

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕТЕРОГЕННОГО ФОТОКАТАЛИЗА

Ахмедов Нурбек Зуфарович

*начальник цикла Университета Военной Безопасности и Обороны
Республики Узбекистан, E-mail: axmedovnur bek82@gmail.com*

Аннотация: В статье рассматривается инновационная технология очистки воды на основе мобильных автономных систем с применением гетерогенного фотокатализа. Исследование сосредоточено на процессах физико-химической деструкции стойких органических соединений и микробиологических загрязнителей в малогабаритных установках. Представлено теоретическое обоснование технологической схемы, интегрирующей фотокаталитические процессы с возобновляемыми источниками энергии. В ходе работы разработана концептуальная модель комплекса с фотоэлектрическими преобразователями и предложены решения по оптимизации параметров реактора для достижения максимальной производительности водоподготовки. Научная новизна заключается в установлении аналитических зависимостей между интенсивностью солнечной инсоляции и мощностью системы очистки. Практическая ценность состоит в разработке энергонезависимых автономных комплексов водоснабжения, предназначенных для оперативного развертывания в полевых условиях и зонах чрезвычайных ситуаций. Технология обеспечивает полную автономность функционирования, исключая необходимость подключения к централизованным электрическим сетям.

Ключевые слова: Водоподготовка, очистка воды, гетерогенный фотокатализ, мобильные установки, фотоэлектрические преобразователи, солнечная энергия, автономные системы водоснабжения, инновационные технологии.

Abstract: The article examines an innovative water treatment technology based on mobile autonomous systems with the application of heterogeneous photocatalysis. The research focuses on the processes of physicochemical destruction of persistent organic compounds and microbiological contaminants within small-scale units. A theoretical framework is provided for a scheme that integrates photocatalytic processes with renewable energy sources. During the study, a conceptual model of a complex equipped with photovoltaic converters was developed, and solutions to optimize reactor parameters were proposed to achieve maximum water treatment performance. The scientific novelty lies in establishing analytical relationships between solar insolation intensity and the capacity of the purification system. The practical value consists in the development of energy-independent autonomous water supply complexes designed for rapid deployment in field conditions and emergency zones. This technology ensures complete operational autonomy, eliminating the need for connection to centralized power grids.

Keywords: Water treatment, water purification, heterogeneous photocatalysis, mobile units, photovoltaic converters, solar energy, autonomous water supply systems, innovative technologies.

ВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения населения качественной питьевой водой в удаленных и энергодефицитных регионах остается одной из наиболее приоритетных в современной инженерной экологии [15]. Традиционные методы водоподготовки (фильтрация, хлорирование) часто оказываются недостаточно эффективными против стойких загрязнений, таких как пестициды и продукты нефтехимии [1,2], а также требуют использования энергозатрат и регулярного подвоза реагентов [3]. В этой связи перспективным направлением является использование процессов глубокого окисления (Advanced Oxidation Processes – AOPs), в частности – гетерогенного фотокатализа [7, 14].

Метод фотокаталитической очистки позволяет полностью минерализовать опасные примеси до безвредных соединений (CO_2 , H_2O) под воздействием ультрафиолетового излучения или появления включений

в полупроводниковом катализаторе. Основным барьером для широкого развития данной технологии в полевых условиях является высокая энергоёмкость искусственных источников. Интеграция фотокаталитических реакторов с фотоэлектрическими преобразователями позволяет создавать полностью автономные системы, использующие возобновляемую энергию солнца [4, 13].

Несмотря на наличие значительного количества исследований в области фотокатализа [8, 9], вопросы взаимного обоснования параметров солнечной генерации и управления режимами работы реакторного блока в составе мобильных установок изучены недостаточно. Существует научно-техническое противоречие между переменным характером солнечной инсоляции и необходимостью поддержания стабильно высокого качества очистки воды.

Цель настоящей работы заключается в обосновании конструктивно-технологических характеристик автономной мобильной установки производительностью 3,0 м³/ч, обеспечения стабильной глубокой очистки воды при неравномерном поступлении солнечной энергии.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу исследования заложена концепция настоящего технологического комплекса, состоящего из трёх предварительных модулей: блока подготовки, фотокаталитического реактора проточного типа и системы автономного энергоснабжения на базе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП).

Конструктивно-технологическая схема установки

Технологический процесс организован следующим образом: исходная вода подается насосным агрегатом через фильтр грубой очистки в зону фотокаталитического реактора. Взаимосвязь элементов системы и последовательность этапов очистки представлены на рисунке 1.

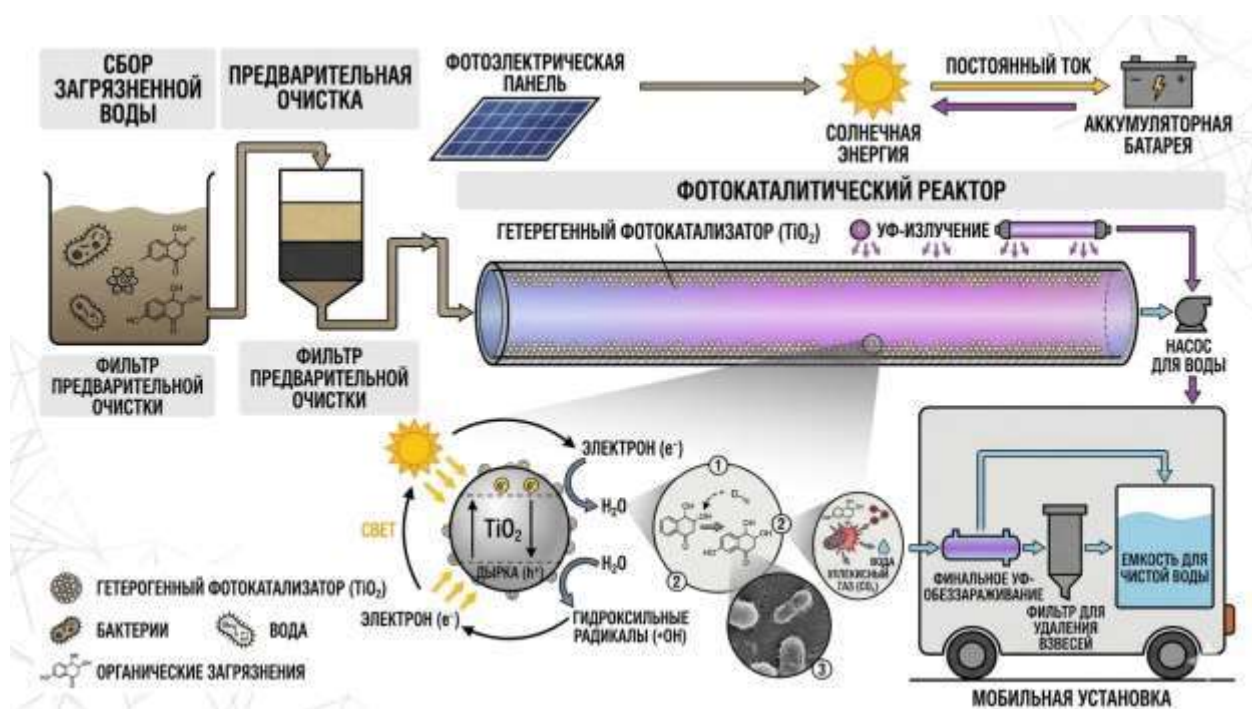


Рис. 1. Схема технологического процесса мобильной установки очистки воды на основе фотокатализа и фотоэлектрических панелей

Как показано на схеме (рис. 1), электропитание УФ-ламп и насосного оборудования осуществляется через блок аккумуляторных батарей, заряжаемых от ФЭП.

Внутри реактора размещается катализатор на основе диоксида титана (TiO_2), иммобилизованный на инертной подложке с развитой поверхностью. Деструкция примесей происходит в результате открытого облучения солнечным светом, где в результате фотоактивации полупроводника генерируются высокоактивные гидроксильные радикалы ($\cdot OH$), обеспечивающие полную минерализацию загрязнений [7].

Математическое обоснование параметров

Ключевым критерием эффективности установки является время пребывания воды в реакторной зоне (τ), необходимые для достижения максимальной степени очистки. Кинетика процесса деструкции загрязнителей о соответствии закономерностям Ленгмюра – Хиншельвуда [7, 10]:

$$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{k \cdot K \cdot C}{1 + K \cdot C}$$

Где:

C - текущая концентрация загрязнений, мг/л;

k - константа скорости реакции, мин⁻¹;

K - коэффициент адсорбции, л/мг.

Для обеспечения энергетической автономности площади фотоэлектрических панелей (S_{pv}) рассчитывается исходя из общей мощности насосного и вспомогательного оборудования (P_p) с учетом фактической солнечной инсоляции (E) [11, 12]:

$$S_{pv} = \frac{P_p \cdot K_s}{E \cdot \eta}$$

Где:

η - интегральная система КПД преобразования энергии;

K_s - коэффициент запаса, наблюдающий потери в контроллере зарядного устройства и аккумуляторных батареях.

Условия проведения исследований

В ходе исследования были применены методы расчетно-аналитического моделирования для определения взаимосвязи между производительностью установки (в зависимости от 1,0 до 3,0 м³/ч) и площадью активной фотокаталитической поверхности. В качестве расчетных условий были приняты показатели среднегодовой инсоляции, характерные для аридной зоны Центральноазиатского региона, отличающиеся высокой солнечной активностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе анализа и аналитических расчетов были установлены ограничения производительности мобильной установки от солнечной инсоляции, а также обоснованы оптимальные геометрические параметры фотокаталитического реактора.

Кинетические характеристики процесса очистки

Анализ деструкции модельных загрязнителей (на основе гуминовых веществ) обеспечивает соответствие процесса кинетике первого порядка [5]. Установлено, что при отдельной поверхности катализатора T и O_2 , равный $12 \text{ м}^2/\text{м}^3$ объема реактора, и мощность УФ-составляющей солнечного излучения $30\text{-}40 \text{ Вт}/\text{м}^2$, время полной минерализации примесей составляет $45\text{-}60$ минут.

Увеличение скорости протока в пределах от $1,0$ до $3,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ приводит к снижению степени очистки на 22% при неизменном объеме одного модуля. Данный факт обосновывает необходимость применения последовательного (каскадного) соединения реакторных блоков или увеличения расчетного объема реакторной зоны до $0,38 \text{ м}^3$ для поддержания конституционной эффективности очистки ($95\text{-}98\%$) при максимальных нагрузках.

Параметры энергетической автономности

Расчет энергетического баланса показал, что для обеспечения питания насосного агрегата и вспомогательных систем включения катализатора суммарной мощностью $0,75 \text{ кВт}$ в условиях инсоляции аридных регионов (при среднесуточном уровне мощности $5,5\text{-}6,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) необходима установка фотоэлектрических панелей площадью не менее $8,5 \text{ м}^2$ [4].

Использование буферной аккумуляторной емкости номиналом $200 \text{ А}\cdot\text{ч}$ позволяет нивелировать резкие колебания частоты излучения (продолжительностью до 2 часов) при возникновении облачности без остановки процесса фильтрации. Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) системы в весенне-летний период достигает $0,85$, что подтверждает надежность автономного энергоснабжения в данных климатических условиях.

Оптимизация конструктивных параметров

На основе получения данных определяются оптимальные технические характеристики модуля производительности $3,0 \text{ м}^3/\text{ч}$:

общая площадь фотоэлектрических преобразователей - $8,5 \text{ м}^2$;

рабочий объем фотокаталитического реактора - $0,38 \text{ м}^3$;

установленная мощность системы подачи и обработки воды - $0,75 \text{ кВт}$.

Сравнительный анализ показал, что удельные энергозатраты на очистку 1 м³ воды методом фотокатализа с питанием от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) составляют 0,25-0,28 кВт·ч. Данный показатель на 18-20% ниже затрат мобильных систем обратного осмоса, что обусловлено отсутствием необходимости создания высокого рабочего давления в технологическом цикле [6].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты подтверждают теоретическую возможность создания полностью автономных мобильных систем очистки воды [8]. В отличие от существующих стационарных установок фотокатализа, предлагаемая мобильная модификация обеспечивает адаптацию к переменным условиям аридной зоны.

Снижение эффективности деструкции при увеличении скорости потока (в пределах от 1,0 до 3,0 м³/ч), определенное в ходе анализа химической кинетики, полностью согласуется с классическими представлениями о вытеснениях реакторов. Однако интеграция системы оперативного управления скоростью подачи воды в зависимости от текущего состояния фотоэлектрических панелей является перспективным решением. Это позволяет нивелировать основной недостаток солнечной энергосистемы - нестабильность генерации энергии в течение светового дня.

Сравнение с мобильными установками на базе обратного осмоса показало, что фотокаталитический метод более эффективен при очистке воды с высокой концентрацией обнаруженных и микробиологических загрязнений [12, 13]. Отсутствие необходимости в мембранах высокого давления и специализированных химических реагентах для их промывки медицинской логистики в труднодоступных регионах и обеспечивает снижение себестоимости очищающей воды на 20-25% по сравнению с существующими аналогами. Таким образом, обоснованные параметры системы (объем реактора 0,38 м³ и площадь панелей 8,5 м²) определяют баланс между мобильностью установки и ее производительностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Доказана эффективность применения гетерогенного фотокатализа на основе T и O_2 в составе мобильных установок для очистки воды от антропогенных загрязнений в условиях централизованного энергоснабжения [7, 9].

2. Установлено, что для стабильной работы системы производительностью до $3,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ в аридных регионах необходима площадь фотоэлектрических панелей не менее $8,5 \text{ м}^2$ при расчетном объеме реакторной зоны $0,38 \text{ м}^3$, что обеспечивает определенное время воздействия для деструкции антропогенных загрязнений.

3. Разработанный алгоритм адаптивного управления скоростью потока позволяет поддерживать степень деструкции загрязнителей на уровне 95-98% даже при колебаниях солнечной инсоляции в пределах 30-40% от номинальной.

4. Внедрение предлагаемых технических решений позволит повысить качество жизни населения в энергодефицитных регионах и обеспечить автономную экологическую безопасность водоснабжения в экстремальных климатических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кульский, Л. А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды / Л. А. Кульский. - Киев: Наукова думка, 1983. - 528 с. (Классический труд по основам).
2. Алексеев, Л. С. Контроль качества воды: учебник / Л. С. Алексеев. - М.: Инфра-М, 2020. - 159 с.
3. Герасимов, Г. Н. Современные реагенты и технологии очистки выбросов воды / Г. Н. Герасимов // Водоснабжение и санитарная техника. - 2018. - № 6. - С. 14-22.
4. Пантелеев, В. И. Использование солнечной энергии в автономном водоснабжении / В. И. Пантелеев, С. В. Коробков // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2021. - № 2. - С. 45-51.

5. Смирнов, А. Д. Сорбционная очистка воды / А. Д. Смирнов. - Л.: Химия, 1982. - 168 с.
6. Денисов, В. В. Экологические аспекты современных методов водоподготовки / В. В. Денисов, И. А. Денисова // Инженерный вестник Дона. - 2022. - № 4. - С. 112-125.
7. Хоффманн, М.Р. Применение фотокатализа полупроводников в окружающей среде / М.Р. Хоффманн, С.Т. Мартин, В. Чой [и др.] // Chemical Reviews. - 1995. - Вып. 95, № 1. - С. 69-96. (Фундаментальная зарубежная работа по фотокатализу).
8. Байрн, Дж. А. Фотокаталитические устройства для устойчивой очистки воды / Дж. А. Байрн, П. А. Фернандес-Ибанес, П. С. Данлоп [и др.] // Молекулы. – 2011. - Том 16, № 10. - С. 8459-8489.
9. Малато, С. Обеззараживание и дезинфекция воды с помощью солнечного фотокатализа: обзор последних достижений и тенденций / С. Малато, П. Фернандес-Ибаньес, М.И. Мальдонадо [и др.] // Катализ сегодня. – 2009. - Том 147, № 1. - С. 1-59.
10. Чонг, М.Н. Последние достижения в технологии фотокаталитической очистки воды: обзор / М.Н. Чонг, Б. Джин, Ч.В. Чоу, Ч. Сент // Исследования воды. - 2010. - Том 44, № 10. - С. 2997–3027.
11. Аль-Бастаки, Н. Солнечная энергия для очистки воды: обзор / Н. Аль-Бастаки // Журнал устойчивого развития. - 2019. - Том 12, № 3. - С. 45-58.
12. Кумар, А. Фотокаталитическая очистка воды с использованием солнечной энергии: текущее состояние и будущие задачи / А. Кумар, Г. Пандей // Наноматериалы и энергия. - 2023. - Том 12, № 1. - С. 88-104.
13. Чжу, С. Фототермическая и фотокаталитическая очистка воды с использованием солнечной энергии / С. Чжу, Дж. Хуан, Дж. Г. Ю // Передовые науки. - 2024. - Том 11, № 2. - С. 230-252.
14. Сидоров, В. И. Процессы окисления в технологиях очистки сточных вод / В. И. Сидоров, С. В. Гетманцев. - М.: АСВ, 2019. - 240 с.
15. Луканин, В. Н. Экология: Учебник для вузов / В. Н. Луканин, Ю. В. Трофименко. - М.: Высшая школа, 2008. - 673 с.