



Copyright (c) 2026 Olena Kiziun, Valery Zazhigalov, Igor Ymnov, Inna Trus

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).**Олена Кізиун, Валерій Зажигалов, Ігор Умнов, Інна Трус****ВПЛИВ УМОВ ПРОВЕДЕННЯ ФОТОКАТАЛІТИЧНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ  
ПАРАЦЕТАМОЛУ ТА ДИКЛОФЕНАКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ  $\text{TiO}_2$  І  $\text{ZnO}$** **Olena Kiziun, Valery Zazhigalov, Igor Ymnov, Inna Trus****THE INFLUENCE OF PHOTOCATALYTIC DEGRADATION CONDITIONS OF  
PARACETAMOL AND DICLOFENAC USING  $\text{TiO}_2$  AND  $\text{ZnO}$** **АНОТАЦІЯ**

**Мета роботи.** Дослідження фотокаталітичної деградації парацетамолу (ПЦ) та диклофенаку (ДФ) у водних розчинах за дії оксиду цинку ( $\text{ZnO}$ ) та діоксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ), визначення впливу рН та дози каталізатора на швидкість деструкції, а також порівняння ефективності різних фотокаталітичних систем.

**Методологія.** Для визначення оптимальних умов проведення фотокаталітичних процесів були досліджені наступні параметри: вплив рН робочих розчинів та концентрацій каталізаторів. Деградацію досліджували в умовах УФ-опромінення. Процес моделювався кінетикою псевдо-першого порядку. На основі експериментальних даних були розраховані константи швидкості реакції ( $k$ ) та періоди напіврозпаду ( $t_{1/2}$ ) для кожного варіанта умов.

**Наукова новизна.** Вперше проведено порівняльний аналіз деградації ПЦ та ДФ в однакових умовах із застосуванням двох найпоширеніших фотокаталізаторів –  $\text{ZnO}$  та  $\text{TiO}_2$  – що дозволило встановити відмінності у їхній реакційній здатності щодо різних класів фармацевтичних забруднювачів. Визначено закономірності впливу рН середовища на фотокаталітичну активність  $\text{TiO}_2$  і  $\text{ZnO}$  для ПЦ та ДФ, що демонструє чітку залежність: зниження рН підсилює деградацію в більшій мірі для  $\text{TiO}_2$ , ніж для  $\text{ZnO}$ . Виявлено, що  $\text{TiO}_2$  проявляє значно вищу активність у кислому середовищі, забезпечуючи практично повне знешкодження ПЦ вже при концентрації каталізатора  $0,5 \text{ г/дм}^3$ , що дозволяє оптимізувати технологічні умови фотокаталітичного очищення стічних вод. Встановлено різницю у кінетичній поведінці двох органічних забруднювачів, де ПЦ деградує швидше, ніж ДФ у всіх експериментальних умовах, що вказує на різну стійкість структур молекул та їхню реакційну здатність у фотокаталітичних процесах.

**Висновки.** Встановлено, що ПЦ розкладається швидше за ДФ незалежно від типу фотокаталізатора. Найвищу ефективність забезпечує  $\text{TiO}_2$  у кислому середовищі (рН 5), тоді як  $\text{ZnO}$  демонструє помірну активність. Зниження рН та збільшення маси каталізатора інтенсифікують процес деградації фармацевтичних сполук.

**Ключові слова:** фотокаталіз, фармацевтичні забруднювачі, каталізатор, парацетамол, диклофенак, деградація

**ABSTRACT**

**Purpose of the work.** To investigate the photocatalytic degradation of paracetamol (PAR) and diclofenac (DCF) in aqueous solutions under the action of zinc oxide ( $\text{ZnO}$ ) and titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ); to determine the influence of pH and catalyst dosage on the degradation rate; and to compare the efficiency of different photocatalytic systems.

**Methodology.** To determine the optimal conditions for the photocatalytic processes, the following parameters were investigated: the effect of the pH of the working solutions and the concentrations of the catalysts. Degradation was carried out under UV irradiation, and the process was modelled using pseudo-first-order kinetics. Based on experimental data, reaction rate constants ( $k$ ) and half-life periods ( $t_{1/2}$ ) were calculated for each set of conditions.

**Scientific novelty.** For the first time, a comparative analysis of PAR and DCF degradation under identical conditions using two of the most widespread photocatalysts –  $\text{ZnO}$  and  $\text{TiO}_2$  – was conducted, enabling the identification of differences in their reactivity toward distinct classes of pharmaceutical pollutants. The study established regularities in the influence of pH on the photocatalytic activity of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{ZnO}$  for both PAR and DCF, demonstrating a clear trend: lowering pH enhances degradation more significantly for  $\text{TiO}_2$  than for  $\text{ZnO}$ . It was found that  $\text{TiO}_2$  exhibits substantially higher activity in acidic media, enabling nearly complete PAR removal even at a catalyst concentration of  $0.5 \text{ g/dm}^3$ ,

which provides a basis for optimizing photocatalytic wastewater treatment conditions. Differences in the kinetic behaviour of the two pollutants were identified: PAR consistently degraded faster than DCF under all experimental conditions, indicating variations in molecular stability and reactivity during photocatalytic processes.

**Conclusions.** PAR degraded faster than DCF regardless of the photocatalyst type. The highest degradation efficiency was achieved with  $\text{TiO}_2$  in acidic medium (pH 5), while  $\text{ZnO}$  showed moderate activity. Lowering pH and increasing catalyst dosage intensified the degradation of pharmaceutical compounds.

**Key words:** photocatalysis, pharmaceutical pollutants, catalyst, paracetamol, diclofenac, degradation

## Вступ

Глобальне погіршення якості водних ресурсів, викликане значним зростанням людської діяльності, індустріалізацією та використанням великої кількості хімічних речовин, стало однією з найважливіших екологічних проблем сьогодення. Водні системи постійно забруднюються новими класами хімічних сполук, відомих як мікрозабруднювачі, або контамінанти, що викликають особливе занепокоєння (emerging contaminants, ECs). Ці забруднювачі характеризуються низькими концентраціями (від  $\text{нг/дм}^3$  до  $\text{мкг/дм}^3$ ), значною стійкістю, біоаккумуляцією та потенційно шкідливим впливом на екосистеми та здоров'я людини (Hofman & Teo, 2021).

Серед ECs особливе місце посідають фармацевтичні субстанції, які широко застосовуються у медицині для лікування, діагностики та профілактики захворювань. До найпоширеніших належать такі анальгетики та протизапальні засоби, як парацетамол (ПЦ) та диклофенак (ДФ) (Lee et al., 2020). Ці речовини регулярно потрапляють у навколишнє середовище, переважно через стічні води, скиди фармацевтичних підприємств та екскрецію з організму людини чи тварин, часто виявляючись у поверхневих, ґрунтових і навіть питних водах. Наприклад, парацетамол є одним із найчастіше зафіксованих фармацевтичних забруднювачів у ґрунтових водах, особливо на урбанізованих та промислових об'єктах. Незважаючи на те, що концентрації цих препаратів зазвичай низькі, їхня стійкість до традиційних методів очищення стічних вод (таких як коагуляція, осадження та біологічне очищення) призводить до їх постійної присутності в природних водоймах. Це вимагає розробки інноваційних та ефективних систем для їхнього повного видалення та мінералізації.

Одним із найбільш перспективних напрямків для подолання проблеми стійких органічних забруднювачів є передові процеси окиснення (Advanced Oxidation Processes, AOPs). Ці методи ґрунтуються на генерації високореактивних форм кисню, зокрема гідроксильних радикалів ( $\cdot\text{OH}$ ), які швидко та неселективно руйнують органічні сполуки, перетворюючи їх на нешкідливі продукти, такі як  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$ . Серед AOPs, гетерогенний фотокаталіз є екологічно чистою (зеленою), економічною та високоефективною технологією (Li et al., 2023). В основі фотокаталізу лежить здатність напівпровідникових каталізаторів поглинати світлове випромінювання (зазвичай UV) з енергією, що перевищує їхню ширину забороненої зони, що призводить до утворення електронно-діркових пар ( $e^-/h^+$ ). Ці носії заряду мігрують на поверхню каталізатора, де ініціюють ланцюг радикальних реакцій, що призводять до деструкції забруднювачів (Samraio et al., 2023).

Основними об'єктами дослідження у гетерогенному фотокаталізі є оксидні напівпровідники, серед яких найширше застосування знайшли діоксид титану ( $\text{TiO}_2$ ) та оксид цинку ( $\text{ZnO}$ ).  $\text{TiO}_2$ , зокрема у фазі анатазу, високо цінується завдяки своїй хімічній стабільності, нетоксичності, корозійній стійкості та високій окиснювальній ефективності, що робить його ключовим матеріалом для очищення води. Однак,  $\text{TiO}_2$  має значну ширину забороненої зони (3,2 eV) (Tanos et al., 2024), що обмежує його активацію лише ультрафіолетовим (УФ) світлом, а швидка рекомбінація електронно-діркових пар знижує загальну ефективність фотокаталітичного процесу (Samraio et al., 2023).

Оксид цинку ( $\text{ZnO}$ ) є ще одним перспективним напівпровідником, який має пряму широку заборонену зону (3,37 eV) (Baibara et al., 2021) і також є нетоксичним та економічно вигідним (його виробництво

може бути значно дешевшим порівняно з  $\text{TiO}_2$ ) та перспективним матеріалом для видалення полютантів (Vica et al., 2020).  $\text{ZnO}$  демонструє високу початкову активність, часто завдяки наявності поверхневих дефектів (кисневих вакансій), які сприяють утворенню активних радикалів. Однак його застосування обмежене через часткову розчинність у слабкокислому середовищі ( $\text{pH} < 6$ ), що може призводити до дезактивації поверхні та втрати каталізатора.

Ефективність фотокаталітичного процесу критично залежить від операційних параметрів, таких як  $\text{pH}$  середовища та концентрація каталізатора. Зміна  $\text{pH}$  впливає на поверхневий заряд напівпровідника (наприклад,  $\text{TiO}_2$  та  $\text{ZnO}$ ), ступінь іонізації молекул забруднювача та швидкість утворення радикалів. У свою чергу, концентрація каталізатора визначає кількість доступних активних центрів, але її надмірне збільшення може призводити до екранування UV-випромінювання та розсіювання світла, що знижує загальну швидкість реакції (Tanos et al., 2024). Таким чином, оптимізація цих параметрів є ключовою для розробки оптимальних технологій очищення води.

Мета цієї роботи полягала у дослідженні фотокаталітичної деградації двох важливих забруднювачів фармацевтичного походження – парацетамолу та диклофенаку – у водних розчинах за дії  $\text{ZnO}$  та  $\text{TiO}_2$ .

### Матеріали та методи дослідження

В роботі використані методи фотометричного аналізу, потенціометричний та кінетичний методи. Фотометричний аналіз використовували для визначення концентрації диклофенаку та парацетамолу у водних розчинах. Потенціометричний метод застосовували для вимірювання  $\text{pH}$  досліджуваних розчинів. Кінетичний метод – для оцінювання швидкості фотокаталітичної деструкції та визначення кінетичних параметрів процесу.

У дослідженні розглянуто дві фармацевтичні сполуки – парацетамол ( $\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}_2$ , IUPAC: N-(4-гідроксифеніл)ацетамід) та диклофенак ( $\text{C}_{14}\text{H}_{11}\text{Cl}_2\text{NO}_2$ , IUPAC: 2-[2-(2,6-дихлораніліно)феніл]оцтова кислота).

Усі експериментальні дослідження проводили у кварцових реакційних кюветах

або фотолізних реакторах із забезпеченням стабільного УФ-опромінення, контрольованих параметрів перемішування та температури. Для підтримання постійної температури використовували циркуляційний термостат, а перемішування забезпечували магнітні мішалки зі швидкістю 400–600 об/хв. Вибір таких умов пояснюється необхідністю рівномірного розподілу фотокаталізатора у водній фазі та запобігання його седиментації, що могло б впливати на кінетику процесу.

Вимірювання оптичної густини проводили на двопроменевому спектрофотометрі (Shimadzu UV-1800) у діапазоні 190–800 нм з використанням кварцових кювет товщиною 1 см, об'ємом 2 мл, та автоматичною корекцією фону. Значення  $\text{pH}$  робочих розчинів контролювали за допомогою  $\text{pH}$  метра (Іономір I-160M).

Об'єм робочого розчину, що містив фармацевтичну сполуку, становив 100 мл. Реакційну суміш опромінювали джерелом ультрафіолетового випромінювання (Phillips HPA 150). Розчини відбирали у визначені моменти часу та негайно фільтрували крізь мембрани 0,22 мкм, щоб усунути вплив суспендованого фотокаталізатора на оптичне поглинання.

Для парацетамолу використовували довжину хвилі  $\lambda = 275$  нм, для диклофенаку –  $\lambda = 276$  нм, оскільки саме на цих довжинах спостерігався максимальний пік поглинання.

Для  $\text{ZnO}$  аналізували чотири комбінації умов для кожної сполуки:  $\text{pH}$  6 і 8 при концентраціях 0,25 та 0,50 г/дм<sup>3</sup>. Вибір такого діапазону  $\text{pH}$  пов'язаний з обмеженою стабільністю  $\text{ZnO}$  у більш кислому середовищі, де можливе часткове розчинення каталізатора.

Для  $\text{TiO}_2$  детально проаналізовано по дві комбінації умов для кожного з модельних забрудників. Для парацетамолу розглянуто  $\text{pH}$  5 при концентрації  $\text{TiO}_2$  0,25 г/дм<sup>3</sup> і  $\text{pH}$  7 при 0,50 г/дм<sup>3</sup>. Для диклофенаку –  $\text{pH}$  5,  $\text{TiO}_2$  0,50 г/дм<sup>3</sup> та  $\text{pH}$  7,  $\text{TiO}_2$  1,00 г/дм<sup>3</sup>.

Початкова концентрація у всіх серіях парацетамолу та диклофенаку становила 10 мг/дм<sup>3</sup>.

Ефективність вилучення ПЦ та ДФ розраховували за формулою:

$$A = \frac{C_{\text{поч}}(\text{ПЦ/ДФ}) - C_{\text{зал}}(\text{ПЦ/ДФ})}{C_{\text{поч}}(\text{ПЦ/ДФ})} \cdot 100\%$$

де  $C_{\text{поч(ПЦ/ДФ)}}$  – початкова концентрація ПЦ чи ДФ в розчині, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{зал(ПЦ/ДФ)}}$  – залишкова концентрація ПЦ чи ДФ в розчині, мг/дм<sup>3</sup>.

Період напіврозпаду, тобто час з який початкова концентрація зменшується вдвічі, розраховували за формулою:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0,693}{k},$$

де  $k$  – константа швидкості реакції першого порядку.

Усі експериментальні вимірювання проводили у триразовій повторюваності, результати подано у вигляді середнього арифметичного значення. Обробку експериментальних даних та побудову кінетичних залежностей здійснювали з використанням стандартних статистичних пакетів MS Excel.

### Результати дослідження та обговорення

Кількісні результати фотокаталітичної деградації ПЦ та ДФ у водних розчинах представлені у вигляді залишкової концентрації з часом. Ці дані є основою для аналізу кінетики процесу, який моделювали за псевдо-першим порядком. Усі серії експериментів розпочиналися з початкової концентрації обох фармацевтичних забруднювачів 10 мг/дм<sup>3</sup>. Дослідження проводилися за різних умов, щоб визначити вплив двох ключових параметрів: типу каталізатора (ZnO або TiO<sub>2</sub>) та його дози, а також рН середовища. Зокрема, для ZnO було проаналізовано умови при рН 6 та 8, а для TiO<sub>2</sub> – при рН 5 та 7, з різними концентраціями каталізаторів (від 0,25 до 1,00 г/дм<sup>3</sup>). Детальна інформація про зміну залишкової концентрації парацетамолу та диклофенаку, що вимірювалася кожні 10 хвилин протягом 60 хвилин фотокаталітичної деградації в присутності ZnO та TiO<sub>2</sub> за різних значень рН і маси каталізатора, узагальнена у таблиці 1.

Практична ефективність ZnO значною мірою залежить від рН розчину, оскільки оксид цинку є частково розчинним у слабкислому середовищі. Тому для коректного порівняння було обрано два значення рН – 6 та 8, що відображають відповідно умови, близькі до межі стабільності ZnO та умови нейтрального

середовища. Паралельно досліджували вплив концентрації каталізатора 0,25 г/дм<sup>3</sup> і 0,50 г/дм<sup>3</sup>.

Аналіз цих даних демонструє, що ZnO проявляв високу активність на початкових стадіях деградації, як парацетамолу, так і диклофенаку. Це може бути пов'язано з наявністю значної кількості поверхневих дефектів, зокрема вакансій кисню, які теоретично здатні знижувати швидкість рекомбінації електронів і дірок, тим самим підвищуючи утворення активних радикалів (Janotti et al., 2007). Хоча у межах проведеного дослідження такі дефекти безпосередньо не визначалися, їхній можливий вплив розглядається як одне з потенційних пояснень отриманих результатів. Проте через відносно більший розмір кристалітів (~26 нм) (Sahai, & Goswami, 2014) активність ZnO зменшувалася при подовженні реакції, оскільки зменшувалася кількість доступних активних центрів після покриття поверхні проміжними продуктами деградації та частковою втратою каталізатора в умовах рН 6, де ZnO є частково розчинним. За рН 8 стабільність каталізатора була дещо вищою, але ефективність у цілому меншою через зниження адсорбційної взаємодії.

Для парацетамолу у присутності ZnO спостерігалася швидка деградація в перші 20-30 хв опромінення, після чого швидкість процесу знижувалася (рис. 1а, 3а), що відповідає літературним даним щодо обмежень ZnO в умовах нейтрального рН. Найвищу активність ZnO спостерігали при рН 7 і концентрації каталізатора 0,5 г/дм<sup>3</sup>.

У випадку диклофенаку активність ZnO була істотно нижчою (рис. 2а, 4а). Швидкість деградації зменшувалася при рН < 6 через підвищення розчинності ZnO, що призводило до втрати маси каталізатора. Також зниження активності можна пояснити хімічною структурою диклофенаку – бензолне кільце з двома атомами Cl та аміногрупою, яке з'єднане з арильним залишком через атом нітрогену, що значно обмежує адсорбцію на поверхні каталізатора і робить молекулу стійкішою до окиснення.

Під час попередньої адсорбції, що проводилася до опромінення для встановлення рівноваги системи, фіксували адсорбцію парацетамолу на поверхні ZnO на рівні 5–10 %. У випадку диклофенаку ці

значення були нижчими – 3–6 %, що може бути пов'язано також з більш складною структурою молекули (як було це відмічено вище). Після увімкнення УФ-джерела

активність ZnO зростала, і процес переходив у фотокаталітичну стадію з експоненціальним зниженням концентрації у часі.

Таблиця 1

Зміна залишкової концентрації парацетамолу та диклофенаку під час фотокаталітичної деградації у присутності ZnO та TiO<sub>2</sub> за різних значень рН і маси катализатора

Катализатор	ZnO								TiO <sub>2</sub>				
рН	6		8		6		8		5	7	5	7	
м, г	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,5	1	
Речовина	ПЦ				ДФ				ПЦ		ДФ		
t, хв	Залишкова концентрація, мг/дм <sup>3</sup>												
0	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
10	5,488	4,660	6,200	5,074	7,806	7,408	8,434	7,788	4,274	3,329	6,703	7,400	
20	3,012	2,172	3,844	2,592	6,092	5,488	7,110	6,066	1,827	1,108	4,493	5,480	
30	1,654	1,011	2,382	1,333	4,757	4,066	5,987	4,727	0,781	0,369	3,012	4,060	
40	0,910	0,470	1,476	0,690	3,712	3,012	5,043	3,685	0,334	0,123	2,019	3,010	
50	0,501	0,218	0,916	0,360	2,899	2,231	4,249	2,877	0,143	0,041	1,353	2,230	
60	0,276	0,101	0,568	0,189	2,264	1,653	3,586	2,243	0,061	0,014	0,907	1,650	

Примітка: ПЦ – парацетамол, ДФ – диклофенак

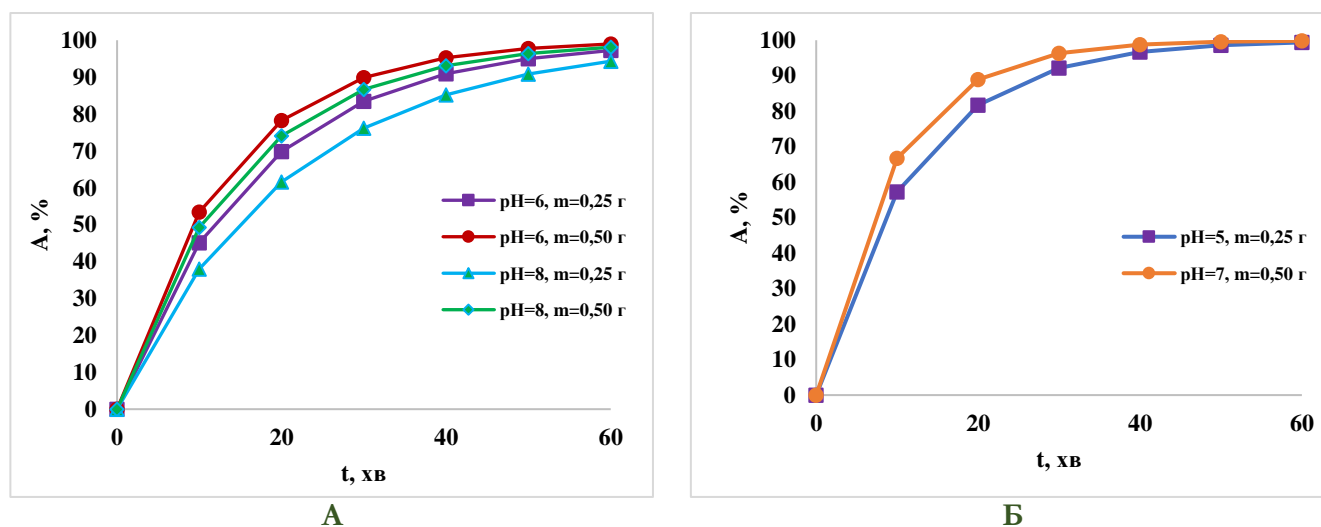


Рис. 1. Ефективність фотокаталітичної деградації парацетамолу при застосуванні катализаторів залежно від часу. А – ZnO; Б – TiO<sub>2</sub>

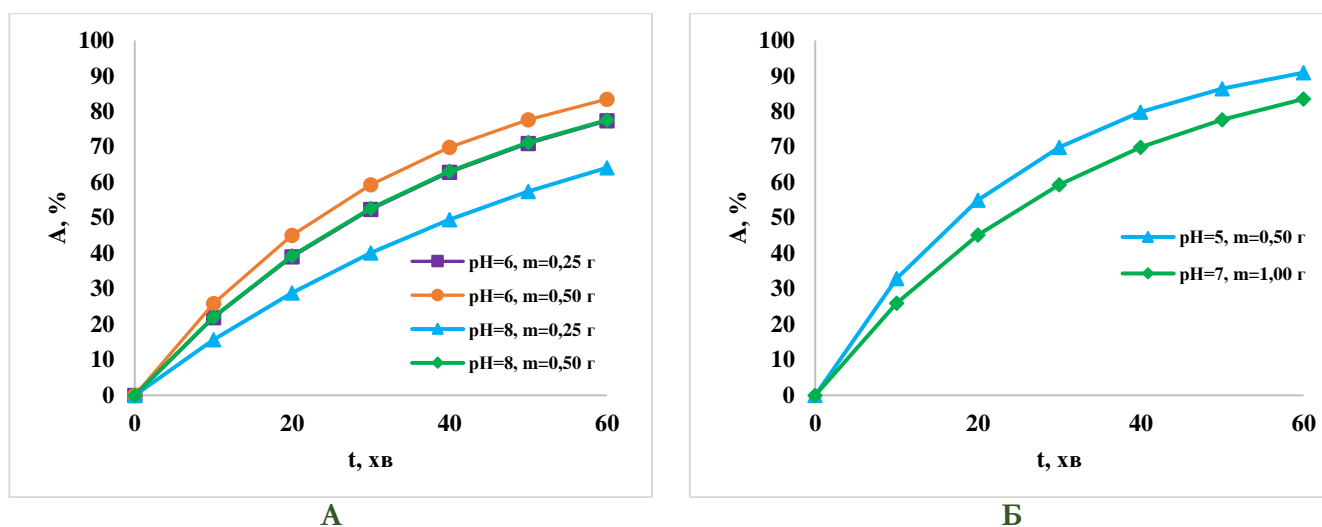


Рис. 2. Ефективність фотокаталітичної деградації диклофенаку при застосуванні катализаторів залежно від часу. А – ZnO; Б – TiO<sub>2</sub>

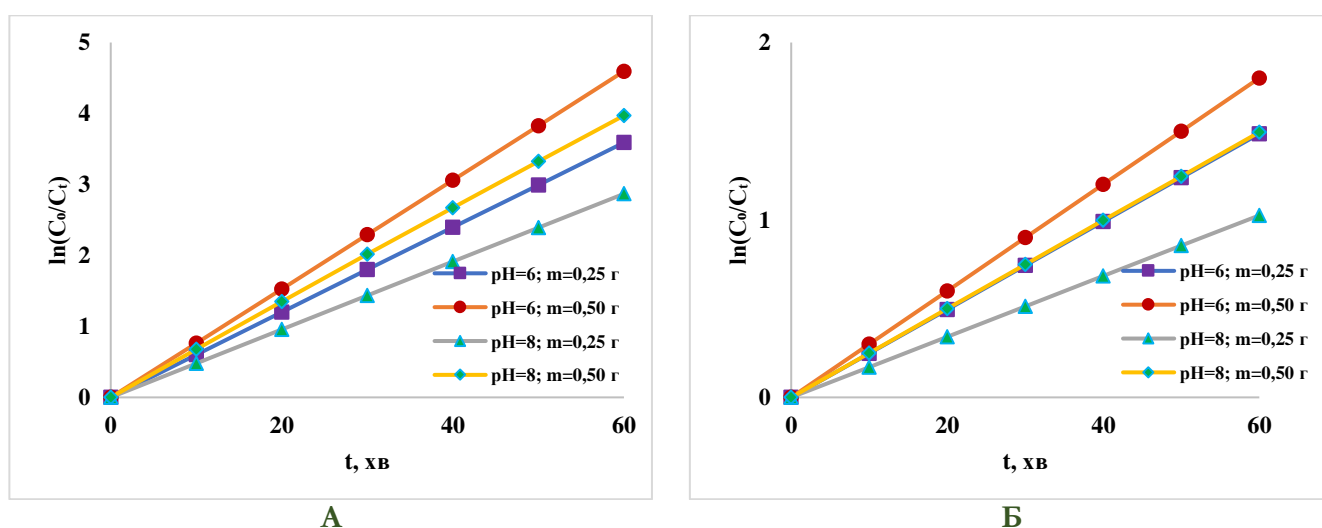


Рис. 3. Кінетична залежність ( $\ln(C_0/C_n)$ ) від часу фотокаталітичної деградації парацетамолу при застосуванні катализаторів залежно від часу. А – ZnO; Б – TiO<sub>2</sub>

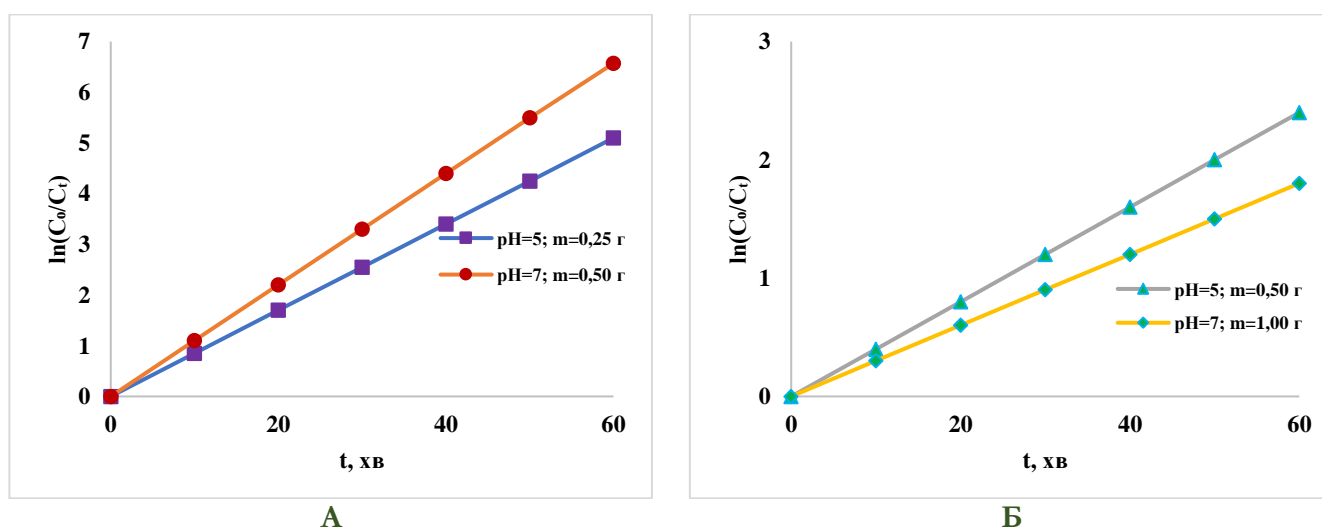


Рис. 4. Кінетична залежність ( $\ln(C_0/C_n)$ ) від часу фотокаталітичної деградації диклофенаку при застосуванні катализаторів залежно від часу. А – ZnO; Б – TiO<sub>2</sub>

Деградація парацетамолу на ZnO відбувається значно швидше та має більш крутий спад концентрації у перші 20–30 хв реакції. Диклофенак, навпаки, демонструє плавний та розтягнутий у часі профіль деградації, що є типовим для ароматичних хлорвмісних сполук. При рН 8 процеси деградації обох забрудників помітно сповільнюються порівняно з рН 6, що підтверджує вирішальний вплив кислотності на стабільність та активність ZnO.

Додатковим фактором, який впливає на фотокаталітичну активність ZnO, є часткове розчинення каталізатора при нижчих значеннях рН. Протягом експериментів при рН 6 у системі фіксували невеликі концентрації  $Zn^{2+}$ , що зростали зі збільшенням часу опромінення та дозування каталізатора. Такий ефект може сприяти дезактивації частини поверхні ZnO та зменшенню числа активних центрів на пізніх стадіях реакції. При рН 8 подібного явища практично не спостерігалось, що пояснюється більшою стабільністю оксиду цинку у нейтральному середовищі.

Отже, фотокаталітичні властивості оксиду цинку визначаються його енергетичною структурою, розміром кристалітів і поверхневою активністю, яка значною мірою залежить від рН середовища. Проведені дослідження продемонстрували, що ZnO проявляє високу початкову фотокаталітичну активність у деградації парацетамолу та має помірну активність щодо диклофенаку, що пов'язано з обмеженнями поверхневої адсорбції та хімічною стійкістю молекули диклофенаку. Тобто процес фотодеструкції диклофенаку проходить через утворення більш стійких продуктів реакції. Даний факт підтверджують результати зміни спектрів УФ-поглинання фармацевтичних сполук у присутності ZnO зразка. Якщо для ПЦ характерно згладжування спектрів поглинання з часом опромінення, то для ДФ зменшення інтенсивності головного спектру іде з появою нових максимумів спектрів з зсувом в інфрачервону зону.

У всіх експериментах використовували ZnO із середнім розміром кристалітів 26,1 нм, що забезпечувало значну кількість поверхневих дефектів типу кисневих вакансій, які зменшують швидкість

рекомбінації електронів і дірок (Sahai, & Goswami, 2014).

Таким чином, проведений аналіз показав, що оптимальними умовами застосування ZnO для деградації парацетамолу є рН 6 та концентрація каталізатора 0,50 г/дм<sup>3</sup>, тоді як для диклофенаку найкращі результати були отримані при тих же значеннях рН, але з дещо помірними швидкостями деградації. Це підтверджує, що вибір умов рН та дози ZnO має ключове значення для ефективності фотокаталітичного очищення води від фармацевтичних мікрополітантів.

На наступному етапі досліджень для деградації ПЦ та ДФ було використано TiO<sub>2</sub>.

Фотокаталітична активність діоксиду титану значною мірою залежить від фазового складу, морфології та умов проведення реакції, зокрема від значення рН і концентрації каталізатора в суспензії. Використаний у роботі TiO<sub>2</sub> (фаза анатаз, середній розмір кристалітів близько 9,3–9,4 нм) характеризується високою питомою поверхнею та стабільною фотокаталітичною активністю у діапазоні рН від слабких до нейтральних значень (Al Saleh, 2025). Проведені дослідження фотокаталітичної деградації парацетамолу та диклофенаку показали, що саме анатаз TiO<sub>2</sub> забезпечує найвищу швидкість руйнування фармацевтичних забрудників. Ефективність фотокаталітичної деградації парацетамолу при застосуванні TiO<sub>2</sub> залежно від часу опромінення візуально представлена на рисунку 16, тоді як аналогічна ефективність для диклофенаку відображена на рисунку 26.

TiO<sub>2</sub> забезпечував швидку деградацію ПЦ у всіх досліджених умовах. Найвища ефективність – при рН 7 і масі 0,50 г/дм<sup>3</sup>, де концентрація ПЦ за 60 хв знижувалася майже на два порядки (рис. 16, 36). Після 20–30 хв реакція сповільнювалася через утворення проміжних продуктів окиснення.

ДФ деградував повільніше, ніж ПЦ, однак TiO<sub>2</sub> проявив значно вищу ефективність порівняно із ZnO (рис. 26, 46). Найкращі результати – при рН 5–7 і дозі 1,00 г/дм<sup>3</sup>, хоча підвищення рН до 7 певною мірою знижувало адсорбцію через утворення аніонної форми ДФ.

Як свідчать результати, TiO<sub>2</sub> є високоефективним фотокаталізатором для

деградації парацетамолу у досліджуваному діапазоні рН та концентрацій. Для парацетамолу встановлені вищі значення констант швидкості порівняно з диклофенаком. Наприклад, за 60 хвилин опромінення концентрація парацетамолу при рН 7 і  $\text{TiO}_2$  0,50 г/дм<sup>3</sup> зменшувалась майже на два порядки, що підтверджує його високу ефективність. У випадку диклофенаку, структура якого є більш стійкою до окиснення, швидкість degradaції була нижчою, проте  $\text{TiO}_2$  також активно руйнує цю хлорвмісну сполуку. Незважаючи на загальну нижчу швидкість degradaції диклофенаку,  $\text{TiO}_2$  забезпечує більш глибоку деструкцію, ніж  $\text{ZnO}$ .

Порівнюючи ефективність  $\text{ZnO}$  і  $\text{TiO}_2$ , можна зробити висновок, що оксид цинку проявляє високу початкову активність, однак швидше втрачає ефективність у слабкокислих умовах.  $\text{TiO}_2$ , навпаки, проявляє стабільну активність у широкому діапазоні рН та забезпечує глибшу мінералізацію. Проте  $\text{ZnO}$  залишається перспективним каталізатором для швидкого руйнування фармацевтичних забрудників у випадках, де потрібна висока інтенсивність окиснення на початкових стадіях процесу.

Поведінка органічної молекули у системі визначається не лише кількістю утворених радикалів, але й поверхневими характеристиками  $\text{TiO}_2$ . Для анатазу характерна висока здатність до адсорбції ароматичних та фенольних структур, що є важливим у випадку парацетамолу та особливо диклофенаку. Саме тому в усіх експериментальних серіях перед увімкненням лампи проводили попередню адсорбцію протягом 30 хв для встановлення рівноваги у системі. На цьому етапі спостерігали незначне падіння концентрації забрудника – від 5 до 12 % залежно від рН і концентрації каталізатора.

Після початку опромінення у всіх серіях встановлено чітку експоненційну залежність зниження концентрації у часі, що підтверджує кінетику псевдопершого порядку. Параметри кінетики визначали шляхом побудови залежності  $\ln(C_0/C_t)$  від часу опромінення; отримані константи швидкості збігаються з типовими значеннями для суспензійного  $\text{TiO}_2$  у подібних умовах.

Кінетичні криві фотокаталітичної degradaції парацетамолу показали швидке падіння концентрації у перші 20–30 хв, після чого реакція сповільнювалась через утворення проміжних продуктів окиснення (рис. 3б). Навпаки, у випадку диклофенаку профіль зниження концентрації був більш плавним і лінійним у напівлогарифмічних координатах (рис. 4б). Розраховані значення  $C_t$  підтвердили, що за 60 хв опромінення концентрація парацетамолу при рН 7 і  $\text{TiO}_2$  0,50 г/дм<sup>3</sup> зменшувалась майже на два порядки, тоді як для диклофенаку при рН 7 і  $\text{TiO}_2$  1,00 г/дм<sup>3</sup> – лише в шість разів. Такі розбіжності можуть бути пов'язані з відмінностями у структурі молекули їх реакційній здатності в умовах фотокаталізу, хоча детальний механізм потребує подальшого вивчення.

Отримані результати свідчать, що  $\text{TiO}_2$  є високоефективним фотокаталізатором для degradaції парацетамолу у широкому діапазоні рН та концентрацій. Диклофенак, хоча й характеризується нижчою швидкістю окиснення, також активно руйнується у присутності  $\text{TiO}_2$  завдяки радикальним реакціям, що підтверджує придатність анатазу для очищення стічних вод, забруднених фармацевтичними мікрополутантами різної природи. Крім того, порівняння кінетичних параметрів засвідчує, що оптимізація умов рН та концентрації каталізатора є ключовим чинником підвищення ефективності фотокаталітичних процесів, особливо для стійких хлорвмісних сполук.

Вплив рН середовища та концентрації оксидного фотокаталізатора на кінетику фотокаталітичної degradaції фармацевтичних сполук є одним із ключових чинників оптимізації процесу очищення води. Зміна кислотності розчину визначає заряд поверхні напівпровідникового каталізатора, ступінь іонізації органічних молекул та швидкість формування активних радикальних частинок, тоді як концентрація каталізатора визначає кількість доступних активних центрів і ефективність поглинання УФ-випромінювання. Тому було проаналізовано кінетичні параметри фотокаталітичної degradaції парацетамолу та диклофенаку в присутності  $\text{TiO}_2$  та  $\text{ZnO}$  при різних значеннях рН і концентраціях каталізатора, використовуючи константи

швидкості реакції  $k$ , періоди напіврозпаду  $t_{1/2}$  та залишкові концентрації  $C(t)$ . Кінетичний аналіз проводили, виходячи з моделі псевдопершого порядку.

Отримані значення  $k$  і  $t_{1/2}$  для різних варіантів рН та концентрацій каталізаторів наведено в узагальнюючих таблицях для ZnO (табл.2) та TiO<sub>2</sub> (табл.3), а характер зміни  $C(t)$  відтворено на кінетичних кривих.

Парацетамол у системах з TiO<sub>2</sub> деградує значно швидше, ніж диклофенак, тому для парацетамолу встановлено вищі значення констант швидкості порівняно з диклофенаком. У випадку рН 5 та концентрації TiO<sub>2</sub> 0,25 г/дм<sup>3</sup> константа швидкості становила 0,0850 хв<sup>-1</sup>, що відповідає періоду напіврозпаду 8,15 хв. Зростання рН до нейтрального значення 7 та збільшення концентрації каталізатора до 0,50 г/дм<sup>3</sup> приводило до інтенсифікації процесу:  $k = 0,1095$  хв<sup>-1</sup> та  $t_{1/2} = 6,33$  хв. Це означає, що за незмінної початкової концентрації зростання кількості доступних активних центрів на поверхні анатазу та оптимізація кислотності сприяють інтенсифікації процесу. Значення рН 7 забезпечувало оптимальний баланс між зарядом поверхні та диспергуванням каталізатора, що сприяло максимально ефективному утворенню гідроксильних радикалів. Крім того, при цих умовах процес демінералізації був інтенсивнішим, про що свідчить більш глибоке зниження концентрації органічного вуглецю.

Для диклофенаку, структура якого містить два атоми хлору й є значно більш стійкою до окиснення, швидкість деградації була нижчою. При рН 5 та концентрації TiO<sub>2</sub> 0,50 г/дм<sup>3</sup> константа швидкості становила 0,0400 хв<sup>-1</sup>, а період напіврозпаду – 17,32 хв. Підвищення рН до 7 та збільшення концентрації TiO<sub>2</sub> до 1,00 г/дм<sup>3</sup> призвело до зростання швидкості лише до  $k = 0,030$  хв<sup>-1</sup>, що відповідає  $t_{1/2} = 23,08$  хв. Подібна поведінка пояснюється тим, що при рН 7 молекула диклофенаку перебуває переважно у аніонній формі, а поверхня TiO<sub>2</sub> при цьому набуває слабо негативного заряду, що знижує адсорбцію та, відповідно, й загальну швидкість окиснення. Незважаючи на це, повільніша, але стабільна деградація доводить здатність TiO<sub>2</sub> руйнувати навіть хлорвмісні фармацевтичні сполуки.

Для парацетамолу встановлено, що при рН 6 і концентрації ZnO 0,25 г/дм<sup>3</sup> константа швидкості становила  $k = 0,0598$  хв<sup>-1</sup>, що відповідає періоду напіврозпаду  $t_{1/2} = 11,58$  хв. Підвищення дози каталізатора до 0,50 г/дм<sup>3</sup> призводило до збільшення швидкості реакції до  $k = 0,0766$  хв<sup>-1</sup> та зменшення  $t_{1/2}$  до 9,05 хв. При підвищенні рН до 8 швидкість деградації зменшувалась: для 0,25 г/дм<sup>3</sup>  $k = 0,0478$  хв<sup>-1</sup> ( $t_{1/2} = 14,50$  хв), а для 0,50 г/дм<sup>3</sup> –  $k = 0,0662$  хв<sup>-1</sup> ( $t_{1/2} = 10,47$  хв). Такі результати вказують на те, що парацетамол швидше руйнується у слабкокислих умовах, де поверхня ZnO має більш позитивний заряд і ефективніше адсорбує нейтральну форму молекули парацетамолу. Отже, для ZnO слабкокислі умови є більш сприятливими для деградації парацетамолу, тоді як при рН 8 зменшується електро-статичне притягання між молекулою та поверхнею каталізатора і частково знижується ефективність формування адсорбційного комплексу.

Для диклофенаку значення констант швидкості були значно нижчими. При рН 6 і концентрації 0,25 г/дм<sup>3</sup>  $k$  становило лише 0,0248 хв<sup>-1</sup> ( $t_{1/2} = 27,99$  хв), а при 0,50 г/дм<sup>3</sup> – 0,0300 хв<sup>-1</sup> ( $t_{1/2} = 23,10$  хв). Збільшення рН до 8 ще більше знижувало активність ZnO щодо диклофенаку, оскільки молекула в цих умовах перебуває переважно в аніонній формі, тоді як поверхня ZnO також набуває негативного заряду. Для 0,25 г/дм<sup>3</sup>  $k$  зменшувалось до 0,0171 хв<sup>-1</sup> ( $t_{1/2} = 40,54$  хв), а для 0,50 г/дм<sup>3</sup> – до 0,0249 хв<sup>-1</sup> ( $t_{1/2} = 27,82$  хв). Це свідчить про суттєве електростатичне відштовхування, яке обмежує адсорбцію і, відповідно, загальну швидкість окиснення. Таким чином, ZnO виявляється істотно менш ефективним для деградації диклофенаку, ніж для парацетамолу, навіть у оптимальних умовах рН 6 і підвищених концентраціях каталізатора.

Порівнюючи результати для TiO<sub>2</sub> та ZnO, можна зробити низку узагальнюючих висновків. По-перше, для парацетамолу обидва каталізатори забезпечують істотне зниження концентрації забрудника, але TiO<sub>2</sub> демонструє більш високі значення  $k$  та менші  $t_{1/2}$ , особливо при рН 7 та концентрації 0,50 г/дм<sup>3</sup>. ZnO є ефективним у слабкокислих умовах, однак поступається TiO<sub>2</sub> за глибиною деградації при однакових або близьких концентраціях каталізатора.

Таблиця 2

Константа швидкості псевдопершого порядку ( $k$ ) та період напіврозпаду ( $t_{1/2}$ ) під час фотокаталітичної деградації парацетамолу та диклофенаку у присутності ZnO за різних значень рН і маси каталізатора

рН	6		8		6		8	
m, г	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5	0,25	0,5
Речовина	ПЦ	ПЦ	ПЦ	ПЦ	ДФ	ДФ	ДФ	ДФ
$k$	0,0598	0,0766	0,0478	0,0662	0,0248	0,0300	0,0171	0,0249
$t_{1/2}$ , хв	11,58	9,05	14,50	10,47	27,99	23,10	40,54	27,82

Примітка: ПЦ – парацетамол, ДФ – диклофенак

Таблиця 3

Константа швидкості псевдопершого порядку ( $k$ ) та період напіврозпаду ( $t_{1/2}$ ) під час фотокаталітичної деградації парацетамолу та диклофенаку у присутності TiO<sub>2</sub> за різних значень рН і маси каталізатора

рН	5	7	5	7
m, г	0,25	0,5	0,5	1,0
Речовина	ПЦ	ПЦ	ДФ	ДФ
$k$	0,0850	0,1095	0,0400	0,0300
$t_{1/2}$ , хв	8,15	6,33	17,32	23,08

Примітка: ПЦ – парацетамол, ДФ - диклофенак

По-друге, для диклофенаку різниця між каталізаторами ще більш виражена: навіть за підвищеної концентрації TiO<sub>2</sub> (1,00 г/дм<sup>3</sup>) та оптимізованих умов рН процес деградації залишається повільнішим, ніж для парацетамолу, але все ж значно інтенсивнішим, ніж у системах із ZnO. У випадку ZnO невисокі значення  $k$  та великі  $t_{1/2}$  у поєднанні зі зростаючою тривалістю реакції свідчать, що цей каталізатор є менш придатним для очищення води від хлорвмісних фармацевтичних сполук у дослідженому діапазоні рН.

По-третє, вплив концентрації каталізатора має виражений екстремальний характер. Збільшення дози TiO<sub>2</sub> та ZnO з 0,25

до 0,50 г/дм<sup>3</sup> у більшості випадків супроводжується зростанням  $k$  і скороченням  $t_{1/2}$ , однак подальше зростання (до 1,00 г/дм<sup>3</sup> для TiO<sub>2</sub>) не завжди дає пропорційне підвищення швидкості реакції. Це пов'язано з ефектом екранування УФ-випромінювання та збільшенням розсіювання світла в перенасичених суспензіях.

Нарешті, рН середовища по-різному впливає на каталізатори. Для TiO<sub>2</sub> оптимальним виявився інтервал від слабнокислого до нейтрального рН (5–7) для парацетамолу і ближчий до слабнокислого рН для диклофенаку, тоді як для ZnO найбільш прийнятним є рН 6. За рН 8 ефективність ZnO знижується як для парацетамолу, так і для

диклофенаку, що пояснюється зміною заряду поверхні та зменшенням адсорбції органічних молекул.

Таким чином, аналіз впливу рН та концентрації каталізатора на кінетичні параметри фотокаталітичної деградації модельних фармацевтичних забрудників показав, що оптимізація цих параметрів є критичною для досягнення високої ефективності процесу.  $\text{TiO}_2$  проявляє стабільно високу активність і є більш універсальним каталізатором для очищення води від фармацевтичних мікрополітантів, тоді як  $\text{ZnO}$  доцільно застосовувати в умовах, де потрібне швидке початкове окиснення у слабкокислому середовищі, але немає жорстких вимог до повної мінералізації стійких хлорвмісних сполук.

Отримані результати свідчать про суттєві відмінності у механізмах фотокаталітичної деструкції парацетамолу та диклофенаку за однакових умов. Незважаючи на загальну тенденцію до швидшого розкладу парацетамолу, сповільнення процесу з часом для обох фармацевтичних сполук може бути пов'язане з утворенням проміжних продуктів окиснення, що здатні адсорбуватися на активних центрах фотокаталізатора та частково блокувати їх. Для диклофенаку, з огляду на його більш складну хімічну структуру, ймовірно формування ще більш різноманітних і стійких проміжних продуктів, що додатково впливає на кінетику процесу. Тому подальші дослідження доцільно спрямувати на ідентифікацію цих проміжних сполук методом хроматомас-спектрометрії, що дозволить встановити не лише їх природу, але й уточнити вплив окремих продуктів на механізм фотокаталітичної деградації, що поглибить розуміння шляхів трансформації органічних забруднювачів та забезпечить розробку більш ефективних умов фотокаталітичного очищення води.

### Висновки

Встановлено, що ПЦ розкладається значно швидше за ДФ незалежно від типу фотокаталізатора ( $\text{ZnO}$  чи  $\text{TiO}_2$ ). Це підтверджується тим, що для ПЦ встановлено вищі значення констант

швидкості ( $k$ ) та менші періоди напіврозпаду ( $t_{1/2}$ ) у всіх експериментальних умовах порівняно з ДФ.

$\text{TiO}_2$  є ефективнішим фотокаталізатором, ніж  $\text{ZnO}$ , оскільки він демонструє більш високі значення  $k$  та менші  $t_{1/2}$ , особливо при деградації парацетамолу. Максимальна ефективність для ПЦ досягнута з  $\text{TiO}_2$  при рН 7 та концентрації  $0,50 \text{ г/дм}^3$ , де константа швидкості  $k$  становила  $0,1095 \text{ хв}^{-1}$ , а період напіврозпаду  $t_{1/2}$  –  $6,33 \text{ хв}$ . Найбільш ефективні умови для ДФ встановлено для  $\text{TiO}_2$  при рН 5 та дозі  $0,50 \text{ г/дм}^3$ , де  $k$  становила  $0,0400 \text{ хв}^{-1}$ . Найкраща активність для  $\text{ZnO}$  для ПЦ була при рН 6 та концентрації  $0,50 \text{ г/дм}^3$  ( $k=0,0766 \text{ хв}^{-1}$ ).

Кисле середовище (рН 5–6) сприяє підвищенню фотокаталітичної активності. Зниження рН підсилює деградацію більшою мірою для  $\text{TiO}_2$ , ніж для  $\text{ZnO}$ . Для  $\text{ZnO}$  оптимальним є слабкокислое середовище (рН 6), оскільки при рН 8 швидкість деградації ПЦ та ДФ помітно знижується. Для  $\text{TiO}_2$  оптимальним виявився інтервал від слабкого до нейтрального рН (5–7). Підвищення рН до 7 призвело до зниження швидкості деградації ДФ, оскільки молекула ДФ в цих умовах набуває аніонної форми, що викликає електростатичне відштовхування від негативно зарядженої поверхні  $\text{TiO}_2$ .

Збільшення дози каталізатора підвищує ефективність процесу, зокрема помітно прискорює початкову стадію деструкції органічних сполук.

Збільшення дози каталізатора (зокрема, від  $0,25$  до  $0,50 \text{ г/дм}^3$ ) у більшості випадків супроводжується зростанням константи швидкості ( $k$ ) і скороченням періоду напіврозпаду ( $t_{1/2}$ ). Однак подальше збільшення (наприклад, до  $1,00 \text{ г/дм}^3$  для  $\text{TiO}_2$  у випадку ДФ) не завжди забезпечує пропорційне підвищення швидкості реакції через ефект екранування UV-випромінювання та розсіювання світла.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологій очищення стічних вод, що містять забруднювачі фармацевтичного походження, шляхом вибору відповідного каталізатора та регулювання рН середовища.

**Фінансування / Funding**

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

**Заява про доступність даних / Data Availability Statement**

Набір даних доступний за запитом до авторів / Dataset available on request from the authors.

**Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement**

Не застосовується / Not applicable.

**Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement**

Не застосовується / Not applicable.

**Конфлікт інтересів / Conflict of interest**

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів / The authors declare no conflict of interest.

**Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process**

У цьому дослідженні не використовувався генеративний штучний інтелект або технології штучного інтелекту для збору, аналізу чи інтерпретації даних / This study did not use generative artificial intelligence or AI technologies to collect, analyze, or interpret data.

**References**

- Hofman, R., & Teo, C. J. (2021). Emerging micropollutants in municipal wastewater: occurrence and treatment options. In *Integrated and Hybrid Process Technology for Water and Wastewater Treatment* (pp. 487-516). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823031-2.00026-4>
- Lee, W. J., Goh, P. S., Lau, W. J., & Ismail, A. F. (2020). Removal of pharmaceutical contaminants from aqueous medium: a state-of-the-art review based on paracetamol. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(9), 7109-7135. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04446-1>
- Li, Z., Wang, J., Chang, J., Fu, B. and Wang, H. (2023). Insight into advanced oxidation processes for the degradation of fluoroquinolone antibiotics: removal, mechanism, and influencing factors. *Science of The Total Environment*, 857, 159172. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159172>
- Sampaio, M. J., Ribeiro, A. R., Ribeiro, C. M., Borges, R. A., Pedrosa, M. F., Silva, A. M., Silva, C. G., & Faria, J. L. (2023). A technological approach using a metal-free immobilized photocatalyst for the removal of pharmaceutical substances from urban wastewaters. *Chemical Engineering Journal*, 459, 141617. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141617>
- Baibara, O. E., Radchenko, M. V., Karpyna, V. A., & Ievtushenko, A. I. (2021). A review of the some aspects for the development of ZnO based photocatalysts for a variety of applications. *Physics and Chemistry of Solid State*, 22(3), 585-594. <https://doi.org/10.15330/pcss.22.3.585-594>
- Bica, B. O., & de Melo, J. V. S. (2020). Concrete blocks nano-modified with zinc oxide (ZnO) for photocatalytic paving: Performance comparison with titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>). *Construction and Building Materials*, 252, 119120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119120>

Tanos, F., Razzouk, A., Lesage, G., Cretin, M., & Bechelany, M. (2024). A comprehensive review on modification of titanium dioxide-based catalysts in advanced oxidation processes for water treatment. *ChemSusChem*, 17(6), e202301139. <https://doi.org/10.1002/cssc.202301139>

Sahai, A., & Goswami, N. (2014). Probing the dominance of interstitial oxygen defects in ZnO nanoparticles through structural and optical characterizations. *Ceramics International*, 40(9), 14569-14578. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.041>

Al Saleh, A. M. (2025). A Review of the Synthesis, Structural, and Optical Properties of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles: Current State of the Art and Potential Applications. *Crystals*, 15(11), 944. <https://doi.org/10.3390/cryst15110944>.

Janotti, A., & Van de Walle, C. G. (2007). Native point defects in ZnO. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 76(16), 165202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.165202>

**Received:** 11.12.2025. **Accepted:** 28.01.2026. **Published:** 06.04.2026.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Кізиун О., Зажигалов В., Умнов І., Трус І. Вплив умов проведення фотокаталітичної деградації парацетамолу та диклофенаку із застосуванням TiO<sub>2</sub> і ZnO. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 1. С. 197-209. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.17>

**Cite this article in APA style as:**

Kiziun, O., Zazhigalov, V., Ymnov, I., & Trus, I. (2026). Vplyv umov provedennia fotokatalitychnoi dehradatsii parasetamolu ta dyklofenaku iz zastosuvanniam TiO<sub>2</sub> i ZnO. [The influence of photocatalytic degradation conditions of paracetamol and diclofenac using TiO<sub>2</sub> and ZnO]. *Biota. Human. Technology*, (1), 197-209. <https://doi.org/10.58407/bht.1.26.17> (in Ukrainian)

**Information about the authors:**

**Kiziun O.** [in Ukrainian: **Кізиун О.**] <sup>1</sup>, PhD of Chemistry, senior researcher, email: lenakiz25@ukr.net  
ORCID: 0000-0002-2339-217X  
Institute for Sorption and Problems of Endoecology, National Academy of Sciences of Ukraine  
13 Oleg Mudrak Str., Kyiv, 03164, Ukraine

**Zazhigalov V.** [in Ukrainian: **Зажигалов В.**] <sup>2</sup>, DSc of Chemistry, Professor, Corresponding member NAS of Ukraine, email: vazazh@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-2169-3443  
Institute for Sorption and Problems of Endoecology, National Academy of Sciences of Ukraine  
13 Oleg Mudrak Str., Kyiv, 03164, Ukraine

**Ymnov I.** [in Ukrainian: **Умнов І.**] <sup>3</sup>, student, email: umnovigor4@gmail.com  
ORCID: 0009-0008-6525-4163  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
37 Prospect Beresteyskiy, Kyiv, 03056, Ukraine

**Trus I.** [in Ukrainian: **Трус І.**] <sup>4</sup>, DSc, Associate Professor, email: inna.trus.m@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-6368-6933  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
37 Prospect Beresteyskiy, Kyiv, 03056, Ukraine

<sup>1</sup> Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

<sup>2</sup> Study design, statistical analysis, manuscript preparation.

<sup>3</sup> Study design, data collection.

<sup>4</sup> Statistical analysis, manuscript preparation.