

## АНОТАЦІЯ

**Кух А. А. Новітній композитний адсорбент-фотокаталізатор на основі титан (IV) оксиду. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 хімічні технології та інженерія. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Хіміко-технологічний факультет, Київ, 2021.

Дисертація присвячена синтезу та дослідженню чистого титан (IV) оксиду та у складі композитів з активованим вугіллям. Вперше з використанням прекурсору титан (III) сульфату низькотемпературним золь-гель методом без термічної обробки синтезовано фотокаталізатор титан (IV) оксид та адсорбент-фотокаталізатор активоване вугілля –  $TiO_2$  та проведено їх повну характеристику. Розроблено лабораторну методику синтезу з прекурсору титан (III) сульфату фотокаталізатору титан (IV) оксиду та адсорбенту-фотокаталізатору активоване вугілля –  $TiO_2$  низькотемпературним золь-гель методом без наступної термічної обробки.

Методами електронної мікроскопії визначено форму часточок чистого титан (IV) оксиду та характер розподілу часточок  $TiO_2$  на поверхні активованого вугілля у синтезованих композитах.

Методом рентгенофазового та рентгеноструктурного аналізу встановлено, що при синтезі  $TiO_2$  з прекурсору титан (III) сульфату осадженням утворюється виключно аморфна фаза; при його гідролізі формується структура, що складається з брукіту, рутилу та аморфного  $TiO_2$ ; і лише низькотемпературний гідроліз у присутності допанта фториду калію призводить до утворення чистої модифікації анатаз.

Методом низькотемпературної адсорбції-десорбції азоту досліджено порувату структуру та адсорбційні властивості синтезованих зразків чистого і композитного титан (IV) оксиду. Встановлено, що композити активоване вугілля –  $\text{TiO}_2$  є змішанопоруватими адсорбентами (в яких наявні мікро- та мезопори) з розвиненою площею поверхні (в середньому близько  $1100 \text{ м}^2/\text{г}$ ). З'ясовано, що всі зразки чистого  $\text{TiO}_2$  мають малорозвинену площу поверхні, в середньому близько  $49 \text{ м}^2/\text{г}$ . Середній радіус пор зразків, допованих фтором, на 11% менший, у порівнянні зі зразками, отриманими іншими способами.

Дослідження адсорбційних та фотокаталітичних властивостей синтезованого чистого і композитного титан (IV) оксиду проведено з використанням модельних розчинів полютантів: глюкози, барвників катіонного (метиленовий синій) та аніонного (оранжево-жовтий S) типу, диклофенака натрію.

При оцінюванні адсорбційної здатності чистого  $\text{TiO}_2$  встановлено, що найвищий ступінь вилучення глюкози (83%) з розчинів вихідної концентрації 0,01% спостерігався для зразка  $\text{TiO}_2(\text{ос})$ , тобто отриманого шляхом прямого осадження без гідролізу. Композити активоване вугілля –  $\text{TiO}_2$  адсорбували глюкозу значно активніше у порівнянні з чистим  $\text{TiO}_2$ . В ході фотокаталітичних досліджень з'ясовано, що зразки чистого  $\text{TiO}_2$  проявляють певну фотокаталітичну активність, однак найвищий ступінь розкладання, досягнутий для них, не перевищував 54%. Порівняно із ними, композити активоване вугілля –  $\text{TiO}_2$  показали значно вищу фотокаталітичну активність в цьому процесі.

При дослідженні адсорбційної активності композитів в процесі вилучення барвників для встановлення адсорбційних закономірностей здійснювали математичну обробку кінетичних залежностей та ізотерм

адсорбції з використанням кінетичних моделей псевдо-першого та псевдо-другого порядків. Встановлено, що адсорбція метиленового синього найкраще описується моделлю псевдо-другого порядку, а це свідчить, що саме хімічна реакція обміну лімітує весь адсорбційний процес. Адсорбція оранжево-жовтого S краще описується моделлю псевдо-першого порядку, а це, в свою чергу, вказує на те, що адсорбція цього барвника лімітується його дифузією в порах адсорбенту.

Встановлено, що у випадку адсорбції метиленового синього найбільш ефективним виявився зразок композиту АВ- $\text{TiO}_2(\text{oc})$ , для якого ступінь вилучення становив 90%. Серед зразків, отриманих варіаціями методу низькотемпературного гідролізу, найвища ефективність спостерігалась для зразка АВ- $\text{TiO}_2(15\text{F})$ , вона становила 70%. Лише ці два зразки виявились більш ефективними у порівнянні з вихідним активованим вугіллям, для якого ступінь адсорбції метиленового синього з розчину складав 65%. Evonik AEROXIDE®  $\text{TiO}_2$  P25 показав значно нижчу адсорбційну здатність по відношенню до всіх досліджуваних поліютантів.

У випадку оранжево-жовтого S досягнуто високих ступенів адсорбційного вилучення, однак вони не перевищують значення, отриманого з використанням активованого вугілля. Найвищий ступінь вилучення було досягнуто при використанні зразка композиту, що модифікований фотором у співвідношенні  $\text{Ti:F}=1:15$ .

При дослідженні адсорбції диклофенаку натрію усі зразки продемонстрували високу ефективність: ступінь вилучення перевищував 60% для усіх зразків. Дослідження фотокаталітичної активності синтезованих композитів у процесі фотокаталітичного розкладання перелічених модельних поліютантів проводили з використанням джерел УФ-випромінювання потужністю 8 та 24 W. За потужності випромінювання 8 W для композитів

AB-TiO<sub>2</sub>(nF), AB-TiO<sub>2</sub>(2F), AB-TiO<sub>2</sub>(7F) та AB-TiO<sub>2</sub>(15F) досягнуто значно нижчі ступені розкладання барвників у порівнянні з ефективністю за інтенсивності у 24 W. Найбільша залежність від інтенсивності випромінювання спостерігалась для композиту AB-TiO<sub>2</sub>(nF), для якого було досягнуто підвищення ефективності розкладання барвників на 50-70%. Фотокаталітичне розкладання диклофенака натрію з використанням композитних фотокаталізаторів було доволі високим за обох інтенсивностей опромінення; наприклад, для зразка AB-TiO<sub>2</sub>(15F) воно знаходилось в межах від 80 до 100%. За інтенсивності ж у 8 W спостерігались дещо нижчі значення ступеня розкладання.

Наукова новизна роботи полягає в тому що, вперше з використанням прекурсору титан (III) сульфату низькотемпературним золь-гель методом без наступної термічної обробки синтезовано фотокаталізатор титан (IV) оксид та адсорбент-фотокаталізатор активоване вугілля – TiO<sub>2</sub> та проведено їх повну характеристику.

Розроблено лабораторну методику синтезу з прекурсору титан (III) сульфату фотокаталізатору титан (IV) оксиду та адсорбенту-фотокаталізатору активоване вугілля – TiO<sub>2</sub> низькотемпературним золь-гель методом без наступної термічної обробки.

Вперше встановлено, що при синтезі TiO<sub>2</sub> з прекурсору титан (III) сульфату осадженням утворюється виключно аморфна фаза; при його гідролізі формується структура, що складається з брукіту, рутилу та аморфного TiO<sub>2</sub>; і лише низькотемпературний гідроліз у присутності допанта фториду калію призводить до утворення чистої модифікації анатаз.

Доведено доцільність використання синтезованих адсорбентів та фотокаталізаторів у процесах очищення стічних вод від таких органічних поліюгантів, як барвники та фармацевтичні субстанції, і їх можна

рекомендувати для використання в технологіях адсорбційного і фотокаталітичного очищення фармацевтичних стічних вод.

Наукові положення, а також результати експериментальних досліджень використано при розробці нового теоретичного розділу та двох нових лабораторних робіт з дисципліни «Адсорбція, адсорбенти та каталізатори на їх основі» для магістрів ОНП та ОПП зі спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» кафедри ТНР, В та ЗХТ КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Доведено, що адсорбенти-фотокаталізатори на основі  $\text{TiO}_2$ , синтезовані методом низькотемпературного гідролізу титан (III) сульфату, ефективні у процесах видалення та розкладання барвників та фармацевтичних субстанцій. Встановлено, що їх можна рекомендувати для використання в технологіях очищення фармацевтичних стічних вод.

*Ключові слова:* адсорбент, фотокаталізатор, композит, титан (IV) оксид, активоване вугілля.

*Список публікацій здобувача:*

*Статті:*

1. Kukh A.A., Ivanenko I.M., Astrelin I.M.  $\text{TiO}_2$  and its composites as effective photocatalyst for glucose degradation processes. *Applied Nanoscience*. 2019. Vol. 9(5), P. 677-682. Іноземне видання: Німеччина (член ЄС). Журнал цитується наукометричними базами SCOPUS і Web of Science. **ISSN:2190-5509 (E-ISSN: 2190-5517)**. *Особистий внесок здобувача: проведення синтезу зразків чистого та композитного титан (IV) оксиду, аналіз даних, отриманих при фотокаталітичному розкладанні глюкози, підготовка статті.*

За даними Scimago Journal & Country Rank предметна область Materials Science і відповідна категорія Materials Science (miscellaneous) належать до квадриля Q2:

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100886227&tip=sid&clean=0>.

2. **Kukh A.**, Ivanenko I., Asterlin I. Composite Titanium Dioxide Photocatalytically Active Materials: Review. *Nanooptics and Photonics, Nanochemistry and Nanobiotechnology, and Their Applications* / Ed. O. Fesenko, L. Yatsenko. Cham, Switzerland: Springer proceedings in physics, 2020. Vol. 247. 624 p. P. 1-11. Іноземне видання: Німеччина (член ЄС). Видання входить до наукометричної бази SCOPUS. **ISSN:0930-8989**. *Особистий внесок здобувача: проведення літературного пошуку та аналіз наукової літератури за темою, підготовка статті.*

3. Ivanenko I.M., **Kukh A.A.**, Byts O.V., Astrelin I.M. Synthesis and Adsorption Activity of TiO<sub>2</sub>/Activated Carbon Composites / Ed. G. Neeraja Rani, J. Anjaiah, P. Raju. Hamburg, Germany: American Institute of Physics Publishing, 2020, Vol. 2269, Iss. 1. 030099; <https://doi.org/10.1063/5.0019932>. Іноземне видання: США (член Організації економічного співробітництва та розвитку). Видання входить до наукометричної бази SCOPUS. **ISSN:0094-243X; (E-ISSN: 1551-7616)**. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обговорення отриманих результатів та написання статті.*

4. Іваненко І.М., Кезікова Ю.Є., **Кух А.А.**, Нагаєвська С. Д. Композитний адсорбент-фотокаталізатор на основі активованого вугілля і титану (IV) оксиду. *Екологічні науки*. 2019. №3(26), С. 138-142. Фахове видання, Україна. **ISSN:2306-9716 (E-ISSN: 2664-6110)**. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обговорення отриманих результатів та написання статті.*

Статті у виданнях, що цитуються наукометричною базою даних GOOGLE Scholar:

5. **Кух А.А., Іваненко І.М., Биць О.В.** Исследование кинетики адсорбции красителей катионного и анионного типа на композитах «активированный уголь –  $TiO_2$ ». *Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ-2019: Збірник наукових статей Сьомої міжнар. наук.-практ. конф. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019 – 430 с. 2019. С. 247-253. ISBN 978-617-696-877-1. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обговорення отриманих результатів та написання статті.*

6. **Кух А.А., Іваненко І.М., Астрелін І.М.** Застосування кінетичних моделей до опису процесів рідиннофазної адсорбції барвників зразками композитів «активоване вугілля –  $TiO_2$ ». *Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку – КМХТ-2020: Збірник наукових статей Восьмої міжнар. наук.-практ. конф. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020 – 462 с. С. 260-266. ISBN 978-617-696-740-8 2020. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обговорення отриманих результатів та написання статті.*

Патенти:

7. Спосіб одержання фотокаталізатора-адсорбенту на основі оксиду титану (IV): пат. 136137 України МПК(2006.01) B01J 20/06. **Кух А.А., Биць О.В., Іваненко І.М., Астрелін І.М.** № U 201900728; заявл. 24.01.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. №15. *Особистий внесок здобувача: планування та проведення експериментальних досліджень, обробка результатів досліджень, патентний пошук, підготовка патенту.*

8. Спосіб одержання адсорбенту для поглинання іонів хрому (IV) із стічних вод: пат. 112600 України МПК(2006.01) B01J 20/06. **Кух А.А.**, Іваненко І.М., Астрелін І.М. № U 201605972; заявл. 02.06.2016; опубл. 26.12.2016, Бюл. №24. *Особистий внесок здобувача: планування та проведення експериментальних досліджень, обробка результатів досліджень, патентний пошук, підготовка патенту.*

Тези доповідей:

9. **Кух А.А.**, Іваненко І.М. (2016). Адсорбційні та фотокаталітичні властивості титану (VI) оксиду та його композитів. *Наукова Україна: Збірник статей II Всеукраїнської наукової конференції (з міжнародною участю).* Дніпропетровськ, С. 116-118. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

10. **Кух А.А.**, Іваненко І.М., Донцова Т.А. (2015). Сорбція глюкози на  $TiO_2$ . *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Чиста вода. фундаментальні, прикладні та промислові аспекти», Київ, С. 128.* *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

11. **Кух А.А.**, Донцова Т.А., Іваненко І.Н. (2014). Низкотемпературный синтез, фазовый состав и фотокаталитическая активность наноструктур титан (IV) оксида. *Тези доповідей XIX Української конференції з неорганічної хімії за участю закордонних учених.* Одеса, С.163. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

12. **Кух А.А.**, Донцова Т.А., Іваненко І.М. (2015). Адсорбція барвників на  $TiO_2$ . *Тези доповідей VII Міжнародна науково-технічна конференція*



*студентів, аспірантів и молодих вчених «Хімія та сучасні технології». Днепропетровск, С. 174. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

13. **Кух А.А., Донцова Т.А., Іваненко І.М. (2015).** Синтез  $TiO_2$  низькотемпературним методом. *Тези доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології». Київ, С. 153. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

14. **Кух А.А., Донцова Т.А., Іваненко І.М. (2015).** Адсорбція барвників на  $TiO_2$ . *Тези доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології». Київ, С. 23. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

15. **Кух А.А., Іваненко І.М., Донцова Т.А. (2016).** Адсорбент-фотокаталізатор на основі  $TiO_2$ . *Збірник тез доповідей учасників IV Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології. Київ, С. 21–22. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

16. **Кух А.А., Іваненко І.М. (2017).** Дослідження впливу прекурсора та характеристик носія на фотокаталітичні властивості композитів «активоване вугілля –  $TiO_2$ ». *Збірник тез доповідей учасників IV Міжнародної науково-технічної конференції «Хімія та сучасні технології». Дніпро, С. 33-34. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

17. Ivanenko I.M., **Kukh A.A.**, Astrelin I.M. (2017). TiO<sub>2</sub> and its composites as effective photocatalyst for glucose degradation processes. *Abstract book of International research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials (NANO-2017)*. Chernivtsi, P. 108. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

18. **Кух А.А.**, Іваненко I.M. (2017). Дослідження активності композитів "активоване вугілля - TiO<sub>2</sub>" в процесах вилучення спиртів з водних розчинів. *Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference «Pure water. Fundamental, applied and industrial aspects» National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»*. Kyiv, P. 186. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

19. **Kukh A.A.**, Ivanenko I.M. (2017). Adsorption characteristics of composites activated carbon – TiO<sub>2</sub>. *III Ukrainian-Polish scientific conference «Membrane and Sorption Processes and Technologies»*. Kyiv, P. 205. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

20. Ivanenko I., **Kukh A.**, Astrlelin I. Adsorption Properties of Composites «Active Carbon - TiO<sub>2</sub>». (2018). *2nd International Conference on Innovations in Natural Science and Engineering (ICINSE 2018)*. Kiev, P. 236. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та участь у написанні тез.*

21. Byts O.V., **Kukh A.A.**, Ivanenko I.M. (2018). Photocatalytic activity of composites «active carbon – TiO<sub>2</sub>». *IV Міжнародна науково-практична конференція «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*. Шостка, 112-113. *Особистий внесок здобувача: проведення*

експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та участь у написанні тез.

22. **Kukh A.**, Ivanenko I. (2019) TiO<sub>2</sub>/Activated Carbon Composites: Synthesis, Structure and Adsorption Properties. *International Conference on Multifunctional Materials (ICMM-2019). Materials Chemistry and Physics Section, Telangana, India, P. 286. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

23. **Kukh A.A.**, Ivanenko I.M. (2019). Synthesis and perspectives of using of active carbon – TiO<sub>2</sub> composites. *Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2019): збірник тез доповідей II Міжнародної (XII Української) наукової конференції студентів, аспірантів і молодих учених. Вінниця, С. 200. Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез.*

24. Byts O.V., **Kukh A.A.**, Ivanenko I.M. (2019). Composites activated carbon – TiO<sub>2</sub> for phenol adsorption. *X Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Вода в харчовій промисловості».* Одеса: ОНАХТ, 2019, С. 28. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та участь у написанні тез.*

25. **Kukh A.A.**, Ivanenko I.M. (2020) Activated carbon (AC) – titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) composites: effect of AC properties on photocatalytic efficiency. *XII International Conference "Electronic Processes in Organic and Inorganic Materials" (ICEPOM-12).* Кам'янець-Подільський, P. 195. *Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, оцінка отриманих результатів та написання тез*

## ABSTRACT

**Kukh A.A. A novel composite adsorbent-photocatalyst based on titanium (IV) oxide. – Qualifying scientific work with the manuscript copyright.**

The thesis for a doctor of philosophy degree by the specialty 161 chemical technologies and engineering. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the synthesis and study of pure titanium (IV) oxide and composites with activated carbon. For the first time, using a precursor titanium (III) sulfate by a low-temperature sol-gel method without following heat treatment, a titanium (IV) oxide photocatalyst and an adsorbent-photocatalyst activated carbon – TiO<sub>2</sub> were synthesized and their complete characterization was carried out. A laboratory procedure for the synthesis of a photocatalyst of titanium (IV) oxide and an adsorbent-photocatalyst activated carbon - TiO<sub>2</sub> using a titanium (III) sulfate precursor by low-temperature sol-gel method without following heat treatment has been developed.

The shape of particles of pure titanium (IV) oxide and the nature of the distribution of TiO<sub>2</sub> particles on the surface of activated carbon in the synthesized composites have been determined by electron microscopy.

By means of X-ray phase and X-ray structural analysis, it was found that during the synthesis of TiO<sub>2</sub> from the precursor of titanium (III) sulfate by precipitation, an exclusively amorphous phase is formed; during its hydrolysis, a structure consisting of brookite, rutile and amorphous TiO<sub>2</sub> is formed; and only low-temperature hydrolysis in the presence of the dopant potassium fluoride leads to the formation of a pure modification of anatases.

The porous structure and adsorption characteristics of the synthesized samples of pure and composite titanium (IV) oxide were studied by the low-temperature

nitrogen adsorption-desorption method. It has been established that composites activated carbon – TiO<sub>2</sub> are mixed-porous adsorbents (which contain micro- and mesopores) with a developed surface area (on average, about 1100 m<sup>2</sup>/g). In samples of pure TiO<sub>2</sub> surface area does not exceed 49 m<sup>2</sup>/g. Average pore radius in fluorine-doped samples of pure TiO<sub>2</sub> is found to be 11% less compared to samples, synthesized by different route.

The study of the adsorption and photocatalytic properties of the synthesized pure and composite titanium (IV) oxide was carried out using model solutions of pollutants: glucose, dyes of cationic (methylene blue) and anionic (orange-yellow S) type, sodium diclofenac.

When evaluating the adsorption capacity of pure TiO<sub>2</sub>, it was found that the highest degree of glucose removal (83%) from solutions of the initial concentration of 0.01% was observed for the TiO<sub>2</sub>(oc) sample, that is, obtained by direct precipitation without hydrolysis. Activated carbon – TiO<sub>2</sub> composites adsorbed glucose much more actively than pure TiO<sub>2</sub>, since the concentration of model initial glucose solutions differed by three orders of magnitude. In the course of photocatalytic studies, it was found that samples of pure TiO<sub>2</sub> exhibit a certain photocatalytic activity, but the highest degree of decomposition did not exceed 54%. Compared with them, the composites activated carbon – TiO<sub>2</sub> showed a significantly higher photocatalytic activity in this process.

In the study of the adsorption activity of composites in the process of removing dyes, in order to establish the adsorption regularities, the kinetic relation of adsorption were mathematically processed using kinetic models of pseudo-first and pseudo-second orders. It has been found that the adsorption of methylene blue is best described by a pseudo-second order model, which indicates that the chemical exchange reaction limits the entire adsorption process. The adsorption of orange-

yellow S is better described by the pseudo-first order model, and this indicates that the adsorption of this dye is limited by its diffusion in the pores of the adsorbent.

It was found that in the case of the adsorption of methylene blue, the most effective sample of the composite AB-TiO<sub>2</sub> (oc), for which the degree of extraction was 90%. Among the samples obtained by variations of the low-temperature hydrolysis method, the highest efficiency was observed for the AB-TiO<sub>2</sub>(15F) sample, it was 70%. Only these two samples turned out to be more effective than the original activated carbon, for which the degree of adsorption of methylene blue from solution was 65%. Evonik AEROXIDE® TiO<sub>2</sub> P25 showed very low adsorption capacity for all pollutants tested.

In the case of orange-yellow S, high degrees of adsorption recovery were achieved, but they did not exceed the values obtained using activated carbon. The highest recovery was achieved using a composite sample modified with F in the ratio Ti: F = 1:15.

In the study of the adsorption of diclofenac sodium, all samples demonstrated high efficiency, the recovery rate exceeded 60% for all samples.

Investigation of the photocatalytic activity of the synthesized composites in the process of photocatalytic decomposition of the listed model pollutants was carried out using UV sources with a power of 8 and 24 W. According to the radiation power of 8 W for composites AB-TiO<sub>2</sub>(ng), AB-TiO<sub>2</sub>(2F), AB-TiO<sub>2</sub>(7F) and AB-TiO<sub>2</sub>(15F), the achieved dye decomposition rates are significantly lower than the efficiency at an intensity of 24 W. The most significant dependence on the radiation intensity was observed for the AB-TiO<sub>2</sub>(ng) composite, for which an increase by 50-70% in the dye decomposition efficiency was achieved.

The scientific novelty of the work is as follows. For the first time, using a precursor titanium (III) sulfate by a sol-gel method, a photocatalyst titanium (IV)

oxide and an adsorbent photocatalyst activated carbon –  $\text{TiO}_2$  were synthesized and their complete characterization was carried out.

A laboratory procedure has been developed for the synthesis of a photocatalyst titanium (IV) oxide and an adsorbent-photocatalyst activated carbon –  $\text{TiO}_2$  by a sol-gel method from a precursor titanium (III) sulfate.

It was established for the first time that during the synthesis of  $\text{TiO}_2$  from the precursor of titanium (III) sulfate by precipitation, an exclusively amorphous phase is formed; during its hydrolysis, a structure consisting of brookite, rutile and amorphous  $\text{TiO}_2$  is formed; and only low-temperature hydrolysis in the presence of the dopant potassium fluoride leads to the formation of a pure modification of anatases.

The expediency of using synthesized adsorbents and photocatalysts in wastewater treatment processes from organic pollutants such as dyes and pharmaceutical substances has been proven, and they can be recommended for use in adsorption and photocatalytic treatment of pharmaceutical wastewater.

Scientific provisions, as well as the results of experimental studies were used in the development of a new theoretical section and two new laboratory works on the discipline "Adsorption, adsorbents and catalysts based on them" for masters of ONP and OPP in specialty 161 "Chemical technology and engineering" of the Department of Inorganic Substances Technology, Water Treatment and General Chemical Engineering of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

It has been proven that  $\text{TiO}_2$ -based photocatalyst adsorbents synthesized by low-temperature hydrolysis of titanium (III) sulfate are effective in the processes of adsorptive removal and photocatalytic decomposition of dyes and pharmaceutical substances. It has been established that they can be recommended for use in pharmaceutical wastewater treatment technologies.

*Key words:* adsorbent, photocatalyst, composite, titanium (IV) oxide, activated carbon.