EDN: TRELQD DOI: https://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.23.4.007

УДК 544.526.5 *2.2.8*

РАЗРАБОТКА ФОТОАКТИВНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЛЕГИРОВАННОГО ДИОКСИДА ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ, С ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИЕЙ В ВИДИМОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ И ВОЗДУХА

А.М. Максумова[1,2], И.М. Абдулагатов[1,2], М.Н. Гафурова[1,2], А.И. Абдулагатов[1]

[1]Дагестанский государственный университет
Российская Федерация, 367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а

[2] Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики - филиал Объединённого института высоких температур РАН
Российская Федерация, 367030, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 39а

Аннотация. В работе представлены результаты разработки и применения фотоактивных нанопокрытий на основе легированного диоксида титана, полученных методом атомно-слоевого осаждения (АСО), ключевой особенностью которых является фотокаталитическая активация в видимой области спектра при облучении фильтрованным имитированным солнечным светом. Легирование TiO_2 ванадием и молибденом обеспечивает целенаправленное изменение электронной структуры материала: формирование примесных энергетических уровней в запрещённой зоне, сужение эффективной ширины запрещённой зоны до 2.4–2.8 эВ и сдвиг края оптического поглощения в видимый диапазон. Благодаря этому покрытия $Ti_xV_yO_z$ и $Ti_xMo_yO_z$ проявляют высокую фотокаталитическую активность при облучении фильтрованным имитированным солнечным светом ($\lambda > 420$ нм), а не только в УФ-области. Показано, что при указанном облучении степень разложения индигокармина на покрытиях $Ti_xV_yO_z$ достигает 78% за 4 ч, тогда как для нелегированного TiO_2 она не превышает 5–7%. Фотокаталитическая очистка воды сопровождается снижением ХПК до 0 мг O_2/дм³ (100%) и обеспечивает до 100% уничтожение патогенных штаммов E. coli и S. aureus. Впервые методом АСО синтезированы наноплёнки $Ti_xMo_yO_z$ с использованием новой комбинации реагентов ($TiCl_4$, MoO_2Cl_2, H_2O), подтверждена их фотокаталитическая активность в видимой области спектра при облучении фильтрованным имитированным солнечным светом. Покрытия химически стабильны и безопасны: компоненты покрытия не обнаружены выше пределов обнаружения использованных аналитических методов. Разработанные фотоактивные нанопокрытия с управляемыми оптическими свойствами перспективны для создания систем очистки воды и воздуха, функционирующих при облучении видимой частью солнечного спектра ($\lambda > 420$ нм).

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение, легированный диоксид титана, легирование ванадием, легирование молибденом, фотокаталитическая активация в видимой области спектра, фотоактивные нанопокрытия, очистка воды, антибактериальные покрытия.

1. Введение

Загрязнение водных ресурсов органическими поллютантами, включая фармацевтические препараты, промышленные красители и нефтепродукты, а также патогенными микроорганизмами является одной из наиболее острых глобальных экологических проблем современности. По данным Всемирной организации здравоохранения, около 2.2 миллиарда человек не имеют доступа к безопасной питьевой воде, и практически 80% заболеваний в развивающихся странах прямо или косвенно связаны с низким качеством потребляемой воды [1]. Традиционные методы очистки воды,

такие как хлорирование, коагуляция и механическая фильтрация, зачастую оказываются недостаточно эффективными для полного удаления стойких органических загрязнителей и патогенных микроорганизмов, что обусловливает острую необходимость в разработке и внедрении передовых технологий водоподготовки.

Одним из наиболее перспективных подходов в области современной очистки воды является использование фотокаталитических материалов на основе диоксида титана (TiO_2), который благодаря своей высокой фотокаталитической активности, химической стабильности, нетоксичности и широкой доступности привлекает особое внимание исследователей во всём мире. Механизм фотокаталитического действия TiO_2 основан на генерации электрон-дырочных пар под действием излучения с энергией, превышающей ширину запрещённой зоны, которые затем инициируют образование активных форм кислорода, таких как гидроксильные радикалы и супероксид-анионы, способных окислять органические загрязнители до безвредных конечных продуктов - углекислого газа и воды [2].

Основным ограничением широкого применения TiO_2 является его широкая запрещённая зона (3.0–3.4 эВ для анатаза и рутила, соответственно), которая ограничивает фотокаталитическую активность преимущественно ультрафиолетовой областью спектра, составляющей лишь около 3–5% от общего солнечного излучения. Физически это означает, что фотоны с энергией меньше E_g не способны возбудить электрон из валентной зоны в зону проводимости, и, следовательно, не происходит генерации электрон-дырочных пар, необходимых для запуска фотокаталитических реакций.

Легирование TiO_2 ионами переходных металлов (V, Mo, Fe, Cr и др.) позволяет целенаправленно изменять электронную структуру материала. При замещении ионов Ti^{4+} в кристаллической решётке TiO_2 ионами легирующего металла с близким ионным радиусом (например, V^{5+}, Mo^{6+}) в запрещённой зоне TiO_2 формируются дополнительные примесные энергетические уровни. Данные уровни возникают вследствие гибридизации d-орбиталей легирующего металла с зонами TiO_2, что приводит к формированию примесных состояний в запрещённой зоне: частично заполненные d-состояния образуют донорные уровни вблизи минимума зоны проводимости, а незаполненные - акцепторные уровни вблизи максимума валентной зоны. В результате эффективная ширина запрещённой зоны уменьшается, что делает энергетически возможными электронные переходы с участием примесных уровней под действием фотонов видимого диапазона.

Таким образом, легирование TiO_2 переходными металлами обеспечивает:

1. Сужение эффективной ширины запрещённой зоны за счёт появления примесных уровней в запрещённой зоне;
2. Сдвиг края оптического поглощения в длинноволновую область - в видимый диапазон спектра;
3. Повышение квантового выхода фотокатализа при облучении солнечным светом за счёт более эффективного использования видимой части спектра;
4. Снижение скорости рекомбинации электрон-дырочных пар за счёт пространственного разделения носителей заряда на примесных центрах.

Именно эти физические механизмы лежат в основе разработанных в настоящей работе фотоактивных нанопокрытий $Ti_xV_yO_z$ и $Ti_xMo_yO_z$, фотокаталитическая активность которых проявляется в видимой области спектра.

В работе для решения обозначенной проблемы предлагается использование нанотехнологии атомно-слоевого осаждения (АСО), которая представляет собой газофазный метод формирования тонких плёнок, обеспечивающий атомный контроль над толщиной, составом и структурой осаждаемых покрытий. Данная точность достигается за счёт последовательного проведения самоограничивающихся поверхностных химических реакций между газообразными прекурсорами и активными центрами на поверхности подложки, что позволяет формировать монослойные или субмонослойные структуры

с высокой степенью воспроизводимости [3]. К числу ключевых преимуществ АСО-технологии применительно к созданию фильтрующих материалов следует отнести возможность получения 100% конформных покрытий на поверхностях сложной геометрии, точный контроль толщины и состава на уровне отдельных атомных слоёв, низкие температуры осаждения (вплоть до комнатной), что критически важно для термочувствительных полимерных материалов, а также высокую адгезию и отличные барьерные свойства формируемых покрытий. Кроме того, АСО-процесс позволяет точно контролировать концентрацию легирующей добавки, что является определяющим фактором для достижения оптимальных фотокаталитических характеристик и управления оптическими свойствами покрытий, и демонстрирует хорошую масштабируемость, что важно для потенциального промышленного внедрения.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы и реактивы

В качестве прекурсоров для атомно-слоевого осаждения (АСО) использовали тетрахлорид титана ($TiCl_4$, CAS 7550450, Sigma-Aldrich), оксотрихлорид ванадия ($VOCl_3$, CAS 7727186, Synor LLC), диоксидихлорид молибдена(VI) (MoO_2Cl_2, CAS 13637682, Sigma-Aldrich), триметилалюминий (ТМА, $Al(CH_3)_3$, CAS 75241, Sigma-Aldrich) и бидистиллированную воду (H_2O) хроматографической степени чистоты. Чистота ТМА и $TiCl_4$ составляла ~97.0 %, $VOCl_3$ - ~99.0 %, MoO_2Cl_2 - ~98 %. В качестве подложек применяли стеклянные шарики для картриджей систем водоподготовки диаметром 4 мм (натриево-кальциево-силикатное стекло), керамические мембраны для аквариумной фильтрации и фильтры для вентиляционных систем. Перед нанесением покрытий подложки последовательно очищали ацетоном, изопропанолом и деионизованной водой, после чего сушили в потоке азота высокой чистоты и дегазировали в реакционной камере не менее 30 мин. Для фотокаталитических испытаний использовали модельный органический краситель индигокармин. Антибактериальные свойства оценивали на патогенных штаммах Escherichia coli (ATCC 10536) и Staphylococcus aureus (ATCC 6538P).

2.2. Синтез нанопокрытий методом атомно-слоевого осаждения

Нанопокрытия на основе легированного диоксида титана получали методом АСО. Для улучшения адгезии и нуклеации основного покрытия предварительно на поверхность подложек наносили затравочный слой Al_2O_3 толщиной примерно 5 нм, получаемый в результате 50 циклов АСО с использованием ТМА и H_2O.

Наноплёнки $Ti_xV_yO_z$ осаждали при температуре реакционной камеры 180 °C с использованием суперциклов, каждый из которых включал последовательность субциклов $TiCl_4$–H_2O и $VOCl_3$–H_2O, взятых в соотношении 1:1. Постоянная роста составляла примерно 1.1 Å/суперцикл. Для получения покрытия толщиной примерно 17 нм выполняли 150 АСО суперциклов.

Наноплёнки $Ti_xMo_yO_z$ синтезировали с использованием новой комбинации реагентов – $TiCl_4$ и MoO_2Cl_2 в качестве металлсодержащих прекурсоров и H_2O в качестве окислителя. Процесс осаждения проводили при температуре 180 °C. Рост плёнок контролировали in situ методом кварцевого пьезоэлектрического микровзвешивания; постоянная роста составляла 0.9 Å/суперцикл, а количество суперциклов - 150.

2.3. Методы характеризации

Состав и структуру полученных нанопокрытий исследовали методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) (Thermo Fisher Escalab 250Xi), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (JEOL JSM-IT300LV) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) (X-MaxN 20, Oxford Instruments).

2.4. Фотокаталитические испытания

Фотокаталитическую активность полученных материалов исследовали с использованием модельного органического красителя индигокармина в качестве тестового загрязнителя. Готовили 100 мл водного раствора индигокармина с концентрацией 1×10^{-5} М; pH раствора доводили до 2.5–3.5 добавлением HCl. Облучение проводили фильтрованным имитированным солнечным светом ($\lambda > 420$ нм, 100 мВт/см²) от солнечного имитатора Sciencetech SS150W (Sciencetech Inc., Канада) с отсекающим фильтром $\lambda > 420$ нм. Расстояние от выходного окна лампы до поверхности раствора составляло 15 см и было предварительно откалибровано по эталонному фотодиоду для обеспечения заданной облучённости. Оптическое поглощение регистрировали на спектрофотометре UV-3100 (Shanghai Mapada Instruments Co., Ltd.) при длине волны 610 нм. В качестве контроля использовали подложки с покрытием на основе нелегированного TiO_2. Степень разложения индигокармина определяли после 30 мин, 1, 2, 3 и 4 ч экспозиции. Эксперименты проводили трижды с использованием одних и тех же образцов для подтверждения воспроизводимости и стабильности покрытий. Для разделения адсорбции и фотокатализа параллельно проводили опыт в темноте: те же образцы выдерживали в растворе индигокармина 240 мин, отбирали пробы после 30 мин, 1, 2, 3 и 4 ч экспозиции и измеряли поглощение при 610 нм. Адсорбционное равновесие достигается за 30 мин, а кинетические кривые фотокатализа были нормированы на концентрацию после установления равновесия (C_0).

2.5. Антибактериальные испытания

Антибактериальную активность покрытий оценивали в отношении патогенных штаммов E. coli (ATCC 10536) и S. aureus (ATCC 6538P) методом Коха. Суспензии микроорганизмов готовили в стерильном физиологическом растворе с концентрацией 1000 КОЕ/мл. В стерильные контейнеры помещали 10 мл стерилизованной (УФ-обработанной) воды и 10 г образцов с нанопокрытиями и без них, после чего вносили 50 мкл микробной суспензии. Образцы приводили в контакт с микробными суспензиями и облучали фильтрованным имитированным солнечным светом ($\lambda > 420$ нм, 100 мВт/см²) в течение 3 ч; эффективность оценивали по степени инактивации микроорганизмов. После инкубации 1 мл каждой пробы высевали в двух повторностях на чашки Петри с 10–15 мл застывшего питательного агара, охлаждённого до 40–45 °C. Для S. aureus использовали желточный агар, для E. coli - агар Эндо. Чашки инкубировали при (30 ± 1) °C в течение 24 ч; подсчёт колоний проводили с помощью лупы (4–10×) на тёмном фоне. После первого эксперимента образцы стерилизовали УФ-облучением, и эксперимент повторяли ещё дважды для оценки стабильности антибактериальной эффективности. Результаты усредняли по трём экспериментам.

2.6. Оценка стабильности и безопасности покрытий

Для оценки миграции компонентов покрытия в очищаемую среду проводили контакт полученных образцов с водой в течение 3 ч. Анализ проб воды выполняли методами капиллярного электрофореза (Kapel-105M, ООО «Люмэкс», Россия) и атомно-эмиссионной спектроскопии (contraA 800, Bruker, США). Влияние pH среды на стабильность покрытий исследовали в диапазоне от 1 до 11. Дополнительно контролировали неизменность гидрохимических показателей воды после контакта с фильтрующими материалами.

3. Результаты и их обсуждения

3.1. Характеризация состава и структуры нанопокрытий

Характеризация полученных нанопокрытий проводилась с использованием комплекса современных физико-химических методов анализа. Результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) подтвердили, что состав наноплёнок $Ti_xV_yO_z$ соответствует формуле $Ti_{23.89}V_{8.32}O_{67.79}$, при этом в спектрах наблюдаются пики,

характерные для степеней окисления Ti^{4+} и V^{5+}. Следует отметить, что содержание титана в плёнках закономерно превышает содержание ванадия, что объясняется протеканием процесса химического травления оксида ванадия в ходе дозирования $TiCl_4$ с последующим удалением летучих продуктов в газовую фазу. Для наноплёнок $Ti_xMo_yO_z$ РФЭС подтвердила низкое содержание молибдена, а состав плёнки соответствовал формуле $Ti_{34.35}Mo_{0.11}O_{65.55}$, причём присутствие степени окисления Mo^{6+} свидетельствует об отсутствии разложения MoO_2Cl_2 в процессе осаждения. Содержание примеси хлора в плёнках было ниже предела чувствительности РФЭС-спектрометра, что указывает на практически полное протекание реакций гидролиза хлоридных прекурсоров.

Данные сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) демонстрируют формирование однородного и непрерывного нанопокрытия по всей поверхности стеклянных шариков и керамических мембран, при этом покрытие конформно повторяет морфологию поверхности, точно воспроизводя все микронеровности и дефекты, что является характерным признаком высокого качества АСО-процесса. Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (ЭДРС) подтвердила присутствие атомов титана, ванадия и молибдена в составе покрытий, тогда как на контрольных образцах без покрытия данные элементы не детектировались.

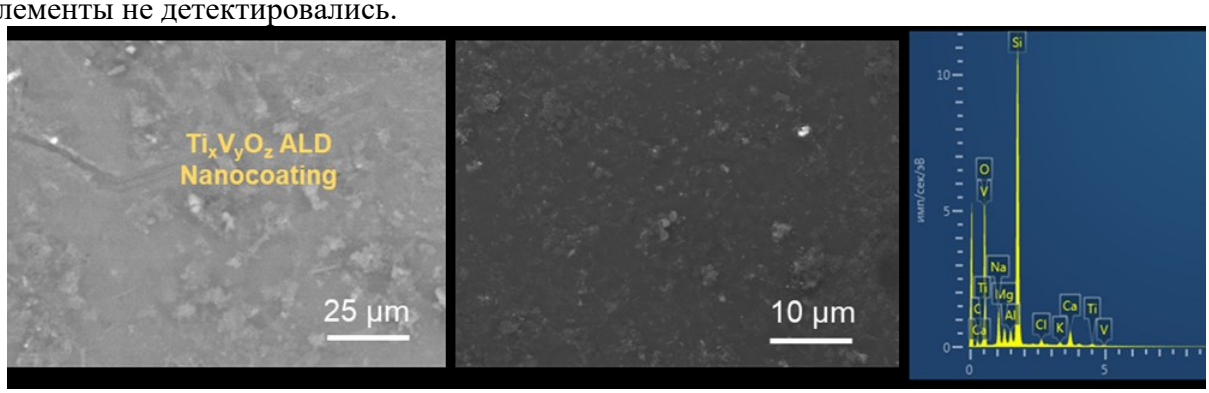


Рис. 1. СЭМ-изображения и данные ЭДРС элементного состава для титан-ванадиевой оксидной АСО нанопленки ($Ti_xV_yO_z$) на поверхности стеклянного шарика

3.2. Зависимость фотокаталитической эффективности нанопокрытий от оптического воздействия

Зависимость фотокаталитической эффективности от оптического воздействия исследовалась путём сравнения скорости разложения модельного красителя индигокармина при облучении видимой частью спектра ($\lambda > 420$ нм, интенсивность 100 мВт/см²).

Показано, что для нелегированного TiO_2 фотокаталитическая активность наблюдается практически исключительно в УФ-области: при облучении видимой частью спектра ($\lambda > 420$ нм) степень разложения индигокармина за 4 часа не превышает 5–7%, что связано с недостаточной энергией фотонов для возбуждения электронов через запрещённую зону TiO_2.

Для покрытий $Ti_xV_yO_z$, напротив, наблюдается высокая фотокаталитическая активность при облучении видимой частью спектра: при облучении светом с $\lambda > 420$ нм степень разложения индигокармина за 4 часа составляет 78%. Это однозначно свидетельствует о том, что легирование ванадием обеспечивает фоточувствительность TiO_2 в видимом диапазоне за счёт формирования примесных уровней V^{5+} в запрещённой зоне.

Аналогичная зависимость наблюдается для покрытий $Ti_xMo_yO_z$: при облучении видимой частью спектра степень разложения индигокармина за 4 часа достигает 65–70%, что подтверждает перспективность молибдена в качестве легирующей добавки для создания фотоактивных покрытий, функционирующих в видимой области спектра.

Таким образом, установлена прямая корреляция между оптическими свойствами покрытий и их фотокаталитической активностью в видимой области спектра. Это позволяет целенаправленно управлять фотокаталитическими свойствами покрытий путём варьирования типа и концентрации легирующей добавки в процессе АСО-синтеза.

3.3. Фотокаталитическая очистка воды

Исследование фотокаталитической активности полученных материалов проводилось с использованием модельного органического красителя индигокармина в качестве тестового загрязнителя. В ходе экспериментов было установлено, что после 4 часов экспозиции при облучении видимой частью спектра в присутствии стеклянных шариков с АСО-покрытием $Ti_xV_yO_z$ разлагается приблизительно 78% индигокармина, тогда как для шариков с покрытием на основе TiO_2 степень разложения составляет примерно 18%. Адсорбция индигокармина на поверхности покрытий также исследована в экспериментах в темноте, после установления адсорбционного равновесия снижение концентрации за счёт адсорбции составило 5–7 %. Столь существенное различие в фотокаталитической активности однозначно свидетельствует о значительном улучшении фотокаталитических свойств, обеспечиваемом легированием диоксида титана ванадием, что позволяет эффективно использовать видимую область солнечного спектра.

Для количественной оценки эффективности очистки воды определялся показатель химического потребления кислорода (ХПК), который отражает количество кислорода, необходимое для окисления всех органических и некоторых неорганических веществ, присутствующих в воде. Исходное значение ХПК для анализируемой питьевой воды составляло 3.6 мг O_2/дм³, что соответствует классу «умеренно загрязнённая» согласно ГОСТ 31859-2012. После 30 минут, 1, 2 и 3 часов контакта с шариками, покрытыми $Ti_xV_yO_z$, значения ХПК закономерно снижались до 1.16; 0.33; 0.04 и 0 мг O_2/дм³ соответственно, что позволяет классифицировать очищенную воду как «очень чистую». При этом присутствие покрытия на основе TiO_2 оказывало незначительное влияние на уровень ХПК, и значение для контрольного образца оставалось практически неизменным на протяжении всего эксперимента.

3.4. Антибактериальные свойства

Антибактериальные свойства разработанных материалов оценивались в отношении патогенных штаммов Escherichia coli и Staphylococcus aureus. Установлено, что покрытия $Ti_xV_yO_z$ обеспечивают до 100% уничтожение патогенных микроорганизмов при облучении видимой частью спектра, что подтверждает их высокую антибактериальную эффективность и перспективность применения в системах обеззараживания воды и воздуха.

3.5. Химическая стабильность и безопасность покрытий

Критически важным аспектом применения любых наноматериалов в системах очистки воды и воздуха является их химическая стабильность и безопасность для человека и окружающей среды. В связи с этим в работе был проведён тщательный анализ возможности миграции компонентов нанопокрытий в очищаемую среду. Капиллярный электрофорез и атомно-эмиссионная спектроскопия проб воды до и после 3 часов контакта с стеклянными шариками с нанопокрытием не выявили диффузии ионов титана, ванадия или молибдена выше пределов обнаружения использованных аналитических методов, что убедительно подтверждает высокую химическую стабильность и безопасность полученных наноплёнок. Исследование влияния изменения pH среды в диапазоне от 1 до 11 на стабильность нанопокрытий также не выявило изменений в составе водных проб после контакта, что указывает на устойчивость покрытий как в кислой, так и в щелочной среде. Анализ других гидрохимических параметров, включая плотность, pH, сухой остаток,

общую жёсткость и щёлочность, показал, что все эти показатели остаются неизменными после контакта проб воды с фильтрующими материалами с нанопокрытием. Предварительное осаждение затравочного АСО слоя Al_2O_3 существенно усиливает адгезию между поверхностью подложки и основным фотокаталитическим слоем, повышая барьерные свойства покрытия и надёжно предотвращая диффузию компонентов в очищаемую среду, что гарантирует безопасность многократного использования разработанных фильтров.

4. Заключение

Таким образом, в рамках настоящей работы впервые продемонстрирована возможность применения нанотехнологии атомно-слоевого осаждения для создания фотоактивных функциональных покрытий с управляемыми оптическими свойствами на основе легированного диоксида титана ($Ti_xV_yO_z$ и $Ti_xMo_yO_z$) на поверхности различных типов фильтрующих материалов. Главный научный результат работы состоит не только в создании эффективной технологии фильтрации, но и в получении фотоактивного функционального покрытия, оптические свойства которого целенаправленно управляются на стадии АСО-синтеза. Показано, что легирование TiO_2 ванадием и молибденом приводит к целенаправленному изменению электронной структуры материала - формированию примесных энергетических уровней в запрещённой зоне, сужению эффективной ширины запрещённой зоны и сдвигу края оптического поглощения в видимую область спектра.

Нанопокрытия на основе диоксида титана, легированного ванадием, обладают высокой фотокаталитической активностью при облучении видимой частью спектра, что обеспечивает эффективное разложение органических загрязнителей со снижением химического потребления кислорода в пробах воды до 100%, а также демонстрируют практически полную антибактериальную эффективность, уничтожая до 100% патогенных штаммов E. coli и S. aureus. Впервые синтезированы наноплёнки диоксида титана, легированного молибденом, с использованием новой комбинации реагентов ($TiCl_4$, MoO_2Cl_2 и H_2O), подтверждена их высокая фотокаталитическая активность при облучении видимой частью спектра в процессах разложения органических загрязнителей. Полученные покрытия характеризуются высокой химической стабильностью и безопасностью, компоненты покрытий не обнаружены выше пределов обнаружения использованных аналитических методов, что обеспечивает возможность их многократного использования.

Разработанная технология может быть успешно применена для модификации различных типов фильтрующих материалов, включая стеклянные шарики для картриджей систем водоподготовки, керамические мембраны для фильтрации аквариумов, а также фильтры для вентиляционных систем, в том числе медицинского назначения (фильтры ИВЛ). Разработанная технология открывает новые перспективы для создания современных, высокоэффективных и экологически безопасных многоразовых фотоактивных систем очистки питьевой воды, промышленных сточных вод и воздуха, функционирующих при облучении видимой частью спектра.

Дополнительные материалы

Личный вклад авторов. Концепция — А.М. Максумова и А.И. Абдулагатов; методология — А.М. Максумова; валидация — М.Н. Гафурова и А.М. Максумова.; формальный анализ — М.Н. Гафурова; исследование — А.М. Максумова; ресурсы — А.М. Максумова; подготовка данных — М.Н. Гафурова; написание — оригинальный черновик — А.М. Максумова; написание — рецензирование и редактирование — И.М. Абдулагатов; визуализация — А.И. Абдулагатов; административное управление проектом — А.М. Максумова; привлечение финансирования — А.М. Максумова. Все авторы прочитали и согласны с опубликованной версией рукописи.

Финансирование. Это исследование профинансировано РОССИЙСКИМ НАУЧНЫМ ФОНДОМ, номер гранта 25-23-20161.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Финансирующие организации не участвовали в разработке исследования; сборе, анализе или интерпретации данных; написании рукописи; или решении о публикации результатов.

Доступность данных

Все данные, полученные в процессе исследования, можно получить при личном обращении к авторам.

Список литературы

1. Maksumova, A. M. Antibacterial glass bead filters via atomic layer deposition of vanadium-doped TiO_2 for enhanced water purification / A. M. Maksumova, I. M. Abdulagatov, M. N. Gafurova et al. // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2026. – Vol. 160. – P. 885–893.
2. Zhang, P. The influence of synthesis method on the properties of iron contained N doped TiO_2 photocatalysts / P. Zhang, S. Yin, T. Sato // Applied Catalysis B: Environmental. – 2011. – Vol. 103. – P. 462–469.
3. George, S. M. Atomic layer deposition: an overview / S. M. George // Chemical Reviews. – 2010. – Vol. 110. – P. 111–131.
4. Abdulagatov, A. I. Atomic layer deposition and thermal transformations of thin titanium–vanadium oxide films / A. I. Abdulagatov, A. M. Maksumova, D. K. Palchaev et al. // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2021. – Vol. 94. – P. 890–902.
5. Maksumova, A. M. Preparation of visible light-activated molybdenum-doped TiO_2 thin films by atomic layer deposition for environmental photocatalytic applications / A. M. Maksumova, I. M. Abdulagatov, M. N. Gafurova et al. // International Journal of Environmental Science and Technology. – 2026. – Vol. 23. – ID. 501.
6. Zhang, J. Advances in atomic layer deposition / J. Zhang, Y. Li, K. Cao, R. Chen // Nanomanufacturing and Metrology. – 2022. – Vol. 5. – P. 191–208.
7. Popov, G. Recent trends in thermal atomic layer deposition chemistry / G. Popov, M. Mattinen, A. Vihervaara, M. Leskelä // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2025. – Vol. 43. – ID 030801.
8. Abdulagatov, I. M. Atomic-layer-deposition application for antibacterial coating of biomedical materials: surgical sutures / I. M. Abdulagatov, V. Y. Khanaliev, R. M. Ragimov et al. // Biomedical Materials. – 2025. – Vol. 20. – ID 025012.
9. Abdulagatov, I. M. Antibacterial food packaging nanomaterial based on atomic layer deposition for long-term food storage / I. M. Abdulagatov, A. M. Maksumova, M. Z. Magomedov et al. // Journal of Food Science and Technology. – 2024. – Vol. 61. – P. 596–605.
10. Berger, T. E. Photocatalytic degradation of organic dye via atomic layer deposited TiO_2 on ceramic membranes in single-pass flow-through operation / T. E. Berger, C. Regmi, A. I. Schäfer et al. // Journal of Membrane Science. – 2020. – Vol. 604. – ID 118015.

DEVELOPMENT OF PHOTOACTIVE NANOCOATINGS BASED ON DOPED TITANIUM DIOXIDE PRODUCED BY ATOMIC LAYER DEPOSITION WITH VISIBLE-LIGHT PHOTOCATALYTIC ACTIVATION FOR WATER AND AIR PURIFICATION

A.M. Maksumova[1,2], I.M. Abdulagatov[1,2], M.N. Gafurova[1,2], A.I. Abdulagatov[1]

[1] Dagestan State University
43a, M. Gadzhieva Str., Makhachkala, 367000, Russian Federation

[2] Institute for Geothermal Research and Renewable Energy of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
39a, Shamilya Str., Makhachkala, 367030, Russian Federation

Absrtact. This work presents the development and application of photoactive nanocoatings based on doped titanium dioxide produced by atomic layer deposition (ALD), whose key feature is photocatalytic activation in the visible spectral range. Doping TiO_2 with vanadium and molybdenum deliberately modifies the electronic structure: impurity levels are formed within the band gap, the effective band gap narrows to 2.4–2.8 eV, and the optical absorption edge shifts into the visible region. As a result, $Ti_xV_yO_z$ and $Ti_xMo_yO_z$ coatings exhibit high photocatalytic activity under visible-light irradiation ($\lambda > 420$ nm), not only in the UV range. Under visible light, the degree of indigo carmine decomposition on $Ti_xV_yO_z$ coatings reaches 78% in 4 h, whereas for undoped TiO_2 it does not exceed 5–7%. Photocatalytic water purification reduces COD to 0 mg O_2/dm^3 (100%) and provides up to 100% inactivation of pathogenic E. coli and S. aureus strains. For the first time, $Ti_xMo_yO_z$ nanofilms were synthesized by ALD using a new reagent combination ($TiCl_4$, MoO_2Cl_2, H_2O), and their visible-light photocatalytic activity was confirmed. The coatings are chemically stable and safe: no migration of coating components into water was detected. The developed photoactive nanocoatings with tunable optical properties are promising for water and air purification systems operating under natural sunlight.

Keywords: atomic layer deposition, doped titanium dioxide, vanadium doping, molybdenum doping, visible-light photocatalytic activation, photoactive nanocoatings, water purification, antibacterial coatings.

Статья представлена в редакцию 28 сентября 2026 г.