

УДК 544.77

СИНТЕЗ НАНОРОЗМІРНОЇ ШПІНЕЛІ MgMn_2O_4 СПІВОСАДЖЕННЯМ В УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ПОЛІ

Ю. В. СУХАЦЬКИЙ¹, М. В. ШЕПІДА¹, М. Я. ГОЛОВЧУК²

¹ Національний університет "Львівська політехніка";

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Частинки нанорозмірної шпінелі MgMn_2O_4 синтезовано співосадженням в ультразвуковому полі. Виявлено, що піки Бреґґа на дифрактограмі синтезованого продукту добре узгоджуються з еталонною моделлю шпінелі MgMn_2O_4 з тетрагональною структурою. За рівнянням Дебая–Шеррера розраховано середній розмір кристаліта MgMn_2O_4 , який становив ~24 нм. Частинки нанорозмірної шпінелі апробовано як активатори натрію перкарбонату під час окиснювальної деградації ксантенового барвника родаміну Б (передове окиснення – ультразвук/ $\text{MgMn}_2\text{O}_4/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5 \text{H}_2\text{O}_2$). Встановлено, що за концентрації натрію перкарбонату 5 мМ, вмісту каталізатора в реакційному середовищі 1 г/л і тривалості оброблення 3600 с ступінь деградації родаміну Б сягає 98%, а константа швидкості – $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Ключові слова: синтез, ультразвукове поле, співосадження, нанорозмірна шпінель, MgMn_2O_4 , каталізатор, активація.

Nanosized MgMn_2O_4 spinel particles were synthesized by co-precipitation in an ultrasonic field. It was found that the Bragg peaks on the diffractogram of the synthesized product were in good agreement with the reference model of MgMn_2O_4 spinel with a tetragonal structure. According to the Debye–Scherrer equation, the average size of the MgMn_2O_4 crystallite was calculated, which was ~24 nm. Nanosized spinel particles were tested as sodium percarbonate activators during the oxidative degradation of the xanthene dye rhodamine B (advanced oxidation – ultrasound/ $\text{MgMn}_2\text{O}_4/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5 \text{H}_2\text{O}_2$). It was established that at the sodium percarbonate concentration of 5 mM, the catalyst content in the reaction medium of 1 g/l, and the treatment time of 3600 s, the degradation degree of rhodamine B was 98%, and the rate constant was – $4.1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Keywords: synthesis, ultrasonic field, co-precipitation, nanosized spinel, MgMn_2O_4 , catalyst, activation.

Вступ. Шпінелі – це напівпровідникові матеріали із загальною формулою AB_2O_4 . У кожній ґратці кубічної структури шпінелі міститься 8 молекул AB_2O_4 : 32 йони O^{2-} , 16 йонів B^{3+} і 8 йонів A^{2+} [1]. Йони O^{2-} розміщуються у кубічній щільно упакованій структурі, утворюючи тетраедричні (для катіонів A^{2+}) й октаедричні (для катіонів B^{3+}) вакансії [2]. Розподіл катіонів у шпінелі визначає її властивості – каталітичну й електрохімічну активність, магнетизм тощо [3].

На сьогодні шпінель, яка містить йони Mg^{2+} і Mn^{3+} , використовують як матеріал катода для магнієвих акумуляторів, які є альтернативою літєвим [4]. Це зумовлено високими питомою ємністю ($272 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$) і густиною енергії ($1000 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$) Mg -йонних акумуляторів на основі MgMn_2O_4 [5–9].

Для синтезу нанорозмірних частинок шпінелі MgMn_2O_4 використовують золь-гель метод [10–12], сольвотермальний [13] і співосадження [14]. Властивості (магнетні, каталітичні, структурні) частинок шпінелей залежать від методу і

параметрів синтезу [15]. Перевагами хімічного синтезу шпінелей в ультразвуковому полі (т.зв. сонохімічного) є вузький розподіл за розмірами синтезованих частинок, контрольовані умови синтезу, висока швидкість, економічна ефективність, висока чистота продукту, екологічність та масштабованість [16]. Метод сонохімічного синтезу ґрунтується на виникненні у рідині акустичної кавітації, тобто швидкого формування, росту та колапсу послідовно генерованих бульбашок, що супроводжується локальними стрибками температури і тиску [17].

Нанорозмірну шпінель MgMn_2O_4 з розмірами частинок від 20 до 40 нм синтезували методом співосадження [14]. Її використовували як активатор натрію перйодату під час окиснювальної деградації бісфенолу А. Застосування передового окиснення " $\text{MgMn}_2\text{O}_4/\text{NaIO}_4$ " впродовж 60 min у нейтральному реакційному середовищі за температури 20°C дало змогу досягнути ступеня деградації бісфенолу А (концентрація – 10 μM) 96,17%. При цьому концентрація окисника (натрію перйодату) дорівнювала 1 mM, а вміст каталізатора розкладу окисника (наночастинок MgMn_2O_4) у середовищі – 0,1 g/l. Під "передовим окисненням" розуміють окиснення органічних забруднювачів водних середовищ вторинними окисниками (високореакційноздатними інтермедіатами), які генеруються через активацію (каталітичну або у фізичних полях) первинних окисників. Наприклад, гідроксильні радикали (вторинні окисники), які беруть участь в окиснювальній деградації органічних полютантів, утворюються внаслідок активації водню пероксиду (первинний).

Мета роботи – дослідити структурні характеристики частинок шпінелі MgMn_2O_4 , синтезованих співосадженням в ультразвуковому полі; апробувати нанорозмірну шпінель MgMn_2O_4 як активатор натрію перкарбонату під час окиснювальної деградації ксантенового барвника (родаміну Б).

Матеріали та методика експерименту. Наночастинки шпінелі MgMn_2O_4 синтезували співосадженням в ультразвуковому полі. При цьому потужність ультразвукового оброблення реакційного середовища дорівнювала 200 W/l. Для збудження акустичних коливань ультразвукового діапазону з частотою 20 kHz використовували магнетострикційний випромінювач (Bandelin Sonopuls HD 2200.2).

Прекурсори $(\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ і $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) за їх мольного співвідношення 1:2 розчиняли за постійного перемішування у 300 ml дистильованої води. Додавали осаджувальний агент (водний розчин NaOH з мольною концентрацією 2 M) краплями до попередньо нагрітого до температури 75°C на водяній бані розчину за стаціонарного генерування ультразвукових коливань до досягнення pH=9. Потім утворену суспензію, дисперсна фаза якої складалась з частинок світло-коричневого кольору, перемішували впродовж 2 h. Температуру суспензії підтримували на рівні 75°C для забезпечення повної кристалізації і росту наночастинок. Ефективного вилучення домішок досягали трикратним промиванням синтезованого продукту дейонізованою водою й етанолом. Сепарували дисперсну фазу центрифугуванням (тривалість – 5 min; частота – 5000 rpm). Далі її сушили (температура сушіння – 60°C; тривалість – 12 h) і піддавали кальцинації впродовж 5 h в атмосфері повітря за температури 200°C. Швидкість нагрівання твердої фази – 5°C/min.

Для досліджень фазового складу, середнього розміру кристалітів і параметрів кристалічної ґратки продукту сонохімічного синтезу застосовували метод рентгенівської дифракції (XRD; дифрактометр AERIS Research з CuK_α -випромінюванням). Обчислювали середній розмір кристалітів за рівнянням Дебая–Шеррера [15]. Сканівну електронну мікроскопію (SEM; мікроскоп ZEISS EVO 40XVP) використовували для визначення форми та оцінювання розміру частинок синтезованого продукту, інфрачервону спектроскопію з Фур'є-перетворенням (FTIR; спектрометр Spectrum Two) – для ідентифікації функціональних груп.

Нанорозмірні частинки шпінелі MgMn_2O_4 використали як активатори натрію

перкарбонату ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$) під час окиснювальної деградації ксантенового барвника родаміну Б ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$) в ультразвуковому полі. Сталу температуру (25°C) реакційного середовища в скляному реакторі під час деградації родаміну Б з використанням передового окиснення “ультразвук/ $\text{MgMn}_2\text{O}_4/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ ” підтримували за допомогою термостата CORIO C-BT5. Спочатку реактор заповнювали ($V = 100 \text{ ml}$) водним розчином родаміну Б з концентрацією 200 mg/l . Потім до 100 ml водного розчину барвника за постійного перемішування додавали 100 ml водного розчину натрію перкарбонату. Отже, концентрація родаміну Б у розчині ($V = 200 \text{ ml}$) дорівнювала 100 mg/l ($0,209 \text{ mM}$). Концентрацію водного розчину натрію перкарбонату змінювали у межах від 1 до 5 mM. Стале значення pH реакційного середовища ($\text{pH}=3$) забезпечували додаванням водного розчину хлоридної кислоти з концентрацією 0,1 M. Ініціювали окиснення дозуванням у реакційне середовище нанорозмірної шпінелі MgMn_2O_4 – каталізатора розкладу натрію перкарбонату. Вміст каталізатора варіювали у діапазоні 0,5...1,0 g/l. Як генератор ультразвукових коливань (частота – 22 kHz) під час окиснювальної деградації родаміну Б застосовували випромінювач “Ultrasonic Disintegrator UD-20” магнетострикційного типу.

Результати та їх обговорення. На основі дифрактограми (рис. 1) встановлено, що піки Брега характеризуються кристалічними площинами (101), (112), (200), (103), (211), (004), (220), (204), (105), (312), (303), (321), (224), (400), (206), (305), (413), (422), (404), (217), (415), (433), (521), (327), (440) і (435). Це узгоджується з моделлю шпінелі MgMn_2O_4 з тетрагональною структурою (еталон – JCPDS No. 01-072-1336) [12]. Параметри ґратки: $a = 5,762 (1) \text{ \AA}$; $c = 9,353 (1) \text{ \AA}$. Відсутність на дифрактограмі піків, характерних для домішок, вказувало на високу чистоту кристалів шпінелі MgMn_2O_4 . Середній розмір кристаліта MgMn_2O_4 , який обчислювали за рефлексом (дифракційним максимумом) при $2\theta = 36,13^\circ$, що відповідав площині (211), з використанням рівняння Дебая–Шеррера [15], становив $\sim 24 \text{ nm}$.

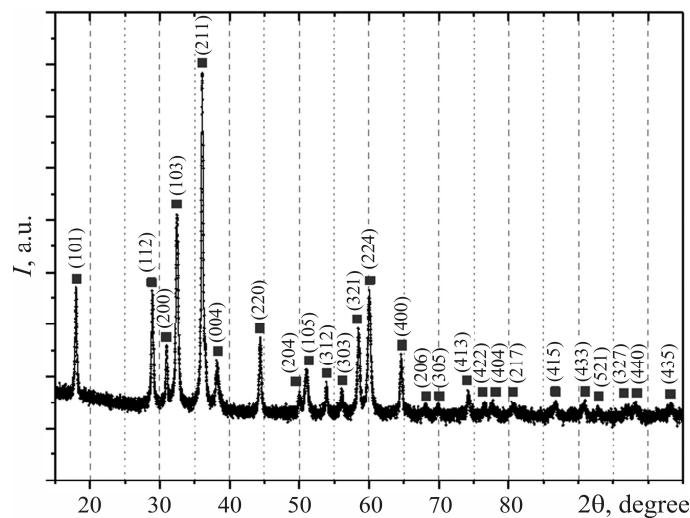


Рис. 1. Дифрактограма частинок нанорозмірної шпінелі MgMn_2O_4 , синтезованих співосадженням в ультразвуковому полі.

Fig. 1. XRD pattern of nanosized MgMn_2O_4 spinel particles, synthesized by co-precipitation method in an ultrasonic field.

Шпінель MgMn_2O_4 формує агрегати (рис. 2а), які складаються з частинок квазісферичної форми з розміром 20...50 nm. Це взаємно узгоджується із результатами розрахунку середнього розміру кристаліта за рівнянням Дебая–Шеррера.

Ця агломерація – наслідок взаємодії між парамагнетними частинками шпінелі MgMn_2O_4 , у якій є Mn зі ступенем окиснення +3. Парамагнетиками є також інші оксиди Mn (Mn_2O_3 , Mn_3O_4), де він також має ступінь окиснення +3.

Ідентифікували функціональні групи хімічних зв'язків частинок нанорозмірної шпінелі MgMn_2O_4 за FTIR-спектром (рис. 2b).

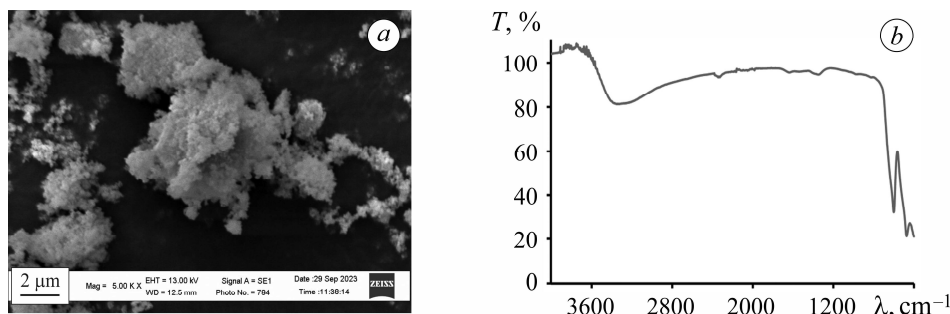


Рис. 2. СЕМ зображення (a) і FTIR-спектр (b) частинок нанорозмірної шпінелі MgMn_2O_4 .

Fig. 2. SEM-image (a) and FTIR spectrum (b) of nanosized MgMn_2O_4 spinel particles.

Відповідність піків функціональним групам хімічних зв'язків у шпінелі MgMn_2O_4 (табл. 1) підтверджує структуру синтезованого співосадження в ультразвуковому полі продукту.

Таблиця 1. Характеристичні смуги на FTIR-спектрі частинок нанорозмірної шпінелі MgMn_2O_4

Хвильове число, cm^{-1}	Функціональна група
3348; 2340; 1635	Гідроксильні групи на поверхні наночастинок та гідроксильні групи адсорбованої води
1350	C–O [12]
600	Mn–O
473	Mg–O

Результатом комбінації різних стратегій активації натрію перкарбонату (частинками нанорозмірної шпінелі MgMn_2O_4 та ультразвуковим випромінюванням) є генерування потужних вторинних окисників – гідроксильних радикалів ($\bullet\text{OH}$) та синглетного кисню ($^1\text{O}_2$) [18]. Ці інтермедіати брали участь у деградації ксантенового барвника родаміну Б.

Застосування передового окиснення “ультразвук/ $\text{MgMn}_2\text{O}_4/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}_2$ ” впродовж 3600 с за початкової концентрації окисника (натрію перкарбонату) у реакційному середовищі 1 mM дало змогу досягнути ступеня деградації x ($x = 100 \cdot (C_0 - C)/C_0$) родаміну Б 81,9% (рис. 3). Збільшення концентрації натрію перкарбонату до 5 mM за однакової тривалості окиснення (3600 s) призводило до зростання ступеня деградації барвника до 98%.

Збільшення вмісту каталізатора (частинок нанорозмірної шпінелі MgMn_2O_4) в реакційному середовищі від 0,5 до 0,75 g/l (рис. 4) зумовило зростання ступеня деградації родаміну Б від 27,8 до 62,7%, відповідно.

Подальше збільшення вмісту частинок нанорозмірної шпінелі MgMn_2O_4 в реакційному середовищі до 1 g/l призводило до закономірного підвищення ступеня деградації родаміну Б до 98% через зростання площі питомої поверхні каталізатора, що збільшувало ефективність гетерогенної активації натрію перкарбонату. Як наслідок, зростала концентрація інтермедіатів (гідроксильних радикалів та синглетного кисню) у середовищі, а отже, і ймовірність їх взаємодії із молекула-

ми барвника. Це й зумовило підвищення ефективності деградації родаміну Б. За концентрації натрію перкарбонату 5 mM і вмісту каталізатора в реакційному середовищі 1 g/l константа швидкості окиснювальної деградації родаміну Б (для реакції псевдопершого порядку) дорівнювала $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

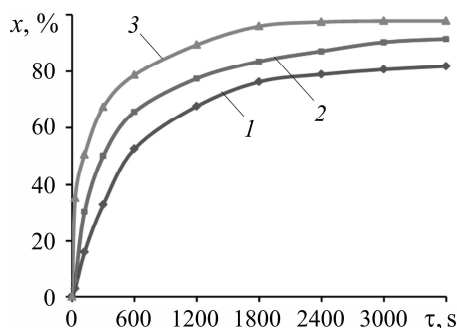


Рис. 3. Fig. 3.

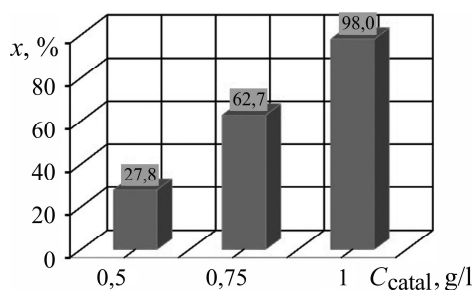


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 3. Вплив концентрації натрію перкарбонату в реакційному середовищі на ступінь деградації родаміну Б (умови: $V = 200 \text{ ml}$; $C_0(\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3) = 0,209 \text{ mM}$; вміст каталізатора 1 g/l; pH=3; температура – 25°C; питома потужність ультразвукового оброблення – 51 W/l): 1 – 1 mM; 2 – 3 mM; 3 – 5 mM.

Fig. 3. Effect of the concentration of sodium percarbonate in the reaction medium on the degradation degree of rhodamine B (conditions: $V = 200 \text{ ml}$; $C_0(\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3) = 0.209 \text{ mM}$; catalyst content of 1 g/l; pH=3; temperature – 25°C; specific power of ultrasonic treatment – 51 W/l): 1 – 1 mM; 2 – 3 mM; 3 – 5 mM.

Рис. 4. Вплив вмісту каталізатора в реакційному середовищі на ступінь деградації родаміну Б (умови: $V = 200 \text{ ml}$; $C_0(\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3) = 0,209 \text{ mM}$; концентрація натрію перкарбонату – 5 mM; pH=3; температура – 25°C; питома потужність ультразвукового оброблення – 51 W/l).

Fig. 4. Effect of the catalyst content in the reaction medium on the degradation degree of rhodamine B (conditions: $V = 200 \text{ ml}$; $C_0(\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3) = 0.209 \text{ mM}$; concentration of sodium percarbonate – 5 mM; pH=3; temperature – 25°C; specific power of ultrasonic treatment – 51 W/l).

Результати досліджень впливу концентрації натрію перкарбонату та каталізатора в реакційному середовищі на ступінь і константу швидкості окиснювальної деградації родаміну Б узагальнено в табл. 2.

Таблиця 2. Ступінь x (%) і константа швидкості k (s^{-1}) окиснювальної деградації родаміну Б

Концентрація натрію перкарбонату, mM	Вміст каталізатора в реакційному середовищі, g/l	$x, \%$	$k \cdot 10^3, \text{s}^{-1}$
1	1,0	81,9	1,3
3	1,0	91,5	2,4
5	1,0	98,0	4,1
5	0,75	62,7	1,7
5	0,50	27,8	0,7

ВИСНОВКИ

Частинки нанорозмірної шпінелі MgMn_2O_4 синтезовано співсадженням в ультразвуковому полі. Основні характеристики продукту синтезу (параметри крис-

талічної ґратки, середній розмір кристаліта, морфологію частинок, функціональні групи) вивчали, використовуючи методи рентгенівської дифракції, сканівної електронної мікроскопії та інфрачервоної спектроскопії з Фур'є-перетворенням. Виявлено, що піки Бреґга на дифрактограмі синтезованого продукту узгоджуються з моделлю шпінелі MgMn_2O_4 з тетрагональною структурою (еталон – JCPDS No. 01–072-1336). Обчислений за рівнянням Дебая–Шеррера середній розмір кристаліта MgMn_2O_4 становив ~ 24 nm. Частинки нанорозмірної шпінелі апробували як активатори натрію перкарбонату під час окиснювальної деградації ксантенового барвника родаміну Б (передове окиснення – ультразвук/ $\text{MgMn}_2\text{O}_4/\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5\text{H}_2\text{O}$). За концентрації натрію перкарбонату 5 mM, вмісту каталізатора в реакційному середовищі 1 g/l і тривалості очищення 3600 s ступінь деградації родаміну Б дорівнював 98%, а константа швидкості – $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Дослідження виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України у межах проєкту наукової роботи молодих вчених “Передові процеси окиснення, зокрема нанокаталітичного, в основі кавітаційних технологій очищення водних середовищ від резистентних N-заміщених органічних сполук” (номер державної реєстрації 0122U000790).

1. Structure and morphology of magnesium ferrite nanoparticles, synthesized via “green” method / T. Tatarchuk, M. Myslin, I. Lapchuk, O. Olkhovyy, N. Danyliuk, and V. Mandzyuk // Phys. Chem. Solid State. – 2021. – **22**, № 2. – P. 195–203. DOI: 10.15330/pcss.22.2.195-203
2. Synthesis, electronic structure, and electrochemical properties of the cubic Mg_2MnO_4 spinel with porous-spongy structure / Zhenyan Wang, He Zhu, Li Ai, Jimin Ding, Pengfei Zhu, Ziqing Li, Bo Li, Hechun Jiang, Fapeng Yu, Xiulan Duan, Huaidong Jiang // Nanomater. – 2021. – **11**. – Article number: 1122. <https://doi.org/10.3390/nano11051122>
3. Spinel manganese ferrites for oxygen electrocatalysis: Effect of Mn valency and occupation site / Y. Zhou, Y. Du, S. Xi, and Z. J. Xu // Electrocatal. – 2018. – **9**. – P. 287–292. <https://doi.org/10.1007/s12678-017-0429-z>
4. Kobayashi H., Yamaguchi K., and Honma I. Rapid room-temperature synthesis of ultrasmall cubic Mg–Mn spinel cathode materials for rechargeable Mg-ion batteries // RSC Adv. – 2019. – **9**. – Article number: 36434. DOI: 10.1039/c9ra08626a
5. Unravelling the surface structure of MgMn_2O_4 cathode materials for rechargeable magnesium-ion battery / Q. D. Truong, M. K. Devaraju, P. D. Tran, Y. Gambe, K. Nayuki, Y. Sasaki, and I. Honma // Chem. Mater. – 2017. – **29**, № 15. – P. 6245–6251. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b01252>
6. Xia H., Luo Z., and Xie J. Nanostructured LiMn_2O_4 and their composites as high-performance cathodes for lithium-ion batteries // Prog. Nat. Sci. Mater. Int. – 2012. – **22**, № 6. – P. 572–584. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2012.11.014>
7. Three-dimensional hollow spheres of the tetragonal-spinel MgMn_2O_4 cathode for high-performance magnesium ion batteries / S. Tao, W. Huang, Y. Li, S. Chen, B. Qian, and L. Song // J. Mater. Chem. A. – 2018. – **6**. – P. 8210–8214. <https://doi.org/10.1039/C8TA02284D>
8. Spinel-type MgMn_2O_4 nanoplates with vanadate coating for a positive electrode of magnesium rechargeable batteries / S. Doi, R. Ise, T. Mandai, Y. Oaki, S. Yagi, and H. Imai // Langmuir. – 2020. – **36**, № 29. – P. 8537–8542. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01298>
9. Bhagwan J., Kumar N., and Sharma Y. Spinel- MgMn_2O_4 nanofibers: An attractive material for high performance aqueous symmetric supercapacitor // J. Energy Storage. – 2022. – **46**. – Article number: 103894. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103894>
10. A novel green synthesis and characterization of tetragonal-spinel MgMn_2O_4 nanoparticles by tragacanth gel and studies of its photocatalytic activity for degradation of reactive blue 21 dye under visible light / F. Moradnia, A. Ramazani, S. T. Fardood, and F. Gouranlou // Mater. Res. Express. – 2019. – **6**, № 7. – Article number: 075057. DOI: 10.1088/2053-1591/ab17bc

11. *Miralles C., Lana-Villarreal T., and Gómez R.* Unraveling the phase transition behavior of MgMn_2O_4 electrodes for their use in rechargeable magnesium batteries // *Mater.* – 2023. – **16**, № 15. – Article number: 5402. <https://doi.org/10.3390/ma16155402>
12. *Synthesis, characterization, and hydrogen storage capacity of MgMn_2O_4 spinel nanostructures* / A. Eslami, S. A. Lachini, M. Shaterian, M. Karami, and M. Enhessari // *Inorg. Chem. Commun.* – 2023. – **154**. – Article number: 110875. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110875>
13. *Yokozaki R., Kobayashi H., and Honma I.* Reductive solvothermal synthesis of MgMn_2O_4 spinel nanoparticles for Mg-ion battery cathodes // *Ceram. Int.* – 2021. – **47**. – P. 10236–10241. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.184>
14. *Periodate activation with stable MgMn_2O_4 spinel for bisphenol A removal: Radical and non-radical pathways* / J. Yu, W. Qiu, X. Lin, Y. Wang, X. Lu, Y. Yu, H. Gu, S. Heng, H. Zhang, and J. Ma // *Chem. Eng. J.* – 2023. – **459**. – Article number: 141574. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141574>
15. *Сухацький Ю. В., Шеніда М. В., Корній С. А.* Сонохімічний синтез наночастинок шпінелі MnFe_2O_4 // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2023. – № 4. – С. 102–107.
16. *Impact of sonochemical synthesis condition on the structural and physical properties of MnFe_2O_4 spinel ferrite nanoparticles* / R. S. Yadav, I. Kuřitka, J. Vilcakova, T. Jamatia, M. Machovsky, D. Skoda, P. Urbánek, M. Masař, M. Urbánek, L. Kalina, and J. Havlica // *Ultrason. Sonochem.* – 2020. – **61**. – Article number: 104839. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104839>
17. *Solvent effect in sonochemical synthesis of metal-alloy nanoparticles for use as electrocatalysts* / C. U. Okoli, K. A. Kuttiyiel, J. Cole, J. McCutchen, H. Tawfik, R. R. Adzic, and D. Mahajan // *Ultrason. Sonochem.* – 2018. – **41**. – P. 427–434. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.049>
18. *Degradation of tetracycline antibiotics by Fe^{2+} -catalyzed percarbonate oxidation* / J. A. I. Pimentel, C.-D. Dong, S. Garcia-Segura, R. R. M. Abarca, C.-W. Chen, and M. D. G. de Luna // *Sci. Total Environ.* – 2021. – **781**. – Article number: 146411. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146411>

Одержано 10.10.2023