

УДК 546.72+546.26-022.532

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-1-5>

**Валентина ЛИТВИН**

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, бульв. Шевченка, 81, м. Черкаси, Україна, 18000

**ORCID:** 0000-0003-1236-6344

**Scopus-Author ID:** 55246724200

**Марина СЕМЕНОВА**

молодший науковий співробітник кафедри хімії та наноматеріалознавства, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, бульв. Шевченка, 81, м. Черкаси, Україна, 18000

**ORCID:** 0000-0002-0485-9715

**Юлія СМЕТЕНКО**

молодший науковий співробітник кафедри хімії та наноматеріалознавства, Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, бульв. Шевченка, 81, м. Черкаси, Україна, 18000

**ORCID:** 0000-0002-2192-7628

**Бібліографічний опис статті:** Литвин, В., Семенова, М., Сметенко, Ю. (2022). Залізо-карбоні наноккомпозити на основі синтетичних гумінових речовин та їх магнітні властивості. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 1, 31–39, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-1-5>

## ЗАЛІЗО-КАРБОНІ НАНОКОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ СИНТЕТИЧНИХ ГУМІНОВИХ РЕЧОВИН ТА ЇХ МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ

Наночастинки металів інкапсульовані в карбоні матрицю становлять значний інтерес у зв'язку з перспективами їх використання при створенні нових матеріалів для техніки та медицини. Важливе значення для промисловості мають метал-карбоні наноккомпозити в складі яких містяться наночастинки перехідних металів. Метою роботи є синтез залізо-карбоні наноккомпозиту з використанням синтетичних гумінових речовин в якості джерела карбону та дослідження властивостей одержаного продукту. Залізо-карбоні наноккомпозит було одержано шляхом піролізу ферум(III) гумату у атмосфері водню  $H_2$ . Використаний в роботі ферум(III) гумат було отримано осадженням з розчину синтетичного натрій гумату йонами  $Fe^{3+}$ . Одержаний FeC-наноккомпозит охарактеризовано методом рентгенівської дифракції, рентгенофлюоресцентного аналізу та скануючої електронної мікроскопії. Встановлено, що отриманий залізо-карбоні наноккомпозит містить металічне залізо з ГЦК та ОЦК ґраткою. Показано, що середній розмір частинок в інтервалі температур піролізу 300–1000 °C змінюється від 9,8 до 52,5 нм. Масова частка нікелю у композиті при підвищенні температури синтезу збільшується від 29 до 41 %. Дослідження магнітних властивостей отриманих наноккомпозитів дозволило встановити, що в області температур менше 320 K вони володіють феромагнетизмом, а в області 320 K зазнають переходу в суперпарамагнітний стан. Важливим результатом дослідження є залежність питомої намагніченості зразків від вмісту заліза та розмірів наночастинок, що забезпечує можливість направленої регулювання магнітних характеристик при зміні параметрів синтезу.

**Ключові слова:** синтетичні гумати, залізо, наноккомпозити, піроліз, аморфний карбон.

**Valentina LITVIN**

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry and Nanomaterial Science, Bohdan Khmelnsky National University, 81 Shevchenko str., Cherkasy, Ukraine, 18000

**ORCID:** 0000-0003-1236-6344

**Scopus-Author ID:** 55246724200

**Marina SEMENOVA**

Junior Research Assistant at the Department of Chemistry and Nanomaterial Science, Bohdan Khmelnsky National University, 81 Shevchenko str., Cherkasy, Ukraine, 18000

**ORCID:** 0000-0002-0485-9715

**Yulia SMETENKO**

Junior Research Assistant at the Department of Chemistry and Nanomaterial Science, Bohdan Khmelnytsky National University, 81 Shevchenko str., Cherkasy, Ukraine, 18000

**ORCID:** 0000-0002-2192-7628

**To cite this article:** Litvin, V., Semenova, M., Smetenko, Yu. (2022). Zalizo-karbonovi nanokompozyty na osnovi syntetychnykh huminovykh rehovyn ta yikh mahnitni vlastyvoli [Iron-carbon nanocomposites based on synthetic humic substances and their magnetic properties]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 31–39, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2022-1-5>

## IRON CARBON NANOCOMPOSITES BASED ON SYNTHETIC HUMIC SUBSTANCES AND THEIR MAGNETIC PROPERTIES

*Metal nanoparticles encapsulated in a carbon matrix are of considerable interest in connection with the prospects for their use in the creation of new materials for technology and medicine. Metal-carbon nanocomposites containing transition metal nanoparticles are of great importance for industry. The aim of the work is the synthesis of an iron-carbon nanocomposite using synthetic humic substances as a source of carbon and studying the properties of the resulting product. The iron-carbon nanocomposite was obtained by ferum(III) humate pyrolysis in an H<sub>2</sub> hydrogen atmosphere. The ferum(III) humate used in the work was obtained by precipitation from a synthetic sodium humate solution by Fe<sup>3+</sup> ions. The resulting FeC nanocomposite is described by X-ray diffraction, X-ray fluorescence analysis, and scanning electron microscopy. It has been established that the resulting iron-carbon nanocomposite contains metallic iron with fcc and bcc lattices. It is shown that the average particle size in the pyrolysis temperature range of 300-1000 °C varies from 9.8 to 52.5 nm. The mass fraction of iron in the composite increases from 29 to 41% with an increase in the synthesis temperature. The study of the magnetic properties of the obtained nanocomposites made it possible to establish that in the temperature range below 320 K they exhibit ferromagnetism, and in the range of 320 K they undergo a transition to the superparamagnetic state. The important result of the study is the dependence of the specific magnetization of the samples on the iron content and nanoparticle sizes, which makes it possible to control the magnetic characteristics when changing the synthesis parameters.*

**Key words:** synthetic humates, iron, nanocomposites, pyrolysis, amorphous carbon.

**Актуальність проблеми.** Магнітні наноконізити, в яких наночастинки металу інкапсульовані в немагнітні матриці (наприклад, карбон), становлять значний науковий і практичний інтерес. Такі матеріали характеризуються унікальними властивостями, зокрема аномальним магнітопором, високою намагніченістю, змінною коерцитивною силою через її залежність від розміру наночастинок, нижчими температурами Кюрі, високою анізотропією тощо (Губин та ін., 2005). Оболонка з карбону часто використовується для покриття магнітних наночастинок, оскільки вона забезпечує біосумісність та хімічну інертність наноконізитів (Цурин та ін., 2014). Можливість регулювання розмірів та структури наночастинок дозволяє отримувати наноконізити із заданими магнітними властивостями. Матеріали з керованими магнітними характеристиками можуть бути використані в системах запису та зберігання інформації, при створенні нових постійних магнітів, в якості контрастних агентів в магнітно-резонансній томографії, в магнітному розділенні олігонуклеотидів, в якості агентів

при адресній доставці лікарів тощо (Herrmann, Grass, 2009). У зв'язку з цим синтез та дослідження властивостей залізо-карбонівих наноконізитів є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Отримання наноструктурованих, чистих метал-карбонівих конізитів із заданими функціональними властивостями, морфологією, складом – складний багатоступінчастий процес. Найпоширенішими способами одержання наночастинок металу на поверхні карбонівой матриці є газофазне осадження (Shen, 2015), піроліз (Чесноков, Буянов, 2005; Salitha, Prasad, 2004), електронно-променева дія (Bruck et al., 2003), золь-гель метод (Defilippi et al., 2019) хімічне відновлення з ультразвуковою стабілізацією (Bagheri et al., 2021), карбонізація (Zaporotskova et al., 2015; Seung et al., 2012; Gu et al., 2020), відновлення в потоці водню (Shen, 2015), метод лазерної абляції (Al-Salih et al., 2021). Однак, як правило, наявні методи отримання або вимагають складного апаратного обладнання і, як наслідок, є дорогими, або кінцеві продукти не структуровані і містять велику кількість домішок.

Значний інтерес становлять процеси, у яких і карбонова основа, і металічні наночастинки формуються в одному процесі. З цією метою можуть бути використані синтетичні гумінові речовини. В науковій літературі є відносно невелика кількість публікацій, в яких використано гумінові речовини в якості джерела Карбону у синтезі металкарбонівих наноконкомпозитів (Litvin, Galagan, 2017; Litvin, Abi Njoh, 2021).

Оскільки синтетичні гумінові речовини характеризуються невпорядкованістю структури, що виражається у відсутності піків на дифрактограмах, можна припустити, що за певних умов проведення процесу карбонова матриця після піролізу зберігатиме аморфну структуру попередника. На нашу думку, дослідження процесів формування металкарбонівих наноконкомпозитів, матриця яких представлена карбоном з високим ступенем невпорядкованості, становить значний науковий інтерес. На противагу традиційним прекурсорам, синтетичні гумінові речовини карбонізуються при піролізі без плавлення зразка з утворенням аморфного карбону високого ступеня чистоти. Будучи типовими органічними кислотами, гумінові речовини (гумінові та фульвокислоти) утворюють нерозчинні солі з перехідними металами (Литвін, 2020), і ця особливість дозволяє приготувати металовмісний прекурсор сталого складу.

**Мета дослідження** полягає у синтезі залізо-карбонівих наноконкомпозитів з використанням синтетичних гумінових речовин в якості джерела карбону та дослідженні властивостей одержаного продукту.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Синтез залізо-карбонівих наноконкомпозитів на основі синтетичних гумінових речовин здійснювали в три етапи. На першій стадії отримували синтетичні гумінові речовини за методикою, описаною в роботі (Litvin, Abi Njoh, 2021). На другій стадії одержували ферум(III) гумат. Для цього 2,0 г синтетичних гумінових речовин у 100 см<sup>3</sup> води, нейтралізували лугом до значення рН = 11. До одержаного розчину додавали 20 см<sup>3</sup> 1 М розчину ферум(III) нітрату. Осад, що випав, промивали декантацією, фільтрували вакуумним способом і висушували при 80 °С у сушильній шафі. На третій стадії проводили піроліз ферум(III)

гумату. При нагріванні порошку ферум(III) гумату на повітрі можна очікувати утворення оксидів металу. При цьому можливе також повне або часткове вигорання Карбону з утворенням CO<sub>2</sub>. Завданням експерименту є максимальне збереження карбону при одночасному відновленні іонів металу до Me<sup>0</sup>. Тому піроліз проводили в атмосфері водню при температурі від 300 °С до 1000 °С. Нагрів печі до робочої температури і її охолодження до кімнатної, також здійснювали при пропусканні водню.

Розклад ферум(III) гумату при нагріванні у атмосфері водню починається при температурі близько 300 °С і супроводжується виділенням рідких та газоподібних продуктів. На рис. 1 наведена залежність зменшення маси зразку від температури при фіксованому часі його витримки (10 хв) при номінальній температурі. З наведеного графіку можна зробити висновок, що видалення летких продуктів розкладу практично завершується в інтервалі температур 900-1000 °С. Вміст феруму при цьому зростає від 18 % у вихідному ферум(III) гуматі до 41 % у кінцевому залізо-карбонівому наноконкомпозиті.

Рентгенодифрактометричний аналіз одержаного залізо-карбонівих наноконкомпозитів здійснювали методом порошку, використовуючи дифрактометр ДРОН-2 у Fe<sub>Kα</sub>-випромінюванні ( $\lambda = 1,93597 \text{ \AA}$ ) в інтервалі кутів  $2\theta$  від 45° до 145°. Зразок для дослідження готували шляхом змішування порошку наноконкомпозитів з водною емульсією полівінілацетату. Отриману суміш наносили на пластину з рентгено-аморфного матеріалу з рівною поверхнею та висушували при кімнатній температурі. Дифрактограми знімали з кроком  $\Delta(2\theta) = 0,1^\circ$  і експозицією  $0,10^\circ \text{ хв}^{-1}$ .

Типова рентгеновська дифрактограма одержаного залізо-карбонівих наноконкомпозитів (рис. 2) характеризується наявністю системи рефлексів як ГЦК, так і ОЦК ґратки заліза. Розміри наночастинок заліза, розраховані за розширенням ліній на рентгеновських дифрактограмах, зростають зі збільшенням температури синтезу (табл. 1).

Спектри рентгенофлюоресцентного аналізу знімали на приладі виробництва НВО «Спектроскан» з енергодисперсійним детектором. Для візуалізації спектру використовувалось програмне забезпечення Elvax.

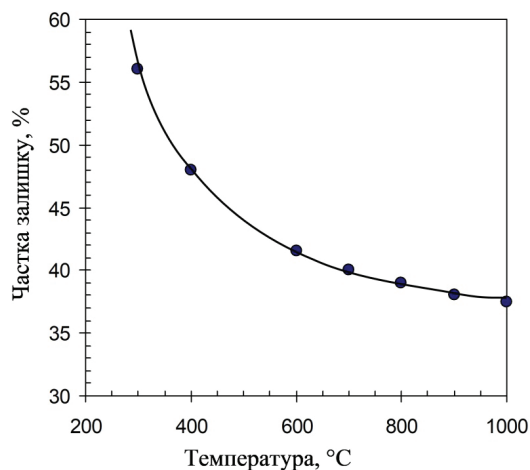


Рис. 1. Залежність втрати маси ферум(III) гумату від температури синтезу

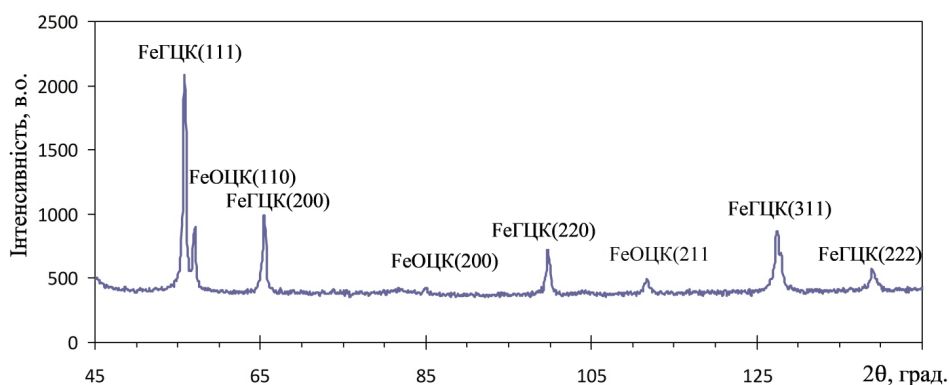


Рис. 2. Рентгенівська дифрактограма залізо-карбонowego нанокomпозиту

Таблиця 1

**Розміри наночастинок заліза у нанокomпозитах, синтезованих при різних температурах**

	Температура синтезу, $t$ °C	w(Fe), %	w(C), %	Розмір, нм
Зразок 1	300	29,3	70,7	9,8
Зразок 2	400	32,1	67,9	10,4
Зразок 3	600	35,2	64,8	19,1
Зразок 4	700	37,6	62,4	24,5
Зразок 5	800	39,8	60,2	31,4
Зразок 6	900	40,5	59,5	38,3
Зразок 7	1000	41	59	52,5

Дані рентгено-флуоресцентної спектроскопії підтверджують наявність у складі нанокomпозиту атомів феруму (рис. 3, а).

Отримані залізо-карбоніві нанокomпозити також досліджували за допомогою скануючої електронної мікроскопії. Результати електронно-мікроскопічного дослідження представ-

лено на рис. 3, б. Можна побачити, що наночастинки заліза знаходяться в карбонівій матриці.

Вивчення магнітних властивостей залізо-карбонівих нанокomпозитів проводили на магнітометрі SQUID MPMS-XL-7 EC. Вимірювання проводили в температурному інтервалі 5-320 К та магнітних полях 1,5 Тл.

Дослідження характеристик намагніченості залізо-карбонівих наноконкомпозитів, одержаних з використанням синтетичних гумінових речовин як джерела карбону, показало залежність намагніченості від напруженості зовнішнього джерела поля ( $I$ ) та температури ( $T$ ). При температурі 5 К крива намагніченості ( $M$ ) зразку 1 як функція напруженості магнітного поля виявила ефект гістерезису (рис. 4). Варто зазначити, що зі збільшенням напруженості магнітного поля в інтервалі від 0 до 10000 А/м питома намагніченість FeC наноконкомпозиту збільшувалась (рис. 4), досягаючи намагніченості насичення –  $9,8 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ . Усунення зовнішнього джерела приводило до того, що досліджуваний наноконкомпозит зберігав залишкову намагніченість ( $3,6 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ ), для усунення якої необхідна напруженість поля для розмагнічення  $H_c$  (коерцитивна сила) 260 Е. Подібна залежність намагніченості характерна для феромагнітних матеріалів і обумовлена, як відомо (Губин, Кокшаров, Хомутов, Юрков, 2005), їх доменною структурою: зміщенням та збільшенням меж доменів з повним вибудовуванням магнітних моментів по полю в міру збільшення напруженості зовнішнього поля. Феромагнетизм досліджуваного наноконкомпозиту є результатом впорядкованого розміщення, і колективних взаємодій частинок в наноконкомпозиті.

Підвищення температури в інтервалі 5-320 К супроводжувалось зниженням питомої намагніченості від  $9,8$  до  $7,8 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$  та коерцитивної сили від 260 до 0 Е. При  $T > 320 \text{ K}$  петлі гістерезису практично відсутні

і залежність намагніченості зразків від напруженості зовнішнього магнітного поля має вигляд (рис. 5), характерний для суперпарамагнетика (Губин та ін., 2005). Така поведінка є загальною властивістю магнітних матеріалів, пов'язана з перебудовою магнітної фази та зміною порядку в розміщенні магнітних моментів при підвищенні температури (Мишин Д.Д., 1991). Особливістю магнетизму досліджуваних залізо-карбонівих наноконкомпозитів, порівняно з масивним та нанорозмірним залізом є температура переходу ( $T = 320 \text{ K}$ ) із феромагнітного в суперпарамагнітний стан, так для заліза в цій області температур спостерігається гістерезис намагніченості та високе значення  $H_c$  (Носкова, Мулюков, 2003).

З ростом вмісту заліза від 29,3 до 41 % величина питомої намагніченості зменшується від  $7,8$  до  $3,7 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$  (рис. 6).

Подібна зміна магнітних властивостей може бути пов'язана як зі зміною розміру частинок в наноконкомпозитах (від  $9,8$  до  $52,5 \text{ nm}$ ), так і з можливістю посилення міжчастинкових взаємодій зі збільшенням вмісту заліза (Суздаєв, 2005).

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Розроблено методику синтезу залізо-карбонівих наноконкомпозитів з використанням синтетичних гумінових речовин як джерела карбону. В основі методики лежить піроліз ферум(III) гумату у відновлюючій водневій атмосфері. За цих умов формується карбонова матриця з дуже низьким ступенем впорядкованості, про що свідчать результати рентгено-

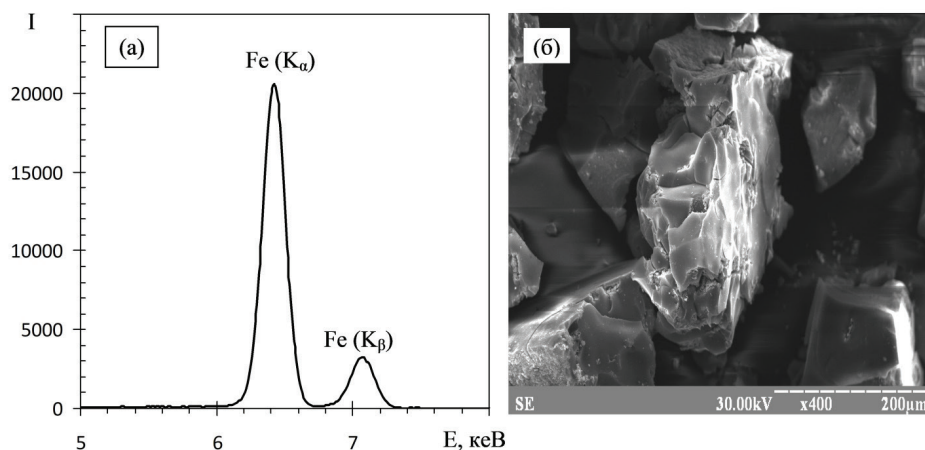


Рис. 3. Рентгенофлуоресцентний спектр (а) та СЕМ-зображення (б) залізо-карбонівих наноконкомпозитів

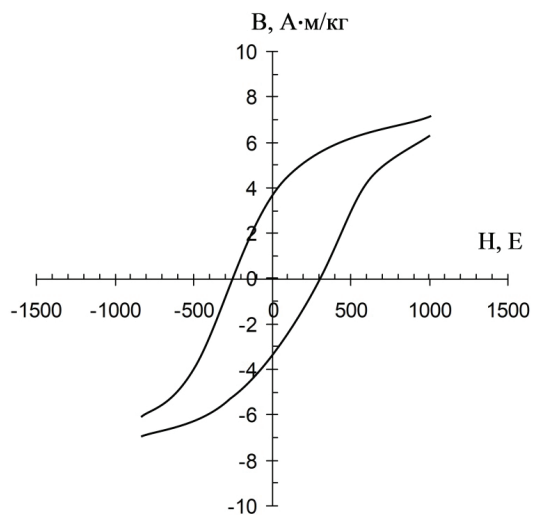


Рис. 4. Петля гістерезису FeS нанокompозиту при температурі 5К

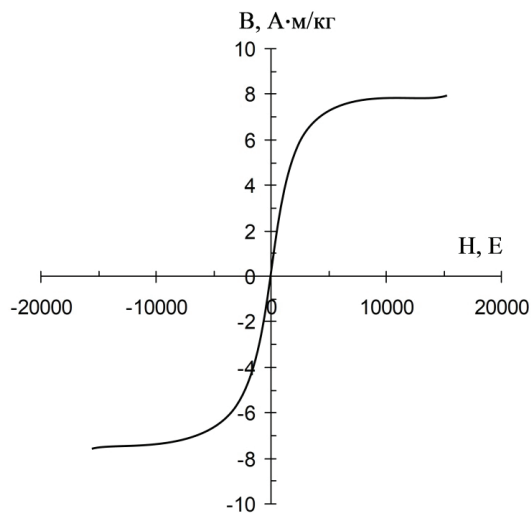


Рис. 5. Залежність намагніченості FeS нанокompозиту від зовнішнього поля ( $T=320K$ )

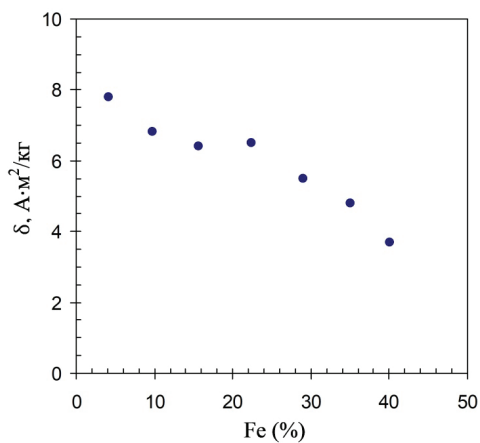


Рис. 6. Залежність намагніченості від вмісту заліза (320 K)

структурного аналізу. Розмір металічних частинок у композиті в інтервалі температур синтезу 300–1000 °C зростає від 9,8 до 52,5 нм.

Встановлено, що наноккомпозити заліза в області температур менше 320 К володіють ферромагнетизмом, а в області 320 К зазнають

переходу в суперпарамагнітний стан. Важливим результатом дослідження є залежність питомої намагніченості зразків від вмісту заліза та розмірів наночастинок, що забезпечує можливість направленою регулювання магнітних характеристик при зміні параметрів синтезу.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Al-Salih M., Samsudin S., Arshad S.S. Synthesis and characterizations iron oxide carbon nanotubes nanocomposite by laser ablation for anti-microbial applications. *J Genet Eng Biotechnol*. 2021. 18;19(1). P. 76.
2. Bagheri M., Jafari S. M., Eikani M. H. Ultrasonic-assisted production of zero-valent iron-decorated graphene oxide/activated carbon nanocomposites: Chemical transformation and structural evolution. *Materials Science and Engineering: C*. 2021. 118. P. 111362.
3. Bruk M. A., Zhikharev E. N., Grigoriev E. I., Spirin A. V., Kalnov V. A., Kardash I. E. Electron-beam-induced deposition of iron carbon nanostructures from iron dodecacarbonyl vapor. *Micro- and Nanoelectronics*. 2003. 5401. pp. 1–6.
4. Defilippi C., Mukadam M. O. A., Nicolae S. A., Lees M. R., Giordano C. Iron Carbide@Carbon Nanocomposites: A Tool Box of Functional Materials. *Materials*. 2019. 12. 323 p.
5. Fleaca C., Morjan I., Alexandrescu M., Dumitrache F., Soare I., Gavrilă-Florescu L., Le Normand F., Faerber J. Carbon nanostructures from FeC nanocomposites by activated CVD methods. *Phys. Status Solidi C*. 2010. 7 (3–4). pp. 1269–1273.
6. Gu Z., Zhang B., Asakura Y., Tsukuda S., Kato H., Kakihana M., Yin S. Alkali-assisted hydro-thermal preparation of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/rGO nanocomposites with highly enhanced photocatalytic NO<sub>x</sub> removal activity. *Appl. Surf. Sci*. 2020. 521. P. 146213.
7. Herrmann I.K., Grass R.N., Stark W.J. High-strength metal nanomagnets for diagnostics and medicine: carbon shells allow long-term stability and reliable linker chemistry. *Nanomedicine*. 2009. 4(7). P. 787-98.
8. Litvin V.A., Abi Njoh R. Quercetin as a precursor in the synthesis of analogues of fulvicacids and their antibacterial properties. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2021. 2. pp. 56–64
9. Litvin V.A., Abi Njoh R. Copper-carbon nanocomposites based on synthetic humic substances. *J. Chem. Technol*. 2021. 29(1). pp. 19–30.
10. Litvin V.A., Galagan R.L. Synthesis and properties of Co-carbon nanocomposites using synthetic fulvic acids. *Mater. Chem. Phys*. 2017. 201. pp. 207–213.
11. Ruan Z., Ran J., Liu S., Chen Y., Wang X., Shi J., Zhu L., Zhao S., Lin J. Controllable preparation of magnetic carbon nanocomposites by pyrolysis of organometallic precursors, similar molecular structure but very different morphology, composition and properties. *New J. Chem*. 2021. 45. pp. 2044–2052.
12. Sajitha E. P., Prasad S. V. Subramanyam. Synthesis and characteristics of iron nanoparticles in a carbon matrix along with the catalytic graphitization of amorphous carbon. *Carbon*. 2004. 42. pp. 2815–2820.
13. Seung J. L., Jongjin J., Kim M. Synthesis of highly stable graphite-encapsulated metal (Fe, Co and Ni) nanoparticles. *J. Mater. Sci*. 2012. 47. pp. 8112–8117.
14. Shen Y. Carbothermal synthesis of metal-functionalized nanostructures for energy and environmental applications. *J. Mater. Chem. A*. 2015. 3. P. 13114.
15. Zaporotskova I.A., Kozhitov L.V., Anikeev N.A., Davletova O.A., Popkova A.V., Muratov D.G., Yakushko E.V. Metal-carbon nanocomposites based on pyrolysed polyacrylonitrile. *Modern Electronic Materials*. 2015.1(2). pp. 43–49.
16. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства. *Успехи химии*. 2005. 74. 539 с.
17. Литвин В.А. Синтетичні аналоги природних гумінових речовин : монографія. Черкаси: видавець Чабаненко Ю.А., 2020. 230 с.
18. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. Москва : Высшая школа. 1991. 383 с.
19. Носкова Н.И., Мулюков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 279 с.
20. Суздаев И.П. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. Москва : КомКнига. 2005. 589 с.
21. Цурин В.А., Ермаков А.Е., Уймин М.А., Мысик А.А., Щеголева Н.Н., Гавико В.С., Майков В.В. Синтез, структура и магнитные свойства наночастиц железа и никеля, капсулированных в углерод. *Физика твердого тела*. 2014. 56(2). С. 287–300.

22. Чесноков В. В., Буянов Р. А. Особенности механизма образования углеродных нанонитей с различной кристаллографической структурой из углеводородов на катализаторах содержащих металлы подгруппы железа. *Кристаллические технологии. Мембраны*. 2005. 4(28). С. 75–79.

#### REFERENCES:

1. Al-Salih, M., Samsudin, S., Arshad, S.S. (2021). Synthesis and characterizations iron oxide carbon nanotubes nanocomposite by laser ablation for anti-microbial applications. *J Genet Eng Biotechnol.*, 18;19(1), 76 [in English].
2. Bagheri, M., Jafari, S. M., Eikani, M. H. (2021) Ultrasonic-assisted production of zero-valent iron-decorated graphene oxide/activated carbon nanocomposites: Chemical transformation and structural evolution. *Materials Science and Engineering: C*, 118, 111362 [in English].
3. Bruk, M. A., Zhikharev, E. N., Grigoriev, E. I., Spirin, A. V., Kalnov, V. A., Kardash, I. E. (2003). Electron-beam-induced deposition of iron carbon nanostructures from iron dodecacarbonyl vapor. *Micro- and Nanoelectronics*, 5401, 1–6 [in English].
4. Defilippi, C., Mukadam, M. O. A., Nicolae, S. A., Lees, M. R., Giordano, C. (2019). Iron Carbide@Carbon Nanocomposites: A Tool Box of Functional Materials. *Materials*, 12, 323 [in English].
5. Fleaca, C., Morjan, I., Alexandrescu, M., Dumitrache, F., Soare, I., Gavrilă-Florescu, L., Le, Normand, F., Faerber, J. (2010). Carbon nanostructures from FeC nanocomposites by activated CVD methods. *Phys. Status Solidi C*, 7 (3–4), 1269–1273 [in English].
6. Gu, Z., Zhang, B., Asakura, Y., Tsukuda, S., Kato, H., Kakihana, M., Yin, S. (2020). Alkali-assisted hydro-thermal preparation of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/rGO nanocomposites with highly enhanced photocatalytic NO<sub>x</sub> removal activity. *Appl. Surf. Sci.*, 521, 146213 [in English].
7. Herrmann, I.K., Grass, R.N., Stark, W.J. (2009). High-strength metal nanomagnets for diagnostics and medicine: carbon shells allow long-term stability and reliable linker chemistry. *Nanomedicine*, 4(7), 787–98 [in English].
8. Litvin, V.A., Abi Njoh, R. (2021). Quercetin as a precursor in the synthesis of analogues of fulvic acids and their antibacterial properties. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2, 56–64 [in English].
9. Litvin, V.A., Abi Njoh, R. (2021). Copper-carbon nanocomposites based on synthetic humic substances. *J. Chem. Technol.*, 29(1), 19–30 [in English].
10. Litvin, V.A., Galagan, R.L. (2017). Synthesis and properties of Co-carbon nanocomposites using synthetic fulvic acids. *Mater. Chem. Phys.*, 201, 207–213 [in English].
11. Ruan, Z., Ran, J., Liu, S., Chen, Y., Wang, X., Shi, J., Zhu, L., Zhao, S., Lin, J. (2021). Controllable preparation of magnetic carbon nanocomposites by pyrolysis of organometallic precursors, similar molecular structure but very different morphology, composition and properties. *New J. Chem.*, 45, 2044–2052 [in English].
12. Sajitha, E. P., Prasad, S. V. (2004). Subramanyam. Synthesis and characteristics of iron nanoparticles in a carbon matrix along with the catalytic graphitization of amorphous carbon. *Carbon*, 42, 2815–2820 [in English].
13. Seung, J. L., Jongjin, J., Kim, M. (2012). Synthesis of highly stable graphite-encapsulated metal (Fe, Co and Ni) nanoparticles. *J. Mater. Sci.*, 47, 8112–8117 [in English].
14. Shen Y. (2015). Carbothermal synthesis of metal-functionalized nanostructures for energy and environmental applications. *J. Mater. Chem. A*, 3, 13114 [in English].
15. Zaporotskova, I.A., Kozhitov, L.V., Anikeev, N.A., Davletova, O.A., Popkova, A.V., Muratov, D.G., Yakushko, E.V. (2015). Metal-carbon nanocomposites based on pyrolysed polyacrylonitrile. *Modern Electronic Materials*, 1(2), 43–49 [in English].
16. Gubin, S.P., Koksharov, Yu.A., Khomutov, G.B., Yurkov, G.Yu. (2005). Magnitnye nanochastitsy: metody polucheniya, stroeniye i svoystva [Magnetic nanoparticles: production methods, structure and properties]. *Uspekhi khimii*, 74, 539 [in Russian].
17. Litvin, V.A. (2020). *Syntetychni analohy pryrodnykh huminovykh rehovyn [Synthetic analogues of natural humic rehovins]*. Cherkasy [in Ukrainian].
18. Mishin, D.D. (1991). *Magnitnye materialy [Magnetic materials]*. Moscow [in Russian].
19. Noskova, N.I., Mulyukov, R.R. (2003) *Submikrokristallicheskiye i nanokristallicheskiye metally i splavy [Submicrocrystalline and nanocrystalline metals and alloys]*. Ekaterinburg [in Russian].
20. Suzdalev, I.P. (2005). *Fiziko-khimiya nanoklasterov, nanostruktur i naiomaterialov [Physical chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials]*. Moscow [in Russian].
21. Tsurin, V.A., Ermakov, A.E., Uimin, M.A., Mysik, A.A., Shchegoleva, N.N., Gaviko, V.S., Maikov, V.V. (2014). Sintez, struktura i magnitnye svoystva nanochastits zheleza i nikelya, kapsulirovannykh v uglevod [Synthesis, structure and magnetic properties of iron and nickel nanoparticles encapsulated in carbon]. *Fizika tverdogo tela*, 56(2), 287–300 [in Russian].



22. Chesnokov, V.V., Buyanov, R.A. (2005). Osobennosti mekhanizma obrazovaniya uglerodnykh nanonitey s razlichnoy kristallograficheskoy strukturoy iz uglevodorodov na katalizatorakh sodержashchikh metally podgruppy zheleza [Features of the mechanism of formation of carbon nanowires with different crystallographic structure from hydrocarbons on catalysts containing metals of the iron subgroup]. *Kriticheskiye tekhnologii. Membrany*, 4(28), 75–79 [in Russian].