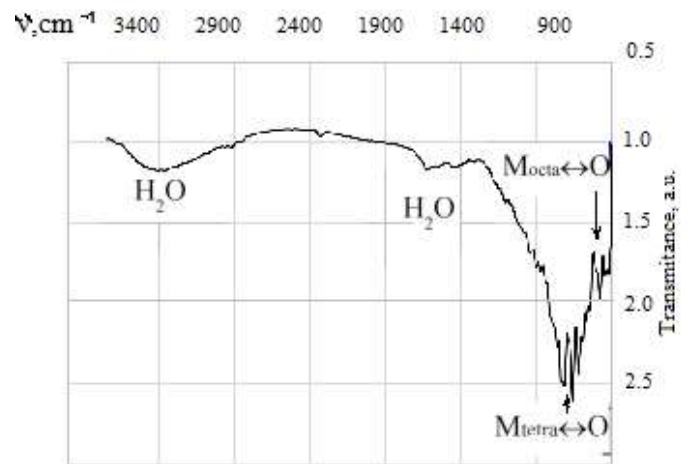


Рис. 4 – ІЧ спектри нанодисперсного фериту кобальту

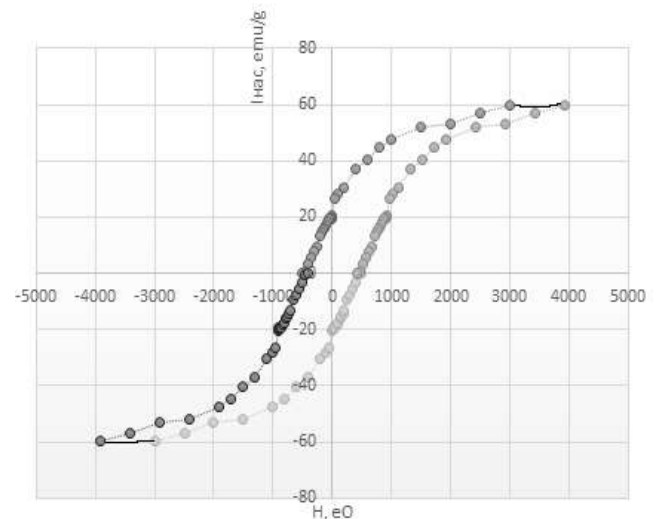


Рис. 5 – Криві М-Н зразка нанодисперсного фериту кобальту за температури 298 К

### Висновки

Зразки фериту кобальту були отримані шляхом комбінації співосадження  $\text{Co}(\text{OH})_2/2\text{Fe}(\text{OH})_2$  та обробки КНП без високотемпературної стадії

Рентгенофазовий аналіз показав утворення кобальтового фериту як єдиної фази. Отриманий ферит кобальту нанорозмірного діапазону, що підтверджено рентгенофазовим аналізом та ПЕМ. Середні розміри частинок, що оцінювалися за допомогою ПЕМ мікроскопії, становив 30-50 нм. ІЧ спектри показали наявність двох смуг, характерних для шпінельових феритів. Намагніченість насичення (58-61 Ам<sup>2</sup>/г) відповідає оцінці інших авторів. Коерцитивність становить близько 450 Ерстед, що вище, ніж коерцитивність дисперсних матеріалів, отриманих іншими методами.

#### Список літератури

1. **Li, Z. H.** High capacity three-dimensional ordered macroporous CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as anode material for lithium ion batteries / **Z. H. Li, T. P. Zhao, X. Y. Zhan, D. S. Gao, Q. Z. Xiao, G. T. Lei** // *Electrochimica Acta*. – 2010. – Vol. 55. – № 15. – P. 4594-4598. – doi:10.1016/j.electacta.2010.03.015.
2. **Amiri, S.** The role of cobalt ferrite magnetic nanoparticles in medical science / **S. Amiri, H. Shokrollahi** // *Materials Science and Engineering*. – 2013. – Vol. 33. – № 1. – P. 1-8. – doi:10.1016/j.msec.2012.09.003.
3. **Kapilevich, L. V.** Effect of nanodisperse ferrite cobalt (CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) particles on contractile reactions in guinea pigs airways / **L. V. Kapilevich et al.** // *Bulletin of experimental biology and medicine*. – 2010. – Vol. 149. – № 1. – P. 70-72. – doi:10.1007/s10517-010-0878-3.
4. **Yavari, S.** Cobalt ferrite nanoparticles: preparation, characterization and anionic dye removal capability / **S. Yavari et al.** // *Journal of the Taiwan institute of chemical engineers*. – 2016. – Vol. 59. – P. 320-329. – doi:10.1016/j.jtice.2015.08.011.
5. **Limaye, M. V.** High coercivity of oleic acid capped CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles at room temperature / **M. V. Limaye et al.** // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2009. – 113. – № 27. – P. 9070-9076. – doi:10.1021/jp810975v.
6. **Mathew, D. S.** An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions / **D. S. Mathew, R. S. Juang** // *Chemical engineering journal*. – 2007. – Vol. 129. – № 1-3. – P. 51-65. – doi:10.1016/j.cej.2006.11.001.
7. **Ferreira, T. A. S.** Structural and morphological characterization of FeCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinels prepared by a coprecipitation method / **T. A. S. Ferreira et al.** // *Solid State Sciences*. – 2003. – Vol. 5. – № 2. – P. 383-392. – doi:10.1016/S1293-2558(03)00011-6.
8. **Repko, A.** A study of oleic acid-based hydrothermal preparation of CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles / **A. Repko, D. Nižňanský, J. Poltírová-Vejpravová** // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2011. – 13. – № 10. – P. 5021. – doi:10.1007/s11051-011-0483-z.
9. **Sharifi, I.** Magnetic and structural studies on CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles synthesized by co-precipitation, normal micelles and reverse micelles methods / **I. Sharifi et al.** // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2012. – Vol. 324. – № 10. – P. 1854-1861. – doi:10.1016/j.jmmm.2012.01.015.
10. **Silva, J. B.** Influence of heat treatment on cobalt ferrite ceramic powders / **J. B. Silva, W. De Brito, N. D. S. Mohallem** // *Materials Science and Engineering: B*. – 2004. – Vol. 112. – № 2-3. – P. 182-187. – doi:10.1016/j.mseb.2004.05.029.
11. **Sangmanee, M.** Nanostructures and magnetic properties of cobalt ferrite (CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) fabricated by electrospinning / **M. Sangmanee, S. Maensiri** // *Applied Physics A*. – 2009. – Vol. 97. – № 1. – P. 167-177. – doi:10.1007/s00339-009-5256-5.
12. **Frolova, L.** Investigation of phase formation in the system Fe<sup>2+</sup>/Co<sup>2+</sup>/O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O / **L. Frolova et al.** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – vol. 6. 6. – 84. – P. 64-68. – doi: 10.15587/1729-4061.2016.85123.

#### References (transliterated)

1. **Li, Z. H. et al.** High capacity three-dimensional ordered macroporous CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as anode material for lithium ion batteries. *Electrochimica Acta*, 2010, **55**, 15, 4594-4598, doi:10.1016/j.electacta.2010.03.015.
2. **Amiri, S., Shokrollahi, H.** The role of cobalt ferrite magnetic nanoparticles in medical science. *Materials Science and Engineering: C*, 2013, **33**, 1, 1-8, doi:10.1016/j.msec.2012.09.003.
3. **Kapilevich, L. V. et al.** Effect of nanodisperse ferrite cobalt (CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) particles on contractile reactions in guinea pigs airways. *Bulletin of experimental biology and medicine*, 2010, **149**, 1, 70-72, doi:10.1007/s10517-010-0878-3.
4. **Yavari, S. et al.** Cobalt ferrite nanoparticles: preparation, characterization and anionic dye removal capability. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, **59**, 320-329, doi:10.1016/j.jtice.2015.08.011.
5. **Limaye, M. V. et al.** High coercivity of oleic acid capped CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles at room temperature. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2009, **113**, 27, 9070-9076, doi:10.1021/jp810975v.
6. **Mathew, D. S., Juang, R. S.** An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions. *Chemical Engineering Journal*, 2007, **129**, 51-65, doi:10.1016/j.cej.2006.11.001.
7. **Ferreira, T.A. et al.** Structural and morphological characterization of FeCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinels prepared by a coprecipitation method. *Solid State Sciences*, 2003, **5**, 2, 383-392, doi:10.1016/S1293-2558(03)00011-6.
8. **Repko, A., Nižňanský, D., Poltírová-Vejpravová, J.** A study of oleic acid-based hydrothermal preparation of CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 2011, **13**, 10, 5021-5031, doi:10.1007/s11051-011-0483-z.
9. **Sharifi, I. et al.** Magnetic and structural studies on CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles synthesized by co-precipitation, normal micelles and reverse micelles methods. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2012, **324**, 10, 1854-1861, doi:10.1016/j.jmmm.2012.01.015.
10. **Silva, J., Brito, W. De., Mohallem, N.** Influence of heat treatment on cobalt ferrite ceramic powder. *Mat. Science Eng. B*, 2004, **112**, 182-187, doi:10.1016/j.mseb.2004.05.029.
11. **Sangmanee, M., Maensiri, S.** Nanostructures and magnetic properties of cobalt ferrite (CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) fabricated by electrospinning. *Applied Physics A*, 2009, **97**, 1, 167-177, doi:10.1007/s00339-009-5256-5.
12. **Frolova, L. et al.** Investigation of phase formation in the system Fe<sup>2+</sup>/Co<sup>2+</sup>/O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **6.6**, 84, 64-68, doi:10.15587/1729-4061.2016.85123.

### Відомості про авторів (About authors)

**Фролова Лілія Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», кафедра технології неорганічних речовин та екології, м. Дніпро, Україна; ORCID: 0000-0001-6782-546X; e-mail: 19kozak83@gmail.com.

**Liliya Frolova** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Ukrainian State University of Chemical Technology, Associate Professor of inorganic substances technology and ecology Department, Dnipro, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6782-546X; e-mail: 19kozak83@gmail.com.

**Дерімова Альона Вадимівна** – асистент, Український державний хіміко-технологічний університет, кафедра технології неорганічних речовин та екології, м. Дніпро, Україна; e-mail: 19kozak83@gmail.com.

**Alona Derimova** – assistant, Ukrainian State University of Chemical Technology, Department of technology of inorganic substances and ecology, Dnipro, Ukraine; e-mail: 19kozak83@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Фролова, Л. А.** Плазмохімічний синтез та магнітні властивості нанодисперсних феритів кобальту / **Л. А. Фролова, А. В. Дерімова** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 228-233. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.31.

*Please cite this article as:*

**Frolova, L., Derimova, A.** Plasmochemical synthesis and magnetic properties of nanodispersy ferrites of cobalt. *Bulletin of NTU KhPI Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 45 (1321), 228–233, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.31.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Фролова, Л. А.** Плазмохимический синтез и магнитные свойства нанодисперсных ферритов кобальта / **Л. А. Фролова, А. В. Дерімова** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 228-233. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.31.

**АННОТАЦИЯ** В настоящее время наноматериалы открыли новую эру в области материаловедения, и потому изучение влияния условий синтеза на фазовый состав требует большего внимания. Ферритные наночастицы продемонстрировали огромную популярность в области биомедицины благодаря их широкому применению для разделения клеток, контрастных агентов, средств для магнитоиндуцированной гипертермии, в частности при лечении опухолей. Химические методы рассматриваются как основные в технологии получения наноматериалов. В этой работе нанодисперсный феррит кобальта был синтезирован двухстадийным способом соосаждения и последующей обработкой контактной низкотемпературной неравновесной плазмой (КНП). Поскольку растворы, обработанные плазмой, содержащие радикалы, перекиси, имеют окислительные свойства, такие химически "активированные" растворы можно использовать для получения ферритов кобальта. Сформированные окислительные агенты, инициируют образование оксидов железа и кобальта. Таким образом, установлено, что под влиянием контактной плазмы перекись водорода в растворах быстро реагирует с формированием феррита кобальта. Исследовано влияние обработки КНП на структурные и магнитные свойства феррита кобальта. Для определения структурных и магнитных свойств использовали рентгеновский дифракционный анализ, инфракрасную Фурье спектроскопию (ИК) и вибрационную магнитометрию (при комнатной температуре). Инфракрасная спектроскопия в диапазоне от 400 до 4000 см<sup>-1</sup> подтвердила внутренние катионные колебания структуры шпинели. ИК спектры показали наличие поглощения за 3414, 1617, 592 и 420 см<sup>-1</sup>. Последние две полосы можно приписать к колебаниям катионов в тетраэдрических и октаэдрических позициях в шпинели CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. Рентгенофазовый анализ показал образование кобальтового феррита как единственной фазы. Рентгеноструктурным анализом и ПЭС было установлено, что полученный феррит кобальта наноразмерного диапазона. Средний размер частиц, измеренный с помощью ПЕМ-микроскопии, составлял 30-50 нм. Намагниченность насыщения 58-61 Ам<sup>2</sup>/г соответствует оценке других авторов. Коэрцитивность составляет около 450 эрстед, что выше, чем для дисперсных материалов, полученных другими методами.

**Ключевые слова:** феррит кобальта; магнитные наночастицы; рентгеновская дифракция; ИК спектры; коэрцитивность; намагниченность

*Поступила (received) 08.12.2018*