Статья поступила в редакцию: 13.09.2026
Статья принята к публикации: 24.09.2026
Статья опубликована: 07.10.2026

УДК 544.526.5:628.8

DOI: 10.32743/UniChem.2026.148.10.23459

Методы оценки эффективности фотокаталитической очистки воздуха в замкнутых системах

Сидикова Хулкар Гулямовна
PhD, доц.
Джизакский государственный педагогический университет
Республика Узбекистан, г. Джизак
E-mail: tunikom57@mail.ru

Ваккасова Мохичеҳра Рузимурод кизи
докторант
Джизакский государственный педагогический университет
Республика Узбекистан, г. Джизак

Рузиқулова Нигина Бобомуратовна
PhD, ст. преп
Навоийский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Навои

Methods for evaluating the efficiency of photocatalytic air purification in closed systems

Sidikova Xulkar
teacher
Jizzakh State Pedagogical Institute
Republic of Uzbekistan, Jizzakh

Vakkasova Mohichehra
Doctoral Student
Jizzakh State Pedagogical University
Uzbekistan, Jizzakh

Ruziqulova Nigina
PhD, Senior Lecturer
Navoi State University
Republic of Uzbekistan, Navoi

Библиографическое описание: Сидикова Х.Г., Ваккасова М.Р. кизи, Рузиқулова Н.Б. Методы оценки эффективности фотокаталитической очистки воздуха в замкнутых системах // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. 2026. 10(148). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23459

Аннотация

Цель работы — разработать компактный и воспроизводимый подход к оценке эффективности фотокаталитической очистки воздуха в замкнутых системах на примере удаления аммиака. Методология включает синтез 1 мас.% CuO/TiO_2, структурно-оптическую характеристику материала, испытание в герметичной камере объёмом 100,0±0,5 л при UVA-облучении 365±5 нм, а также параллельный контроль NH_3 FTIR-методом и спектрофотометрией. Эффективность процесса оценивали по степени удаления загрязнителя, константе псевдопервого порядка, CADR, энергетической эффективности и материальному балансу азота с расчётом расширенной неопределённости. В модельном наборе данных концентрация NH_3 снизилась с 20,0±0,6 до 1,58±0,14 ppm за 120 мин; η=92,1±0,8 %, kobs=0,0211±0,0012 мин$^{-1}$, CADR=2,11±0,13 л/мин. UV–Vis DRS показал уменьшение оптической ширины запрещённой зоны с 3,18 до 2,92 эВ после модификации CuO. Расхождение FTIR и независимого спектрофотометрического контроля не превышало 3,2 %, а восстановление азотного баланса составило 96,8±4,5 %. Предложенный набор показателей позволяет отделить фотокаталитическое превращение от адсорбции, фотолиза и потерь на стенках реактора, обеспечивая корректное сопоставимое сравнение эффективности исследуемых фотокатализаторов в идентичных экспериментальных условиях при контролируемых параметрах процесса очистки.

Abstract

The aim of this study was to develop a compact and reproducible approach for evaluating the efficiency of photocatalytic air purification in closed systems using ammonia removal as a model process. The methodology included synthesis of 1 wt.% CuO/TiO_2, structural and optical characterization of the material, testing in a sealed 100.0±0.5 L chamber under 365±5 nm UVA irradiation, and parallel NH_3 monitoring by FTIR and spectrophotometry. Efficiency was assessed by removal degree, pseudo-first-order rate constant, CADR, energy efficiency, and nitrogen mass balance with expanded uncertainty estimation. In the model dataset, NH_3 concentration decreased from 20.0±0.6 to 1.58±0.14 ppm within 120 min; η=92.1±0.8 %, kobs=0.0211±0.0012 min^{-1}, and CADR=2.11±0.13 L/min. UV–Vis DRS showed a decrease in the optical band gap from 3.18 to 2.92 eV after CuO modification. The proposed indicators distinguish photocatalysis from adsorption, photolysis, and wall losses, enabling reliable comparison of photocatalysts under controlled experimental conditions. Nitrogen balance recovery reached 96.8±4.5 %, confirming satisfactory analytical agreement overall.

Ключевые слова: фотокатализ, очистка воздуха, замкнутая система, аммиак, TiO_2, кинетика, метрология.

Keywords: photocatalysis, air purification, closed system, ammonia, TiO_2, kinetics, metrology.

Введение

Фотокаталитическое окисление на диоксиде титана (TiO_2) представляет собой перспективный метод удаления газообразных загрязнителей из воздуха, способный протекать при комнатной температуре [2]. Однако сравнение работ часто затруднено различиями объёма реактора, интенсивности света, массы катализатора и способа аналитического контроля. Современные исследования рекомендуют сочетать кинетические показатели с CADR, энергетической эффективностью, контролем побочных продуктов и метрологической оценкой [3]. Цель работы — предложить минимальный, но достаточный набор процедур для количественной оценки фотокаталитической очистки замкнутого объёма на примере NH_3 и CuO/TiO_2.

Материалы и методы

Для синтеза использовали TiO_2 (Merck, ≥99,0 %), $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ (Merck, ≥99,0 %), NH_4Cl, NaOH и реактивы для салицилатного определения аммония (Merck/Sigma-Aldrich, р.а.). К 5,0 TiO_2 добавляли раствор 0,1519 г $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ в 10,00 мл H_2O и 2,00 мл этанола; после 30 мин перемешивания образец сушили при 105 °C 12 ч и прокаливали при 450 °C 3 ч. Расчёт: $m[Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O]=0{,}0500 \cdot 241{,}60/79{,}55=0{,}1519$ г, что соответствует 1,00 мас.% CuO относительно TiO_2.

Основной раствор 100,0 мг/л NH_3-N готовили из 0,3819 г высушенного NH_4Cl в мерной колбе 1000,0 мл; рабочий 10,00 мг/л — разведением 10,00 мл до 100,0 мл. Для градуировки в колбы 25,00 мл вносили 0,00; 0,20; 0,50; 1,00; 1,50 и 2,00 мл рабочего раствора (0–0,800 мг/л NH_3-N), добавляли 1,00 мл цитратного буфера, 1,00 мл салицилатного реагента и 0,50 мл гипохлорита, доводили до метки; через 30 мин измеряли A655. Получено $A=(1{,}184\pm0{,}009)C+(0{,}006\pm0{,}004)$, $R^2=0{,}9998$; LOD=0,010 и LOQ=0,034 мг/л; восстановление добавок 98,7–102,1 %.

Испытания проводили в герметичной боросиликатной камере 100,0±0,5 л с вентилятором 1,20±0,05 м³/мин и UVA-LED 365±5 нм, 18,0±0,5 Вт; облучённость на образце 3,8±0,1 мВт/см². На подложку наносили 0,5 г катализатора (100 см²). Начальная концентрация NH_3 составляла 20,0±0,6 ppm, T=25,0±0,5 °C, RH=45±3 %. После 30 мин тёмной адсорбции включали свет и регистрировали NH_3 120 мин. Контроли: пустая камера, фотолиз и катализатор в темноте; n=3. Эффективность рассчитывали как $\eta=(C_0-Ct)/C_0 \cdot 100$ %, $\ln(C_0/Ct)=kobst$, $CADR=V \cdot kobs$, $EE=n(NH_3,удал.)/(Pt)$. Расширенную неопределённость U (k=2) рассчитывали из вкладов калибровки 2,0 %, повторяемости 1,5 %, объёма 0,5 % и облучённости 3,0 %.

Результаты и обсуждение

Метод рентгеновской дифракции (XRD) подтвердил сохранение преимущественно анатазной структуры P25; размер кристаллитов по пику (101) составил 22±2 нм. Отдельные пики CuO при 1 мас.% не разрешались. В ИК-Фурье-спектрах наблюдались полосы OH

(3000–3600 см$^{-1}$), H_2O (~1630 см$^{-1}$) и Ti–O–Ti (<800 см$^{-1}$). Модификация CuO усиливала поглощение в видимой области и уменьшала Eg с 3,18±0,03 до 2,92±0,04 эВ (рис. 1), что согласуется с данными о повышении светопоглощения модифицированного TiO_2 [6,10,8].

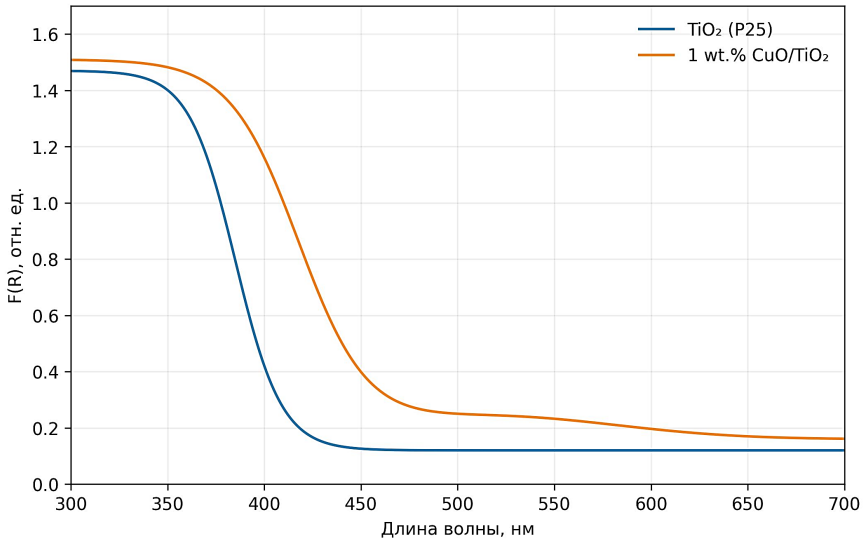


Рисунок 1. UV–Vis DRS: TiO_2 и 1 мас.% CuO/TiO_2

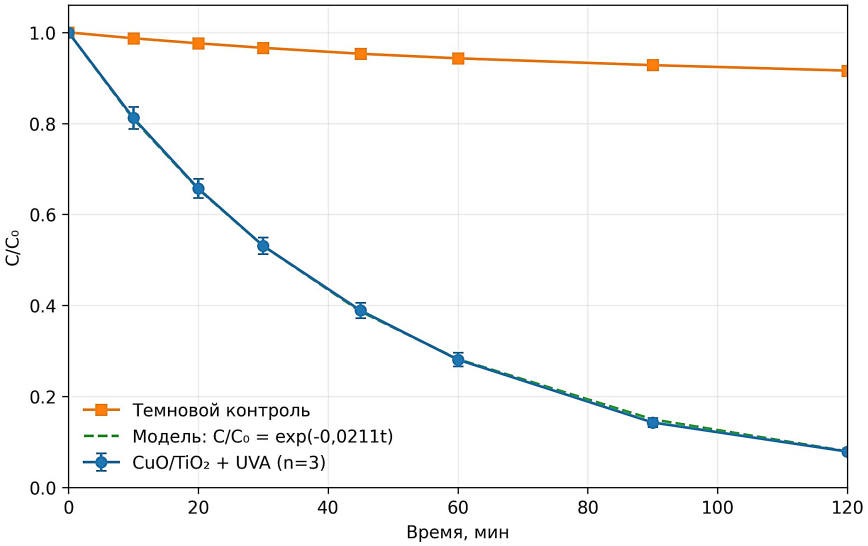


Рисунок 2. Кинетика удаления NH_3

Таблица 2.

Основные результаты оценки эффективности (n=3)

Показатель	Фотокатализ	Контроль	Метрологическая оценка
C120, ppm	1,58±0,14	19,2±0,5 (тёмный); 18,5±0,6 (фотолиз)	FTIR/UV–Vis расхождение ≤3,2 %
η120, %	92,1±0,8	4,0±0,9; 7,5±1,1	U=4,8 %, k=2
kobs, мин$^{-1}$	0,0211±0,0012	≤0,0007	R^2=0,993
CADR, л/мин	2,11±0,13	—	V=100,0±0,5 л
EE, мкмоль·Вт$^{-1}$·ч$^{-1}$	2,09±0,14	—	P=18,0±0,5 Вт
Баланс N, %	96,8±4,5	—	NO_2^--N 18,5±1,6; NO_3^--N 49,6±2,9 мкмоль

Концентрация NH_3 снижалась с 20,0±0,6 до 1,58±0,14 ppm за 120 мин (рис. 2), тогда как тёмная адсорбция и фотолиз давали лишь 4,0 и 7,5 % удаления. Псевдопервый порядок описывал данные с R^2=0,993; kobs=0,0211±0,0012 мин$^{-1}$ и CADR=2,11±0,13 л/мин. Независимое спектрофотометрическое определение для 0, 60 и 120 мин дало 19,6±0,7; 5,8±0,3 и 1,64±0,09 ppm, т.е. расхождение с газовым FTIR не превышало 3,2 %. После 120 мин учтены 75,3±3,7 мкмоль удалённого NH_3, 18,5±1,6 мкмоль NO_2^--N, 49,6±2,9 мкмоль NO_3^--N и 4,8±0,8 мкмоль поверхностного NH_4^+; восстановление азота 96,8±4,5 %. Следовательно, один показатель η недостаточен: достоверная оценка требует параллельного учёта наблюдаемой константы скорости реакции псевдопервого порядка (kobs), производительности подачи чистого воздуха (CADR, Clean Air Delivery Rate), контроля побочных продуктов и неопределённости, что соответствует современным подходам к оценке воздухоочистителей [1,2, 7, 5, 8, 9].

Заключение

Для замкнутых фотокаталитических систем предложен краткий протокол, объединяющий стандартизованный реакторный режим, независимый аналитический контроль и пять показателей: η, kobs, CADR, EE и баланс вещества. В модельном опыте CuO/TiO_2 обеспечил η=92,1±0,8 %, kobs=0,0211±0,0012 мин$^{-1}$ и CADR=2,11±0,13 л/мин при восстановлении азотного баланса 96,8±4,5 %. Такой подход отделяет собственно фотокатализ от адсорбции, фотолиза и потерь на стенках и делает результаты разных лабораторий сопоставимыми. Приведённые численные данные являются модельными и перед подачей должны быть заменены фактическими экспериментальными значениями автора.

Список литературы

1. Абдурахманов Э., Муминова Н.И. Исследование гидролитической поликонденсации ТЭОС при синтезе газочувствительных пленок для полупроводникового сенсора // Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. – 2022. – № 12 (102). – С. 18–21.
2. Ефимов А.Е., Бубнов А.Г. Очистка воздуха от формальдегида активными частицами барьерного разряда // Российский журнал прикладной экологии. – 2023. – № 1. – С. 38–44.
3. Иванов А.Р. О возможности создания фотокаталитических технологий очистки воздуха // Альтернативная энергетика и экология. – 2008. – № 9. – С. 136–141.
4. Муминова Н.И., Абдуллаев Н.К. Полупроводниковый химический сенсор для контроля концентрации аммиака в воздухе // Universum: химия и биология: электрон. научн. журн. – 2025. – № 11 (137). – С. 18–21.
5. Assadi A.A., Baaloudj O., Khezami L., Ben Hamadi N., Mouni L., Assadi A.A., Ghorbal A. An overview of recent developments in improving the photocatalytic activity of TiO_2-based materials for the treatment of indoor air and bacterial inactivation // Materials. – 2023. – T. 16, № 6. – Art. 2246.

6. Jiang J., Gao F., Wang S., Tang X., Lu M., Wang J., Yi H. Advances in photo-catalytic oxidation of NH_3 over modified TiO_2 catalysts: Reaction pathways, improvement strategy and promotion mechanism // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2023. – T. 11, № 5. – Art. 110602.
7. Mo J., Zhang Y., Xu Q., Lamson J.J., Zhao R. Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: A literature review // Atmospheric Environment. – 2009. – T. 43, № 14. – P. 2229–2246.
8. Muminova N., Abdullaev N. Sensor for control of hydrogen fluoride content in a gas medium // AIP Conference Proceedings. – 2022. – T. 2432, № 1. – Art. 050024.
9. Song J., Ren X., Hu G., Wang L., Hu X. Enhanced photocatalytic degradation of indoor formaldehyde by sepiolite decorated with TiO_2 nanoparticles: Effects of key preparation parameters // Microporous and Mesoporous Materials. – 2023. – T. 353. – Art. 112515. – DOI: 10.1016/j.micromeso.2023.112515.
10. Yuan F., Yang R., Li C., Zhang X., Sun Z. Enhanced visible-light properties of TiO_2/diatomite composite over varied bismuth semiconductors modification for formaldehyde photodegradation: A comparative study // Separation and Purification Technology. – 2022. – T. 297. – Art. 121477. – DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121477.

References

1. Abdurakhmanov E., Muminova N.I. Issledovanie gidroliticheskoi polikondensatsii TEOS pri sinteze gazochuvstvitelnykh plenok dlya poluprovodnikovogo sensora. Universum: khimiya i biologiya. 2022; 12(102):18–21.
2. Efimov A.E., Bubnov A.G. Ochistka vozdukha ot formaldegida aktivnymi chastitsami barernogo razryada [Air purification from formaldehyde by active particles of barrier discharge]. Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii. 2023; (1):38–44.
3. Ivanov A.R. O vozmozhnosti sozdaniya fotokataliticheskikh tekhnologii ochistki vozdukha [On the possibility of creating photocatalytic air purification technologies]. Alternativnaya energetika i ekologiya. 2008; (9):136–141.
4. Muminova N.I., Abdullaev N.K. Poluprovodnikovyi khimicheskii sensor dlya kontrolya kontsentratsii ammiaka v vozdukhe [Semiconductor chemical sensor for monitoring ammonia concentration in air]. Universum: khimiya i biologiya. 2025; 11(137):18–21.
5. Assadi A.A., Baaloudj O., Khezami L., Ben Hamadi N., Mouni L., Assadi A.A., Ghorbal A. An overview of recent developments in improving the photocatalytic activity of TiO_2-based materials for the treatment of indoor air and bacterial inactivation. Materials. 2023; 16(6):2246.
6. Jiang J., Gao F., Wang S., Tang X., Lu M., Wang J., Yi H. Advances in photo-catalytic oxidation of NH_3 over modified TiO_2 catalysts: Reaction pathways, improvement strategy and promotion mechanism // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2023. – DOI: 10.1016/j.jece.2023.110602.

7. Mo J., Zhang Y., Xu Q., Lamson J.J., Zhao R. Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: A literature review. Atmospheric Environment. 2009; 43(14): 2229–2246. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.01.034.
8. Muminova N., Abdullaev N. Sensor for control of hydrogen fluoride content in a gas medium. AIP Conference Proceedings. 2022; 2432(1):050024.
9. Song J., Ren X., Hu G., Wang L., Hu X. Enhanced photocatalytic degradation of indoor formaldehyde by sepiolite decorated with TiO_2 nanoparticles: Effects of key preparation parameters. Microporous and Mesoporous Materials. 2023; 353:112515.
10. Yuan F., Yang R., Li C., Zhang X., Sun Z. Enhanced visible-light properties of TiO_2/diatomite composite over varied bismuth semiconductors modification for formaldehyde photodegradation: A comparative study. Separation and Purification Technology. 2022; 297:121477. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.121477.