

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-2-220-230>
УДК 620.3:539.21:544.526

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ И УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА. КРАТКИЙ АНАЛИЗ

Т. К. Идрисова¹, А. А. Алиакбарова¹, Н. Б. Бакранов¹, Н. Е. Абдылдаева^{1*},
Л. С. Рахымбай¹, И. А. Лебедев^{1,2}, Е. К. Хусанов¹, Е. Шабдан¹, Д. И. Бакранова^{1,3*}

¹ «Research Group altAir Nanolab», Алматы, Казахстан

² «Институт Ядерной Физики» Агентства РК по Атомной Энергии, Алматы, Казахстан

³ Университет СДУ, Школа Информационных Технологий и Математики, Каскелен, Казахстан

* E-mail для контактов: akhmetovanuriya@gmail.com

Данная работа представляет собой анализ влияния окружающей среды на эффективность фотокаталитических процессов в очистке воздуха. Современные фотокаталитические системы очистки воздуха представляют собой устройства, в которых полупроводниковые материалы под действием света генерируют активные формы кислорода, способные окислять загрязнители до менее токсичных продуктов. Согласно экспериментальным данным, наблюдается значительный прогресс в разработке фотокатализаторов на основе оксидных и гетероструктурированных материалов. Тем не менее, высокая активность фотокаталитических материалов, продемонстрированная в лабораторных условиях, не всегда воспроизводима в реальных условиях окружающей среды. Основное внимание было уделено влиянию следующих факторов на кинетику фотокаталитических реакций и доступность активных поверхностных участков: относительная влажность, интенсивность солнечного излучения, температура окружающей среды и условия массопереноса. Установлено, что влияние влажности носит нелинейный характер и определяется балансом между образованием гидроксильных радикалов и конкурирующей адсорбцией молекул воды и целевых загрязнителей. Эффективность фотокаталитических процессов в реальных условиях эксплуатации определяется не только внешними параметрами окружающей среды, но и структурным дизайном самих систем. Наиболее перспективными являются интегрированные фотокаталитические структуры, такие как волокнистые мембраны и композитные материалы, обеспечивающие одновременную фильтрацию, адсорбцию и каталитическое окисление загрязняющих веществ, а также улучшенный массоперенос к активным центрам. Такая архитектура значительно повышает стабильность и воспроизводимость фотокаталитической активности в изменяющихся внешних условиях. Была проведена дополнительная оценка практической эффективности очистки воздуха с учетом образования промежуточных продуктов реакции и их потенциального воздействия на здоровье человека. Было показано, что использование фотокаталитического окисления без предварительной или сопутствующей фильтрации может приводить к образованию нежелательных побочных продуктов, тогда как комбинированные системы обеспечивают более полную очистку воздуха и снижают негативное воздействие на кардиореспираторные параметры. В целом полученные результаты указывают на необходимость перехода от материального подхода к системному проектированию фотокаталитических технологий с учетом их реальных условий эксплуатации.

Ключевые слова: фотокатализ, очистка воздуха, газовая фаза, относительная влажность, интенсивность излучения, гетероструктурные материалы, массоперенос, фотокаталитическое окисление, качество воздуха, воздействие на здоровье человека.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях роста урбанизации и увеличения времени пребывания человека в закрытых помещениях возрастает проблема обеспечения эффективной очистки воздуха от летучих органических соединений и токсичных примесей. Традиционные методы очистки, основанные на адсорбции и механической фильтрации, обеспечивают лишь перенос загрязнителей из одной фазы в другую и требуют регулярной замены фильтрующих элементов, что ограничивает их долговременную эффективность. В этой связи фотокаталитические процессы рассматриваются как перспективный подход, обеспечивающий окислительное разложение загрязнителей до малотоксичных или

инертных продуктов, в том числе дезактивацию бактерий [1]. В частности, показано, что очиститель на основе фотокатализаторов продемонстрировал превосходное удаление твердых частиц, достигнув 99% эффективности в течение 10 минут и снизив концентрацию ультрадисперсных частиц до одной десятой от концентрации, наблюдаемой при использовании высокоэффективной фильтрации HEPA [2].

В последнее время исследовательский интерес направлен на развитие фотокатализаторов на основе TiO_2 , полимерного нитрида углерода, углеродных наноматериалов, ZnO , NaTaO_3 , Zn_2SnO_4 , CdTe , перовскитов и других полупроводниковых материалов [3-11]. Несмотря на значительный прогресс в разра-

ботке фотокатализаторов, практическое применение данных материалов сопровождается существенными ограничениями. В частности, эффективность фотокаталитических систем, продемонстрированная в лабораторных условиях, часто не воспроизводится при эксплуатации в реальных средах, что указывает на наличие факторов, выходящих за рамки свойств самого катализатора. Одной из ключевых причин данного расхождения является влияние параметров окружающей среды, которые в большинстве исследований либо фиксируются, либо рассматриваются как второстепенные. В частности, модификация поверхности фотокатализаторов, например, ZnO, функционализированного силановыми соединениями, позволяет существенно повысить эффективность фотокаталитических процессов за счёт увеличения количества гидроксильных групп и улучшения переноса заряда. Данные эффекты напрямую зависят от влажности, температуры и интенсивности освещения. Так, в системах с иммобилизованными фотокаталитическими плёнками достигалась степень разложения метиленового синего до 91% и метилового оранжевого до 60% при ультрафиолетовом облучении, а также удаление бензола из газовой фазы до 35%. Однако данные результаты получены в контролируемых условиях реакторных систем, что ограничивает их прямую экстраполяцию на реальные условия эксплуатации [12].

Поверхность катализатора в системах в газовой фазе находится в постоянном взаимодействии с компонентами окружающей среды. В таких условиях водяной пар, кислород и органические соединения конкурируют за активные центры. Это напрямую влияет на эффективность процесса. Относительная влажность определяет степень покрытия поверхности молекулами воды и влияет на образование гидроксильных радикалов. Между тем, кинетика элементарных стадий, а также процессов адсорбции и десорбции регулируется температурой окружающей среды, а состав газовой среды влияет на конкуренцию за активные центры и приводит к изменению механизма реакций.

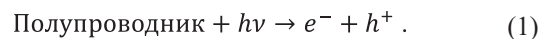
Использование гетероструктурных катализаторов, таких как $\text{LaVO}_4/\text{BiOBr}$, продемонстрировало высокие скорости фотокаталитического разложения летучих органических соединений в ряде исследований. В некоторых случаях в газофазных реакторах в течение нескольких часов достигалось удаление до 95% ацетона и 87% толуола [13]. Однако данные результаты получены в лабораторных условиях с фиксированными и контролируемыми параметрами и ограниченным объемом реактора. Соответственно они не отражают полной сложности реальных эксплуатационных условий, включая вариации влажности, температуры и состава газовой смеси. Несмотря на значительный прогресс в области фотокаталитических материалов,

их широкое использование ограничено вследствие недостаточной эффективности в реальных условиях эксплуатации, где на фотокаталитическую активность существенно влияют параметры окружающей среды, включая влажность, температуру, интенсивность и спектральный состав излучения, а также условия массопереноса в газовой фазе. Эти факторы приводят к снижению доступности активных центров, изменению путей реакции и уменьшению стабильности фотокаталитических систем, что проявляется в виде их сниженной долговечности и производительности по сравнению с лабораторными условиями [14].

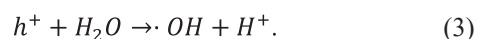
2. ОБЩИЕ МЕХАНИЗМЫ ФОТОКАТАЛИЗА В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

Фотокаталитические процессы в газовой фазе являются следствием стимуляции полупроводникового материала излучением с энергетическими уровнями, превышающими ширину запрещенной зоны, что приводит к образованию электронно-дырочных пар. Образовавшиеся носители заряда перемещаются к поверхности катализатора, участвуя в окислительно-восстановительных реакциях с элементами газовой среды (рисунок 1).

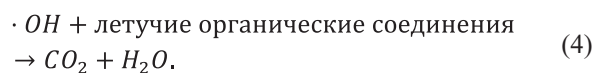
Ключевые элементарные стадии фотокаталитического процесса могут быть представлены формулами 1-4.



Фотогенерированные электроны и дырки взаимодействуют с адсорбированными компонентами газовой среды, приводя к образованию реакционноспособных форм кислорода:



Образующиеся гидроксильные и супероксидные радикалы инициируют последовательные стадии окисления органических загрязнителей, приводящие к их частичной или полной минерализации:



Несмотря на универсальность элементарных стадий, описанных формулами 1-4, эффективность фотокаталитического процесса в газовой фазе определяется не только скоростью генерации носителей заряда, но и условиями их участия в поверхностных реакциях до рекомбинации. В этом контексте ключевую роль играет адсорбция реагентов на поверхности катализатора, поскольку именно она определяет вероятность взаимодействия активных частиц с молекулами загрязнителей. Летучие органические соединения, кислород и водяной пар конкурируют за активные центры, формируя динамическое равновесие, от которого зависит концентрация реакционноспособных частиц.

В отличие от жидкофазных систем, где транспорт реагентов осуществляется преимущественно за счёт диффузии в объёме, в газовой фазе процессы ограничиваются скоростью адсорбции, десорбции и поверхностной диффузии. Даже при высокой фотокаталитической активности материала общая эффективность процесса может лимитироваться условиями массопереноса и доступностью активных центров [15].

Таким образом, фотокаталитическая активность в газовой фазе формируется в результате сочетания трёх взаимосвязанных процессов: фотогенерации носителей заряда, поверхностных реакций и транспорта реагентов. Данное обстоятельство определяет необходимость перехода от оценки свойств отдельных материалов к анализу системы в целом, включая влияние параметров окружающей среды и условий эксплуатации, которые определяют реальную эффективность фотокаталитической очистки воздуха.

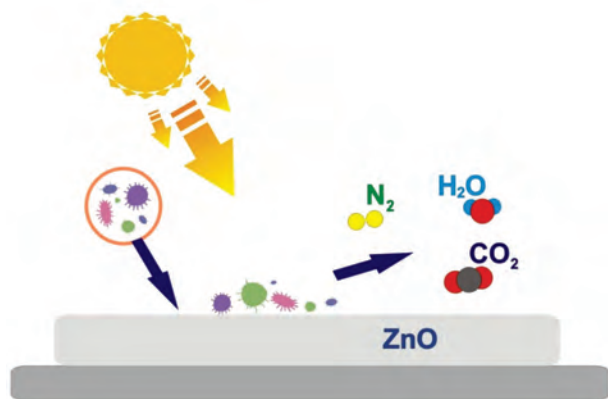


Рисунок 1. Схематическое изображение механизма фотокаталитического (на основе ZnO) разложения загрязнения окружающего воздуха. Сложные органические соединения, в том числе бактерии и вирусы разлагаются на молекулы воды, двуокиси углерода и N_2

3. Влияние различных условий на эффективность фотокаталитических процессов

3.1 Влияние относительной влажности

Относительная влажность является одним из ключевых параметров, определяющих эффективность фотокаталитических процессов в газовой фазе, поскольку она непосредственно влияет на состояние поверхности катализатора, адсорбционные свойства и механизмы формирования реакционноспособных форм кислорода. Молекулы воды, адсорбируясь на поверхности полупроводника, участвуют в генерации гидроксильных радикалов ($\bullet OH$), играющих центральную роль в окислении органических загрязнителей. В то же время вода выступает в качестве конкурирующего компонента, способного занимать активные центры и ограничивать адсорбцию целевых соединений.

Экспериментальные исследования показывают, что влияние влажности на фотокаталитическое окис-

ление носит нелинейный характер и определяется балансом между генерацией реакционноспособных частиц и доступностью активных центров. В частности, на примере разложения формальдегида установлено существование оптимального диапазона относительной влажности, при котором достигается максимальная скорость реакции, тогда как отклонение в сторону более низких или более высоких значений приводит к снижению эффективности процесса [16, 17].

При низкой относительной влажности наблюдается ограниченная доступность молекул воды на поверхности катализатора, что приводит к снижению скорости образования гидроксильных радикалов. В этих условиях фотокаталитическая активность в основном определяется реакциями с супероксидными радикалами, которые обладают пониженной окислительной способностью, ограничивая степень минерализации загрязняющих веществ.

При повышении влажности до умеренного уровня устанавливается удовлетворительное равновесие между количеством адсорбированной воды и доступностью активных центров для молекул загрязняющих веществ. Это усиливает образование OH -радикалов, обеспечивая при этом эффективную адсорбцию органических соединений, что приводит к оптимальной скорости фотокаталитической деградации. Этот диапазон влажности считается наиболее подходящим для эффективного использования фотокаталитических систем очистки воздуха.

По мере повышения относительной влажности поверхность катализатора насыщается молекулами воды, образуя многослойные адсорбционные структуры. В результате активные центры экранируются, органические загрязнения с меньшей вероятностью адсорбируются, а перенос заряда к реакционным центрам нарушается. Кроме того, образовавшееся водное покрытие может изменить механизм реакции и препятствовать прохождению кислорода, что снижает фотокаталитическую активность.

Экспериментальные исследования нескольких фотокаталитических систем подтверждают эти тенденции. Так, для TiO_2 , отожжённого при 500 °C в сухих условиях достигается высокая степень удаления ацетальдегида (93.5%), тогда как при повышении влажности степень конверсии несколько снижается, но при этом возрастает глубина минерализации, что связано с усилением окисления промежуточных продуктов [18]. Аналогично, для фотокаталитических волоконных гетероструктур на основе системы $Fe_3(PO_4)_2/MIL-88B(Fe)-NH_2$ выявлено, что при высокой относительной влажности (до 90%) наблюдается снижение адсорбции формальдегида вследствие конкуренции за активные центры, однако одновременно усиливается генерация гидроксильных радикалов, что обеспечивает высокую эффективность удаления загрязнителей,

превышающую 85% даже при многократных циклах работы [19].

В проточных газозатопных системах с иммобилизованными фотокатализаторами влияние влажности проявляется в сочетании с гидродинамическими параметрами. В частности, для системы Au/TiO₂ при относительной влажности около 30% и контактном времени порядка 4–5 минут достигается высокая степень конверсии этилена (88%) в условиях непрерывного потока. При этом оптимизация режима течения, обеспечивающая переход от диффузионного к кинетическому контролю, приводит к дополнительному росту эффективности процесса [20].

В условиях реального воздуха поверхность фотокатализатора, как правило, покрыта многослойной структурой адсорбированной воды, концентрация которой значительно превышает концентрацию органических загрязнителей, присутствующих на уровне ppbv (parts per billion by volume - частей на миллиард по объёму). В отличие от лабораторных условий, где фотокаталитические процессы обычно исследуются при контролируемой влажности, фиксированном составе газовой смеси и ограниченной толщине пограничного слоя, в реальных условиях наблюдается существенное изменение механизма реакции. Это приводит к тому, что взаимодействие загрязнителей с активными центрами происходит не напрямую, а через водные адсорбционные слои. При этом гидроксильные радикалы, формирующиеся при фотоактивации, способны мигрировать внутри этих слоёв и реагировать с молекулами загрязнителей на некотором удалении от поверхности катализатора [21].

3.2 Влияние интенсивности излучения

Эффективность фотокаталитических процессов напрямую определяется интенсивностью падающего излучения, поскольку именно поток фотонов определяет скорость генерации электронно-дырочных пар и, соответственно, концентрацию реакционноспособных форм кислорода. Увеличение плотности потока фотонов приводит к ускорению фотокаталитических реакций за счёт повышения вероятности образования •ОН и O₂• радикалов.

Экспериментальные данные подтверждают данную зависимость. В частности, при увеличении интенсивности излучения от 211 до 612 Вт/м² время полураспада нафталина сокращается с 268 до 102 мин, что свидетельствует о более чем двукратном ускорении процесса разложения [22]. Это указывает на переход системы в режим, ограниченный фотонным потоком, при котором скорость реакции определяется количеством поглощённого излучения.

В то же время, при высоких интенсивностях излучения возможен переход к насыщению фотокаталитической системы, при котором дальнейшее увеличение светового потока не приводит к пропорциональному

росту эффективности вследствие усиления рекомбинации носителей заряда. Таким образом, существует оптимальный диапазон интенсивности, при котором эффективность фотокаталитического процесса достигает до максимального значения.

Другим способом повышения эффективности является использование люминесцентных или накапливающих свет компонентов, которые способны собирать энергию и продолжать производить активные частицы после прекращения внешнего облучения. Эти устройства имеют больший потенциал для практического применения, поскольку они сохраняют остаточную фотокаталитическую активность в темной среде [23].

3.3 Влияние температуры и гидродинамических условий

Температура и условия массопереноса оказывают существенное влияние на кинетику фотокаталитических процессов в газовой фазе. Повышение температуры может изменить равновесие адсорбции реагентов на поверхности катализатора, а также ускорить основные стадии реакции и процессы десорбции продуктов.

Экспериментальные данные показывают, что повышение температуры увеличивает константу скорости реакции. Для модифицированных наностержней β-MnO₂ с дефектами наблюдается увеличение константы скорости с 24.0×10⁻³ до 36.7×10⁻³ мин⁻¹ при повышении температуры до 90 °С, что частично можно объяснить фототермическим эффектом [24].

Гидродинамические факторы, такие как скорость потока и условия потока, также имеют большое значение. В газозатопных системах процессы массопереноса могут ограничивать скорость фотокаталитических реакций, особенно с иммобилизованными катализаторами. Улучшение гидродинамики, в частности переход от диффузионного к кинетическому режиму, может значительно повысить эффективность процесса, облегчая перемещение реагентов к активным центрам и устраняя продукты реакции [20].

Mikyskova с соавторами в своем исследовании [25] продемонстрировали, что эффективность фотокаталитического разложения NO_x в проточных реакторах при скоростях потока воздуха, приближенных к реальным условиям, значительно зависит от гидродинамических параметров. Так, при скорости потока порядка 0.1 м/с достигается степень конверсии NO_x до 80%, тогда как при увеличении скорости до 0.7 м/с эффективность снижается до 20%, что указывает на переход системы в режим, ограниченный массопереносом. Одновременно реакционная скорость демонстрирует противоположную зависимость, увеличиваясь с ростом расхода газа и достигая значений порядка 130 мкмоль·м⁻²·ч⁻¹, что связано с увеличением количества поступающего загрязнителя и интенсификацией пе-

реноса вещества к поверхности катализатора. Это может быть объяснено интенсивным перемешиванием и формированием вихревых структур, обусловленных шероховатостью поверхности со снижением диффузионных ограничений и повышением эффективности массопереноса.

4. МАТЕРИАЛЫ И ИНТЕГРАЦИЯ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

Современные фотокаталитические системы очистки воздуха развиваются в направлении интеграции функциональных наноматериалов в инженерные конструкции, обеспечивающие одновременное удаление твёрдых частиц, газообразных загрязнителей и биоаэрозолей. В отличие от традиционного подхода, ориентированного преимущественно на оптимизацию свойств отдельных фотокатализаторов, в настоящее время ключевое внимание уделяется созданию комплексных систем, в которых эффективность определяется сочетанием каталитических, адсорбционных и гидродинамических характеристик. В то же время, морфология фотокатализатора сама по себе не является определяющим фактором его активности, поскольку она неразрывно связана с кристалличностью, фазовым составом и концентрацией дефектов. Структуры с высокой удельной поверхностью, такие как нанотрубки, не обязательно демонстрируют высокую фотокаталитическую активность, что связано с ухудшением кристаллического качества и усилением рекомбинации носителей заряда. С другой стороны Уоо с соавторами в [26] показали, что нанопористая структура TiO_2 обеспечивает более высокую эффективность удаления NO_x по сравнению с порошковыми формами за счёт увеличенной удельной поверхности и улучшенного контакта с газовой фазой. В то же время, наилучшие результаты достигаются для морфологий, обеспечивающих комплексное управление ключевыми процессами, включая перенос фотонов, разделение зарядов и массообмен. В частности, наноленты, обладающие открытыми высокоэнергетическими поверхностями, способствуют эффективному разделению электронов и дырок, тогда как полые структуры усиливают поглощение света за счёт многократных внутренних отражений и улучшенной диффузии загрязняющих веществ. С другой стороны, использование различных кристаллических фаз повышает эффективность за счёт создания внутренних гетеропереходов [27].

Наноматериалы играют решающую роль в этих системах благодаря большой удельной площади поверхности, наличию дефектных состояний и возможности точной регулировки их электронных свойств. В отличие от объёмных материалов, наноструктуры демонстрируют повышенную каталитическую активность благодаря эффектам квантового ограничения и большей плотности активных центров. Это

позволяет эффективно использовать их для удаления примесей при низких концентрациях, характерных для реальных условий эксплуатации [28] (Рисунок 2).

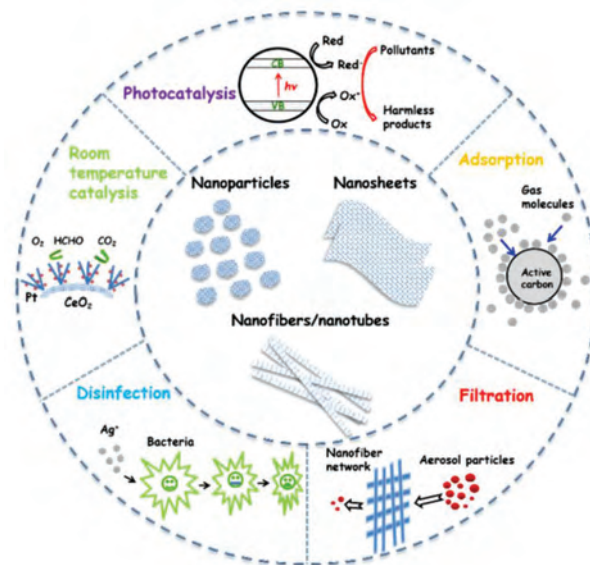


Рисунок 2. Технологии, используемые для очистки атмосферного воздуха с помощью наноматериалов [28] (MDPI)

Одним из наиболее перспективных направлений является интеграция фотокатализаторов в волокнистые и мембранные структуры, обеспечивающие совмещение процессов фильтрации и фотокаталитического окисления. В частности, электроспиннинговые нановолокна, модифицированные плазмонными наностержнями Ag-TiO_2 , обеспечивают синергетическое удаление как твёрдых частиц, так и летучих органических соединений (рисунок 3). Эффективность удаления РМ достигает 90%, что существенно превышает показатели немодифицированных волокон (60%) и систем на основе TiO_2 (80%), при этом степень фотокаталитической деградации толуола превышает 90% в течение 120 минут [29]. Аналогично, нановолокнистые мембраны на основе полиакрилонитрила (PAN), модифицированные S-схемной гетероструктурой $\text{Ag}_3\text{PO}_4\text{-BiVO}_4$, демонстрируют эффективность удаления частиц $\text{PM}_{0.3}$ (particulate matter, аэрозольные частицы с аэродинамическим диаметром ≤ 0.3 мкм) до 99.3% при низком перепаде давления на уровне 54.6 Па, одновременно обеспечивая фотокаталитическое разложение формальдегида и выраженный антибактериальный эффект [30].

Дополнительным направлением является разработка дефектно-модифицированных оксидных систем, обеспечивающих высокую степень минерализации загрязнителей. Так, $\beta\text{-MnO}_2$ наностержни с контролируемыми кислородными вакансиями и смешанными валентными состояниями $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ обеспечивают до 95% разложения толуола и до 93% его

полной минерализации в CO_2 в течение 40 минут, демонстрируя высокую стабильность и эффективность в проточных режимах [24].

Следует отметить, что фотокаталитическая активность материалов не является аддитивной характеристикой и существенно зависит от их взаимодействия с носителем и окружающей средой. Данный эффект наблюдается в различных композитных системах, где фотокатализатор распределён в объёме или на поверхности матрицы. Например, в цементных композициях с добавлением TiO_2 возможно его агломерирование и частичное экранирование продуктами гидратации, что приводит к снижению доступности активных центров и уменьшению эффективности фотокаталитического процесса [32]. Аналогичные эффекты могут наблюдаться и в других гетерогенных системах, где дополнительные компоненты, такие как кварц или минеральные наполнители, изменяют массоперенос и селективность реакции, несмотря на сохранение структурных характеристик материала [31].

уделяется разработке композитных систем, сочетающих фотокаталитические и адсорбционные свойства. В частности, использование TiO_2 /цеолитных материалов позволяет существенно снизить образование токсичных промежуточных продуктов. При фотокаталитическом окислении этанола применение чистого TiO_2 может приводить к увеличению общего индекса опасности (ОИО) до 720%, тогда как использование композитного катализатора ограничивает рост данного показателя до 32% [34]. Использование металло-органических каркасов в качестве функциональных фильтров позволяет эффективно сочетать высокую адсорбционную способность с фотокаталитической активностью. При этом фильтрующие системы на основе металло-органического каркаса MIL-100(Fe), нанесённого на пористую металлическую подложку, обеспечивают степень адсорбции летучих органических соединений на уровне 94%, тогда как эффективность их последующего фотокаталитического разложения достигает 76%. К тому же такие системы характеризуются высокой стабильностью при многократном использовании, сохраняя эффективность удаления загрязнителей на уровне 73% после 50 циклов работы. Результаты Lee с соавторами подтверждают, что комбинированные фильтрующие структуры, объединяющие адсорбционные и фотокаталитические механизмы, являются перспективным направлением для создания эффективных систем очистки воздуха в реальных условиях эксплуатации [35].

225

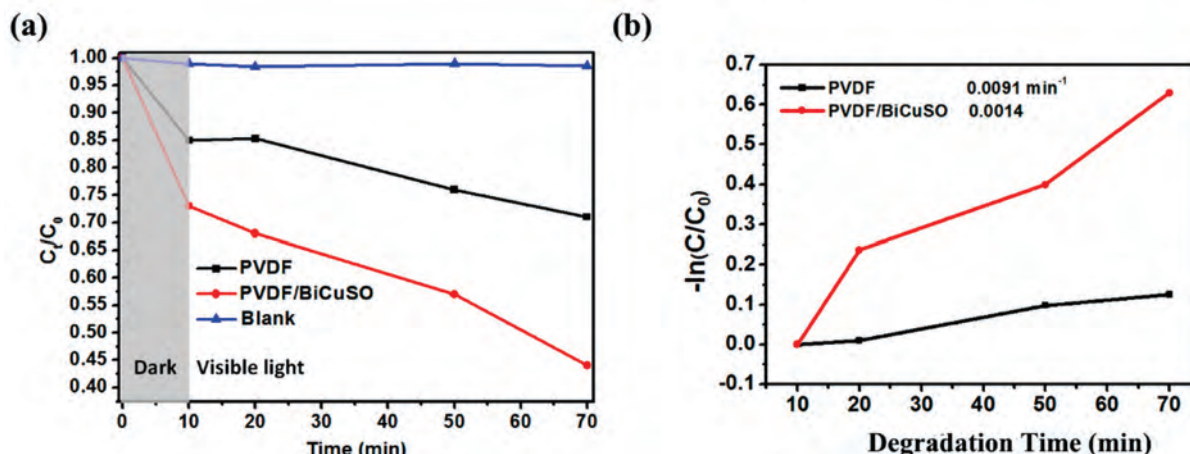


Рисунок 4 – (a) Зависимость относительной концентрации загрязнителя от времени при фотокаталитическом разложении; (b) кинетическая зависимость в координатах псевдопервого порядка для систем PVDF и PVDF/BiCuSO при видимом облучении [36] (MDPI)

го функцию активного компонента, обеспечивающего окисление газообразных загрязнителей, наблюдается эффективное взаимодействие с молекулами загрязнителей – PVDF/BiCuSO при видимом облучении. Показано, что композитный материал обеспечивает существенно более высокую скорость деградации по сравнению с исходной полимерной матрицей. В частности, степень разложения достигает более 50% в течение 70 минут, тогда как для чистого PVDF данный показатель не превышает 30% (рисунок 4a). Кинетический анализ (рисунок 4b) показывает, что процесс подчиняется псевдопервому порядку, при этом константа скорости увеличивается с 0.0014 до 0.0091 мин⁻¹ при переходе от PVDF к композитной системе PVDF/BiCuSO. Полученные результаты указывают на существенное ускорение фотокаталитического процесса, обусловленное улучшением разделения электронно-дырочных пар и повышением эффективности генерации реакционноспособных форм кислорода [36].

В целом результаты показывают, что эффективность фотокаталитических систем очистки воздуха определяется не только свойствами активного материала, но и уровнем его интеграции в функциональные структуры. Комбинация фотокатализа, адсорбции и фильтрации, а также оптимизация морфологии и гидродинамики системы являются ключевыми условиями для достижения высокой эффективности в реальных условиях эксплуатации.

5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ВЛИЯНИЕ НА ЗДОРОВЬЕ

Практическая эффективность фотокаталитических систем очистки воздуха не может оцениваться исключительно на основе степени удаления загрязнителей, поскольку фотокаталитическое окисление часто сопровождается образованием промежуточных продуктов, обладающих потенциальной токсичностью. В

этой связи ключевым аспектом является комплексная оценка качества воздуха с учётом как степени очистки, так и возможного вторичного загрязнения.

Экспериментальные и клинические исследования показывают, что применение фотокаталитического окисления без дополнительной фильтрации приводит к снижению концентраций газообразных загрязнителей, включая суммарные летучие органические соединения и диоксид серы, однако сопровождается ухудшением физиологических показателей. В частности, наблюдается увеличение уровня оксида азота в выдыхаемом воздухе, являющегося маркером воспаления дыхательных путей, а также снижение показателей функции лёгких, включая форсированную жизненную ёмкость и объём форсированного выдоха за первую секунду [37]. В противоположность этому интеграция фотокаталитического окисления с фильтрационными системами обеспечивает более комплексную очистку воздуха, включая удаление твёрдых частиц, биоаэрозолей и газообразных загрязнителей. Комбинированные системы приводят не только к снижению концентраций загрязняющих веществ, но и к улучшению кардиореспираторных показателей, что свидетельствует о снижении воспалительной нагрузки на дыхательную систему [37-39].

Дополнительным подтверждением необходимости комплексного подхода является использование интегральных показателей, учитывающих суммарную токсичность воздушной смеси. В частности, введение показателя ОИО позволяет учитывать вклад всех компонентов, включая промежуточные продукты фотокаталитического окисления. При использовании чистого TiO₂ возможно значительное увеличение общего уровня опасности воздуха вследствие накопления частично окисленных соединений, тогда как применение композитных фотокатализаторов с адсорбцион-

ными свойствами позволяет существенно снизить данный эффект [34].

Помимо способности расщеплять газообразные загрязняющие вещества, наноструктурированные оксиды металлов, такие как TiO_2 и ZnO , демонстрируют заметные антимикробные свойства благодаря сочетанию синергетических механизмов, что значительно ограничивает способность микроорганизмов к развитию резистентности. Ключевым этапом является повреждение клеточной мембраны, обеспечивающее проникновение активных форм кислорода и наночастиц внутрь клетки, где реализуется дальнейшее разрушение биологических структур. Образующиеся реактивные формы кислорода ингибируют репликацию ДНК, синтез белков и метаболические процессы, что в конечном итоге приводит к гибели клетки. При этом введение металлических наноструктур, например серебра, способствует захвату фотоиндуцированных электронов, снижению скорости рекомбинации и увеличению времени жизни носителей заряда, что усиливает генерацию реактивных форм и повышает бактерицидную эффективность фотокаталитической системы [40].

Эффективность фотокаталитических систем существенно зависит от условий окружающей среды и свойств материала. Так, для фотокаталитического разложения бензола модифицированные системы на основе TiO_2 , допированные германийсодержащими компонентами и графеновыми квантовыми точками, обеспечивают практически полное удаление загрязнителя при низких концентрациях на уровне 15 частиц на миллион и низкой относительной влажности, около 5%, в течение 120 минут. При этом увеличение интенсивности освещения приводит к росту эффективности процесса, что указывает на переход системы в фотон-лимитированный режим [41].

Практическая эффективность фотокаталитических систем определяется не только способностью к разложению загрязнителей, но и их влиянием на состав воздуха и состояние здоровья человека. Это требует перехода от оценки отдельных показателей очистки к комплексному анализу, учитывающему образование промежуточных продуктов, интегральную токсичность и физиологические эффекты воздействия очищенного воздуха.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показывает, что эффективность фотокаталитических процессов очистки воздуха в газовой фазе определяется не только свойствами используемых материалов, но в значительной степени условиями окружающей среды и особенностями интеграции катализаторов в реальные системы. Несмотря на значительный прогресс в разработке фотокатализаторов на основе TiO_2 , ZnO и гетероструктурных композитов, их высокая активность, продемон-

рованная в лабораторных условиях, не всегда воспроизводится при эксплуатации в реальной среде, что указывает на определяющую роль внешних факторов.

Установлено, что параметры окружающей среды, включая относительную влажность, интенсивность излучения, температуру и условия массопереноса, формируют режим функционирования фотокаталитической системы. В частности, влияние влажности носит нелинейный характер и определяется балансом между генерацией реакционноспособных гидроксильных радикалов и доступностью активных центров поверхности, тогда как интенсивность излучения контролирует скорость фотогенерации носителей заряда и может переводить систему в фотон-лимитированный режим. Температура и гидродинамические условия, в свою очередь, определяют кинетику элементарных стадий и эффективность транспорта реагентов, что становится критически важным при переходе к проточным и масштабируемым системам.

Наибольшая эффективность очистки воздуха достигается при использовании комплексных решений, сочетающих фотокаталитические, адсорбционные и фильтрационные механизмы. Интеграция фотокатализаторов в волокнистые мембраны, пористые структуры и строительные материалы позволяет обеспечить одновременное удаление твёрдых частиц, газообразных загрязнителей и биоаэрозолей, однако требует оптимизации морфологии, распределения активных центров и условий эксплуатации. При этом эффективность таких систем определяется не только степенью разложения загрязнителей, но и глубиной их минерализации, а также подавлением образования токсичных промежуточных продуктов.

Особое значение имеет оценка практической эффективности фотокаталитических систем с учётом их влияния на здоровье человека. Показано, что использование фотокаталитического окисления без дополнительной фильтрации может сопровождаться образованием промежуточных соединений, приводящих к ухудшению физиологических показателей, тогда как комбинированные системы обеспечивают не только очистку воздуха, но и улучшение кардиореспираторных параметров. Это подчёркивает необходимость перехода от оценки отдельных показателей очистки к комплексному анализу, включающему интегральные показатели токсичности.

Следовательно, дальнейшее развитие фотокаталитических технологий очистки воздуха должно быть направлено на переход от материал-ориентированного подхода к системному проектированию, учитывающему взаимодействие фотокатализатора с окружающей средой и условиями эксплуатации. Такой подход является ключевым для обеспечения стабильной и безопасной работы фотокаталитических систем в реальных условиях и их успешного внедрения в практику.

Благодарность

В процессе подготовки данной работы авторы использовали ChatGPT (версия 4.0) для улучшения рукописи. Весь текст был впоследствии проверен и отредактирован авторами, которые несут полную ответственность за окончательную версию публикации.

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23490626 «Исследование и разработка фотозлектродов ZnO/BiVO₄ и Si₃N₄/ZnO для создания высокоэффективных tandemных светопроводящих систем производства водорода»), Авторы заявляют, что финансовая поддержка была получена для исследования, авторства и/или публикации данной статьи.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Ochiai T., Nagai T., Hamada K., Tobe T., Aoki D., Sunada K., Ishiguro H. Estimating the Anti-Viral Performance of Photocatalytic Materials: The Correlation between Air Purification Efficiency and Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Inactivation // *Catalysts*. – 2024. – Т. 14, № 3.
2. Liu B., Zhang J., Li Z., Shu Y., Dai W., Cao J., Zhang B., Zhang T., Yang C., Yang W., Liu G., Lan B., Feng F., Huang H. Efficient Purification of Multiple Pollutants of Tobacco Smoke via Photocatalytic Oxidation Purifier // *Environmental Science & Technology*. – 2025. – Т. 59, № 20. – С. 10108-10119.
3. Zhou M., Ou H., Li S., Qin X., Fang Y., Lee S., Wang X., Ho W. Photocatalytic Air Purification Using Functional Polymeric Carbon Nitrides // *Advanced Science*. – 2021. – Т. 8, № 24.
4. Yu Q., Brouwers H. Indoor air purification using heterogeneous photocatalytic oxidation. Part I: Experimental study // *Applied Catalysis B-Environmental*. – 2009. – Т. 92, № 3-4. – С. 454-461.
5. Tapia-Brito E., Riffat J., Wang Y., Wang Y., Ghaemmaghami A., Coleman C., Erdinç M., Riffat S. Experimental study of the purification performance of a MopFan-based photocatalytic air cleaning system // *Building And Environment*. – 2023. – Т. 240.
6. Chung M., Choi M., Lee B., He F., Kim J., Weon S. Carbon Cocatalysts Self-Destruction in Photocatalytic Air Purification // *Environmental Science & Technology*. – 2025. – Т. 59, № 24. – С. 12314-12327.
7. Le Pivert M., Kerivel O., Zerelli B., Leprince-Wang Y. ZnO nanostructures based innovative photocatalytic road for air purification // *Journal Of Cleaner Production*. – 2021. – Т. 318.
8. Ding Z., Guo S., Wu X., Fida H. One-step synthesis of spherical NaTaO₃ and graphene spherical NaTaO₃ nanoparticles with enhanced photocatalytic activity for NO purification // *Functional Materials Letters*. – 2018. – Т. 11, № 4.
9. Wang C., Li N., Yu B., Uddin M., Ji J. A novel solar spectrum-splitting utilization photocatalytic CdTe double-skin facade: Concept, design and performance investigation // *Building And Environment*. – 2021. – Т. 195.
10. Estrada-Pomares J., Oliva M., Sánchez L., de Miguel G. Exploring the photocatalytic performance of (CH₃NH₃)₂AgInBr₆, a Pb-free perovskite, and the composite with a MgAlTi layered double hydroxide for air purification purposes // *Journal Of Environmental Chemical Engineering*. – 2025. – Т. 13, № 1.
11. Ai Z., Lee S., Huang Y., Ho W., Zhang L. Photocatalytic removal of NO and HCHO over nanocrystalline Zn₂SnO₄ microcubes for indoor air purification // *Journal Of Hazardous Materials*. – 2010. – Т. 179, № 1-3. – С. 141-150.
12. Ghamarpoor R., Jamshidi M., Fallah A., Eftekhari-pour F. Preparation of dual-use GPTES@ZnO photocatalyst from waste warm filter cake and evaluation of its synergistic photocatalytic degradation for air-water purification // *Journal Of Environmental Management*. – 2023. – Т. 342.
13. Zou X., Yuan C., Dong Y., Ge H., Ke J., Cui Y. Lanthanum orthovanadate/bismuth oxybromide heterojunction for enhanced photocatalytic air purification and mechanism exploration // *Chemical Engineering Journal*. – 2020. – Т. 379.
14. Seiss V., Thiel S., Eichelbaum M. Preparation and Real World Applications of Titania Composite Materials for Photocatalytic Surface, Air, and Water Purification: State of the Art // *Inorganics*. – 2022. – Т. 10, № 9.
15. Sharma S., Kumar R., Raizada P., Ahamad T., Alshehri S., Nguyen V., Thakur S., Nguyen C., Kim S., Van Le Q., Singh P. An overview on recent progress in photocatalytic air purification: Metal-based and metal-free photocatalysis // *Environmental Research*. – 2022. – Т. 214.
16. Lu Y., Ma C., Xia G., Wei W., Chang M., ISHVAC. The effect of humidity on the photocatalytic degradation of air contaminants using TiO₂ film // *Proceedings Of The 4th International Symposium On Heating, Ventilating And Air Conditioning, Vols 1 And 2*. – 2003. – С. 427-432.
17. Lu Y., Ma C., Xia G., Yin X., Jiang S. Photocatalytic degradation of air contaminants using TiO₂ film in a reticulated photocatalytic reactor // *Energy And Environment, Vols 1 And 2*. – 2003. – С. 1531-1536.
18. Kwon Y., Jung K., Zhao S., Ji Y., Saqlain S., Kim Y. TiO₂ for efficient photocatalytic decomposition of acetaldehyde: An investigation of the effects of annealing temperature, humidity, and binder // *Bulletin Of The Korean Chemical Society*. – 2024. – Т. 45, № 8. – С. 706-719.
19. Lee J., Park G., Kim G., Yun J., Lee D., Roh S., Kim J. Self-Sacrificial Growth of Heterojunction Photocatalytic Fibers as a Humidity-Adaptive Platform for Sustainable VOC Purification // *Advanced Fiber Materials*. – 2026.
20. Eliyas A., Petrova P., López-Tenllado F., Tomova D., Marinas A. Experimental arrangements for determining the photocatalytic activity of Au/TiO₂ in air and wastewater purification // *Bulgarian Chemical Communications*. – 2015. – Т. 47, № 4. – С. 978-984.
21. Pichat P. Some views about indoor air photocatalytic treatment using TiO₂: Conceptualization of humidity effects, active oxygen species, problem of C1-C3 carbonyl pollutants // *Applied Catalysis B-Environmental*. – 2010. – Т. 99, № 3-4. – С. 428-434.
22. Schnabel T., Dutschke M., Schuetz F., Hauser F., Springer C. Photocatalytic air purification of polycyclic aromatic hydrocarbons: Application of a flow-through reactor, kinetic studies and degradation pathways // *Journal Of Photochemistry And Photobiology A-Chemistry*. – 2022. – Т. 430.

23. Zhang W., Niu Y., Xia H., Wu Z., Song L., Li X., Cui L. Preparation and performance of fluorescent-assisted photocatalytic self-cleaning coatings for enhanced NO degradation // Separation And Purification Technology. – 2025. – T. 359.
24. Kong J., Chen H., Li Z., Tang M., Wang Y., Guo Y., Zhang W., An T. Synergistic defect engineering in β -MnO₂ nanorods for energy-efficient photocatalytic air purification // Chemical Engineering Journal. – 2025. – T. 522.
25. Mikyskova E., Martiniakova I., Zouzelka R., Rathousky J. Photocatalytic NOx abatement: The effect of high air flow velocity // Environmental Technology & Innovation. – 2022. – T. 28.
26. Yoo S., Lee J., Park B., Choi Y. Photocatalytic NOx degradation performance of TiO₂-nanofiber-spray-coated foam composite according to saturated conditions // Construction And Building Materials. – 2022. – T. 358.
27. Mamaghani A., Haghighat F., Lee C. Role of titanium dioxide (TiO₂) structural design/morphology in photocatalytic air purification // Applied Catalysis B-Environment And Energy. – 2020. – T. 269.
28. Cao J., Huang Y., Zhang Q. Ambient Air Purification by Nanotechnologies: From Theory to Application // Catalysts. – 2021. – T. 11, № 11.
29. Wang S., Zhang X., Su D., Wang Y., Qian C., Zhou X., Li Y., Zhang T. Electrospinning Ag-TiO₂ Nanorod-Loaded Air Treatment Filters and Their Applications in Air Purification // Molecules. – 2020. – T. 25, № 15.
30. Yang M., Guo M., Lou Y., Zhang Y., Li D., Liu S., Ma J., Zhang H., Li C., Li X., Wang B. A versatile electrospinning polyacrylonitrile nanofiber membrane integrated with S-scheme heterojunction for indoor air filtration, disinfection, and photocatalytic degradation of pollutants // Separation And Purification Technology. – 2025. – T. 377.
31. Liu D., Zepper J., Hon K., Chen Y., Yu Q. Photocatalytic cementitious composites: enhanced air purification performance by BOF slag addition // Cement & Concrete Composites. – 2025. – T. 164.
32. Kalinowski M., Chilmon K., Jackiewicz-Rek W., Rakowski B. The Influence of Selected Material Variables of Photocatalytic Cementitious Composites on the Self-Cleaning Properties and Air Purification Efficiency from NOx Pollutants // Sustainability. – 2023. – T. 15, № 1.
33. Chilmon K., Kalinowski M., Jackiewicz-Rek W. Effect of Cement Substitution with Mineral Fillers on NOx Air-Purification Efficiency and Photocatalytic Reaction Selectivity of Nano-TiO₂-Modified Cementitious Composites // Materials. – 2024. – T. 17, № 23.
34. Kovalevskiy N., Lyulyukin M., Selishchev D., Kozlov D. Analysis of air photocatalytic purification using a total hazard index: Effect of the composite TiO₂/zeolite photocatalyst // Journal Of Hazardous Materials. – 2018. – T. 358. – C. 302-309.
35. Lee J., Jang J., Kim J., Lim S. A recyclable indoor air filter system based on a photocatalytic metal-organic framework for the removal of harmful volatile organic compounds // Chemical Engineering Journal. – 2022. – T. 430.
36. Luo Y., Qiao L., Wang H., Lan S., Shen Y., Lin Y., Nan C. Bismuth Oxysulfide and Its Polymer Nanocomposites for Efficient Purification // Materials. – 2018. – T. 11, № 3.
37. Zhang J., Liao G., Lin H., Xie J., Li W., Chen H., Wu D., Juan H., Kuo J., Chen P. Enhancing indoor air quality and cardiopulmonary health in patients with asthma by photocatalytic oxidation and filters air cleaner // Journal Of Hazardous Materials. – 2025. – T. 482.
38. Link M., Robertson R., Clafin M., Poppendieck D. Quantification of Byproduct Formation from Portable Air Cleaners Using a Proposed Standard Test Method // Environmental Science & Technology. – 2024. – T. 58, № 18. – C. 7916-7923.
39. Collins D., Farmer D. Unintended Consequences of Air Cleaning Chemistry // Environmental Science & Technology. – 2021. – T. 55, № 18. – C. 12172-12179.
40. Martínez-Montelongo J., Medina-Ramírez I., Romo-Lozano Y., Zapien J. Development of a sustainable photocatalytic process for air purification. // Chemosphere. – 2020. – T. 257.
41. Zhang Y., Lu P., Feng C., Zheng X., Hu P. Mechanism study on photocatalytic purification of low-concentration gaseous benzene over germanium & graphene quantum dot-doped titanium dioxide: An experimental and theoretical study // Chemical Engineering Journal. – 2025. – T. 525.

БЫҒАЛДЫЛЫҚ ПЕН ҚОРШАҒАН ОРТА ЖАҒДАЙЛАРЫНЫҢ АУАНЫ ФОТОКАТАЛИТИКАЛЫҚ ТАЗARTY TIIMДІЛІГІНЕ ӘСЕРІ. ҚЫСҚАША ТАЛДАУ.

**Т. Қ. Идрисова¹, А. А. Әлиакбарова², Н. Б. Бакранов¹, Н. Е. Абдылдаева^{1*},
Л. С. Рахымбай¹, И. А. Лебедев^{1,2}, Е. К. Хусаннов¹, Е. Шабдан¹, Д. И. Бакранова^{1,3*}**

¹ «Research Group altAir Nanolab», Алматы, Қазақстан

² Қазақстан Республикасының Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің «Ядролық физика институты»,
Алматы, Қазақстан

³ SDU университеті, Ақпараттық Технологиялар және Математика Мектебі, Қаскелең, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: akhmetovanuriya@gmail.com

Бұл зерттеу қоршаған орта параметрлерінің ауаны тазарту үшін фотокаталитикалық процестердің тиімділігіне әсерін талдайды. Қазіргі заманғы фотокаталитикалық ауаны тазарту жүйелері ластаушы заттарды аз уытты өнімдерге дейін тотықтыруға қабілетті реактивті оттегі түрлерін алу үшін жарықпен белсендірілген жартылай өткізгіш материалдарды пайдаланады. Эксперименттік деректер оксидті және гетероқұрылымды материалдарға негізделген фотокатализаторларды әзірлеуде айтарлықтай ілгерілеушілікті көрсетеді. Дегенмен, зертханалық жағдайларда көрсетілген фотокаталитикалық материалдардың жоғары белсенділігі нақты қоршаған орта жағдайларында әрдайым қайталана бермейді. Зерттеу фотокаталитикалық реакциялардың кинетикасына және

белсенді беттік учаскелердің қолжетімділігіне салыстырмалы ылғалдылық, күн радиациясының қарқындылығы, қоршаған орта температурасы және масса алмасу жағдайларының әсеріне бағытталған. Ылғалдылықтың әсері сызықты емес екені және гидроксил радикалдарының түзілуі мен су молекулалары мен нысаналы ластаушы заттардың бәсекелес адсорбциясы арасындағы тепе-теңдікке байланысты анықталды. Нақты жұмыс жағдайларындағы фотокаталитикалық процестердің тиімділігі тек сыртқы қоршаған орта параметрлерімен ғана емес, сонымен қатар жүйелердің өздерінің құрылымдық дизайнымен де анықталады. Талшықты мембраналар мен композиттік материалдар сияқты интеграцияланған фотокаталитикалық құрылымдар ең перспективті болып табылады. Бұл құрылымдар ластаушы заттардың бір мезгілде сүзілуін, адсорбциялануын және каталитикалық тотығуын, сондай-ақ белсенді орындарға масса тасымалын жақсартуды қамтамасыз етеді. Бұл архитектура әртүрлі қоршаған орта жағдайларында фотокаталитикалық белсенділіктің тұрақтылығы мен қайталануын айтарлықтай жақсартады. Реакция аралық өнімдерінің түзілуін және олардың адам денсаулығына ықтимал әсерін ескере отырып, практикалық тиімділікті одан әрі бағалау жүргізілді. Алдын ала немесе қатарлас сүзілусіз фотокаталитикалық тотығуды қолдану жағымсыз қосалқы өнімдердің түзілуіне әкелуі мүмкін екені, ал аралас жүйелер ауаны толық тазартуды қамтамасыз ететіні және кардиореспираторлық параметрлерге теріс әсерін азайтатыны көрсетілді. Жалпы алғанда, алынған нәтижелер фотокаталитикалық технологиялардың нақты жұмыс жағдайларын ескере отырып, материалға негізделген тәсілден жүйелік жобалауға көшу қажеттілігін көрсетеді.

Түйін сөздер: фотокатализ, ауаны тазарту, газ фазасы, салыстырмалы ылғалдылық, сәулелену қарқындылығы, гетероқұрылымды материалдар, масса алмасу, фотокаталитикалық тотығу, ауа сапасы, адам денсаулығына әсері.

INFLUENCE OF HUMIDITY AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE EFFICIENCY OF PHOTOCATALYTIC AIR PURIFICATION. A BRIEF ANALYSIS.

T. K. Idrisova¹, A. A. Aliakbarova¹, N. B. Bakranov¹, N. E. Abdylдаева^{1*},
L. S. Rakhymbay¹, I. A. Lebedev^{1,2}, Ye. K. Khussainov¹, E. Shabdan¹, D. I. Bakranova^{1,3*}

¹ *Research Group altAir Nanolab, Almaty, Kazakhstan*

² *Institute of Nuclear Physics of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan*

³ *SDU University, School of Information Technology and Mathematics, Kaskelen, Kazakhstan*

*E-mail for contacts: akhmetovanuriya@gmail.com

This study analyzes the influence of environmental parameters on the efficiency of photocatalytic processes for air purification. Modern photocatalytic air purification systems utilize light-activated semiconductor materials to generate reactive oxygen species capable of oxidizing pollutants to less toxic products. Experimental data indicate significant progress in the development of photocatalysts based on oxide and heterostructured materials. However, the high activity of photocatalytic materials demonstrated in laboratory conditions is not always reproducible under real-world environmental conditions. The study focused on the influence relative humidity, solar radiation intensity, ambient temperature, and mass transfer conditions on the kinetics of photocatalytic reactions and the availability of active surface sites. It was found that the effect of humidity is nonlinear and is determined by the balance between the formation of hydroxyl radicals and the competing adsorption of water molecules and target pollutants. The efficiency of photocatalytic processes under real-world conditions is determined not only by external environmental parameters but also by the structural design of the systems themselves. Integrated photocatalytic structures, such as fibrous membranes and composite materials, offer the most promise. These structures provide simultaneous filtration, adsorption, and catalytic oxidation of pollutants, as well as improved mass transfer to active sites. This architecture significantly improves the stability and reproducibility of photocatalytic activity under varying environmental conditions. A further evaluation of practical efficiency was conducted, taking into account the formation of reaction intermediates and their potential impact on human health. It was shown that the use of photocatalytic oxidation without pre- or concomitant filtration can lead to the formation of undesirable byproducts, whereas combined systems provide more thorough air purification and reduce the negative impact on cardiorespiratory parameters. Overall, the obtained results indicate the need to move from a material-based approach to a systems-based design of photocatalytic technologies, taking into account their real-world operating conditions.

Keywords: photocatalysis, air purification, gas phase, relative humidity, irradiation intensity, heterostructured materials, mass transfer, photocatalytic oxidation, air quality, impact on human health.