

Научная статья
УДК 541.145:546.824.31
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.044

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОКАТАЛИЗАТОРОВ $\text{TiO}_2\text{-Me}$ (Fe, W или V) В ПРОЦЕССАХ ИНАКТИВАЦИИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ МИКРОФЛОРЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВИДИМЫМ СВЕТОМ

**Максим Леонидович Беликов¹, Сергей Александрович Сафарян²,
Надежда Викторовна Фокина³, Анастасия Сергеевна Сошина⁴**

^{1,2}Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

^{3,4}Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹m.belikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5585-0537>

²s.safarian@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0838-9909>

³nadezdavf@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2936-5252>

⁴anastasiya.soshina97@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4173-6992>

Аннотация

Показана возможность фотокаталитической инактивации грамотрицательных и грамположительных бактериальных клеток различных родов (*Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus*) в присутствии фотокатализаторов (ФК) на основе диоксида титана, модифицированного иновалентными катионами металлов, при облучении видимым светом.

Ключевые слова:

диоксид титана, железо, вольфрам, ванадий, фотокатализ, инактивация, бактерии

Для цитирования:

Применение фотокатализаторов $\text{TiO}_2\text{-Me}$ (Fe, W или V) в процессах инактивации бактериальной микрофлоры при облучении видимым светом / М. Л. Беликов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 259–264. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.044.

Original article

APPLICATION OF $\text{TiO}_2\text{-Me}$ (Fe, W, or V) PHOTOCATALYSTS IN BACTERIAL MICROFLORA INACTIVATION PROCESSES UNDER VISIBLE LIGHT IRRADIATION

Maxim L. Belikov¹, Sergey A. Safaryan², Nadezhda V. Fokina³, Anastasia S. Soshina⁴

^{1,2}Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre

“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

^{3,4}Institute of Industrial Ecology Problems—Subdivision of the Federal Research Centre

“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

¹m.belikov@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5585-0537>

²s.safarian@ksc.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0838-9909>

³nadezdavf@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2936-5252>

⁴anastasiya.soshina97@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4173-6992>

Abstract

The possibility of photocatalytic inactivation of Gram-negative and Gram-positive bacterial cells of various genera (*Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Bacillus*) in the presence of photocatalysts based on titanium dioxide modified with inovalent metal cations under visible light irradiation is demonstrated.

Keywords:

titanium dioxide, iron, tungsten, vanadium, photocatalysis, inactivation, bacteria

For citation:

Application of $\text{TiO}_2\text{-Me}$ (Fe, W, or V) photocatalysts in bacterial microflora inactivation processes under visible light irradiation / M. L. Belikov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 259–264. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.044.

Ранее при облучении видимым светом была показана высокая фотокаталитическая активность (ФКА) синтезированных фотокатализаторов на основе диоксида титана, модифицированного различными

иновалентными примесями [1–10]. При этом максимальную эффективность в процессах фотокаталитической деструкции показали образцы диоксида титана, модифицированного железом, вольфрамом или ванадием.

Цель данной работы — изучение фотокаталитической инактивации бактерий при облучении видимым светом в присутствии разработанных авторами фотокатализаторов.

В качестве ФК применялись синтезированные ранее [1; 9; 10] образцы диоксида титана, модифицированного железом, вольфрамом или ванадием. Эффективность ФК оценивали по степени ингибирования роста грамотрицательных и грамположительных бактериальных клеток (*Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas alcaliphila*, *Micrococcus luteus*, *Bacillus bevis*) при облучении бактериальной суспензии, содержащей ФК, видимым светом ($\lambda > 400$ нм). Эксперименты проводились при комнатной температуре. Навеску ФК помещали в стеклянную пробирку, содержащую 19 мл физраствора, затем вносили 1 мл бактериальной суспензии. Изменение численности бактерий после контакта с ФК и облучения светом фиксировали с помощью посева бактериальной суспензии на плотную питательную среду — мясопептонный агар в чашках Петри. Посев проводили через определенные промежутки времени. Колонии бактерий подсчитывали после инкубации при 27 °С в течение 72 ч по формуле [11]:

$$N = M \cdot P / V, \quad (1)$$

где N — численность КОЕ (колонии образующие единицы) в 1 мл исходного инокулята; P — разведение, из которого сделан высеv; $P = 10^n$, где 10 — коэффициент разведения, n — порядковый номер разведения; M — среднее количество КОЕ, выросших на чашке Петри, в разведении P ; V — объем инокулята, взятого для посева в чашку Петри из разведения P .

Антибактериальную активность (АА) ФК рассчитывали по формуле [12]:

$$AA = \log(N_0/N_1), \quad (2)$$

где AA — антибактериальная активность; N_0 — исходная численность бактериальных клеток (КОЕ/мл); N_1 — численность бактериальных клеток (КОЕ/мл) после контакта с ФК.

Образцами сравнения служили: TiO_2 аналогичного с модифицированными образцами TiO_2 генезиса и промышленный TiO_2 фирмы Degussa (P25), предложенный ранее в качестве стандарта сравнения [13]. Маркировка образцов модифицированного диоксида титана, например 600-V-5, содержит данные о температуре термообработки (600 °С), модифицирующем металле (V) и его содержании в продукте (5 мас. %).

В таблице 1 показано изменение численности грамотрицательных бактерий *Pseudomonas fluorescens* при облучении искусственным светом (степень освещенности (E) 4 300 лк) в присутствии W-модифицированных ФК.

Таблица 1

Изменение численности бактерий (*Pseudomonas fluorescens*)
в присутствии ФК (10 мг/мл) в зависимости от времени облучения

Образец	$N, \times 10^7$ кл/мл	
	Исходная	Через 24 ч
Контроль	6,3	361
P25	2,1	132
TiO_2	1,5	130
600-W-5	1,8	102
600-W-20	1,4	0
600-W-30	1,2	0,4

Видно, что применение образцов 600-W-20 и 600-W-30 приводит к полному ингибированию и деструкции бактерий в отличие от образцов P25 и TiO_2 .

Изучение кинетики фотокаталитической инактивации бактерий в присутствии ФК 600-W-20 при облучении естественным светом ($E = 14\,500$ лк), показало, что в первые 45 мин N снижается на 5 порядков, а через 120 мин бактерий не обнаруживается (рис. 1) [14].

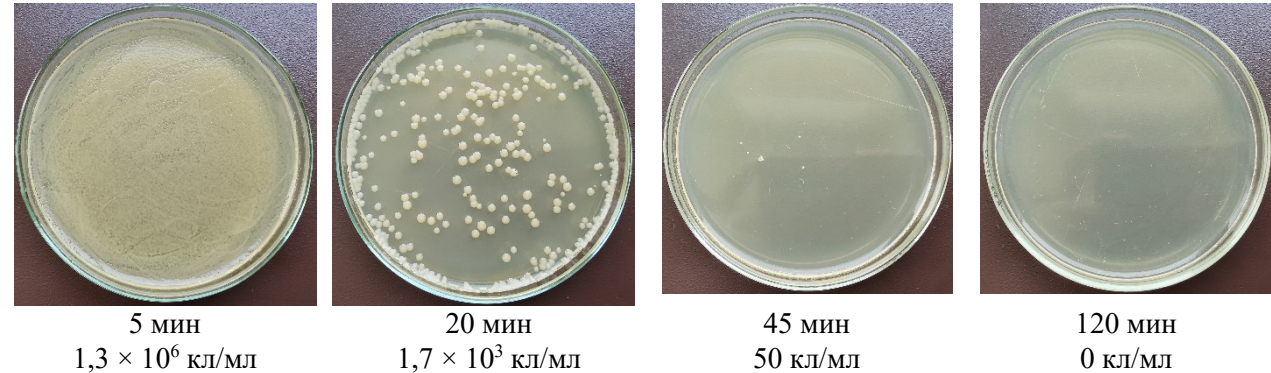


Рис. 1. Изображения колоний *Pseudomonas fluorescens* на чашке с агаром после облучения в присутствии ФК 600-W-20 (10 мг/мл). Исходная численность бактерий $2,0 \times 10^6$ к/мл

Применение Fe-модифицированных ФК также приводит к существенному снижению численности бактерий. Так, в присутствии образца 600-Fe-5 при облучении искусственным светом ($E = 4\,300$ лк) в течение 4 ч N снижается в два раза (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость численности бактерий (*Pseudomonas alcaliphila*) от времени облучения и ФК (2 мг/мл)

Образец	$N, \times 10^6$ к/мл		
	Исходная	Через 2 ч	Через 4 ч
600-W-10	250	61	3
600-Fe-5	84	48	42

AA образцов существенно зависит от степени освещенности. На рис. 2 на примере образца ФК 600-W-20 показана зависимость AA от степени освещенности.

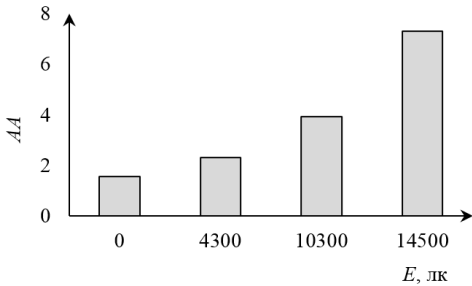


Рис. 2. Зависимость AA ФК (10 мг/мл) от E . Время облучения 3 ч

Видно, что при увеличении E от 0 до $14\,500$ лк AA увеличивается в 7 раз. Таким образом, чем выше степень освещенности бактериальной суспензии в присутствии ФК, тем выше степень инактивации и деструкции бактерий. Наличие AA при нулевом освещении связано с предварительной фотоактивацией ФК в процессе синтеза и хранения, что наблюдалось и в других работах [15; 16].

V-модифицированные ФК, так же как и вышеприведенные образцы, эффективны в процессах фотокаталитической инактивации грамотрицательных бактерий. Из табл. 3 видно, что при искусственном освещении в присутствии ФК (2 мг/мл) N существенно снижается ($>50\%$) уже в первые 3 ч облучения, а через 24 ч N стремится к нулю.

Таблица 3

Изменение численности бактерий *Pseudomonas fluorescens*
в зависимости от времени облучения в присутствии ФК (2 мг/мл), $E = 2\ 800$ лк

Образец	$N, \times 10^5$ кл/мл			
	Исходная	3 ч	6 ч	24 ч
600-TiO ₂	$1,6 \pm 0,27$	$0,62 \pm 0,2$	$0,68 \pm 0,09$	$0,41 \pm 0,02$
600-V-2,5	$1,6 \pm 0,27$	$1,02 \pm 0,19$	$0,45 \pm 0,13$	$0,26 \pm 0,001$
600-V-5	$1,6 \pm 0,27$	$0,29 \pm 0,09$	$0,31 \pm 0,02$	$0,001 \pm 0,0001$
600-V-20	$1,6 \pm 0,27$	$0,75 \pm 0,09$	$0,22 \pm 0,02$	$0,00007 \pm 0,000003$

Исследования АА ФК по отношению к грамположительным бактериям, в том числе спорообразующим, также показали их высокую эффективность. В табл. 4 показано изменение N бактерий *Micrococcus luteus* и *Bacillus brevis* при облучении ($E = 14\ 000$ – $43\ 000$ лк) в присутствии различных ФК.

Таблица 4

Изменение численности грамположительных бактерий (*Micrococcus luteus*, *Bacillus brevis*)
в зависимости от времени облучения в присутствии ФК (2 мг/мл)

Образец	<i>Micrococcus luteus</i> , $N, \times 10^5$ кл/мл, $E = 14\ 000$ лк			
	Исходная	Через 3 ч	Через 6 ч	Через 24 ч
600-W-10	7 ± 2	$2,85 \pm 0,15$	$2,55 \pm 0,35$	$0,04 \pm 0,01$
600-W-20	7 ± 2	$1,05 \pm 0,05$	$0,42 \pm 0,02$	$0,007 \pm 0,002$
	<i>Bacillus brevis</i> , $N, \times 10^4$ кл/мл, $E = 43\ 000$ лк			
	Исходная	Через 3 ч	Через 6 ч	Через 24 ч
600-W-10	$10,5 \pm 1,5$	$0,45 \pm 0,05$	$0,4 \pm 0,1$	$0,05 \pm 0,01$
600-W-20	$10,5 \pm 1,5$	$1,15 \pm 0,15$	$0,65 \pm 0,35$	$0,13 \pm 0,01$
600-V-2,5	$0,7 \pm 0,28$	$0,54 \pm 0,25$	$0,5 \pm 0,19$	$0,28 \pm 0,02$
600-V-5	$0,7 \pm 0,28$	$0,68 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,25$	$0,23 \pm 0,027$
600-V-20	$0,7 \pm 0,28$	$0,67 \pm 0,18$	$0,5 \pm 0,1$	$0,45 \pm 0,09$

Из таблицы 4 видно, что инактивация грамположительных бактерий при облучении видимым светом в присутствии разработанных нами ФК довольно эффективна, хотя и в меньшей степени, чем при инактивации грамотрицательных бактерий, что связано с более сложной клеточной стенкой грамположительных и спорообразующих бактерий, что, в свою очередь, определяет их жизнеспособность и устойчивость к внешним факторам. Тем не менее численность *Micrococcus luteus* в процессе фотокаталитической инактивации снизилась более чем на 99 %, а численность *Bacillus brevis* — на 96–99,5 %.

Увеличение времени контакта, количества ФК и/или степени освещенности во всех вышеописанных случаях приводит к полной инактивации и гибели бактерий.

Выводы

Изучена фотокаталитическая инактивация грамотрицательных (*Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas alcaliphila*) и грамположительных (*Micrococcus luteus*, *Bacillus brevis*) бактерий в присутствии различных ФК при облучении видимым светом.

Показано, что примененные ФК позволяют эффективно инактивировать различную бактериальную микрофлору при облучении видимым светом. При этом степень инактивации и деструкции бактерий, зависящая от вида бактерии, применяемого ФК и его количества, времени контакта и степени освещенности, составляет 95–100 %.

Наиболее эффективными образцами являются ФК с маркировкой 600-W-20, 600-W-10, 600-V-5, 600-V-20.

Список источников

1. Седнева Т. А., Локшин Э. П., Беликов М. Л., Беляевский А. Т. Структура и морфология диоксида титана, модифицированного железом // Неорганические материалы. 2011. Т. 47, № 11. С. 1323–1332.
2. Седнева Т. А., Локшин Э. П., Беликов М. Л., Калинин В. Т. Фотокаталитическая активность мезопористых нанокомпозитов $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ // Доклады Академии наук. 2012. Т. 447, № 5. С. 523–525.
3. Седнева Т. А., Локшин Э. П., Калинин В. Т., Беликов М. Л. Фотокаталитическая активность модифицированного вольфрамом диоксида титана // Доклады Академии наук. 2012. Т. 443, № 2. С. 195–197.
4. Седнева Т. А., Локшин Э. П., Беликов М. Л., Беляевский А. Т. Фотокаталитические композиты на основе TiO_2 и Nb_2O_5 // Неорганические материалы. 2013. Т. 49, № 4. С. 395–403.
5. Седнева Т. А., Локшин Э. П., Беликов М. Л., Беляевский А. Т. Синтез и физико-химические свойства фотокаталитических оксидных композитов на основе титана (IV) и кобальта (II) // Неорганические материалы. 2016. Т. 52, № 2. С. 187–196.
6. Седнева Т. А., Беликов М. Л., Локшин Э. П. Синтез и фотокаталитические свойства наноматериалов на основе оксидов титана (IV) и церия (IV) // Неорганические материалы. 2016. Т. 52, № 10. С. 1081–1090.
7. Седнева Т. А., Беликов М. Л., Локшин Э. П. Синтез и фотокаталитические свойства наноматериалов на основе титана (IV) и цинка (II) // Неорганические материалы. 2016. Т. 52, № 12. С. 1343–1352.
8. Беликов М. Л., Седнева Т. А., Локшин Э. П. Синтез, свойства и фотокаталитическая активность в видимом свете нестехиометрических оксидных композитов на основе диоксида титана // Неорганические материалы. 2020. Т. 56, № 6. С. 762–773.
9. Беликов М. Л., Седнева Т. А., Локшин Э. П. Адсорбционные и фотокаталитические свойства диоксида титана, модифицированного вольфрамом // Неорганические материалы. 2021. Т. 47, № 2. С. 154–162.
10. Беликов М. Л., Сафарян С. А. Синтез и фотокаталитические свойства диоксида титана, модифицированного ванадием // Неорганические материалы. 2025. Т. 61, № 7–8. С. 411–423.
11. Аристовская В. В., Владимирская М. Е., Голлербах М. М. Большой практикум по микробиологии: Учебное пособие. М.: Высшая школа. 1962. 491 с.
12. Caballero L., Whitehead K. A., Allen N. S., Verran J. Inactivation of *Escherichia coli* on immobilized TiO_2 using fluorescent light // J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 2009. Vol. 202, No. 2–3. P. 92–98.
13. Matthews R. W., McEvoy S. R. Destruction of Phenol in Water with Sun, Sand, and Photocatalysis // Solar Energy. 1992. Vol. 49. P. 507–513.
14. Беликов М. Л., Фокина Н. В., Редькина В. В., Сафарян С. А. Фотокаталитическая инактивация бактерий в присутствии диоксида титана, модифицированного вольфрамом, при облучении видимым светом // Кинетика и катализ. 2022. Т. 63, № 4. С. 433–445.
15. Popov A. L., Zhlobak N. M., Balko O. I., Balko O. B., Shcherbakov A. B., Popova N. R., Ivanova O. S., Baranchikov A. E., Ivanov V. K. Photo-induced toxicity of tungsten oxide photochromic nanoparticles // J. Photochem. Photobiol. B: Biol. 2017. Vol. 178. P. 395–403.
16. Verdier T., Coutand M., Bertron A., Roques C. Antibacterial Activity of TiO_2 Photocatalyst Alone or in Coatings on *E. coli*: The Influence of Methodological Aspects // Coatings. 2014. Vol. 4, No. 3. P. 670–686.

References

1. Sedneva T. A., Lokshin E. P., Belikov M. L., Belyaevskij A. T. Struktura i morfologiya poroshkov dioksida titana, modifitsirovannogo zhelezom [Structure and morphology of iron-modified titanium dioxide powders]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2011, Vol. 47, No. 11, pp. 1323–1332. (In Russ.).
2. Sedneva T. A., Lokshin E. P., Belikov M. L., Kalinnikov V. T. Fotokataliticheskaya aktivnost' mezoporistyyh nanokompozitov $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ [Photocatalytic activity of mesoporous $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ nanocomposites]. *Doklady Akademii nauk* [Papers of the Academy of Sciences], 2012, Vol. 447, No. 5, pp. 523–525. (In Russ.).
3. Sedneva T. A., Lokshin E. P., Kalinnikov V. T., Belikov M. L. Fotokataliticheskaya aktivnost' modifitsirovannogo vol'framom dioksida titana [Photocatalytic activity of tungsten-modified titanium dioxide]. *Doklady Akademii nauk* [Papers of the Academy of Sciences], 2012, Vol. 443, No. 2, pp. 195–197. (In Russ.).
4. Sedneva T. A., Lokshin E. P., Belikov M. L., Belyaevskij A. T. Fotokataliticheskie kompozity na osnove TiO_2 i Nb_2O_5 [Photocatalytic composites based on TiO_2 and Nb_2O_5]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2013, Vol. 49, No. 4, pp. 395–403. (In Russ.).

5. Sedneva T. A., Lokshin E. P., Belikov M. L., Belyaevskij A. T. Sintez i fiziko-khimicheskie svojstva fotokataliticheskikh oksidnykh kompozitov na osnove titana(IV) i kobal'ta(II) [Synthesis and physicochemical properties of photocatalytic oxide composites based on titanium(IV) and cobalt(II)]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2016, Vol. 52, No. 2, pp. 187–196. (In Russ.).
6. Sedneva T. A., Belikov M. L., Lokshin E. P. Sintez i fotokataliticheskie svojstva nanomaterialov na osnove oksidov titana (IV) i ceriya (IV) [Synthesis and photocatalytic properties of nanomaterials based on titanium (IV) and cerium (IV) oxides]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2016, Vol. 52, No. 10, pp. 1081–1090. (In Russ.).
7. Sedneva T. A., Belikov M. L., Lokshin E. P. Sintez i fotokataliticheskie svojstva nanomaterialov na osnove titana (IV) i cinka (II) [Synthesis and photocatalytic properties of nanomaterials based on titanium (IV) and zinc (II)]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2016, Vol. 52, No. 12, pp. 1343–1352. (In Russ.).
8. Belikov M. L., Sedneva T. A., Lokshin E. P. Sintez, svojstva i fotokataliticheskaya aktivnost' v vidimom svete nestekhiometricheskikh oksidnykh kompozitov na osnove dioksida titana [Synthesis, properties and photocatalytic activity in visible light of non-stoichiometric oxide composites based on titanium dioxide]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2020, Vol. 56, No. 6, pp. 762–773. (In Russ.).
9. Belikov M. L., Sedneva T. A., Lokshin E. P. Adsorbciionnye i fotokataliticheskie svojstva dioksida titana, modifitsirovannogo vol'framom [Adsorptive and photocatalytic properties of titanium dioxide modified with tungsten]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2021, Vol. 47, No. 2, pp. 154–162. (In Russ.).
10. Belikov M. L., Safaryan S. A. Sintez i fotokataliticheskie svojstva dioksida titana, modifitsirovannogo vanadiem [Synthesis and photocatalytic properties of vanadium-modified titanium dioxide]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic Materials], 2025, Vol. 61, No. 7–8, pp. 411–423. (In Russ.).
11. Aristovskaya V. V., Vladimirskaya M. E., Gollerbach M. M. *Bol'shoi praktikum po mikrobiologii: Uchebnoe posobie* [A Large Practical Course in Microbiology: A Textbook]. Moscow, Vysshaya shkola, 1962, 491 p. (In Russ.).
12. Caballero L., Whitehead K. A., Allen N. S., Verran J. Inactivation of *Escherichia coli* on immobilized TiO₂ using fluorescent light. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 2009, Vol. 202, No. 2–3, pp. 92–98.
13. Matthews R. W., McEvoy S. R. Destruction of Phenol in Water with Sun, Sand, and Photocatalysis. *Solar Energy*, 1992, Vol. 49, pp. 507–513.
14. Belikov M. L., Fokina N. V., Redkina V. V., Safaryan S. A. Fotokataliticheskaya inaktivatsiya bakteriy v prisutstvii dioksida titana, modifitsirovannogo vol'framom, pri obluchenii vidimym svetom [Photocatalytic inactivation of bacteria in the presence of tungsten-modified titania under visible light irradiation]. *Kinetika i kataliz* [Kinetics and Catalysis], 2022, Vol. 63, No. 4, pp. 433–445. (In Russ.).
15. Popov A. L., Zholobak N. M., Balko O. I., Balko O. B., Shcherbakov A. B., Popova N. R., Ivanova O. S., Baranchikov A. E., Ivanov V. K. Photo-induced toxicity of tungsten oxide photochromic nanoparticles. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.*, 2017, Vol. 178, pp. 395–403.
16. Verdier T., Coutand M., Bertron A., Roques C. Antibacterial Activity of TiO₂ Photocatalyst Alone or in Coatings on *E. coli*: The Influence of Methodological Aspects. *Coatings*, 2014, Vol. 4, No. 3, pp. 670–686.

Информация об авторах

М. Л. Беликов — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

С. А. Сафарян — аспирант, инженер-исследователь;

Н. В. Фокина — кандидат технических наук, заведующий лабораторией;

А. С. Сошина — аспирант, инженер.

Information about the authors

M. L. Belikov — PhD (Engineering), Senior Researcher;

S. A. Safaryan — Graduate Student, Research Engineer;

N. V. Fokina — PhD (Engineering), Head of laboratory;

A. S. Soshina — Graduate Student, Engineer.

Статья поступила в редакцию 01.09.2025; одобрена после рецензирования 22.09.2025; принята к публикации 30.09.2025.
The article was submitted 01.09.2025; approved after reviewing 22.09.2025; accepted for publication 30.09.2025.