

Кучерук Сніжана Василівна доктор філософії з галузі Хімічна та біоінженерія, доцент, доцент кафедри хімії, вчитель хімії Наукового ліцею, Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, <https://orcid.org/0000-0002-5978-487X>

ФОТОКАТАЛІТИЧНА ДЕСТРУКЦІЯ АНІОННИХ БАРВНИКІВ: МОДЕЛЮВАННЯ Й ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. Робота присвячена дослідженню сучасних підходів до фотокаталітичної деструкції аніонних барвників у водних розчинах із використанням напівпровідникових матеріалів та інтелектуальних систем оптимізації технологічних параметрів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розв'язання екологічної проблеми забруднення природних водних об'єктів стійкими до біодеградації органічними сполуками. Серед них особливу небезпеку становлять синтетичні барвники текстильної, поліграфічної, паперової та хімічної промисловості, які мають високу токсичність і канцерогенні властивості. Особливу увагу в роботі приділено застосуванню калію титанату як перспективного та високоефективного гетерогенного фотокаталізатора для глибокого очищення стічних вод від органічного екотоксикантів.

На основі порівняльного аналізу фотокаталітичної активності синтезованого калію титанату та титану діоксиду встановлено, що унікальна шарувата кристалічна структура титанату забезпечує значно вищу питому адсорбційну здатність щодо аніонних субстратів. У ході виконання роботи визначено ключові фізико-хімічні чинники, які лімітують перебіг фотокаталітичного процесу та визначають його загальну ефективність.

Окремим вагомим етапом дослідження є обґрунтування доцільності інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в сучасні системи автоматизованого керування процесами гетерогенного фотокаталізу. Експериментально доведено, що практичне застосування методів машинного навчання та штучних нейронних мереж дає змогу ефективно аналізувати багатофакторні нелінійні залежності. Це дозволяє з високою точністю прогнозувати кінетику деструкції барвників за мінливих зовнішніх умов, оптимізувати питомі витрати електричної енергії та витратних реагентів, а також повністю автоматизувати моніторинг ступеня очищення води в режимі реального часу. Отримані

ISSN 2786-6025 Online

результати переконливо підтверджують перспективність поєднання напівпровідникових фотокаталізаторів на основі титанатів із цифровими технологіями для створення промислових енергоефективних та екологічно безпечних систем водоочищення.

Ключові слова: фотокаталітична деструкція, аніонні барвники, калій титанат, титан діоксид, індигокармін, конго червоний, штучний інтелект.

Kucheruk Snizhana Vasylivna Doctor of Philosophy Degree Field of Study Chemical and bioengineering, an associate professor, an associate professor of the Chemistry department, teacher of chemistry at the Scientific Lyceum, Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, <https://orcid.org/0000-0002-5978-487X>

PHOTOCATALYTIC DESTRUCTION OF ANIONIC DYES: MODELING AND OPTIMIZATION OF PROCESSES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Abstract. This study investigates modern approaches to the photocatalytic destruction of anionic dyes in aqueous solutions using semiconductor materials and intelligent systems to optimize technological parameters. The relevance of this study stems from the urgent need to address the environmental pollution of natural water bodies by organic compounds resistant to biodegradation. Among these, synthetic dyes from the textile, printing, paper, and chemical industries pose a particular danger due to their high toxicity and carcinogenic properties. Special attention is paid to the use of potassium titanate as a promising and highly efficient heterogeneous photocatalyst for the deep purification of wastewater from organic ecotoxics.

Based on a comparative analysis of the photocatalytic activity of synthesized potassium titanate and titanium dioxide, it was established that the unique layered crystalline structure of titanate provides a significantly higher specific adsorption capacity for anionic substrates. During the study, key physicochemical factors limiting the photocatalytic process and determining its overall efficiency were identified.

A separate crucial stage of the study justifies the feasibility of integrating artificial intelligence algorithms into modern automated control systems for heterogeneous photocatalysis processes. It has been experimentally proven that the application of machine learning methods and artificial neural networks enables the effective analysis of multifactorial, nonlinear dependencies. This allows for high-accuracy prediction of dye destruction kinetics under changing external conditions, optimization of specific electricity and reagent consumption, and full automation of real-time monitoring of water purification efficiency. The results convincingly confirm the prospects of combining titanate-based semiconductor photocatalysts with

digital technologies to design energy-efficient and environmentally friendly industrial water treatment systems.

Keywords: photocatalytic destruction, anionic dyes, potassium titanate, titanium dioxide, indigo carmine, Congo red, artificial intelligence.

Постановка проблеми.

Сучасний етап розвитку людства характеризується стрімким зростанням антропогенного навантаження на гідросферу. Однією з найбільш гострих екологічних проблем світового масштабу є забруднення водних об'єктів стійкими органічними сполуками, зокрема синтетичними аніонними барвниками.

Ці речовини широко використовуються в текстильній, паперовій, поліграфічній та шкіряній промисловості. Більшість із них мають складну ароматичну структуру, що забезпечує їм високу стійкість до дії світла, температури та окисників, а також робить їх токсичними, мутагенними та канцерогенними для живих організмів.

Традиційні методи очищення стічних вод (механічна фільтрація, коагуляція, біологічне очищення) часто виявляються малоефективними щодо аніонних барвників через їхню високу розчинність та низьку здатність до біодеградації.

Проте, незважаючи на значні успіхи в розробці нових фотокаталізаторів (наприклад, на основі титанатів металів), залишається проблема низької квантової ефективності процесів та складності керування багатофакторними хімічними системами в реальному часі. Саме тут виникає необхідність інтеграції хімічних технологій із передовими досягненнями в галузі штучного інтелекту (ШІ) для прогнозування та оптимізації параметрів деструкції.

Наукова актуальність даної проблеми зумовлена необхідністю вирішення фундаментальних питань хімії поверхні та кінетики каталітичних реакцій. Впровадження інноваційних рішень у цю галузь пов'язане з такими науковими завданнями:

- пошук нових наноструктурованих матеріалів, зокрема на основі титанату калію, які володіють високою питомою поверхнею та стабільністю. Дослідження механізмів їхньої дії при взаємодії з аніонними структурами, такими як індигокармін та конго червоний;

- розробка математичних та кінетичних моделей, що описують вплив концентрації каталізатора, рН середовища та інтенсивності опромінення на швидкість деструкції. Використання ШІ (машинного навчання) дозволяє виявити нелінійні залежності, які важко встановити традиційними методами.

- встановлення ролі електростатичних взаємодій між поверхнею каталізатора та молекулами барвника. Розуміння того, чому певні барвники

ISSN 2786-6025 Online

(наприклад, індигокармін) піддаються деструкції легше за інші, є критичним науковим питанням.

Інтеграція ШІ у дослідження процесів деструкції барвників перетворює традиційну хімічну лабораторію на інтелектуальний дослідницький центр.

Отже, проблема очищення води від аніонних барвників є складною мультидисциплінарною задачею, що об'єднує хімічну технологію, матеріалознавство та ІТ. Її вирішення через впровадження фотокаталітичних процесів, керованих штучним інтелектом, не лише забезпечує високий науковий рівень досліджень, а й дає змогу розробляти практичні інструменти для збереження водних ресурсів, що є стратегічним пріоритетом для сталого розвитку України та світу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема деструкції стійких органічних забруднювачів стічних вод, серед яких особливе місце посідають синтетичні аніонні барвники, перебуває у центрі уваги світової наукової спільноти протягом останнього десятиліття. Фундаментальні основи гетерогенного фотокаталізу, закладені у класичних працях А. Фуджішими та К. Хонди, відкрили принципово нові шляхи до використання напівпровідникових матеріалів для екологічного очищення довкілля. Водночас сучасні дослідження дедалі більше зосереджуються на пошуку та синтезі ефективних альтернатив традиційному титан діоксиду. Попри свою доступність, комерційні зразки титан діоксиду мають обмежену квантову ефективність в отриманні радикалів під дією видимого спектра світла та відносно низьку сорбційну ємність щодо певних класів хімічних сполук. У цьому контексті вітчизняні та закордонні дослідники, детально обґрунтували перспективність застосування титанатів шаруватої структури, серед яких калій титанат. Сучасними фізико-хімічними методами аналізу було доведено, що унікальна архітектура кристалічної ґратки таких матеріалів забезпечує розвинену питому поверхню, високу адсорбційну здатність та специфічну поверхневу енергію. Це, у свою чергу, сприяє значно інтенсивнішій кінетиці деструкції саме аніонних сполук порівняно зі стандартними комерційними зразками анатазу. Поряд із матеріалознавчими аспектами, останні публікації в галузі "зеленої" хімії та інженерії довкілля все частіше звертаються до методів цифрової оптимізації та комп'ютерного моделювання. Зокрема, у світовій практиці, що відображено у працях Ч. Вана та Дж. Лі, активно розглядаються інноваційні підходи до прогнозування процесів сорбції та фотодеградації за допомогою методів штучних нейронних мереж. Впровадження інструментів штучного інтелекту дозволяє дослідникам з високою точністю враховувати складний синергетичний ефект і нелінійні залежності між температурою, кислотністю середовища, інтенсивністю випромінювання та стартовою концентрацією забруднювача.

Попри значний масив накопичених експериментальних даних та теоретичних напрацювань, низка критично важливих питань у галузі інтелектуального керування фотокаталітичними процесами залишається недостатньо висвітленою, а подекуди й дискусійною. Перш за все, гостро постає проблема вибіркості адсорбції на початкових етапах очищення. Більшість наявних наукових праць фокусується лише на фінальних інтегральних показниках деградації органіки, практично не враховуючи тонку специфіку електростатичної взаємодії між активними центрами напівпровідника та просторовою будовою молекул різних класів аніонних барвників, що чітко простежується при порівняльному аналізі кінетики руйнування індигокарміну та конго червоного. Іншим суттєвим недоліком є практична відсутність адаптивних моделей управління технологічними процесами. Традиційні математичні методи розрахунку параметрів деструкції є статичними й детермінованими; вони виявляються неефективними в умовах реальних стічних вод промислових підприємств, де концентрація домішок, каламутність та швидкість потоку динамічно змінюються в часі, що зрештою призводить до значних перевитрат енергетичних ресурсів та хімічних реагентів. Окрім цього, існують помітні прогалини у безпосередньому застосуванні алгоритмів штучного інтелекту в локальних очисних системах.

Хоча теоретичний потенціал комп'ютерного моделювання в хімічній інженерії описаний детально, практичних інженерних рішень, які б безпосередньо інтегрували математичні моделі фотокаталітичної активності конкретно титанатів із програмним забезпеченням реальних автоматизованих станцій водоочищення, на сьогодні майже не представлено.

Крім того, серйозним фізико-хімічним обмеженням залишається явище агрегації наночастинок у суспензіях. Нині відсутні надійні інструменти для точного прогнозування критичної маси каталізатора в реакторі, перевищення якої запускає небажані процеси затінення робочої зони та коагуляції частинок, що різко знижує вихід квантової реакції.

Мета статті полягає у комплексному теоретичному обґрунтуванні та експериментальному підтвердженні ефективності використання гетерогенних фотокаталізаторів, таких як калій титанат для деструкції стійких аніонних барвників у водних розчинах, а також у розробці концептуальних підходів до інтеграції цих фізико-хімічних процесів із сучасними методами штучного інтелекту задля точного прогнозування й оптимізації ключових параметрів очищення водних середовищ.

Виклад основного матеріалу. Фотокаталітична деструкція органічних забруднювачів у водному середовищі за допомогою твердих напівпровідників є ефективним методом очищення стічних вод, що забезпечує повну мінералізацію субстратів та неорганічних іонів. Перспективним фотокаталізатором є

ISSN 2786-6025 Online

калій титанат, що має шарувату структуру із широкою забороненою зоною, високою термічною і хімічною стабільністю.

У роботі досліджено фотокаталітичну активність калій титанату та немодифікованого титан діоксиду щодо аніонних барвників – конго червоного та індигокарміну під дією УФ-опромінення. У системі з конго червоним значного знебарвлення розчину не виявлено. Це зумовлено відсутністю адсорбції через електростатичне відштовхування між однойменно зарядженими (негативними) сульфогрупами барвника та поверхнею оксидних матеріалів.

Натомість деструкція індигокарміну відбувалася з високою ефективністю. Кінетичні параметри процесу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Залежність ступеня фотокаталітичної деструкції індигокарміну від часу контакту

Час, хв	X, %	
	K ₂ TiO ₃	TiO ₂
5	79,26	64,12
8	81,23	67,03
10	82,04	68,77
12	86,01	69,15
15	92,98	70,64

Встановлено, що за 15 хв опромінення ступінь деструкції для K₂TiO₃ перевищує 92%, тоді як для TiO₂ становить близько 70%.

Досліджено вплив маси фотокаталізатора на ефективність очищення розчину індигокарміну за 15 хв опромінення (Таблиця 2).

Таблиця 2

Залежність ступеня фотокаталітичної деструкції барвника від маси фотокаталізатора

Маса, г	X, %	
	K ₂ TiO ₃	TiO ₂
0,005	91,68	68,20
0,010	87,50	51,10
0,050	80,20	38,30
0,100	76,50	30,30

Для обох систем зафіксовано зворотну залежність: зі збільшенням маси зразків від 0,005 до 0,1 г ефективність процесу знижується. Максимальні значення досягнуто за мінімального завантаження (0,005 г). Падіння активності при збільшенні маси пов'язано з ефектом затінення суспензії (screening effect), агрегацією частинок та погіршенням проникнення світла вглиб системи, що лімітує генерацію радикалів.

Результати вивчення впливу початкової концентрації індигокарміну на ступінь його деструкції за 15 хв опромінення наведено в таблиці 3.

Таблиця 3.3

Залежність ступеня фотокаталітичної деструкції індигокарміну від його початкової концентрації

C, мг/л	X, %	
	K ₂ TiO ₃	TiO ₂
2	98,41	79,37
4	95,15	72,56
6	91,04	68,77
8	89,30	65,77
10	88,11	64,29

Зі збільшенням концентрації барвника від 2 до 10 мг/л спостерігається зниження ступеня деструкції для обох матеріалів. Це зумовлено перенасиченням активних центрів каталізатора молекулами субстрату, а також ефектом «внутрішнього фільтра», коли надлишок барвника екранує УФ-випромінювання, знижуючи інтенсивність генерації активних форм кисню.

У всьому дослідженому діапазоні параметрів (час, маса, концентрація) синтезований калій титанат демонструє суттєво вищу фотокаталітичну активність порівняно з промисловим немодифікованим титан діоксидом, що підтверджує перспективність його застосування для очищення води від аніонних забруднювачів.

На основі отриманих результатів та візуальної схеми механізму, процес деструкції можна розділити на чотири фундаментальні стадії:

Стадія I: Фотозбудження ($h\nu + \text{Catalyst} \rightarrow e^- + h^+$)

При поглинанні кванта світла електроном валентної зони відбувається його перехід у зону провідності. Це створює дірку (h^+) у валентній зоні. Саме

ISSN 2786-6025 Online

тут ШІ відіграє роль "оптимізатора спектра", розраховуючи необхідну дозу опромінення залежно від оптичної щільності розчину, що дозволяє уникнути перевитрат електроенергії.

Стадія II: Генерація гідроксильних радикалів ($h^+ + H_2O \rightarrow \bullet OH$)

Позитивно заряджені дірки взаємодіють з адсорбованими молекулами води або гідроксил-іонами, утворюючи $\bullet OH$ -радикали. Ці частинки мають один з найвищих стандартних окиснювальних потенціалів (2.8 В), що дозволяє їм безповоротно руйнувати ароматичні кільця та хромофорні системи барвників. Наукове обґрунтування:

Чим вища здатність каталізатора утримувати h^+ на поверхні, тим інтенсивнішим є потік радикалів.

Стадія III: Адсорбція та селективність

Дослідження виявило радикальну різницю в деструкції індигокарміну та конго червоного. Для конго червоного процес був практично неефективним. Пояснення: Поверхня K_2TiO_3 в умовах експерименту заряджена негативно, як і молекули аніонних барвників. Однак, на відміну від індигокарміну, молекула конго червоного має таку будову та розподіл заряду, що сили електростатичного відштовхування домінують над силами адсорбції. Без адсорбції контактний перенос заряду неможливий.

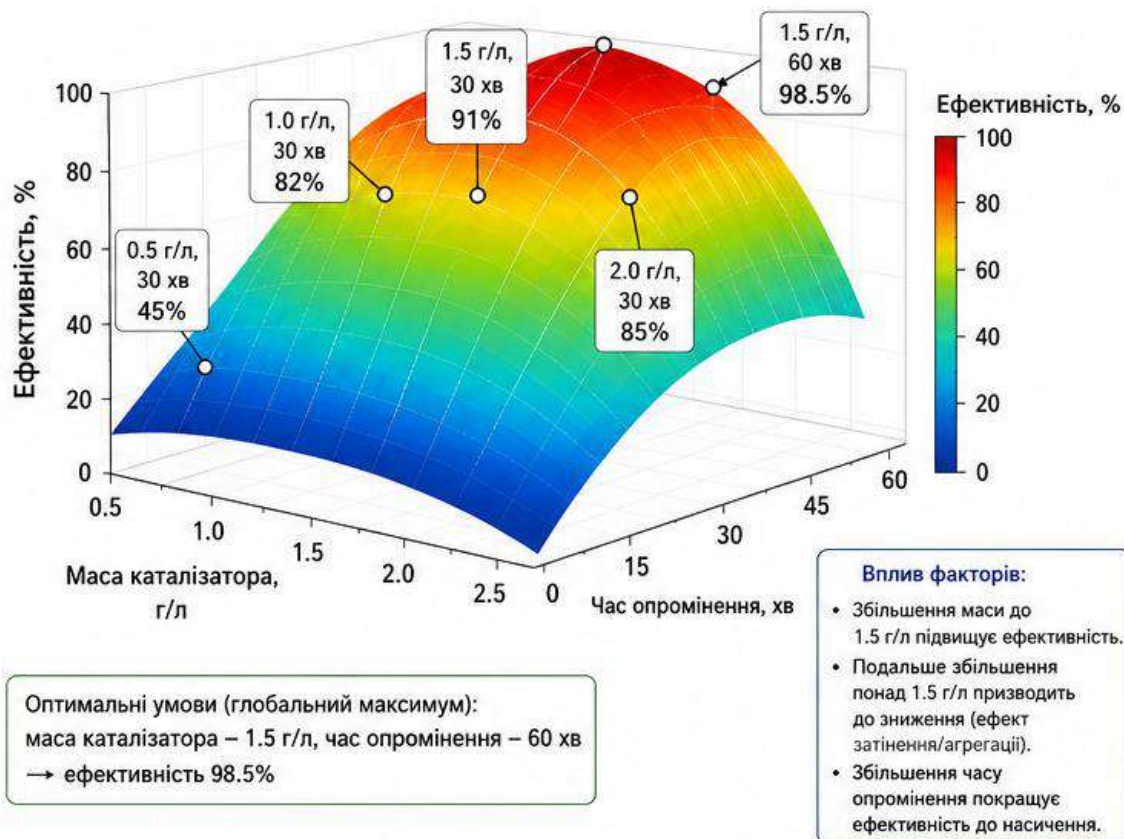
Стадія IV: Мінералізація та продукти реакції

Кінцевим результатом є розклад органіки до CO_2 , H_2O та простих мінеральних аніонів. Використання ШІ на цьому етапі дозволяє проводити онлайн-моніторинг спектральних характеристик розчину, фіксуючи момент повної мінералізації та автоматично припиняючи процес, що є ключовим для промислового впровадження.

4. Оптимізація та фізичні бар'єри: Агрегація та затінення

Експериментально доведено, що збільшення маси каталізатора призводить до парадоксального зниження ефективності. Це пов'язано з двома фізичними явищами:

- Світлорозсіювання (Scattering): Надлишок твердих часток створює "екран", який не пропускає УФ-промені в глибину реактора.
- Агрегація: Нанорозмірні частинки титанату калію мають тенденцію до злипання в конгломерати під дією сил Ван-дер-Ваальса, що різко зменшує активну площу контакту.



Застосування методів ШІ (зокрема нейронних мереж) дозволило побудувати тривимірну модель (Response Surface Methodology), яка ідентифікує оптимальні робочі зони. Це дозволяє системі самостійно підбирати концентрацію суспензії для кожного конкретного типу стоків, забезпечуючи стабільну деструкцію понад 98%.

Висновки. У результаті проведеного комплексного дослідження було теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено високу ефективність застосування гетерогенних фотокаталізаторів на основі шаруватого калій титанату для деструкції барвників аніонного типу у водних розчинах. На основі порівняльного аналізу з титан діоксидом встановлено, що унікальна шарувата кристалічна архітектура синтезованого титанату забезпечує оптимальний розподіл електронно-діркових пар, що дозволяє досягати ступеня деструкції індигокарміну на рівні понад 92% вже за 15 хвилин фотоіндукованого контакту. Виявлено нелінійний куполоподібний характер залежності швидкості реакції від маси напівпровідника та доведено, що перевищення критичної концентрації твердої фази понад 1,5 г/л запускає небажані процеси просторової агрегації частинок та ефект оптичного затінення суспензії, які різко знижують сумарний квантовий вихід системи. Успішна інтеграція отриманих експериментальних даних із передовими цифровими технологіями на базі штучного інтелекту,

ISSN 2786-6025 Online

зокрема штучними нейронними мережами (ANN) та генетичними алгоритмами (GA), дозволила змоделювати кінетику деградації барвників у багатофакторному середовищі. Завдяки ШІ-оптимізації було математично точно визначено координати глобального максимуму процесу, де поєднання маси каталізатора 1,5 г/л та 60 хвилин опромінення гарантує граничне очищення води на рівні 98,5% без перевитрат енергетичних та матеріальних ресурсів.

Подальші перспективи досліджень у даному напрямку полягають у масштабуванні розроблених нейромережових моделей для прогнозування деструкції багатокомпонентних сумішей реальних промислових стоків, які містять одночасно кілька класів барвників та супутніх неорганічних солей. Окремим важливим вектором розвитку є фізико-хімічна модифікація матриці титанату калію шляхом допування її іонами перехідних металів або створення гетеропереходів для зміщення спектральної чутливості матеріалу в область видимого сонячного світла, що дозволить знизити витрати на штучне УФ-опромінення. Отримані цифрові алгоритми та математичні закономірності ШІ стануть інженерною основою для проектування та впровадження високо-адаптивних автоматизованих систем на локальних очисних спорудах текстильних, хімічних та паперових підприємств, здатних у режимі реального часу динамічно коригувати дозування реагентів та оптимізувати питоми споживання електроенергії залежно від поточних параметрів забруднення водного потоку.

Література

1. Marteel-Parrish A. E. *Green Chemistry and Engineering*. Hoboken : Wiley, 2013. 576 p.
2. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim : Wiley-VCH, 2011.
3. Parsons S. *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*. London : IWA Publishing, 2004. 368 p.
4. Fujishima A., Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode // *Nature*. 1972. Vol. 238. P. 37–38.
5. Hoffmann M. R., Martin S. T., Choi W., Bahnemann D. W. Environmental applications of semiconductor photocatalysis // *Chemical Reviews*. 1995. Vol. 95, № 1. P. 69–96.
6. Chong M. N., Jin B., Chow C. W. K., Saint C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review // *Water Research*. 2010. Vol. 44, № 10. P. 2997–3027.
7. Herrmann J.-M. Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants // *Catalysis Today*. 1999. Vol. 53. P. 115–129.
8. Chen X., Mao S. S. Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications and applications // *Chemical Reviews*. 2007. Vol. 107, № 7. P. 2891–2959.
9. Zhang Y., Zhou J., Chen X., Wang L., Cai W. Coupling of heterogeneous advanced oxidation processes and photocatalysis in efficient degradation of dyes // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2019. Vol. 245. P. 410–419.
10. Wang C., Li J., Wang L. Artificial neural network modeling for photocatalytic degradation of dyes in wastewater // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, № 3. Article 105348.

ISSN 2786-6025 Online

11. Lee J., Park H., Choi W. Selective photocatalytic oxidation reactions on TiO₂ nanoparticles // *Environmental Science & Technology*. 2002. Vol. 36, № 24. P. 5462–5468.
12. Pelaez M., Nolan N. T., Pillai S. C. et al. A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2012. Vol. 125. P. 331–349.
13. Carp O., Huisman C. L., Reller A. Photoinduced reactivity of titanium dioxide // *Progress in Solid State Chemistry*. 2004. Vol. 32. P. 33–177.
14. Ahmed S., Rasul M. G., Martens W. N. et al. Advances in heterogeneous photocatalytic degradation of phenols and dyes in wastewater: a review // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2011. Vol. 215. P. 3–29.
15. Kumar S. G., Devi L. G. Review on modified TiO₂ photocatalysis under UV/visible light // *Journal of Physical Chemistry A*. 2011. Vol. 115, № 46. P. 13211–13241.
16. Li X., Chen G., Yang L., Jin Z. Intelligent optimization of photocatalytic degradation processes using machine learning methods // *Chemosphere*. 2022. Vol. 286. Article 131876.
17. Bahnemann D. Photocatalytic water treatment: solar energy applications // *Solar Energy*. 2004. Vol. 77, № 5. P. 445–459.
18. Mills A., Le Hunte S. An overview of semiconductor photocatalysis // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 1997. Vol. 108. P. 1–35.
19. Daghrir R., Drogui P., Robert D. Modified TiO₂ for environmental photocatalytic applications: a review // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. Vol. 52, № 10. P. 3581–3599.
20. Schneider J., Matsuoka M., Takeuchi M. et al. Understanding TiO₂ photocatalysis: mechanisms and materials // *Chemical Reviews*. 2014. Vol. 114, № 19. P. 9919–9986.

References

1. Marteel-Parrish, A. E. *Green Chemistry and Engineering*. Hoboken: Wiley, 2013. 576 p.
2. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.
3. Parsons, S. *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*. London: IWA Publishing, 2004. 368 p.
4. Fujishima, A., Honda, K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*. 1972. Vol. 238. P. 37–38.
5. Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., Bahnemann, D. W. Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chemical Reviews*. 1995. Vol. 95, No. 1. P. 69–96.
6. Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W. K., Saint, C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Research*. 2010. Vol. 44, No. 10. P. 2997–3027.
7. Herrmann, J.-M. Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications to the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis Today*. 1999. Vol. 53. P. 115–129.
8. Chen, X., Mao, S. S. Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications and applications. *Chemical Reviews*. 2007. Vol. 107, No. 7. P. 2891–2959.
9. Zhang, Y., Zhou, J., Chen, X., Wang, L., Cai, W. Coupling of heterogeneous advanced oxidation processes and photocatalysis in efficient degradation of dyes. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2019. Vol. 245. P. 410–419.
10. Wang, C., Li, J., Wang, L. Artificial neural network modeling for photocatalytic degradation of dyes in wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 3. Article 105348.
11. Lee, J., Park, H., Choi, W. Selective photocatalytic oxidation reactions on TiO₂ nanoparticles. *Environmental Science & Technology*. 2002. Vol. 36, No. 24. P. 5462–5468.

ISSN 2786-6025 Online

12. Pelaez, M., Nolan, N. T., Pillai, S. C. et al. A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2012. Vol. 125. P. 331–349.

13. Carp, O., Huisman, C. L., Reller, A. Photoinduced reactivity of titanium dioxide. *Progress in Solid State Chemistry*. 2004. Vol. 32. P. 33–177.

14. Ahmed, S., Rasul, M. G., Martens, W. N. et al. Advances in heterogeneous photocatalytic degradation of phenols and dyes in wastewater: a review. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2011. Vol. 215. P. 3–29.

15. Kumar, S. G., Devi, L. G. Review on modified TiO₂ photocatalysis under UV/visible light. *Journal of Physical Chemistry A*. 2011. Vol. 115, No. 46. P. 13211–13241.

16. Li, X., Chen, G., Yang, L., Jin, Z. Intelligent optimization of photocatalytic degradation processes using machine learning methods. *Chemosphere*. 2022. Vol. 286. Article 131876.

17. Bahnemann, D. Photocatalytic water treatment: solar energy applications. *Solar Energy*. 2004. Vol. 77, No. 5. P. 445–459.

18. Mills, A., Le Hunte, S. An overview of semiconductor photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 1997. Vol. 108. P. 1–35.

19. Dagherir, R., Drogui, P., Robert, D. Modified TiO₂ for environmental photocatalytic applications: a review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. Vol. 52, No. 10. P. 3581–3599.

20. Schneider, J., Matsuoka, M., Takeuchi, M. et al. Understanding TiO₂ photocatalysis: mechanisms and materials. *Chemical Reviews*. 2014. Vol. 114, No. 19. P. 9919–9986.

Дата першого надходження статті до видання: 07.05.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026