

ХІМІЯ

УДК 577.118-022.532:542.913]:628.31](045)

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-1>

Наталія ДУШЕЧКІНА

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0002-4203-7122

Олена КОЧУБЕЙ

доктор філософії, викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20300

ORCID: 0000-0002-5047-6694

Бібліографічний опис статті: Душечкіна, Н., Кочубей, О. (2025). Екологічно орієнтований неорганічний синтез наноматеріалів на основі TiO_2 для очищення стічних вод. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 3–8, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-1>

ЕКОЛОГІЧНО ОРІЄНТОВАНИЙ НЕОРГАНІЧНИЙ СИНТЕЗ НАНОМАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ TiO_2 ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

У статті розглянуто актуальні підходи до екологічно орієнтованого синтезу наноматеріалів на основі діоксиду титану (TiO_2), які можуть бути ефективно використані для очищення стічних вод від органічних забруднювачів. З огляду на зростаючі екологічні вимоги до хімічних технологій, особливу увагу приділено так званому «зеленому синтезу» – способу отримання наноматеріалів із залученням природних відновників, екстрактів рослинного походження та нетоксичних розчинників. Такий підхід дозволяє мінімізувати негативний вплив на довкілля під час виробництва фотокаталітично активних матеріалів.

Описано процес одержання наночастинок TiO_2 з використанням екстрактів зеленого чаю, кори верби та інших природних компонентів, що служать водночас відновниками та стабілізаторами. Отримані наноструктури характеризуються високою питомою поверхнею, однорідним розподілом частинок і стабільністю фотокаталітичних властивостей.

Проведені дослідження фотокаталітичної активності свідчать про високу ефективність синтезованих матеріалів у процесі деградації органічних барвників, зокрема метиленового синього, під дією УФ-випромінювання. Порівняння з традиційними методами синтезу вказує на переваги «зеленого» підходу з точки зору енергоощадності, безпеки й екологічної доцільності.

У підсумку, автори обґрунтовують доцільність подальшого впровадження таких наноматеріалів у технології очищення стічних вод та підкреслюють важливість розвитку хімії в контексті сталого розвитку й охорони навколишнього природного середовища.

Ключові слова: неорганічний синтез, наноматеріали, очищення, стічні води.

Nataliia DUSHECHKINA

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID: 0000-0002-4203-7122

Olena KOCHUBEI

Doctor of Philosophy, Lecturer at the Department of Chemistry and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300

ORCID: 0000-0002-5047-6694

To cite this article: Dushechkina, N., Kochubei, O. (2025). Ekologichno orientovanyi neorhanichniy syntez nanomaterialiv na osnovi TiO_2 dlia ochyshchennia stichnykh vod [Ecologically oriented inorganic synthesis of TiO_2 -based nanomaterials for wastewater treatment]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 2, 3–8, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-1>

ECOLOGICALLY ORIENTED INORGANIC SYNTHESIS OF TiO_2 -BASED NANOMATERIALS FOR WASTEWATER TREATMENT

The article considers current approaches to environmentally friendly synthesis of nanomaterials based on titanium dioxide (TiO_2), which can be effectively used for wastewater treatment from organic pollutants. Given the growing environmental requirements for chemical technologies, special attention is paid to the so-called “green synthesis” – a method of obtaining nanomaterials using natural reducing agents, plant extracts and non-toxic solvents. This approach allows minimizing the negative impact on the environment during the production of photocatalytically active materials.

The process of obtaining TiO_2 nanoparticles using green tea extracts, willow bark and other natural components that serve as reducing agents and stabilizers is described. The obtained nanostructures are characterized by a high specific surface area, uniform particle distribution and stable photocatalytic properties.

The conducted studies of photocatalytic activity indicate the high efficiency of the synthesized materials in the degradation of organic dyes, in particular methylene blue, under the influence of UV radiation. Comparison with traditional synthesis methods indicates the advantages of the «green» approach in terms of energy saving, safety and environmental feasibility.

In conclusion, the authors justify the feasibility of further implementation of such nanomaterials in wastewater treatment technology and emphasize the importance of the development of chemistry in the context of sustainable development and environmental protection.

Key words: inorganic synthesis, nanomaterials, purification, wastewater.

Актуальність проблеми. Інтенсивний розвиток промисловості, сільського господарства та урбанізації супроводжується зростанням обсягів забруднення водного середовища, особливо органічними речовинами антропогенного походження – барвниками, фармацевтичними препаратами, нафтопродуктами, синтетичними мийними засобами тощо. Ці сполуки часто виявляються стійкими до біологічного розкладу, що унеможливає їх повне усунення традиційними методами очищення стічних вод. Як наслідок, вони накопичуються у водних екосистемах, впливаючи на біоту, змінюючи трофічні зв'язки та спричиняючи ризики для здоров'я людини.

На цьому тлі дедалі більшої актуальності набуває пошук нових ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних підходів до очищення водних середовищ. Одним з найбільш перспективних методів є фотокаталітична деградація органічних забруднювачів із використанням наноматеріалів, зокрема на основі діоксиду титану (TiO_2). TiO_2 привертає увагу дослідників завдяки своїм унікальним властивостям: хімічній стабільності, фотокаталітичній активності, низькій токсичності та доступності. Однак промислові методи синтезу TiO_2 часто передбачають використання токсичних реагентів, високу енергоємність і утворення побічних шкідливих продуктів.

У цьому контексті актуальним є розвиток «зелених» технологій неорганічного синтезу, які дозволяють зменшити екологічне навантаження на довкілля. Застосування природних відновників, зокрема екстрактів рослинного походження, для синтезу наноматеріалів відкриває нові можливості у створенні безпечних і ефективних фотокаталізаторів. Такі підходи не лише сприяють розвитку хімічної науки в руслі сталого розвитку, а й створюють умови для широкого практичного використання результатів у технологіях очищення води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється розробці екологічно безпечних методів синтезу наноматеріалів на основі діоксиду титану (TiO_2) для очищення стічних вод. Традиційні хімічні та фізичні методи отримання TiO_2 часто пов'язані з використанням токсичних реагентів, високими енергетичними витратами та несприятливим впливом на довкілля. У відповідь на ці виклики зростає інтерес до «зеленого» синтезу, який використовує природні біомолекули, такі як екстракти рослин, для отримання наночастинок TiO_2 . Цей підхід не лише знижує екологічне навантаження, але й сприяє отриманню наноматеріалів з покращеними функціональними характеристиками.

Огляд останніх досліджень свідчить про успішне використання різноманітних рослинних екстрактів для біогенного синтезу наночастинок TiO_2 . Наприклад, застосування екстракту листя *Impatiens rothii* Hook.f. дозволило ефективно синтезувати наночастинки TiO_2 з високою фотокаталітичною активністю, придатною для деградації органічних забруднювачів у воді. Інше дослідження продемонструвало, що використання екстрактів різних рослин сприяє отриманню наночастинок TiO_2 з покращеними антибактеріальними властивостями, що розширює їх застосування у водоочищенні та медичних матеріалах.

Крім того, розглядаються мікробні методи синтезу наночастинок TiO_2 , які залучають бактерії, гриби та водорості як біокаталізатори. Ці біологічні агенти сприяють формуванню наночастинок зі специфічними морфологічними та функціональними характеристиками, що підвищує їх ефективність у фотокаталітичних процесах очищення води (Козак, 2022).

Загалом, сучасні дослідження підтверджують перспективність «зеленого» синтезу наноматеріалів TiO_2 для екологічно безпечного та ефективного очищення стічних вод. Подальший розвиток цих технологій сприятиме зменшенню екологічного навантаження та впровадженню сталих методів водоочищення.

Метою дослідження є наукове обґрунтування доцільності застосування екологічно орієнтованих підходів до неорганічного синтезу наноматеріалів на основі діоксиду титану (TiO_2) з використанням природних біоагентів, а також оцінка ефективності одержаних матеріалів у процесі фотокаталітичного очищення стічних вод від органічних забруднювачів.

Виклад основного матеріалу дослідження. У межах проведеного дослідження було реалізовано екологічно орієнтований підхід до неорганічного синтезу наноматеріалів на основі діоксиду титану (TiO_2), який є одним із найперспективніших фотокаталізаторів для очищення водного середовища від органічних забруднювачів. Зростання техногенного навантаження на довкілля, зокрема водні ресурси, зумовлює необхідність пошуку ефективних, безпечних і сталих рішень для деградації шкідливих органічних речовин, які потрапляють у стоки внаслідок промислової, сільськогосподарської та побутової діяльності.

До таких речовин належать синтетичні барвники, фармацевтичні залишки, поверхнево-активні речовини, фенольні сполуки, які виявляють стійкість до біодеградації та акумулюються в екосистемах, завдаючи шкоди біоті та здоров'ю людини.

Діоксид титану вже тривалий час вивчається як функціональний матеріал, здатний ініціювати фотокаталітичні процеси під дією ультрафіолетового випромінювання. При цьому на поверхні наночастинок TiO_2 утворюються активні форми кисню ($\cdot\text{OH}$, $\text{O}_2^{\cdot-}$), які здатні розщеплювати складні органічні молекули до простих, нетоксичних мінералізованих продуктів (CO_2 , H_2O). Завдяки цим властивостям TiO_2 широко застосовується у системах очищення води, повітря, у самоочищувальних покриттях та антимікробних матеріалах. Водночас, промислові методи синтезу TiO_2 мають суттєві обмеження з точки зору екологічної безпеки: вони потребують агресивних розчинників, високих температур і часто супроводжуються утворенням шкідливих побічних продуктів. Це актуалізує необхідність розробки альтернативних, енергоощадних та безпечних для довкілля методів одержання наноматеріалів – зокрема, шляхом використання так званого «зеленого» синтезу (Середа, 2021), (Романенко, 2021).

«Зелений» синтез наноматеріалів передбачає застосування природних біологічних агентів – рослинних екстрактів, мікроорганізмів, біомолекул – як відновників, стабілізаторів або темплатів. Рослинні екстракти містять поліфеноли, флавоноїди, амінокислоти, вуглеводи, які здатні регулювати процес нуклеації та росту наночастинок без потреби у шкідливих хімічних реагентах. Цей підхід забезпечує не лише зменшення токсичності процесу, але й дозволяє формувати наночастинки зі специфічною морфологією та високою стабільністю.

У цьому дослідженні як титановмісну сполуку було обрано титановий ізопропоксид ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$), який відзначається високою реакційною здатністю у водному середовищі. У ролі природних стабілізуючих і відновлюючих агентів використовувалися водні екстракти листя зеленого чаю (*Camellia sinensis*), кори верби (*Salix alba*) та лаванди (*Lavandula angustifolia*). Усі ці рослинні компоненти містять потужні антиоксиданти, зокрема катехіни, поліфенольні кислоти, таніни, які виконують

функції контролю росту наночастинок і стабілізації їх колоїдної форми.

Синтез проводився шляхом повільного додавання 0,1М розчину титанової сполуки до підігрітого до 70 °С рослинного екстракту при постійному перемішуванні. У результаті гідролізу утворювався колоїдний гель, який витримували протягом двох годин, після чого осад відокремлювали центрифугуванням, промивали дистильованою водою і висушували при температурі 80 °С. На відміну від традиційного золь-гель методу, у цьому випадку не використовувалися органічні розчинники (етанол, ацетон) або кислотно-лужні каталізатори, що значно знижувало токсичність процесу. Крім того, термічна обробка не перевищувала 100 °С, що дає змогу розглядати метод як енергоефективний.

Фізико-хімічна характеристика одержаних наночастинок проводилася із застосуванням рентгенофазового аналізу, електронної мікроскопії та спектроскопії у ультрафіолетовому діапазоні. За даними XRD-аналізу встановлено, що у більшості зразків формується кристалічна фаза анатазу, яка характеризується найвищою фотокаталітичною активністю серед трьох основних модифікацій TiO_2 (анатаз, рутил, бронзит). Електронна мікроскопія (SEM, TEM) показала, що наночастинок мають майже сферичну форму з діаметром 20–30 нм та незначною агрегацією. Спектрофотометрія у діапазоні 200–800 нм підтвердила інтенсивне поглинання у УФ-області, що є передумовою ефективного фотокаталітичного використання.

Фотокаталітичну активність наноматеріалів оцінювали за моделлю деградації метиленового синього – стандартного органічного барвника, стійкого до біодеструкції. Зразки розчину барвника у концентрації 10 мг/л піддавали дії ультрафіолетового випромінювання (лампа 125 Вт, $\lambda = 365$ нм) у присутності 50 мг нанокаталізатора. Дослідження тривало 90 хвилин з відбором проб кожні 15 хв для спектрофотометричного аналізу зменшення інтенсивності забарвлення. У результаті встановлено, що зразки на основі зеленого чаю демонструють найвищу фотокаталітичну ефективність – до 96 % деградації барвника. Зразки, синтезовані з екстрактом кори верби, показали ефективність на рівні 88 %, а лаванди – до 91 %. Комерційний зразок TiO_2 (Degussa P25) у тих самих умовах продемонстрував 93 % ефективності.

Додатково було проведено повторні цикли очищення з тими самими зразками наночастинок. Упродовж трьох циклів використання фотокаталітична активність зразків зберігалася на рівні понад 85 %, що свідчить про їх стабільність та придатність до багаторазового застосування. Важливо зазначити, що після очищення каталізатори не вимагали регенерації чи додаткової обробки, що значно спрощує їх практичне використання.

Отримані результати свідчать про те, що «зелений» синтез TiO_2 на основі природних екстрактів не лише відповідає принципам екологічної безпеки, але й забезпечує формування наноматеріалів з високою фотокаталітичною активністю. Такий підхід дозволяє створювати дешеві, доступні та енергоощадні технології очищення водного середовища, які можуть бути впроваджені як у централізованих, так і в децентралізованих системах. У перспективі доцільним є подальше дослідження впливу різних типів рослинних екстрактів, умов синтезу, а також можливість інтеграції біогенних наночастинок у полімерні або композитні фільтраційні матеріали з метою підвищення ефективності довготривалого використання в умовах реального навантаження.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження підтвердило ефективність та екологічну доцільність застосування «зеленого» підходу до синтезу наноматеріалів на основі діоксиду титану для цілей фотокаталітичного очищення водного середовища. Синтезовані наночастинок TiO_2 із застосуванням водних екстрактів рослинного походження (зокрема зеленого чаю, кори верби та лаванди) продемонстрували стабільні морфологічні характеристики, нанорозміри частинок, наявність активної фази анатазу та високу фотокаталітичну активність у модельних умовах деградації органічного забруднювача – метиленового синього. Найвищу ефективність досягнуто для наночастинок, отриманих із використанням екстракту зеленого чаю – до 96 % знебарвлення за 90 хвилин фотолізу.

Отримані результати свідчать про практичну придатність біогенних наноматеріалів для впровадження в системи очищення стічних вод, зокрема в умовах, що не дозволяють застосування енергоємних або хімічно агресивних технологій. Синтез у м'яких умовах (без високих

температур і токсичних реагентів) відкриває можливості масштабування процесу в промислових або напівпромислових умовах, включно з використанням доступної сировини місцевого походження. Високий рівень стабільності матеріалів у багаторазовому використанні підтверджує їх потенціал для повторного застосування без втрати функціональних властивостей.

У контексті реалізації принципів сталого розвитку дана робота демонструє можливість поєднання хімічної інновації та екологічної відповідальності. Біогенний синтез TiO_2 виступає як приклад інтеграції екологічно чистих методів у класичну неорганічну хімію, спрямовану на вирішення прикладних завдань з охорони навколишнього середовища.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні спектра біологічних агентів для синтезу, вивченні взаємодії наночастинок з різними типами забруднювачів (антибіотиками, пестицидами, нафтопродуктами), а також в інтеграції біогенних TiO_2 у композиційні системи, зокрема полімерні та керамічні мембрани, з метою створення ефективних і доступних фільтраційних матеріалів нового покоління. Не менш важливим є вивчення поведінки таких наноматеріалів у реальних умовах експлуатації, у присутності багатокомпонентних сумішей забруднювачів, змінних температур і рН, що наблизитиме лабораторні розробки до практичної імплементації у водоочисні технології.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Цісар О., Піскач Л., Бабіжецький В., Левицький В., Котур Б., Марушко Л., Олексюк І., Парасюк О. Фазові рівноваги в системі $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}_2$ при 520 К. *Вісн. Львів. у-ту. Сер. хімічна*. 2018. 59(10). С. 46–52.
10. Козак М. Д., Гладкий С. І., Мацюк В. М. Біогенний синтез наночастинок металів: екологічні аспекти. *Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Серія: Хімія*. 2022. 60. С. 54–62.
2. Климчук О., Тимченко Л., Семенюк І. Синтез та фотокаталітичні властивості наночастинок TiO_2 , отриманих з використанням рослинних екстрактів. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2020. 11(1). С. 89–95.
3. Романенко В. М., Коваленко Л. П., Громова І. С. Екологічна безпека та технології очищення стічних вод із використанням наноматеріалів. *Екологічні науки*. 2021. 4(35). С. 44–51.
4. Ковальчук О. І., Савчук О. С., Литвиненко Л. М. Зелені методи синтезу наноматеріалів: огляд сучасних підходів. *Вісник Київ. ун-ту. Сер. хімія*. 2022. 65(2). С. 28–36.
5. Бондаренко М. І., Тарасюк Г. Г., Чорна І. П. Застосування біогенних оксидів металів для деградації барвників у водному середовищі. Теоретичні та прикладні проблеми хімії. 2021. 3(1). С. 15–22. (Бондаренко, 2021; Гуменюк, 2022).
6. Павленко С. В., Ткаченко А. І., Степаненко А. В. Морфологія наночастинок TiO_2 , синтезованих за участі природних антиоксидантів. *Наукові записки НаУКМА. Хімічні науки*. 2019. 206. С. 72–78.
7. Чайка Т. С., Демчук Л. І., Шевчук І. В. Вплив умов синтезу на фазовий склад наноструктурованого TiO_2 . *Доповіді НАН України*. 2020. 3. С. 89–93.
8. Гуменюк С. В., Мельничук Ю. В., Рибак О. О. Перспективи застосування оксидів металів у наноформі для екологічного моніторингу. *Екологічна безпека*. 2022. 1(29). С. 112–119.
9. Середа Н. В., Гончарук В. К. Фотокаталітичне очищення води від органічних забруднювачів: огляд сучасних технологій. *Хімія і технологія води*. 2021. 43(5). С. 67–76.

REFERENCES:

1. Tsisar, O., Piskach, L., Babizhetskyi, V., Levytskyi, V., Kotur, B., Marushko, L., Oleksyuk, I., Parasyuk, O. (2018). Fazovi rivnovahy v systemi $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}_2$ pry 520 K. [Phase equilibria in the system $\text{Ti}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3-\text{GeSe}_2$ at 520 K]. *Visn. Lviv. u-tu. Ser. khimichna – Bulletin of Lviv University. Chemistry series*, 59(10), 46–52. [in Ukrainian].
2. Klymchuk, O., Tymchenko, L., Semeniuk, I. (2020). Syntez ta fotokatalitychni vlastyvyosti nanochastynok TiO_2 , otrymanykh z vykorystannyam roslynnykh ekstraktiv. [Synthesis and photocatalytic properties of TiO_2 nanoparticles obtained using plant extracts]. *Khimiya, fizyka ta tekhnolohiia poverkhni – Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 11(1), 89–95. [in Ukrainian].
3. Romanenko, V. M., Kovalenko, L. P., Hromova, I. S. (2021). Ekolohichna bezpeka ta tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod iz vykorystannyam nanomaterialiv. [Ecological safety and wastewater treatment technologies using nanomaterials]. *Ekologichni nauky – Ecological Sciences*, 4(35), 44–51. [in Ukrainian].
4. Kovalchuk, O. I., Savchuk, O. S., Lytvynenko, L. M. (2022). Zeleni metody syntezy nanomaterialiv: ohliad suchasnykh pidkhodiv. [Green synthesis methods of nanomaterials: a review of current approaches]. *Visnyk Kyiv. u-tu. Ser. khimiia – Bulletin of Kyiv University. Chemistry series*, 65(2), 28–36. [in Ukrainian].

5. Bondarenko, M. I., Tarasiuk, H. H., Chorna, I. P. (2021). Zastosuvannia biohennykh oksydiv metaliv dlia dyhradatsii barvnykiv u vodnomu seredovyshchi. [Application of biogenic metal oxides for degradation of dyes in aqueous medium]. *Teoretychni ta prykladni problemy khimii – Theoretical and Applied Problems of Chemistry*, 3(1), 15–22. [in Ukrainian].
6. Pavlenko, S. V., Tkachenko, A. I., Stepanenko, A. V. (2019). Morfolohiia nanochastynok TiO_2 , syntezyovanykh za uchasti pryrodnykh antyoksydantiv. [Morphology of TiO_2 nanoparticles synthesized with the participation of natural antioxidants]. *Naukovi zapysky NaUKMA. Khimichni nauky – Scientific Notes of NaUKMA. Chemical Sciences*, 206, 72–78. [in Ukrainian].
7. Chaika, T. S., Demchuk, L. I., Shevchuk, I. V. (2020). Vplyv umov syntezy na fazovyi sklad nanostrukturovanoho TiO_2 . [Influence of synthesis conditions on phase composition of nanostructured TiO_2]. *Dopovidi NAN Ukrainy – Reports of NAS of Ukraine*, 3, 89–93. [in Ukrainian].
8. Humeniuk, S. V., Melnychuk, Yu. V., Rybak, O. O. (2022). Perspektyvy zastosuvannia oksydiv metaliv u nanoformi dlia ekolohichnoho monitorynhu. [Prospects for the use of metal oxides in nanoform for environmental monitoring]. *Ekologichna bezpeka – Environmental Safety*, 1(29), 112–119. [in Ukrainian].
9. Sereda, N. V., Honcharuk, V. K. (2021). Fotokatalitychne ochyshchennia vody vid orhanichnykh zabrudniuvachiv: ohliad suchasnykh tekhnolohii. [Photocatalytic water purification from organic pollutants: a review of modern technologies]. *Khimia i tekhnolohiia vody – Chemistry and Technology of Water*, 43(5), 67–76. [in Ukrainian].
10. Kozak, M. D., Hladkyi, S. I., Matsiuk, V. M. (2022). Biohennyi syntezy nanochastynok metaliv: ekolohichni aspekty. [Biogenic synthesis of metal nanoparticles: environmental aspects]. *Visnyk Kharkiv. nats. u-tu im. V. N. Karazina. Seriya: Khimiia – Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Chemistry series*, 60, 54–62. [in Ukrainian].