

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ДИОКСИДА ТИТАНА В УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Д.Е. Шашин
А.Д. Дьячков
А.Л. Романов

shashinde@volgatech.net
addyachkov@gmail.com
romanoval@volgatech.net

Волгатех, Йошкар-Ола, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены вопросы эффективности применения фотокаталитических пленок диоксида титана в устройствах для очистки воды. Несмотря на множество работ, опубликованных по этой тематике, информация о влиянии фотокатализа на характеристики обеззараживаемой воды довольно противоречива и не систематизирована: связано это с большим числом параметров, по которым оценивается качество воды. К важнейшим из таких параметров можно отнести мутность и цветность. Для их определения оптическое пропускание является фундаментальным параметром. Методом импульсного реактивного магнетронного распыления сформирована фотокаталитическая пленка TiO_2 на внешней поверхности кварцевой колбы, защищающей УФ-лампу устройства для очистки воды от механических повреждений. Предложенное решение позволяет избежать потерь УФ-излучения на преодоление слоя воды, что положительно сказывается на интенсивности фотокаталитической реакции. Апробирована экспериментальная установка, состоящая из проточного обеззараживателя, в котором осуществляется разложение органических загрязнителей, резервуара с очищаемой жидкостью и насоса. Эта установка позволяет провести оценку эффективности применения фотокаталитических элементов в устройствах для очистки воды. Экспериментально показано, что применение фотокаталитического элемента в проточном реакторе для очистки воды позволяет увеличить минимальное оптическое пропускание 0,005 % раствора метиленового синего в диапазоне

Ключевые слова

Фотокатализ, диоксид титана, фотокаталитические пленки, обеззараживание воды, магнетронное распыление, спектрофотометрия, оптическое пропускание

длин волн 500...700 нм от 40...45 % при разложении УФ-обеззараживателем без фотокаталитического элемента до 58...65 % при использовании фотокаталитического элемента

Поступила 15.09.2025

Принята 21.10.2025

© Автор(ы), 2026

Введение. Одним из наиболее перспективных способов создания экономичных и энергоэффективных устройств для очистки воды является использование полупроводниковых фотокатализаторов, активирующих процессы окисления органических загрязнителей [1–5]. Преимущества таких устройств — долговечность фотокаталитических элементов, не требующих регулярной замены.

В фотокаталитических процессах часто применяют широкозонные полупроводниковые материалы. Среди них особенно выделяется диоксид титана (TiO_2), который характеризуется значительной фотокаталитической эффективностью и устойчивостью к химическим воздействиям [6–8]. Для активации фотокаталитических процессов в присутствии TiO_2 применяют источники излучения с длиной волны $\lambda < 370$ нм, что соответствует УФ-диапазону. Существуют три основные кристаллические формы TiO_2 : 1) анатаз; 2) рутил; 3) брукит. Термодинамические и структурные исследования подтверждают, что анатаз — наиболее стабильная фаза TiO_2 вследствие относительно низкой поверхностной энергии. Ширина запрещенной зоны для TiO_2 находится в области значения 3,23 эВ для анатаза и в диапазоне 3,1...3,4 эВ для рутила и брукита.

Основной метод обработки воды с применением фотокатализа заключается в нанесении фотокаталитической пленки на поверхности, непосредственно контактирующие с водой, и воздействии на эти поверхности УФ-излучением [9–12].

Важнейший этап при разработке технологии очистки воды — определение эффективности работы фотокатализатора в различных условиях окружающей среды. Оценка эффективности фотокатализатора обычно осуществляется за счет мониторинга скорости разложения органических красителей в водном растворе в контролируемых условиях [11, 12]. Несмотря на большое число работ, данные о влиянии фотокатализа на характеристики обеззараживаемой воды довольно противоречивы и не систематизированы. Это связано с большим числом параметров, по которым оценивается качество воды. К важнейшим из таких параметров можно отнести мутность и цветность. Для их определения оптическое пропускание является фундаментальным параметром [12].

Цель работы — оценка эффективности применения фотокаталитических пленок диоксида титана в устройствах для очистки воды.

Для достижения цели методом импульсного реактивного магнетронного распыления необходимо сформировать фотокаталитическую пленку TiO_2 на поверхности устройства для очистки воды, непосредственно контактирующей с водой, учитывая возможность технической реализации интенсивного УФ-облучения поверхности; подготовить экспериментальную установку; экспериментально оценить эффективность применения фотокаталитического элемента в проточном реакторе для очистки воды с использованием спектрофотометрического анализа раствора метиленового синего, прошедшего обработку в проточном обеззараживателе с применением фотокаталитического элемента и без него.

Формирование фотокаталитических пленок оксида титана. Фотокаталитические пленки TiO_2 формировали на внешней стороне колбы размером $23 \times 1,5 \times 180$ мм, защищающей УФ-лампу от механических повреждений. Колба изготовлена из кварцевого стекла марки КУ 1, которое является полностью прозрачным в диапазоне $\lambda = 170 \dots 1\,000$ нм. При нанесении пленки на внешнюю сторону кварцевой колбы полностью исключаются потери УФ-излучения на преодоление слоя воды перед попаданием на фотокаталитический слой, что положительно влияет на интенсивность протекающей фотокаталитической реакции.

Тонкие пленки TiO_2 с фотокаталитическими свойствами могут быть сформированы с использованием различных методов, включая физическое осаждение из газовой фазы (например, термическое испарение, реактивное распыление, ионно-лучевое или электронно-лучевое испарение), химическое осаждение из газовой фазы и золь-гель метод. Химическое осаждение из газовой фазы обычно требует значительно более высокой температуры ($300 \dots 800$ °С) по сравнению с физическим осаждением [13, 14]. Это ограничение по температуре делает химическое осаждение неприменимым для подложек, не выдерживающих такие высокие температуры. В последние годы методы физического осаждения из газовой фазы получили наибольшее распространение для формирования тонких пленок TiO_2 , поскольку они обеспечивают большую гибкость в настройке параметров процесса [15, 16].

Особый интерес вызывает метод импульсного реактивного магнетронного распыления, так как он позволяет точно регулировать параметры технологического процесса и, следовательно, оптимизировать функциональные свойства формируемых пленок. Импульсное реактивное

магнетронное распыление заключается в распылении материала мишени в плазме магнетронного разряда и осаждении распыленных частиц на подложку. Использование импульсного источника питания предотвращает образование диэлектрической оксидной пленки на поверхности мишени, что способствует стабильности магнетронного разряда.

Фотокаталитические пленки изготавливали магнетронным распылением на установке с шестью магнетронами и ионным источником. Колба крепилась на планетарный подложкодержатель, который обеспечивал вращение колбы не только относительно магнетронов, но и относительно собственной оси. Применяемая установка магнетронного распыления имеет систему получения вакуума на основе пластинчато-роторного насоса, насоса Рутса и высоковакуумного турбомолекулярного насоса [17, 18]. Колбы из кварцевого стекла очищали в дистиллированной воде и парах ацетона, после чего загружали в вакуумную камеру, в которой создавался высокий вакуум. Затем колбы прогревались и в камеру подавалась рабочая смесь газов аргона с кислородом. После запуска рабочей смеси включали магнетроны и на внешней стороне колбы формировалась фотокаталитическая пленка TiO_2 . После остывания подложек осуществляли замер толщины полученных пленок конвертным методом [19, 20], толщина пленки составила 500 ± 50 нм. Схема технологического процесса и основные технологические параметры формирования фотокаталитических пленок TiO_2 методом реактивного импульсного магнетронного распыления показаны на рис. 1.

Подготовка экспериментальной установки. В качестве устройства для очистки воды, в котором применялись фотокаталитические элементы, использовали обеззараживатель проточного типа (рис. 2).

Вода, поступающая в корпус из коррозионно-стойкой стали через входной штуцер, обтекает колбу из кварцевого стекла, защищающую УФ-лампу, и подвергается интенсивному УФ-облучению перед выходом через выпускной патрубок (рис. 3). Бактерицидное действие обеспечивается воздействием УФ-излучения длиной волны $\lambda < 390$ нм, которое вызывает повреждение нуклеиновых кислот (ДНК и РНК) микроорганизмов, что нарушает их репродуктивную способность на генетическом уровне. Этот эффект распространяется не только на вегетативные клетки бактерий, но и на споровые формы, обладающие повышенной устойчивостью к внешним воздействиям.

Исследование эффективности применения полученных фотокаталитических пленок. Исследование осуществлено на экспериментальной



Рис. 1. Схема технологического процесса формирования фотокаталитических пленок TiO_2

установке (см. рис. 3), включающей в себя проточный обеззараживатель (см. рис. 2), резервуар с очищаемой жидкостью и насос. Очищаемая жидкость представляет собой водный раствор органического красителя метиленового синего ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$) концентрацией 0,005 %. Объем резервуара 200 л. Насос обеспечивал расход 0,2 м³/ч. В обеззараживателе использовали ртутную УФ-лампу, которая облучает поверхность колбы с фотокаталитической пленкой энергией не менее 40 мДж/см². Выполнены две серии экспериментов. В первой серии проведена оценка степени разложения раствора обеззараживателем, в котором установлена стандартная кварцевая колба без фотокаталитической пленки TiO_2 . Вторая серия проведена с кварцевой колбой, на поверхности которой сформирована фотокаталитическая пленка TiO_2 . При проведении первой и второй серий установка включалась на 1 ч, после чего проводили отбор проб и измерение их оптического пропускания спектрофотометрическим методом. В первой и второй сериях экспериментов отбирались по три пробы на разных глубинах резервуара.

Рис. 2. Объемная модель обеззараживателя воды проточного типа

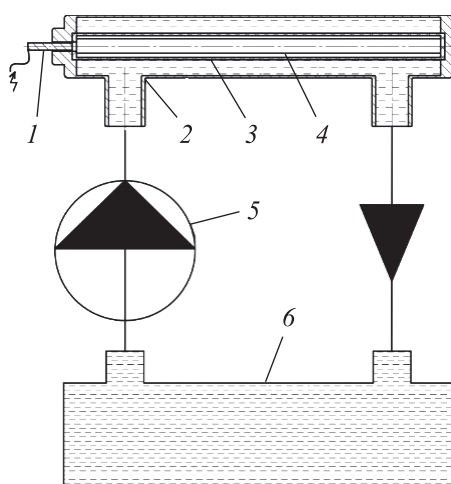
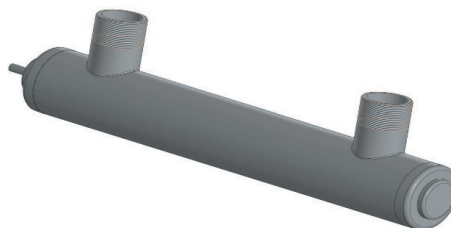


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

1 — провод электропитания; 2 — корпус из стали; 3 — защитная колба из кварцевого стекла; 4 — ртутная УФ-лампа мощностью 8 Вт; 5 — насос; 6 — резервуар с очищаемой жидкостью

Измерение оптического пропускания проведено на спектрофотометре СФ-2000 в диапазоне значений длин волн 200...1100 нм, образцы растворов помещали в кюветы с длиной оптического пути 1 мм и объемом пробы 0,75 мл. Результаты исследований на спектрофотометре приведены на рис. 4.

На спектре 1 заметно, что метиленовый синий сильно снижает пропускание в диапазоне длин волн 500...700 нм. Необходимо отметить, что спектр пропускания 2, который снят с раствора, обработанного обеззараживателем без фотокаталитического элемента, имеет более слабое пропускание (40...45 %) в диапазоне длин волн 500...700 нм, чем раствор обработанный с применением фотокаталитического элемента — спектр 3 (58...65 %). Это свидетельствует о более высокой степени разложения метиленового синего в присутствии фотокатализатора. Для сравнения показан спектр пропускания водопроводной питьевой воды — спектр 4.

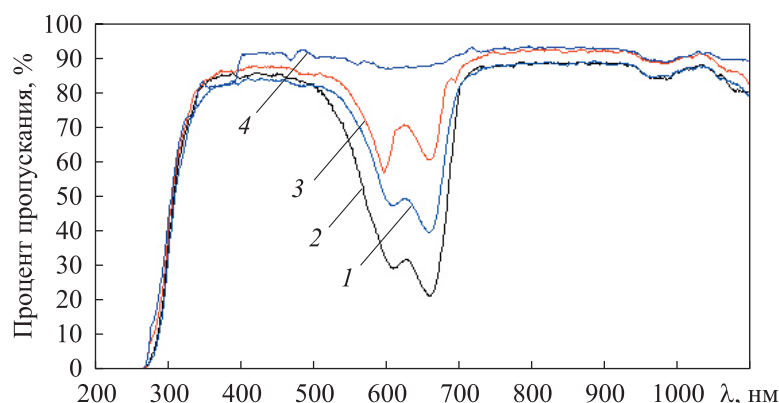


Рис. 4. Результаты исследований спектров пропускания исходного раствора метиленового синего до УФ-облучения (1), растворов, обработанных обеззараживателем без фотокаталитического элемента (2) и с его применением (3), водопроводной питьевой воды (4)

Наблюдаемое повышение эффективности УФ-очистки при использовании фотокаталитического элемента обусловлено следующим физическим процессом в материале нанесенного слоя. Диоксид титана TiO_2 представляет собой оксидный полупроводник, где электроны существуют в виде свободных и связанных электронов. Свободные электроны перемещаются по всему объему полупроводниковой структуры. Связанные электроны локализованы вблизи атомов кристаллической решетки и участвуют в формировании химических связей. Для перевода электрона в свободное состояние необходимо внешнее воздействие, например электромагнитное, с длиной волны не более 370 нм. Воздействие излучения приводит к формированию электронно-дырочных пар, которые на поверхности TiO_2 способны взаимодействовать с молекулами, находящимися в адсорбированном состоянии. Этот процесс и является основой для фотокаталитической реакции, где TiO_2 выступает в роли катализатора, активируемого светом. Адсорбер, захватывая электрон, трансформируется в свободный радикал, создавая окислительную среду, способную разрушать органические вещества. Таким образом, под действием УФ-излучения TiO_2 проявляет выраженные окислительные свойства. Покрытая пленкой TiO_2 подложка может самоочищаться от органических загрязнений вследствие фотокаталитического окисления.

Выводы. Методом импульсного реактивного магнетронного распыления сформирована фотокаталитическая пленка TiO_2 на внешней поверхности защитной кварцевой колбы, защищающей УФ-лампу от меха-

нических повреждений. Предложенное решение позволяет избежать потерь УФ-излучения на преодоление слоя воды, что положительно влияет на интенсивность фотокаталитической реакции.

Экспериментально показано, что применение фотокаталитического элемента в проточном реакторе для очистки воды позволяет увеличить оптическое пропускание 0,005 % раствора метиленового синего в диапазоне значений длин волн 500...700 нм от 40...45 % при разложении УФ-обеззараживателем без фотокаталитического элемента до 58...65 % при использовании фотокаталитического элемента.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Prakash J., Gupta R.K., Swart H.C., et al. Noble metals-TiO₂ nanocomposites: from fundamental mechanisms to photocatalysis, surface enhanced Raman scattering and antibacterial applications. *Appl. Mater. Today*, 2018, vol. 11, pp. 82–135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.02.002>
- [2] Niemelä, J.P., Marin G., Karppinen M. Titanium dioxide thin films by atomic layer deposition: a review. *Semicond. Sci. Technol.*, 2017, vol. 32, no. 9, art. 093005. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aa78ce>
- [3] Zhang W., Tian Y., He H., et al. Recent advances in the synthesis of hierarchically mesoporous TiO₂ materials for energy and environmental applications. *Natl. Sci. Rev.*, 2020, vol. 7, no. 11, pp. 1702–1725. DOI: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa021>
- [4] Rafiq A., Ikram M., Ali S., et al. Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water pollution. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2021, vol. 97, pp. 111–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.02.017>
- [5] Abid N., Shujait S., Chaudhary K., et al. Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: a review. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2022, vol. 300, art. 102597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102597>
- [6] Надточенко В.А., Саркисов О.М., Никандров В.В. и др. Инактивация болезнетворных микроорганизмов в фотокаталитических процессах с использованием наноразмерных кристаллов TiO₂. *Химическая физика*, 2008, т. 27, № 1, с. 26–36. EDN: IBYTMZ
- [7] Корчин В.И., Миняйло Л.А., Корчина Т.Я. Содержание химических элементов в водопроводной питьевой воде с различным уровнем очистки (на примере городов Ханты-Мансийского автономного округа). *Журнал медико-биологических исследований*, 2018, т. 6, № 2, с. 188–197. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2018.6.2.188>
- [8] Лимаренко Н.В. Анализ способов обеззараживания воды. *Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения. Сб. ст. 8-й Междунар. науч.-практ. конф.* Ростов н/Д., ДГТУ, 2015, с. 605–606. EDN: UJDISL

- [9] Костюченко С.В., Ткачев А.А., Фроликова Т.Н. УФ-технологии для обеззараживания воды, воздуха и поверхностей: принципы и возможности. *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*, 2020, Т. 19, № 5, с. 112–119. EDN: MHO GAM
- [10] Бугаев А.С., Шешин Е.П., Озол Д.И. и др. Современные направления развития источников УФ-излучения бактерицидного диапазона. *Вестник МГОУ. Сер. Физика-математика*, 2017, № 4, с. 24–38.
DOI: <https://doi.org/10.18384/2310-7251-2017-4-24-38>
- [11] Михальченко Т.С., Шардина А.О., Юлдашова Л.Ш. и др. Влияние ультрафиолетового излучения на микроорганизмы в водной среде. *Электронные средства и системы управления. Матер. докл. Междунар. науч.-практ. конф.*, 2019, № 1-2, с. 24–26. EDN: BRLDQW
- [12] Гинаятлов Н.С., Залялов И.Н., Абсатиров Г.Г. и др. Сравнительная оценка эффективности методов обеззараживания воды в установках замкнутого водоснабжения. *Ученые записки Казанской ГАВМ им. Н.Э. Баумана*, 2017, т. 232, № 4, с. 43–46. EDN: ZVRHNL
- [13] Белянин А.Ф., Налимов С.А., Борисов В.В. и др. Влияние отжига на строение пленок ZnO, выращенных магнетронным распылением. *Вакуумная наука и техника. Матер. XXV науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов*. М., Новелла, 2018, с. 170–176.
- [14] Шашин Д.Е., Дьячков А.Д. Формирование фотокаталитических пленок TiO₂ методом реактивного магнетронного распыления с применением квазизамкнутого пространства. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 3 (148), с. 75–90. EDN: LILUCB
- [15] Шашин Д.Е., Владимиров Д.С. Исследование супергидрофильных свойств пленок TiO₂, сформированных методом реактивного магнетронного распыления, и разработка технологии для их усиления. *Вестник ПГТУ. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*, 2024, № 2, с. 74–85.
DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2024.2.74>
- [16] Романов А.Л., Шашин Д.Е., Дьячков А.Д. и др. Особенности формирования многослойных структур методом магнетронного распыления. *Вакуумная техника, материалы и технология. Тез. XVIII Междунар. науч.-техн. конф.* М., Электровакуумные технологии, 2024, с. 37–38. EDN: EGFFBS
- [17] Шашин Д.Е. Разработка математической модели формирования тонких пленок оксида цинка с заданными значениями комплексной диэлектрической проницаемости. *Вестник ПГТУ. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*, 2018, № 4, с. 74–81. EDN: YPSPYA
- [18] Shashin D.E., Sushentsov N.I. Obtaining thin metal films and their compounds using magnetron sputtering and arc evaporation in a single technological cycle. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2059, art. 012022.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2059/1/012022>

[19] Shashin D.E., Sushentsov N.I. Development of manufacturing technology of photo-dielectric sensitive element of ultraviolet range on the basis of thin films of zinc oxide. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2019, № 6 (129), с. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2019-6-99-109>

[20] Белянин А.Ф., Борисов В.В., Сушенцов Н.И. и др. Влияние термической обработки на строение и характеристики автоэмиссионных катодов на слоистых структурах нитрида титана и углеродных наностенок. *Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век*, 2017, т. 9, № 1, с. 4–11. EDN: ZCJBAN

Шашин Дмитрий Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Волгатека (Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3).

Дьячков Алексей Дмитриевич — аспирант кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Волгатека (Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3).

Романов Алексей Леонидович — заведующий лабораторией кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Волгатека (Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шашин Д.Е., Дьячков А.Д., Романов А.Л. Исследование эффективности применения фотокаталитических пленок диоксида титана в устройствах для очистки воды. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2026, № 1 (154), с. 34–46. EDN: EBSWBK

**STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF PHOTOCATALYTIC
TITANIUM DIOXIDE FILMS IN WATER
PURIFICATION DEVICES**

D.E. Shashin

A.D. Dyachkov

A.L. Romanov

shashinde@volgatech.net

addyachkov@gmail.com

romanoval@volgatech.net

Volgatech, Yoshkar-Ola, Russian Federation

Abstract

The article discusses the effectiveness of titanium dioxide photocatalytic films in water purification devices. Despite the many studies published on this topic, information on the effect of photocatalysis on the characteristics of disinfected water is rather contradictory and unsystematic. This is due to the

Keywords

Photocatalysis, titanium dioxide, photocatalytic films, water disinfection, magnetron sputtering, spectrophotometry, optical transmittance

large number of parameters used to assess water quality, the most important of which are turbidity and colour. Optical transmittance is a fundamental parameter for determining these parameters. A TiO_2 photocatalytic film was formed on the outer surface of a quartz bulb protecting the UV lamp of the water purification device from mechanical damage using the pulsed reactive magnetron sputtering method. The proposed solution avoids the loss of UV radiation when passing through the water layer, which has a positive effect on the intensity of the photocatalytic reaction. An experimental setup consisting of a flow-through disinfectant, in which organic pollutants are decomposed, a tank with the liquid to be purified, and a pump has been tested. This setup allows the effectiveness of photocatalytic elements in water purification devices to be evaluated. It has been experimentally shown that the use of a photocatalytic element in a flow-through reactor for water purification allows the optical transmittance of a 0.005 % methylene blue solution in the 500–700 nm wavelength range to be increased from 40–45 % when decomposed by a UV disinfectant without a photocatalytic element to 58–65 % when using a photocatalytic cell

Received 15.09.2025

Accepted 21.10.2025

© Author(s), 2026

REFERENCES

- [1] Prakash J., Gupta R.K., Swart H.C., et al. Noble metals- TiO_2 nanocomposites: from fundamental mechanisms to photocatalysis, surface enhanced Raman scattering and antibacterial applications. *Appl. Mater. Today*, 2018, vol. 11, pp. 82–135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2018.02.002>
- [2] Niemelä, J.P., Marin G., Karppinen M. Titanium dioxide thin films by atomic layer deposition: a review. *Semicond. Sci. Technol.*, 2017, vol. 32, no. 9, art. 093005. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aa78ce>
- [3] Zhang W., Tian Y., He H., et al. Recent advances in the synthesis of hierarchically mesoporous TiO_2 materials for energy and environmental applications. *Natl. Sci. Rev.*, 2020, vol. 7, no. 11, pp. 1702–1725. DOI: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa021>
- [4] Rafiq A., Ikram M., Ali S., et al. Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water pollution. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2021, vol. 97, pp. 111–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.02.017>
- [5] Abid N., Shujait S., Chaudhary K., et al. Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, influencing factors, advantages, and disadvantages: a review. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2022, vol. 300, art. 102597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102597>

- [6] Nadtochenko V.A., Sarkisov O.M., Nikandrov V.V., et al. Inactivation of pathogenic microorganisms in the photocatalytic process on nanosized TiO₂ crystals. *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 105–114.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990793108010168>
- [7] Korchin V.I., Minyaylo L.A., Korchina T.Ya. The chemical composition of tap water with different quality of purification (exemplified by the cities of Khanty-Mansi autonomous area). *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy* [Journal of Medical and Biological Research], 2018, vol. 6, no. 2, pp. 188–197 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2018.6.2.188>
- [8] Limarenko N.V. [Analysis of water disinfection methods]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya selskokhozyaystvennogo mashinostroeniya. Sb. st. 8-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Status and development prospects of agricultural engineering. Proc. 8th Int. Sci.-Pract. Conf.]. Rostov on Don, DSTU Publ., 2015, pp. 605–606 (in Russ.). EDN: UJDISL
- [9] Kostyuchenko S.V., Tkachev A.A., Frolikova T.N. UV-technologies for disinfection of water, air and surfaces: principles and possibilities. *Epidemiologiya i vaksinoprofilaktika* [Epidemiology and Vaccinal Prevention], 2020, vol. 19, no. 5, pp. 112–119 (in Russ.). EDN: MHOGAM
- [10] Bugaev A.S., Sheshin E.P., Ozol D.I., et al. Modern trends in the development of UV-sources of germicidal range. *Vestnik MGOU. Ser. Fizika-matematika* [Bulletin of Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics], 2017, no. 4, pp. 24–38 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18384/2310-7251-2017-4-24-38>
- [11] Mikhilchenko T.S., Shardina A.O., Yuldashova L.Sh., et al. Effect of ultraviolet radiation on microorganisms in an aquatic environment. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Mater. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Electronic Devices and Control Systems. Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.], 2019, no. 1-2, pp. 24–26 (in Russ.). EDN: BRLDQW
- [12] Ginayatov N.S., Zalyalov I.N., Absatirov G.G., et al. Assessment by effectiveness of methods of disinfection water in installations of the closed water supply. *Uchenye zapiski Kazanskoy GAVM im. N.E. Baumana* [Scientific Notes of the Kazan Academy of Veterinary Medicine n.a. N.E. Bauman], 2017, vol. 232, no. 4, pp. 43–46 (in Russ.). EDN: ZVRHNL
- [13] Belyanin A.F., Nalimov S.A., Borisov V.V., et al. [Influence of annealing on the structure of zno films grown by magnetron sputtering]. *Vakuumnaya nauka i tekhnika. Mater. XXV nauch.-tekh. konf. s uchastiem zarubezhnykh spetsialistov* [Vacuum Science and Technology. Proc. 25th Sci.-Tech. Conf. with Participation of Foreign Experts]. Moscow, Novella Publ., 2018, pp. 170–176 (in Russ.).
- [14] Shashin D.E., Dyachkov A.D. TiO₂ photocatalytic film formation by reactive magnetron sputtering using the quasi-closed space. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 3 (148), pp. 75–90 (in Russ.). EDN: LILUCB
- [15] Shashin D.E., Vladimirov D.S. Research on the superhydrophilic properties of TiO₂ films formed by the reactive magnetron sputtering method and the development

of technology to enhance them. *Vestnik PGTU. Ser. Radiotekh. i infokom. Sistemy* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems], 2024, no. 2, pp. 74–85 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2024.2.74>

[16] Romanov A.L., Shashin D.E., Dyachkov A.D., et al. [Features of the formation of multilayer structures by magnetron sputtering]. *Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya. Tez. XVIII Mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* [Vacuum Technique, Materials, and Technology. Abs. XVIII Int. Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, Elektrovakuumnye tekhnologii Publ., 2024, pp. 37–38 (in Russ.). EDN: EGFFBS

[17] Shashin D.E. Development of a mathematical model of synthesizing thin films of zinc oxide for given complex-valued relative permittivity. *Vestnik PGTU. Ser. Radiotekh. i infokom. Sistemy* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems], 2018, no. 4, pp. 74–81 (in Russ.).

EDN: YPSPYA

[18] Shashin D.E., Sushentsov N.I. Obtaining thin metal films and their compounds using magnetron sputtering and arc evaporation in a single technological cycle. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 2059, art. 012022.

DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2059/1/012022>

[19] Shashin D.E., Sushentsov N.I. Development of manufacturing technology of photo-dielectric sensitive element of ultraviolet range on the basis of thin films of zinc oxide. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2019, no. 6 (129), pp. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2019-6-99-109>

[20] Belyanin A.F., Borisov V.V., Sushentsov N.I., et al. The effect of heat treatment on the structure and characteristics of field emission cathodes on a layered structures of titanium nitride and carbon nanowalls. *Nanotekhnologii: razrabotka, primeneniye – XXI vek* [Nanotechnology: Development and Applications – XXI Century], 2017, vol. 9, no. 1, pp. 4–11 (in Russ.). EDN: ZCJBAH

Shashin D.E. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of the Department of Design and Production of Radio Equipment, Volgatech (Lenina ploshchad 3, Yoshkar-Ola, 424000 Russian Federation).

Dyachkov A.D. — Post-Graduate Student, Department of Design and Production of Radio Equipment, Volgatech (Lenina ploshchad 3, Yoshkar-Ola, 424000 Russian Federation).

Romanov A.L. — Head of the Laboratory, Department of Design and Production of Radio Equipment, Volgatech (Lenina ploshchad 3, Yoshkar-Ola, 424000 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Shashin D.E., Dyachkov A.D., Romanov A.L. Study of the effectiveness of photocatalytic titanium dioxide films in water purification devices. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2026, no. 1 (154), pp. 34–46 (in Russ.). EDN: EBSWBK