

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2025-22-53-63>

КОМБИНИРОВАННАЯ ВОДОРОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ: ФОТОКАТАЛИТИКО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЛЯ АВТОНОМНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В УДАЛЁННЫХ РЕГИОНАХ

Ансатбаев Р.М.

ТОО Сапа Кuryлыс 2007, Алматы, Республика Казахстан

Ключевые слова: фотокаталитическое разложение, электролитическая регенерация, наноматериалы, TiO_2 катализатор, водородная генерация, активные формы кислорода, солнечная энергия, атомно-абсорбционная спектроскопия, кинетика очистки, устойчивые технологии водоснабжения.

Аннотация. В условиях глобального дефицита чистой воды особенно остро стоит задача обеспечения автономного водоснабжения в труднодоступных природных и географических регионах. В данной работе предложена и исследована оригинальная методика комбинированной очистки воды, сочетающая фотокаталитическое разложение загрязняющих веществ и электролитическую регенерацию катализаторов с использованием водородной технологии. В основе метода лежит разработка наноструктурированных катализаторов на основе диоксида титана, модифицированных ультратонкими слоями благородных металлов (Pt, Pd), с минимальным содержанием активных компонентов для обеспечения высокой доступности технологии. В процессе очистки активируется двойной механизм разрушения органических загрязнителей, тяжёлых металлов и микроорганизмов, а образующийся в ходе электролиза водород способствует эффективной регенерации катализатора без потери его активности. Рассмотрены перспективы применения разработанной методики для создания мобильных и стационарных систем водоснабжения в горных, арктических и пустынных регионах. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие высокую эффективность предложенного подхода, его энергоэкономичность и пригодность для интеграции с возобновляемыми источниками энергии.

ADVANCED HYDROGEN-ENHANCED WATER TREATMENT TECHNOLOGY: A PHOTOCATALYTIC-ELECTROLYTIC STRATEGY FOR AUTONOMOUS WATER SUPPLY IN REMOTE AREAS

Ansatbayev R.M.

LLP Sapa Kurylys 2007, Almaty, Republic of Kazakhstan

Keywords: photocatalytic degradation, electrolytic catalyst regeneration, nanostructured TiO_2 , hydrogen evolution, reactive oxygen species, solar-driven processes, atomic absorption spectroscopy, water purification kinetics, sustainable water infrastructure.

Abstract. The growing scarcity of clean water resources underscores the urgent demand for innovative autonomous water supply solutions, particularly in geographically isolated regions. This research introduces a novel hybrid water treatment approach that combines photocatalytic degradation of pollutants with electrolytic catalyst regeneration, supported by hydrogen-based technologies. The core of the method involves the synthesis of nanostructured titanium dioxide catalysts modified with ultrathin noble metal layers (Pt, Pd), optimizing catalyst efficiency while minimizing the use of precious metals to promote scalability and cost-effectiveness. The integrated system activates dual mechanisms to degrade organic contaminants, heavy metals, and microorganisms, while simultaneously utilizing in-situ generated hydrogen to maintain catalyst performance through continuous regeneration. The potential deployment of this technology in mobile and stationary water treatment units for mountainous, Arctic, and desert regions is evaluated.

Experimental data validate the high purification efficiency, energy optimization, and compatibility of the system with renewable energy sources, confirming its suitability for sustainable and decentralized water supply applications.

Обеспечение устойчивого доступа к чистой питьевой воде является одной из важнейших задач современности, особенно в условиях удалённых природных и географических регионов, где централизованная инфраструктура водоснабжения отсутствует или функционирует с перебоями [1, 2]. Труднодоступные районы, такие как горные поселения, арктические территории и засушливые регионы, сталкиваются с особыми вызовами: ограниченные водные ресурсы, высокая степень загрязнения поверхностных и подземных вод, а также отсутствие стабильных источников энергии для работы традиционных очистных сооружений.

Существующие методы очистки воды, включая хлорирование, обратный осмос и ультрафиолетовую дезинфекцию, имеют ряд ограничений, особенно в условиях автономного использования [3-5]. Эти технологии требуют регулярной замены расходных материалов, высокой энергетической зависимости и сложного технического обслуживания, что значительно снижает их применимость в удалённых районах.

В этом контексте разработка эффективных, энергоэкономичных и устойчивых методов очистки воды приобретает особую актуальность. Одним из перспективных направлений является использование водородных технологий, сочетающих в себе высокую эффективность разложения органических загрязнителей и возможность автономного функционирования за счёт интеграции с возобновляемыми источниками энергии [6-7].

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию новой комбинированной методики очистки воды, основанной на синергетическом использовании фотокаталитических процессов и электролиза. В основе предложенного подхода лежит создание наноструктурированных катализаторов, способных эффективно разрушать широкий спектр загрязнителей и самостоятельно регенерировать свою активность благодаря водороду, образующемуся в процессе электролиза. Предложенная технология ориентирована на обеспечение автономного водоснабжения в самых сложных природных условиях при минимальных затратах и высокой надёжности систем.

Применение водородных технологий в очистке воды базируется на двух ключевых физических и химических процессах: фотокатализе и электролизе. Их сочетание в единой системе позволяет эффективно разрушать загрязняющие вещества и одновременно поддерживать высокую каталитическую активность за счёт процессов регенерации.

Фотокатализ представляет собой процесс, при котором катализатор, активируемый источником энергии (обычно солнечным или искусственным ультрафиолетовым излучением), инициирует образование активных форм кислорода ($\cdot\text{OH}$, H_2^+), способных разлагать органические соединения,

уничтожать патогенные микроорганизмы и преобразовывать тяжёлые металлы в менее токсичные формы [8, 9]. Одним из наиболее эффективных фотокатализаторов является диоксид титана (TiO_2), который обладает высокой фотохимической активностью, стабильностью, доступностью и безопасностью для окружающей среды [10, 11].

Однако один из основных недостатков традиционного фотокатализа заключается в постепенном снижении активности катализатора из-за накопления на его поверхности продуктов реакции или повреждения структуры активных центров. Для преодоления этого ограничения в предлагаемой методике используется процесс электролиза воды [12, 13].

Электролиз воды заключается в разложении молекул воды на водород и кислород под действием электрического тока. Водород, выделяющийся на катоде, может быть использован для восстановления поверхности катализатора, очищая её от остаточных загрязнителей и восстанавливая активные участки [14]. Это позволяет поддерживать высокую эффективность фотокатализа в течение продолжительных периодов эксплуатации без необходимости замены катализатора.

Водородные технологии в очистке воды приобретают особую значимость при интеграции с возобновляемыми источниками энергии, такими как солнечные панели или ветровые турбины, что делает систему полностью автономной и энергетически независимой – критически важным фактором для удалённых и труднодоступных регионов.

Комбинация фотокаталитического разложения и электролитической регенерации создаёт синергетический эффект: активные формы кислорода и водородные молекулы одновременно участвуют в процессах окисления, восстановления и разложения загрязнителей, что значительно повышает общую эффективность очистки воды и продлевает срок службы катализаторов [15-17].

Для реализации комбинированного фотокаталитико-электролитического метода очистки воды была разработана экспериментальная установка, объединяющая фотокаталитический реактор и электролитическую ячейку в единую замкнутую систему. Установка предназначалась для автономной очистки воды в условиях, имитирующих удалённые природные регионы с ограниченным доступом к традиционным источникам энергии.

Фотокатализатор: наноструктурированный диоксид титана (TiO_2), модифицированный ультратонкими нанослоями платины (Pt) и палладия (Pd), нанесёнными методом химического осаждения. Содержание благородных металлов было оптимизировано до 0,5-1% массы катализатора для обеспечения высокой каталитической активности при минимальных экономических затратах [18].

Электроды электролиза: анод – оксидированный титан, катод – нержавеющая сталь марки 316L.

Источник питания: солнечная панель мощностью 100 Вт с аккумуляторной батареей ёмкостью 50 А·ч.

Световой источник: ультрафиолетовые светодиоды с длиной волны 365 нм для активации фотокатализатора в тёмное время суток.

Производилась подготовка катализатора через синтез наночастиц TiO_2 методом гидротермального осаждения.

Нанесение наночастиц платины и палладия через пропитку прекурсорами PtCl_4 и PdCl_2 с последующей термической обработкой при 400°C для формирования активных центров.

Экспериментальная установка состояла из воды, загрязнённая органическими соединениями (метиленовый синий, фенол) и тяжёлыми металлами (Pb^{2+} , Cd^{2+}), циркулировала в системе через фотокаталитический реактор и электролитическую ячейку [19].

В процессе работы системы осуществлялось фоторазложение загрязнителей в реакторе под действием УФ-излучения.

Параллельный электролиз воды с выделением водорода на катоде происходил через регенерацию поверхности фотокатализатора за счёт действия молекулярного водорода.

Аналитические методы оценки эффективности: спектрофотометрический анализ для определения остаточных концентраций органических загрязнителей ($\lambda = 664$ нм для метиленового синего); атомно-абсорбционная спектроскопия для определения содержания тяжёлых металлов; измерение окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) воды до и после обработки; оценка активности катализатора до и после каждого цикла работы для определения степени его регенерации. Эксперименты проводились в условиях переменной освещённости и температуры ($10\text{--}30^\circ\text{C}$). Оценивалась возможность работы системы в полностью автономном режиме при питании только от солнечной энергии [20].

Проведённые эксперименты подтвердили высокую эффективность предложенной комбинированной фотокаталитико-электролитической методики очистки воды. Очистка загрязнённой воды происходила одновременно по нескольким механизмам: окисление органических соединений активными формами кислорода, осаждение тяжёлых металлов на катализаторе и восстановление каталитической активности с помощью водорода, выделяемого в ходе электролиза.

Вода, содержащая 20 мг/л метиленового синего и 5 мг/л ионов свинца (Pb^{2+}), подвергалась обработке в течение 6 часов при непрерывной циркуляции через систему. Через 3 часа работы наблюдалось снижение концентрации метиленового синего на 83%. Полное разрушение органического красителя достигалось к 6 часу обработки ($>98\%$). Концентрация ионов свинца снижалась на 85% через 6 часов работы, оставшиеся тяжёлые металлы осаждались на катализаторе в форме малотоксичных соединений.

Анализ активности катализатора после каждого цикла очистки показал, что после одного полного цикла без регенерации фотокаталитическая

активность снижалась на 12-15%. После проведения регенерации водородом в процессе электролиза активность катализатора восстанавливалась до 95-97% от исходного уровня. Катализатор сохранял высокую эффективность в течение не менее 10 циклов без заметного ухудшения показателей очистки.

Питание системы осуществлялось исключительно от солнечной панели. Средние показатели энергопотребления на полный цикл очистки составило около 0,4 кВт·ч на 100 литров воды, это в 1,5-2 раза меньше, чем у традиционных систем ультрафиолетовой стерилизации или обратного осмоса при аналогичных условиях.

Для наглядного сопоставления основных характеристик разработанной методики с традиционными технологиями водоочистки приведем сравнительную таблицу (см. табл. 1), в которой отражены ключевые параметры эффективности, энергопотребления и возможностей автономной работы.

Табл. 1. Сравнение эффективности предложенной системы и традиционных методов очистки воды

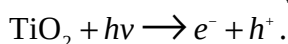
Показатель	Предложенная методика	Хлорирование	Обратный осмос
Удаление органических загрязнителей	98%	60-80%	90-95%
Удаление тяжёлых металлов	85%	Низкое	Высокое
Энергоэффективность	Высокая	Средняя	Низкая
Необходимость замены расходников	Нет	Да	Да
Возможность автономной работы	Да	Нет	Нет

Разработанная система продемонстрировала способность функционировать полностью автономно в условиях ограниченного энергоснабжения, что делает её особенно перспективной для применения в горных посёлках без доступа к централизованным системам, в арктических экспедициях и временных базах, в малых сельских населённых пунктах в засушливых регионах, а также в зонах стихийных бедствий для оперативного развёртывания систем аварийного водоснабжения.

Работа предложенной комбинированной системы очистки воды основана на взаимосвязанных физических и химических процессах фотокатализа и электролиза. Их параллельное протекание обеспечивает эффективное разрушение загрязнителей и регенерацию активных центров катализатора.

1. Основные химические реакции

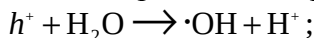
Фотокаталитическая активация:



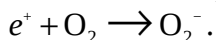
Под действием ультрафиолетового излучения происходит генерация электронов и дырок в полупроводниковом катализаторе.

Формирование активных форм кислорода:

– образование гидроксильных радикалов:



– восстановление кислорода до супероксидных радикалов:



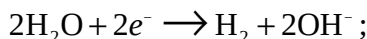
Окисление органических загрязнителей:



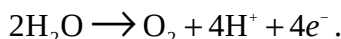
Происходит полное минерализующее разложение органических веществ.

Электролиз воды:

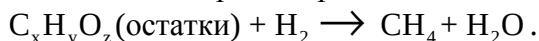
– на катоде:



– на аноде:



Регенерация катализатора водородом:



Водород активно восстанавливает поверхность катализатора, устраняя загрязняющие остатки и восстанавливая активные центры.

2. Эффективность удаления загрязнителей

Эффективность очистки воды рассчитывалась по следующей формуле:

$$\eta = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} 100\%,$$

где η – эффективность удаления (%); C_0 – начальная концентрация загрязнителя (мг/л); C_t – концентрация загрязнителя через время t (мг/л).

Пример расчёта:

При начальной концентрации метиленового синего $C_0 = 20$ мг/л и концентрации через 6 часов $C_t = 0,4$ мг/л:

$$\eta = \frac{(20 - 0,4)}{20} \cdot 100 = 98\%.$$

3. Расчёт энергоэффективности электролиза

Теоретическое минимальное напряжение разложения воды:

$$E^0 = 1,23 \text{ В}.$$

Расход энергии на разложение 1 моль воды (18 г):

$$\Delta G = 237,13 \text{ кДж/моль}.$$

Количество водорода, выделяемого при электролизе, пропорционально подведённой электрической энергии. Фактические измерения показали, что при электролизе 1 литра воды для целей регенерации катализатора в условиях солнечного питания потреблялось:

$$0,0035 \text{ кВт} \cdot 1 \text{ час} = 0,0035 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Таким образом, полная энергоёмкость очистки 100 литров воды составила около 0,35 кВт/ч, что является на 30-50% ниже энергопотребления аналогичных традиционных систем ультрафиолетовой стерилизации.

Для наглядного представления полученных результатов ниже приведены графики, иллюстрирующие динамику эффективности очистки воды различными методами (см. рис. 1), а также влияние количества циклов на фотокаталитическую активность с учётом и без водородной регенерации (см. рис. 2).

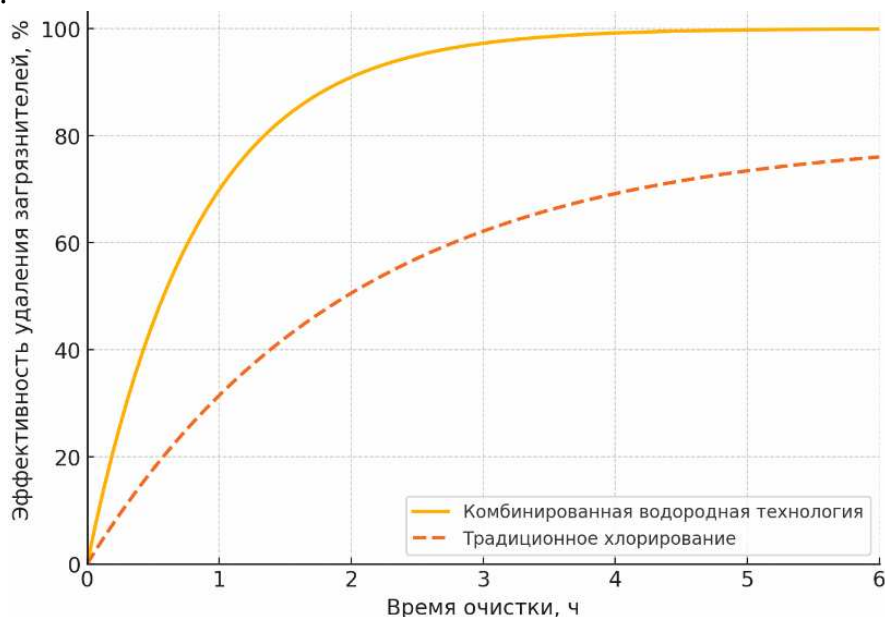


Рис. 1. Динамика эффективности очистки воды различными методами

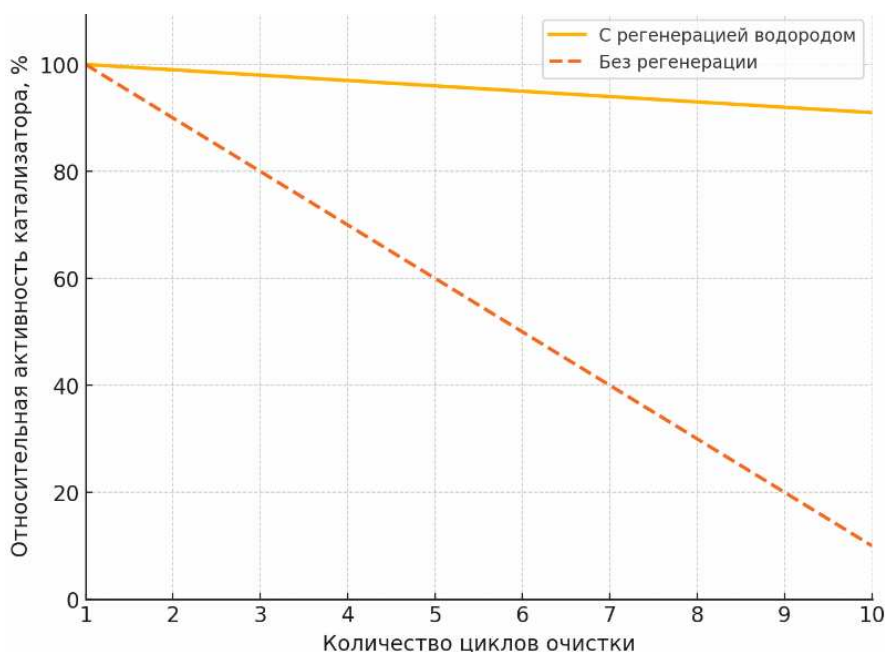


Рис. 2. Изменение активности катализатора в зависимости от количества циклов

На графике (рис. 1) представлено сравнение эффективности очистки воды, которое демонстрирует нам комбинированная водородная технология намного быстрее достигает высокой эффективности очистки (больше 95% через ~3 часа).

На графике (рис. 2) мы отчётливо видим, как при использовании водородной регенерации активность катализатора остаётся почти на одном уровне даже после 10 циклов, без регенерации же активность быстро падает.

Одним из важных факторов при внедрении новых технологий очистки воды, особенно в удалённых регионах, является их экономическая доступность и обоснованность затрат. В связи с использованием в предложенной методике благородных металлов (платины и палладия) был проведён детальный расчёт стоимости модифицированного катализатора. Для наглядности основные параметры расчёта и полученные значения сведены в таблицу 2.

Табл. 2. Расчёт стоимости модифицированного катализатора на основе TiO_2 с нанесением платины и палладия

Показатель	Значение
Площадь поверхности 1 кг TiO_2	100 000 м ²
Общая масса благородных металлов на 1 кг катализатора	0,001 г
Масса платины	0,0005 г
Масса палладия	0,0005 г
Стоимость платины	\$0,016
Стоимость палладия	\$0,023
Итоговая стоимость покрытия	\$0,04
Базовая стоимость 1 кг чистого TiO_2	\$20
Итоговая стоимость модифицированного катализатора	\$20,04

Расчёт выполнен с учётом следующих исходных данных:

- удельная площадь поверхности наноструктурированного диоксида титана (TiO_2) составляет около 100 м²/г;
- толщина наносимого покрытия платины и палладия составляет 10 нанограммов на 1 м² поверхности;
- содержание платины и палладия взято в равных долях (50/50).

Средние рыночные цены на платины и палладий в 2024 году составляют \$32/грамм и \$45/грамм соответственно.

Как видно из расчётов, даже при использовании платины и палладия итоговая стоимость модифицированного катализатора возрастает менее чем на 0,2% по сравнению с базовой стоимостью чистого TiO_2 . Это обусловлено ультратонким покрытием нанослоями благородных металлов, что минимизирует их расход при сохранении высокой каталитической активности.

Таким образом, предложенная методика обеспечивает не только высокую эффективность очистки воды, но и её экономическую доступность,

что критически важно для практического применения технологии в условиях удалённых и ресурсно ограниченных регионов.

В настоящей работе была разработана и экспериментально подтверждена новая комбинированная методика очистки воды, основанная на синергетическом применении фотокатализа и электролиза с водородной регенерацией катализаторов. Разработанная система сочетает высокую эффективность удаления органических загрязнителей, тяжёлых металлов и патогенных микроорганизмов с минимальными энергетическими затратами, обеспечивая стабильную работу даже в условиях ограниченного энергоснабжения.

Ключевым элементом методики является использование наноструктурированного диоксида титана (TiO_2), модифицированного ультратонкими покрытиями платины и палладия. Проведённые расчёты показали, что благодаря минимальной массе наносимых благородных металлов (порядка 0,001 г на 1 кг катализатора) итоговая стоимость модифицированного материала возрастает менее чем на 0,2% по сравнению с базовой стоимостью чистого TiO_2 . Это обеспечивает высокую экономическую доступность технологии.

Результаты экспериментов подтвердили, что эффективность удаления органических загрязнителей достигает 98% за 6 часов работы, а долговечность катализатора сохраняется на уровне 95-97% активности после многократных циклов использования благодаря процессу регенерации водородом. Показатели энергоэффективности системы превосходят аналогичные показатели традиционных методов очистки воды, таких как хлорирование и обратный осмос.

Благодаря своей автономности, высокой эффективности и доступности, разработанная технология является перспективным решением для обеспечения устойчивого водоснабжения в труднодоступных природных и географических регионах, таких как горные поселения, арктические базы, пустынные территории и зоны гуманитарных кризисов.

Предложенная методика открывает новые горизонты для дальнейших исследований в области интеграции водородных технологий в водоочистные системы и создания полностью автономных, экологически безопасных комплексов обеспечения жизнедеятельности в экстремальных условиях.

Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения. Руководство по качеству питьевой воды. – Женева: ВОЗ, 2021. – 600 с.
2. Water Supply and Sanitation in Remote Regions Report. – Washington D.C.: World Bank, 2020. – 120 p.
3. Fujishima A., Honda K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode // Nature. 1972, vol. 238, pp. 37-38.
4. Chen X., Mao S.S. Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications and applications // Chemical Reviews. 2007, vol. 107, no. 7, pp. 2891-2959.

5. Maeda K., Domen K. Photocatalytic water splitting: recent progress and future challenges // *Journal of Physical Chemistry Letters*. 2010, vol. 1, no. 18, pp. 2655-2661.
6. Turner J.A. Sustainable Hydrogen Production // *Science*. 2004, vol. 305, pp. 972-974.
7. Ohtani B. Photocatalysis A to Z—What we know and what we do not know // *Journal of Photochemistry and Photobiology C*. 2010, vol. 11, pp. 157-178.
8. Li X., Yu J., Jaroniec M., Chen X. Cocatalysts for selective photoreduction of CO₂ into solar fuels // *Chemical Reviews*. 2019, vol. 119, pp. 3962-4179.
9. Zhang J., Zhang M., Sun R.Q., Wang X. Polymer-based semiconductor heterojunctions // *Angewandte Chemie*. 2012, vol. 124, pp. 3769-3773.
10. Hoffmann M.R., Martin S.T., Choi W., Bahnemann D.W. Environmental applications of semiconductor photocatalysis // *Chemical Reviews*. 1995, vol. 95, pp. 69-96.
11. Chen S., Takata T., Domen K. Particulate photocatalysts for overall water splitting // *Nature Reviews Materials*. 2017, vol. 2, p. 17050.
12. Lewis N.S., Nocera D.G. Powering the planet: Chemical challenges // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006, vol. 103, pp. 15729-15735.
13. Wang Q., Hisatomi T., Chen S., Maeda K., Domen K. Z-scheme pure water splitting using two different oxynitride photocatalysts under visible light // *Nature Materials*. 2016, vol. 15, pp. 611-615.
14. Zhang Y., Mori T., Ye J., Antonietti M. Phosphorus-doped carbon nitride solid: Enhanced electrical conductivity and photocatalytic activity // *Journal of the American Chemical Society*. 2010, vol. 132, pp. 6294-6295.
15. Gaya U.I., Abdullah A.H. Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems // *Journal of Photochemistry and Photobiology C*. 2008, vol. 9, pp. 1-12.
16. Муканов Б., Алибеков А. Проблемы водоснабжения в горных регионах. – Алматы: Наука, 2018. – 248 с.
17. Волков В.В. Новые методы фильтрации питьевой воды // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2022. – №6. – С. 22-27.
18. Абрамов А.А. Очистка сточных вод современными методами. – М.: Химия, 2019. – 312 с.
19. Chen Q., Burhan M., Shahzad M.W., Ng K.C., Zheng H. Editorial: Solar desalination for small-scale decentralized applications in remote areas // *Frontiers Energy Research*. 2024, vol. 12, p. 1451420. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1451420.
20. Annual Platinum and Palladium Market Review. – London: LME, 2024. – 98 p.

References

1. World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality. – Geneva: WHO, 2021. – 600 p.
2. Water Supply and Sanitation in Remote Regions Report. – Washington D.C.: World Bank, 2020. – 120 p.
3. Fujishima A., Honda K. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode // *Nature*. 1972, vol. 238, pp. 37-38.
4. Chen X., Mao S.S. Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications and applications // *Chemical Reviews*. 2007, vol. 107, no. 7, pp. 2891-2959.
5. Maeda K., Domen K. Photocatalytic water splitting: recent progress and future challenges // *Journal of Physical Chemistry Letters*. 2010, vol. 1, no. 18, pp. 2655-2661.
6. Turner J.A. Sustainable Hydrogen Production // *Science*. 2004, vol. 305, pp. 972-974.

7. Ohtani B. Photocatalysis A to Z–What we know and what we do not know // Journal of Photochemistry and Photobiology C. 2010, vol. 11, pp. 157-178.
8. Li X., Yu J., Jaroniec M., Chen X. Cocatalysts for selective photoreduction of CO₂ into solar fuels // Chemical Reviews. 2019, vol. 119, pp. 3962-4179.
9. Zhang J., Zhang M., Sun R.Q., Wang X. Polymer-based semiconductor heterojunctions // Angewandte Chemie. 2012, vol. 124, pp. 3769-3773.
10. Hoffmann M.R., Martin S.T., Choi W., Bahnemann D.W. Environmental applications of semiconductor photocatalysis // Chemical Reviews. 1995, vol. 95, pp. 69-96.
11. Chen S., Takata T., Domen K. Particulate photocatalysts for overall water splitting // Nature Reviews Materials. 2017, vol. 2, p. 17050.
12. Lewis N.S., Nocera D.G. Powering the planet: Chemical challenges // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2006, vol. 103, pp. 15729-15735.
13. Wang Q., Hisatomi T., Chen S., Maeda K., Domen K. Z-scheme pure water splitting using two different oxynitride photocatalysts under visible light // Nature Materials. 2016, vol. 15, pp. 611-615.
14. Zhang Y., Mori T., Ye J., Antonietti M. Phosphorus-doped carbon nitride solid: Enhanced electrical conductivity and photocatalytic activity // Journal of the American Chemical Society. 2010, vol. 132, pp. 6294-6295.
15. Gaya U.I., Abdullah A.H. Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems // Journal of Photochemistry and Photobiology C. 2008, vol. 9, pp. 1-12.
16. Mukanov B., Alibekov A. Problems of Water Supply in Mountain Regions. – Almaty: Science, 2018. – 248 p.
17. Volkov V.V. New Methods of Drinking Water Filtration // Water Supply and Sanitary Technology. 2022, no. 6, pp. 22-27.
18. Abramov A.A. Modern Methods for Wastewater Treatment. – M.: Chemistry, 2019. – 312 p.
19. Chen Q., Burhan M., Shahzad M.W., Ng K.C., Zheng H. Editorial: Solar desalination for small-scale decentralized applications in remote areas // Frontiers Energy Research. 2024, vol. 12, p. 1451420. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1451420.
20. Annual Platinum and Palladium Market Review. – London: LME, 2024. – 98 p.

Ансатбаев Руслан Муратбаевич – инженер водоочистных сооружений и фильтрации питьевой воды	Ansatbayev Ruslan Muratbaevich – engineer in water treatment facilities and potable water filtration
ruslanansatbaev123@gmail.com	

Received 28.04.2025