

УДК 546.56+546.47+546.72:543.4:543.42

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-10>

В'ячеслав ЧОБОТАР

аспірант кафедри аналітичної і біоорганічної хімії та якості води, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041

ORCID: 0000-0003-2604-2121

Володимир КОПЛЕВИЧ

доктор хімічних наук, професор, професор кафедри аналітичної і біоорганічної хімії та якості води, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041

ORCID: 0000-0001-7987-1084

Бібліографічний опис статті: Чоботар, В., Копілевич, В. (2025). Хіміко-аналітичне дослідження комплексоутворення наночастинок Cu, Zn, Fe з карбамідом. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 75–83, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-10>

ХІМІКО-АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСОУТВОРЕННЯ НАНОЧАСТИНОК Cu, Zn, Fe З КАРБАМІДОМ

У роботі представлено результати комплексного хіміко-аналітичного дослідження процесів комплексоутворення наночастинок міді (Cu), цинку (Zn) та заліза (Fe) з карбамідом у водному середовищі. Актуальність теми зумовлена необхідністю стабілізації наночастинок перехідних металів для подальшого застосування в агрохімії, біомедицині та екотехнологіях. Зважаючи на їх високу реактивність, здатність до комплексоутворення та відносно низьку токсичність у наночастинці, Cu-, Zn- та Fe-наночастинки демонструють значний потенціал для створення новітніх функціональних матеріалів.

Основною метою дослідження було з'ясування структурних і координаційних особливостей взаємодії наночастинок з карбамідом як лігандом і стабілізатором. Синтезовані наночастинки досліджували методами спектрофотометрії, трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ), FTIR-спектроскопії та рентгеноструктурного аналізу (XRD). Було встановлено, що співвідношення метал/ліганд 3:1 є оптимальним для ефективного комплексоутворення. За результатами ТЕМ спостерігалася значна зміна морфології частинок після стабілізації – утворення кластерів з ореолом органічної природи.

FTIR-спектроскопія підтвердила утворення координаційних зв'язків Cu–O, Zn–N, Fe–O з функціональними групами карбаміду. Найбільш виражене комплексоутворення встановлено для Cu, що супроводжувалося структурними змінами в нижньочастотному діапазоні спектра. Рентгенофазовий аналіз виявив збереження кристалічної структури основної фази металів, а також наявність оксидних домішок (Cu₂O, Fe₃O₄), що свідчить про часткове окиснення. Ширина піків XRD вказує на нанорозмірність отриманих структур.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що хімічна природа металу істотно впливає на ефективність та стабільність комплексоутворення з карбамідом. Представлені дані можуть бути використані для подальшої розробки наноструктурованих матеріалів з заданими функціональними властивостями.

Ключові слова: наночастинки металів, карбамід, комплексоутворення, FTIR-спектроскопія, рентгеноструктурний аналіз.

Viacheslav CHOBOTAR

Postgraduate Student at the Department of Analytical and Bioinorganic Chemistry and Water Quality, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroyiv Oborony str., Kyiv, Ukraine, 03041

ORCID: 0000-0003-2604-2121

Volodymyr KOPILEVICH

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at the Department of Analytical and Bioinorganic Chemistry and Water Quality, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroyiv Oborony str., Kyiv, Ukraine, 03041

ORCID: 0000-0001-7987-1084

To cite this article: Chobotar, V., Kopilevich, V. (2024). Khimiko-analitychne doslidzhennia kompleksoutvorennia nanochastynok Cu, Zn, Fe z karbamidom [Chemical and analytical study of complex formation of Cu, Zn, Fe nanoparticles with carbamide]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 75–83, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-10>

CHEMICAL AND ANALYTICAL STUDY OF THE COMPLEX FORMATION OF Cu, Zn, AND Fe NANOPARTICLES WITH CARBAMIDE

This paper presents the results of a comprehensive chemical and analytical study of the complexation processes of copper (Cu), zinc (Zn), and iron (Fe) nanoparticles with urea in an aqueous medium. The relevance of the topic is due to the need to stabilize the nanoforms of transition metals for further use in agrochemistry, biomedicine, and environmental technologies. Due to their high reactivity, complexation ability, and relatively low toxicity in the nanoform, Cu-, Zn-, and Fe-nanoparticles show great potential for the creation of new functional materials.

The main objective of the study was to elucidate the structural and coordination features of the interaction of nanoparticles with urea as a ligand and stabilizer. The synthesized nanoparticles were studied by spectrophotometry, transmission electron microscopy (TEM), FTIR spectroscopy, and X-ray diffraction (XRD). It was found that a metal/ligand ratio of 3:1 is optimal for effective complex formation. TEM results showed a significant change in particle morphology after stabilization – the formation of clusters with an organic halo.

FTIR spectroscopy confirmed the formation of Cu–O, Zn–N, and Fe–O coordination bonds with functional groups of urea. The most pronounced complex formation was found for Cu, accompanied by structural changes in the low-frequency range of the spectrum. X-ray phase analysis revealed the preservation of the crystalline structure of the main phase of metals, as well as the presence of oxide impurities (Cu₂O, Fe₃O₄), indicating partial oxidation. The width of the XRD peaks indicates the nanoscale of the obtained structures.

The results obtained allow us to conclude that the chemical nature of the metal significantly affects the efficiency and stability of complex formation with urea. The presented data can be used for further development of nanostructured materials with specified functional properties.

Key words: metal nanoparticles, urea, complex formation, FTIR spectroscopy, X-ray structural analysis.

Актуальність проблеми. Стрімкий розвиток нанотехнологій актуалізував дослідження щодо використання наночастинок перехідних металів (Cu, Zn, Fe) у біологічних, медичних і агропромислових застосуваннях, зокрема як компонентів для позакореневого внесення в рослинництві. Висока площа поверхні, реактивність і здатність до комплексоутворення з біоактивними сполуками забезпечують їм значний потенціал як нанодобрив, переносників активних речовин і сенсорів.

Особливої наукової уваги заслуговує вивчення механізмів взаємодії наночастинок металів з низькомолекулярними лігандами, такими як карбамід, що може виконувати функцію стабілізатора, ліганду або транспортної молекули. Суттєвою перевагою наноформ металів є їх знижена токсичність порівняно з традиційними солями, що розширює можливості їх використання в живих системах. Проте недостатня стабільність наночастинок у водних середовищах обмежує їх практичну ефективність, що обумовлює необхідність розробки ефективних методів стабілізації.

У цьому контексті актуальним є хіміко-аналітичне дослідження комплексоутворення

наночастинок Cu, Zn та Fe з карбамідом як потенційним стабілізатором та лігандом. Аналіз комплексів із застосуванням спектрофотометричних, електронномікроскопічних, ІЧ-спектроскопічних та рентгеноструктурних методів дозволяє не лише глибше зрозуміти природу взаємодій, але й оптимізувати умови для збереження наноструктурованого стану матеріалів, що є критично важливим для забезпечення їх стабільності та функціональності в агрохімії, фармації та біотехнологіях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інноваційні розробки у сфері нанотехнологій значно активізували дослідження щодо позакореневого застосування інженерних наночастинок (НЧ) як нанодобрив, наносенсорів та нанотранспортерів у різних галузях агропромислового комплексу. Високе співвідношення поверхні до об'єму, середній розмір частинок менше ніж 100 нм та підвищена реактивність обумовлюють їхню ефективність у низці технологічних процесів (Shahrekiad, 2015, с. 118; Yu, 2017, с. 11272; Kolencik, 2020, с. 1619; Jurkow, 2020, с. 290). Завдяки своїй каталізаторній активності (Wu, 2020, с. 114117) і здатності до функціоналізації різними активними групами,

наночастинки мають підвищену біодоступність і краще поглинаються клітинами (El Amerany, 2020, с. 6–10).

Разом із тим токсичність традиційних сполук перехідних металів обмежувала їхнє широке застосування в біологічних системах. Водночас наноформи цих металів, зокрема міді, цинку та заліза, є істотно менш токсичними. Згідно з дослідженнями, наноформи міді виявилися в 7 разів, цинку – у 30 разів, а заліза – у 40 разів менш токсичними, ніж відповідні сульфатні солі (Борисевич, 2009, с. 121).

Із розвитком нанотехнологій було відкрито нові перспективи застосування перехідних металів у біології, ветеринарії та медицині (Борисевич, 2009, с. 85). Методи синтезу наночастинок поділяють на три основні підходи: формування частинок через об'єднання атомів або молекул; механічне диспергування твердих тіл до нанорозмірів; а також комбіновані методи, які поєднують обидва підходи.

Хімічні методи синтезу характеризуються як перевагами, так і недоліками, проте саме методи, засновані на випаровуванні з твердого тіла з наступною конденсацією, мають потенціал для масштабного виробництва наноматеріалів завдяки можливості контролю розміру та морфології частинок (Косінов, 2008, с. 2–5).

З хімічної точки зору, механізми формування наночастинок у водному середовищі зазвичай складніші порівняно з неводними системами через домінування реакції подвійного заміщення з утворенням осадів нанорозмірних частинок. Зростання таких частинок, як правило, одразу припиняється завдяки дії стабілізуючих агентів. Саме тому підбір стабілізаторів для використання НЧ в рослинництві для позакореневого нанесення є актуальним.

Мета дослідження

Встановити особливості комплексоутворення наночастинок міді (Cu), цинку (Zn) та заліза (Fe) з карбамідом у водному середовищі на основі хіміко-аналітичних методів дослідження з метою оптимізації умов їх стабілізації та оцінки впливу на фізико-хімічні властивості наноструктур.

Завдання дослідження

1. Синтезувати наночастинки Cu, Zn та Fe у водному середовищі та провести їх попередню характеристику методами електронної мікроскопії.

2. Визначити умови утворення комплексів наночастинок з карбамідом і дослідити ефективно співвідношення метал/ліганд за спектрофотометричними даними.

3. Провести порівняльний аналіз структурних змін наночастинок до та після стабілізації з використанням FTIR-спектроскопії та XRD-аналізу.

4. З'ясувати вплив хімічної природи металу на ступінь комплексоутворення та стабільність наночастинок у присутності карбаміду.

5. Оцінити можливості практичного застосування стабілізованих наночастинок у агрохімічних або біомедичних технологіях.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У межах дослідження було проведено комплекс хіміко-аналітичних експериментів, спрямованих на встановлення структурних та координаційних особливостей комплексоутворення наночастинок міді, цинку та заліза з карбамідом у водному середовищі. Об'єктами дослідження були золі наночастинок Cu, Zn та Fe з концентрацією 0,01 М, у водному розчині. На першому етапі наночастинки у воді були осажені на центрифугі та видалено надлишкову вологу при 50–60 °С для подальшого їх дослідження методами. Аналітичні дослідження отриманих водних дисперсій та самих частинок Cu і Zn дають уявлення про їх структуру та властивості. Для дослідження структури зразків нанорозчинів. Об'єктами дослідження були золі наночастинок Cu, Zn та Fe з концентрацією 0,01 М, у водному розчині.

На першому етапі наночастинки у воді були осажені на центрифугі та видалено надлишкову вологу при 50–60 °С для подальшого їх дослідження методами. Аналітичні дослідження отриманих водних дисперсій та самих частинок Cu і Zn дають уявлення про їх структуру та властивості. Для дослідження структури зразків нанорозчинів виготовлялися препарати, аналіз яких проводили в трансмісійному TEM 1230 (Jeol, Tokyo, Japan) електронному мікроскопі.

Наступним етапом було проведення серії симбатних розведень для вивчення комплексоутворення з карбамідом. Вимірювання проводили на спектрофотометрі при довжині хвилі для Cu 585 нм, для заліза нм. Дослідження проводили на спектрофотометрі SF Optizen Pop, Daejeon, Republic of Korea.

Після дослідження комплексоутворення була проведена трансмісійна електронна мікроскопія

(ТЕМ) на електронному мікроскопі 1230 (Jeol, Tokyo, Japan). Було зроблено знімки наночастинок з лінійкою 50 та 100 нм.

Розчини наночастинок металів були відділені на центрифугі. Отримані осад досліджували методами ІЧ спектроскопії та рентгенівської спектроскопії.

Результати проведених досліджень

Особливістю наночастинок є їх окислення, особливо при диспергуванні у водному розчині. Саме тому, на першому етапі нами було проведено мікроскопію наночастинок Купруму, Цинку та Феруму. Дані наведені на рис. 1.

Частинки мають неправильну форму та сильно агломеровані – це типово для наночастинок, особливо при синтезі у водному середовищі без стабілізатора. Спостерігаються окремі сфероподібні наночастинки. Розмір окремих частинок – у межах 20–80 нм. Спостерігаються різні зони контрастності: темніші ділянки можуть вказувати на агломерати, тоді як світліші – на менші або частково аморфні фрагменти.

Для розуміння взаємодії наночастинок з карбамідом було проведено комплексоутворення та також оцінено ефективне співвідношення

метал/ліганд. Оскільки цинк у розчині має білий колір на спектрофотометрі сполуки дослідити важко. Саме тому для цього нами було вибрано наночастинки Cu як модельні для таких взаємодій. Дані спектрів симбатних серій наведено на рис. 2.

Отже, при дослідженні оптичної густини комплексних сполук наночастинок з карбамідом найбільш доцільними є співвідношення метал/ліганд 1/5 та 3/1. Саме співвідношення 3/1 ми застосували для стабілізації наночастинок та їх подальших досліджень.

Після стабілізації було проведено мікроскопію отриманих зразків та порівняння їх з вихідними наночастинками без стабілізації. Дані наведені на рис. 2.

Зі знімків ТЕМ видно, що спостерігається пухка агрегація – наночастинки не злиті, але згруповані в кластери. Частинки оточені світлішим ореолом, що вказує на наявність органічної стабілізуючої оболонки – у даному випадку карбаміду (сечовини). Видимі міжчастинкові порожнини, що характерно для пористих структур або слабкої агломерації.

Наступним етапом було вимірювання FTIR спектрів осаджених наночастинок для оцінки їх структури. Дані наведені на рис. 4

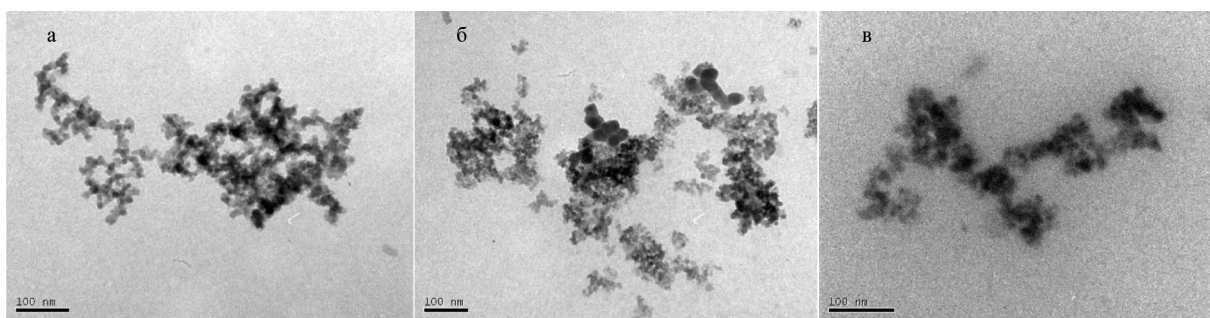


Рис. 1. Наночастинки Cu (а), Zn (б) та Fe (в)

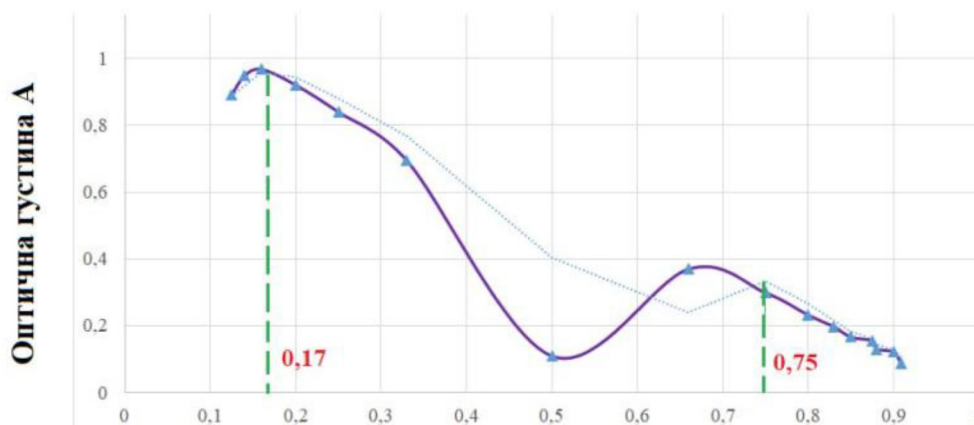


Рис. 2. Оптична густина симбатних серій Cu/0,1 М розчин карбаміду

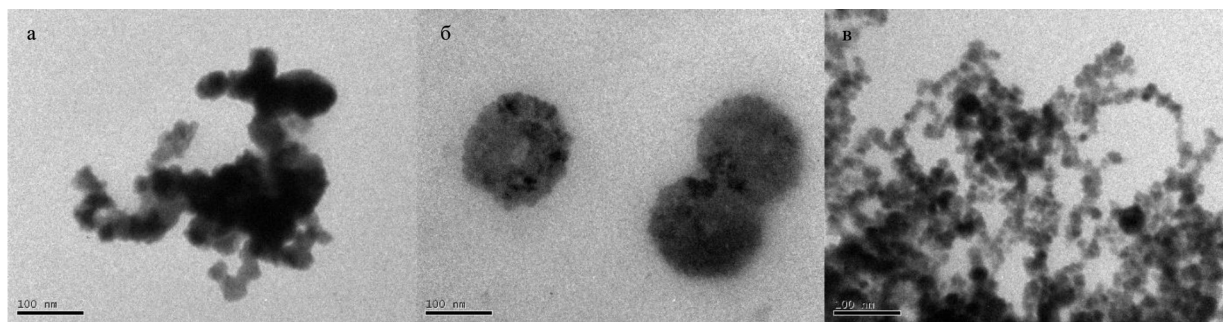


Рис. 3. Стабілізовані наночастинки Cu (а), Zn (б) та Fe (в)

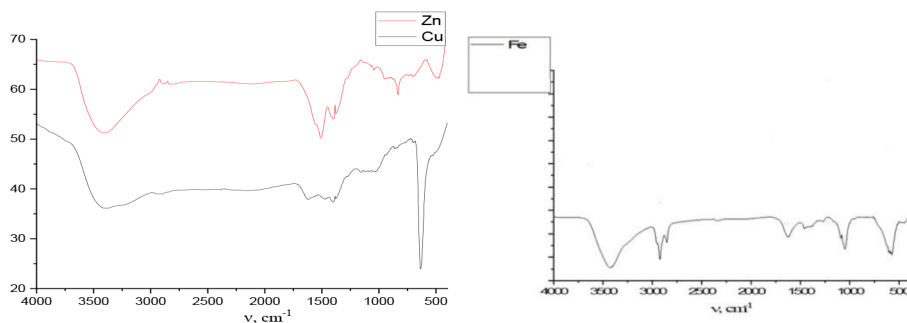


Рис. 4. FTIR спектри наночастинок металів

По FTIR спектру не стабілізованих наночастинок металів можна зробити наступні висновки:

- $\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$ – широка смуга, спільна для всіх зразків, характерна для О—Н коливань (гідроксильні групи або волога), що часто присутня на поверхні наночастинок.
- $\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ – можлива поява деформаційного коливання Н—О—Н

У наночастинок цинку на графіку при $500\text{--}600 \text{ cm}^{-1}$ видно типовий діапазон для Zn—О зв'язків, що підтверджує присутність ZnO-фази.

Для Cu видно менш виражені О—Н або H_2O смуги, що свідчить про іншу природу поверхні або кращу дегідратацію.

Характерні для Fe—О коливань (метал-кисень):

- $\sim 580\text{--}560 \text{ cm}^{-1}$ – типовий пік Fe—О в $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ або Fe_3O_4
- $\sim 690\text{--}750 \text{ cm}^{-1}$ – можливі зміщення, якщо присутні домішки або часткове окиснення

Для порівняння ми проводили вимірювання FTIR спектрів на зразках, стабілізованих у 0,1 М розчині карбаміду. Це дало нам змогу порівняти та зробити висновки про стабілізацію наночастинок. Дані наведені на рис. 3.

У порівнянні з попередніми спектрами при стабілізації карбамідом можемо побачити зміни. Для Fe urea (зелений) слабкіша зона поглинання

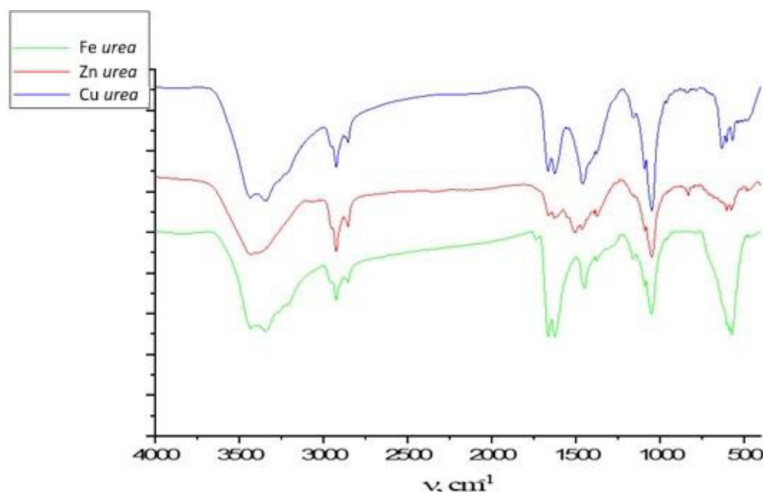


Рис. 5. FTIR спектри наночастинок стабілізованих у розчині карбаміду

у 3400 см^{-1} – менш гідрофільна поверхня або вища кристалічність. Пік $\sim 580\text{ см}^{-1}$ чітко відповідає Fe—O зв'язкам (типово для Fe_3O_4). Всі основні інфрачервоні поглинання карбаміду присутні, але інтенсивність менша, що можливо через слабше зв'язування. Також можлива конкуренція з водою (OH^-), оскільки поверхня $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ гідрофільна й сильно зв'язує воду – частина піків у зоні $3300\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ може перебиватися з H—O—H .

Для цинку Zn urea (червоний): Сильна смуга при 3400 см^{-1} – інтенсивне водне зв'язування. Потужні піки в зоні $1000\text{--}1400\text{ см}^{-1}$ C=O зв'язки, типові для комплексу Zn-сечовина.

Для Cu urea (синій) найбільш виражена структура в нижньочастотному діапазоні ($<1000\text{ см}^{-1}$), що свідчить про сильне комплексотворення. Пік близько 620 см^{-1} свідчить про зв'язки Cu—O. У діапазоні $1400\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ – розщеплення піків, що свідчить про координаційні взаємодії з сечовиною.

Наступним етапом досліджень було отримання інформації із порошкової рентгенограми (XRD) про структуру наночастинок та їх стабілізацію в розчині.

XRD-аналіз наночастинок цинку стабілізованих у розчині карбаміду зображено на рис. 5:

Основні піки на діаграмі: Пік $\sim 31.8^\circ$ (2θ) відповідає кристалографічній площині (100), є одним із головних рефлексів для гексагональної вюрцитової структури ZnO, $\sim 34.4^\circ$ (2θ) та $\sim 36.3^\circ$ (2θ) та формують характерний набір для

гексагональної фази ZnO (вюрцит). Ширина піків свідчить про нанорозмірність, оскільки піки мають ширину на піввисоті (FWHM), що значно більша, ніж у звичайних порошках. Це свідчить про дуже малий розмір кристалітів. Розмір ми можемо розрахувати за формулою Шерера:

$$d = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta},$$

де d – Середній розмір кристалітів (в нанометрах або ангстремах); K – Коефіцієнт форми (константа Шерера): зазвичай $0.89\text{--}0.94$, типово 0.9 ; λ – Довжина хвилі рентгенівського випромінювання (в Å або нм): для Zn K α складає 0.15406 нм ; β – Ширина піку на піввисоті (FWHM) в радіанах (не в градусах); θ – Половина кута дифракції (Bragg) у радіанах.

Згідно з формулою Шерера, розмір Zn оцінюється в межах $10\text{--}30\text{ нм}$, що збігається з даними мікроскопії. Отже, спектр підтверджує, що зразок – це чистий гексагональний ZnO. Широки піки свідчать про нанорозмірність частинок. Наявність незначного шуму може вказувати на наявність стабілізатора.

На наступному етапі було проведено XRD-аналіз наночастинок Cu стабілізованих карбамідом, що наведений на рис. 6:

Опис основних піків: сновною фазою є Cu^0 (мідь). Пік $\sim 43.3^\circ$ – найінтенсивніший, площина (111) міді. Пік $\sim 50.4^\circ$ – площина (200). Обидва дуже чіткі та вузькі, тому свідчать про високу кристалічність та наявність металічної міді

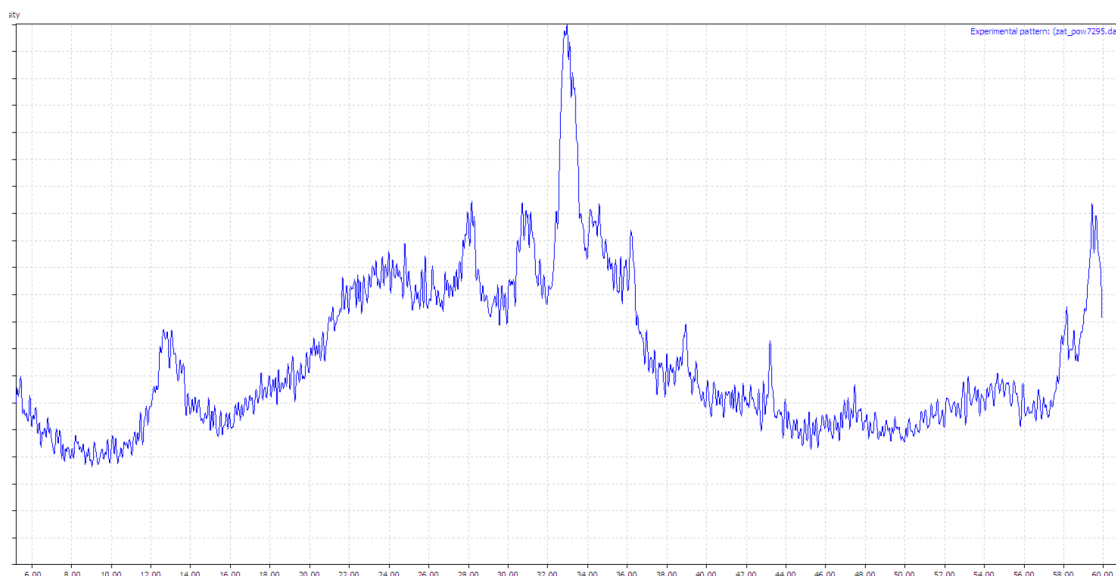


Рис. 6. XRD аналіз комплексоутворення карбамід-наночастинки Zn

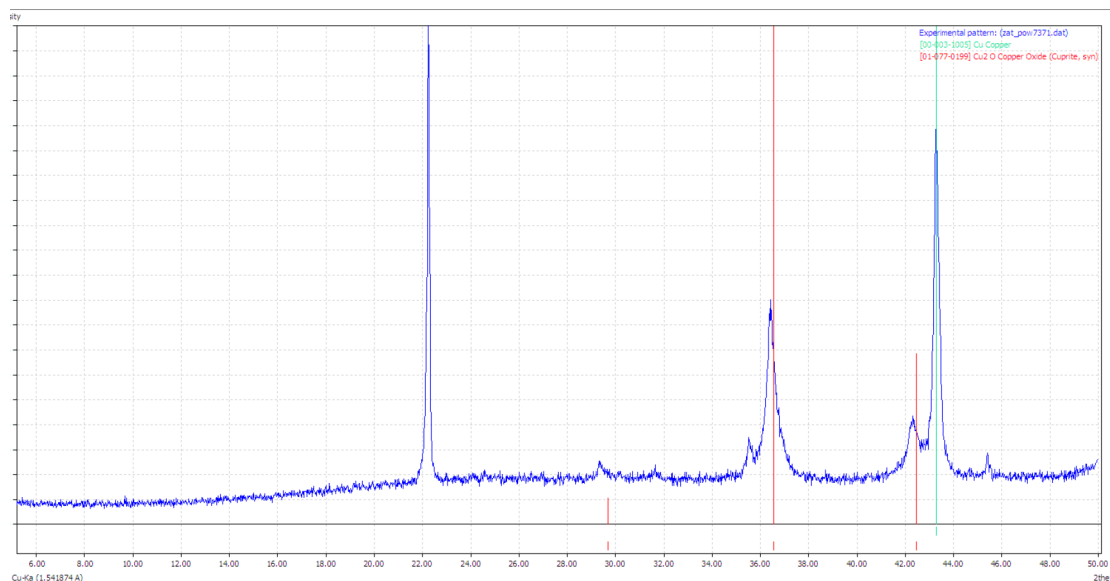


Рис. 7. XRD-аналіз комплексоутворення карбамід-CuHNC

як основної фази. Додатковою фазою є Cu_2O (оксид міді I). Піки $\sim 29.5^\circ$, $\sim 36.4^\circ$, $\sim 42.3^\circ$ (2θ) – характерні для Cu_2O . Фон рівний – свідчить про низький вміст аморфної органіки (карбаміду) або її наявність тільки як тонкий стабілізаційний шар. Всі піки вузькі, отже наночастинки мають високий ступінь впорядкованості. Присутні також домішки Cu_2O , що є ознакою легкого поверхневого окиснення, типовий ефект при стабілізації карбамідом. За формулою Шерера розміри складають 20–40 нм.

Нижче на рис. 7 наведено XRD-спектр наночастинок заліза (Fe):

Найсильніші піки $\sim 44.7^\circ$, 65.0° (2θ), що відповідають площинам **(110)** та **(200)** для

металевого Fe^0 (α -фаза). Збігаються з еталоном 01-087-2396. Отже, основна фаза – металічне залізо. Піки $\sim 30.1^\circ$, 35.5° , 43.1° , 57.0° (2θ) характерні для Fe_3O_4 (магнетит), тому присутня домішка магнетиту. Також слабкі піки $\sim 33^\circ$, $\sim 49.4^\circ$ (2θ), що відповідають Fe_2O_3 (гематиту). Оскільки інтенсивність мала, то гематит у незначній кількості або на поверхні. У спектрі спостерігаються незначні відхилення від класичних положень піків гематиту чи магнетиту. Це свідчить про дисторсію кристалічної решітки, спричинену зв'язуванням з лігандом, тобто утворенням поверхневих комплексів (наприклад, $\text{Fe}-\text{O}-\text{C}$ або $\text{Fe}-\text{NH}_2$). Також Ширина піків збільшена (особливо в зоні

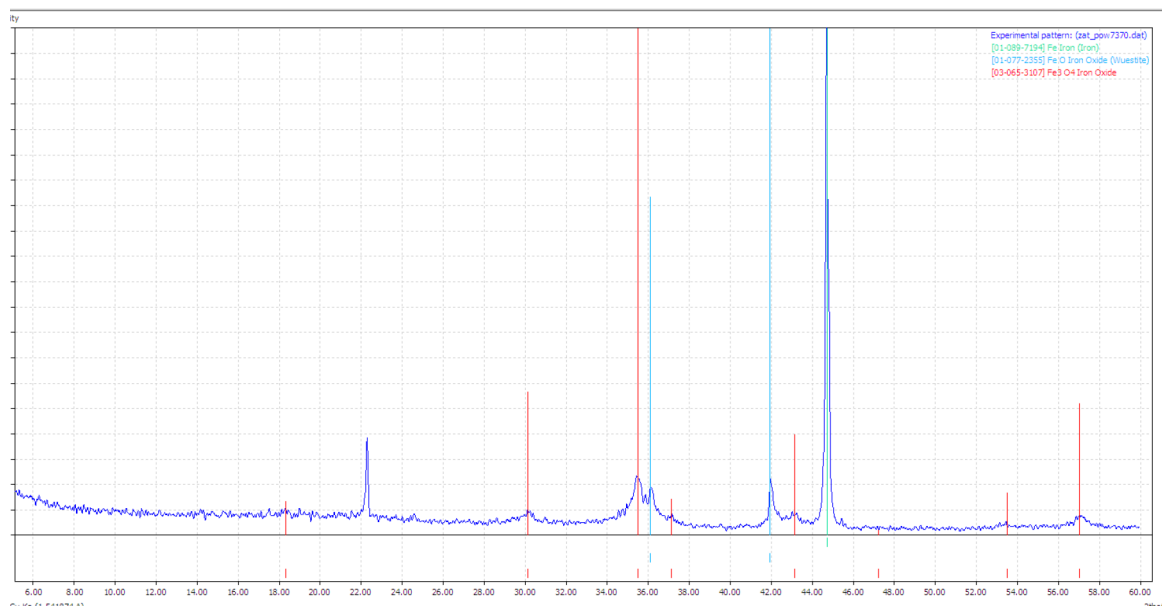


Рис. 8. XRD спектри комплексоутворення карбаміду з Fe HNC

30–40°). Це вказує на неоднорідну координацію Fe^{3+} і Fe^{2+} з органічними молекулами — типовий ефект для Fe—O—C—NH_2 комплексів.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Отже, хімічна природа металу суттєво впливає на ступінь його взаємодії з карбамідом. Залізо зберігає металеву структуру з незначним впливом стабілізатора. Цинк утворює менші наночастинки із середньою силою комплексоутворення. Мідь проявляє найвищу здатність до координаційної взаємодії, утворюючи стійкі комплекси, що потенційно покращує стабільність та функціональні властивості таких наночастинок у агрохімічних або каталізаторних застосуваннях.

Рентгенограми засвідчили збереження основної кристалічної структури в усіх зразках після модифікації. У зразку Fe urea домінує металева фаза $\alpha\text{-Fe}$, водночас виявлено домішки Fe_3O_4 та Fe_2O_3 , що свідчить про часткове поверхнєве окиснення. Помірне розширення піків та зниження інтенсивності сигналів Fe_3O_4 свідчать про деформацію кристалічної решітки внаслідок слабкої взаємодії з молекулами карбаміду.

Зразок Zn urea характеризується широкими та низькоінтенсивними піками, що відповідають гексагональній фазі ZnO. Значна ширина піків у діапазоні 30–36° (2 θ) вказує на нанокристалічну структуру з розмірами доменів 10–20 нм. Підвищений фоновий сигнал свідчить про наявність аморфного органічного шару – залишків карбаміду.

У зразку Cu urea зберігається висока кристалічність металічної міді (Cu^0), підтверджена вузькими та інтенсивними піками. Слабкі сигнали Cu_2O вказують на часткове окиснення. Розмір кристалітів для Fe urea і Cu urea становить 29–34 нм, тоді як у ZnCN спостерігається найменший розмір частинок.

Результати FTIR спектроскопії підтверджують утворення координаційних зв'язків між металами та функціональними групами карбаміду. У всіх зразках виявлені характерні смуги поглинання, що відповідають вібраціям NH_2 та C=O .

У Fe urea спостерігаються лише незначні зсуви смуг, що вказує на слабку взаємодію заліза з карбамідом, ймовірно через поверхнєву адсорбцію. Для Zn urea зафіксовано помітні зміщення в ділянках C=O та NH_2 , що свідчить про утворення координаційних зв'язків Zn—O—C—NH_2 . У зразку Cu urea фіксуються найбільш інтенсивні та структуровані смуги нижче 1000 cm^{-1} , які відповідають зв'язкам Cu—N і Cu—O , що є прямим свідченням сильного комплексоутворення.

Перспективи подальших досліджень. Результати проведеного дослідження відкривають низку перспективних напрямів для подальшої наукової роботи. Насамперед доцільним є розширення спектру досліджуваних наночастинок шляхом включення до аналізу інших перехідних металів, що мають біологічну активність або каталізаторні властивості. Перспективним є також вивчення впливу різних типів стабілізаторів (зокрема природного походження) на комплексоутворення та колоїдну стабільність наночастинок у водному середовищі.

Окрему увагу слід приділити біоекспериментальним дослідженням щодо фітотоксичності, проникності та транспорту стабілізованих наночастинок у модельних рослинних або клітинних системах. Це дозволить оцінити практичний потенціал отриманих комплексів у сфері агрохімії, біомедицини та екотехнологій.

Подальше використання комп'ютерного моделювання (DFT, молекулярна динаміка) для прогнозування енергетично сприятливих конфігурацій комплексів металів з карбамідом може доповнити експериментальні дані й сприяти глибшому розумінню механізмів комплексоутворення.

Загалом, перспективи досліджень полягають у створенні функціоналізованих наноструктур із заданими властивостями, що матимуть високу стабільність, біосумісність та ефективність для застосування у високотехнологічних галузях.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Shahrekizad M., Ahangar A. G., Mir N. EDTA-Coated Fe_3O_4 Nanoparticles: a Novel Biocompatible Fertilizer for Improving Agronomic Traits of Sunflower (*Helianthus Annuus*). *Journal of Nanostructures*. 2015. Vol. 5. P. 117–127.
2. Yu M., Yao J., Liang J., Zeng Z., Cui B., Zhao X., Sun C., Wang Y., Liu G., Cui H. Development of functionalized abamectin poly(lactic acid) nanoparticles with regulatable adhesion to enhance foliar retention. *RSC Advances*. 2017. Vol. 7, No. 19. P. 11271–11280.

3. Kolencik M., Ernst D., Urik M., Durisova L., Bujdos M., Sebesta M., Dobrocka E., Ksinan S., Illa R., Qian Y., Feng H., Cerny I., Holisova V., Kratosova G. Foliar Application of Low Concentrations of Titanium Dioxide and Zinc Oxide Nanoparticles to the Common Sunflower under Field Conditions. *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, No. 8. P. 1619.
4. Jurkow R., Pokluda R., Sekara A., Kalisz A. Impact of foliar application of some metal nanoparticles on antioxidant system in oakleaf lettuce seedlings. *BMC Plant Biology*. 2020. Vol. 20, No. 1. P. 290.
5. Wu J., Wang G., Vijver M. G., Bosker T., Peijnenburg W. Foliar versus root exposure of AgNPs to lettuce: Phytotoxicity, antioxidant responses and internal translocation. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 261. P. 114117.
6. El Amerany F., Meddich A., Wahbi S., Porzel A., Taourirte M., Rhazi M., Hause B. Foliar Application of Chitosan Increases Tomato Growth and Influences Mycorrhization and Expression of Endochitinase-Encoding Genes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No. 2. P. 1–18.
7. Нанотехнологія у ветеринарній медицині / [В. Б. Борисевич, Б. В. Борисевич, В. Г. Каплуненко та ін.]. Київ : ТОВ «Наноматеріали і нанотехнології», 2009. 232 с.
8. Спосіб отримання колоїдних металевих наночастинок «Ерозійно-вибухове отримання колоїдних металевих наночастинок» : пат. на корисну модель № 29450 Україна, МПК (2006) B01 J13/00 / М. В. Косінов, В. Г. Каплуненко ; заявл. 03.10.2007 ; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 1.

REFERENCES:

1. Shahrekizad, M., Ahangar, A. G., & Mir, N. (2015). EDTA-Coated Fe₃O₄ Nanoparticles: a Novel Biocompatible Fertilizer for Improving Agronomic Traits of Sunflower (*Helianthus Annuus*). *Journal of Nanostructures*, 5, 117–127.
2. Yu, M., Yao, J., Liang, J., Zeng, Z., Cui, B., Zhao, X., Sun, C., Wang, Y., Liu, G., & Cui, H. (2017). Development of functionalized abamectin poly(lactic acid) nanoparticles with regulatable adhesion to enhance foliar retention. *RSC Advances*, 7(19), 11271–11280.
3. Kolencik, M., Ernst, D., Urik, M., Durisova, L., Bujdos, M., Sebesta, M., Dobrocka, E., Ksinan, S., Illa, R., Qian, Y., Feng, H., Cerny, I., Holisova, V., & Kratosova, G. (2020). Foliar Application of Low Concentrations of Titanium Dioxide and Zinc Oxide Nanoparticles to the Common Sunflower under Field Conditions. *Nanomaterials*, 10(8), 1619.
4. Jurkow, R., Pokluda, R., Sekara, A., & Kalisz, A. (2020). Impact of foliar application of some metal nanoparticles on antioxidant system in oakleaf lettuce seedlings. *BMC Plant Biology*, 20(1), 290.
5. Wu, J., Wang, G., Vijver, M. G., Bosker, T., & Peijnenburg, W. (2020). Foliar versus root exposure of AgNPs to lettuce: Phytotoxicity, antioxidant responses and internal translocation. *Environmental Pollution*, 261, 114117.
6. El Amerany, F., Meddich, A., Wahbi, S., Porzel, A., Taourirte, M., Rhazi, M., & Hause, B. (2020). Foliar Application of Chitosan Increases Tomato Growth and Influences Mycorrhization and Expression of Endochitinase-Encoding Genes. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(2), 1–18.
7. Borisevych, V. B., Borisevych, B. V., Kaplunenko, V. H. та ін. (2009). *Nanotekhnolohiia u veterynarnii medytsyni* [Nanotechnology in veterinary medicine]. Kyiv : TOV “Nanomaterialy i nanotekhnolohii”. [in Ukrainian]
8. Kosinov, M. V., & Kaplunenko, V. H. (2008). *Sposib otrymannia koloidnykh metalevykh nanochastynok “Eroziino-vybukhove otrymannia koloidnykh metalevykh nanochastynok”* [Method for producing colloidal metal nanoparticles “Erosive-explosive synthesis of colloidal metal nanoparticles”]: Patent of Ukraine, No. 29450. Claimed: 03.10.2007; Published: 10.01.2008, Bulletin No. 1. [in Ukrainian].