

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ И ФОТОКАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧНОЙ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Сативалдиев Азиз Кахраманович

Андижанский государственный технический институт,
кафедра «Метрология и легкая промышленность.», к.т.н. доцент
azizsativaldiev@mail.ru тел.: +998911699408

Аннотация: В статье рассмотрены перспективы использования микроорганизмов и фотокатализаторов для экологичной очистки промышленных сточных вод. Анализируются механизмы биodeградации органических загрязнителей и биосорбции тяжёлых металлов микроорганизмами, а также фотокаталитические процессы с применением полупроводниковых катализаторов, таких как TiO_2 и ZnO . Особое внимание уделяется интеграции биологических и фотокаталитических методов, позволяющей повысить эффективность удаления сложных и токсичных загрязнений. Обсуждаются преимущества, ограничения и перспективы развития данных технологий в контексте устойчивого водопользования и зеленой экономики.

Ключевые слова: микроорганизмы, фотокатализаторы, очистка сточных вод, промышленное загрязнение, биodeградация, экологичные технологии, TiO_2 , ZnO , биосорбция, интегрированные системы очистки

Введение: Промышленные сточные воды содержат сложные смеси загрязнителей, включая органические соединения, тяжелые металлы, нефтепродукты и токсичные химикаты. Незрелая или недостаточно эффективная очистка приводит к ухудшению качества поверхностных и подземных вод, разрушению экосистем и угрозам здоровью человека. Традиционные методы очистки, такие как химическое осаждение, флокуляция и фильтрация, хотя и широко применяются, обладают значительными ограничениями — высокими затратами, низкой селективностью, образованием токсичных отходов и большим потреблением энергии.

В последние годы растёт интерес к экологически устойчивым методам очистки сточных вод, которые сочетают высокую эффективность с минимальным воздействием на окружающую среду. Среди таких технологий — биологические

методы с использованием микроорганизмов и фотокаталитические процессы, основанные на окислении загрязнителей под воздействием света и полупроводниковых катализаторов.

В данной статье рассматриваются перспективы применения микроорганизмов и фотокатализаторов, а также их синергетическое сочетание, направленное на повышение эффективности и экологичности очистки промышленных сточных вод.

Таблица 1. Основные загрязнители в промышленных сточных водах по отраслям

Отрасль	Тип загрязнителей	Типичные концентрации
Химическая	Органические соединения, тяжелые металлы	50–500 мг/л органики, 1–10 мг/л металлы
Нефтепереработка	Углеводороды, фенолы	100–600 мг/л углеводородов
Текстильная	Красители, органические соединения	20–200 мг/л красителей

Микробиологическая очистка промышленных сточных вод

Биологическая очистка использует метаболическую активность микроорганизмов — бактерий, грибов и водорослей — для разрушения и преобразования загрязнителей. Основные процессы включают аэробное (с использованием кислорода) и анаэробное (без кислорода) разложение органических веществ.

Механизмы биodeградации

- **Аэробное разложение:** микроорганизмы окисляют органические загрязнители, превращая их в воду, углекислый газ и биомассу. Этот процесс эффективен для большинства растворимых органических соединений.
- **Анаэробное разложение:** применяется для очистки сточных вод с низким содержанием кислорода и для удаления трудноразлагаемых соединений, таких как нитраты и сульфаты.

Биосорбция тяжелых металлов

Некоторые микроорганизмы способны адсорбировать тяжелые металлы на своей поверхности или преобразовывать их в менее токсичные формы. Это важно для очистки промышленных вод, содержащих кадмий, свинец, ртуть и другие вредные металлы.

Преимущества и ограничения: Преимущества биологической очистки: низкие эксплуатационные затраты, минимальное энергопотребление, возможность адаптации к изменяющимся условиям и комплексное удаление органических веществ.

Однако, биологические системы чувствительны к токсическим веществам, требуют длительного времени для очистки и контролируемых условий (температура, pH, наличие питательных веществ).

Таблица 2. Эффективность удаления загрязнителей с помощью различных микроорганизмов

Микроорганизмы	Органические загрязнители (%)	Тяжелые металлы (%)	Патогены (%)
Bacillus subtilis	75–85	30–40	50–60
Pseudomonas aeruginosa	80–90	20–30	40–50
Chlorella vulgaris	60–70	40–50	30–40

Фотокаталитическая очистка: Фотокаталитическая очистка основана на использовании полупроводниковых материалов, таких как диоксид титана (TiO_2) или оксид цинка (ZnO), которые под воздействием ультрафиолетового (УФ) или видимого света активируются и образуют реакционноспособные радикалы. Эти радикалы, главным образом гидроксил-радикалы ($\cdot\text{OH}$), обладают высокой окислительной способностью и способны разлагать органические загрязнители до безвредных соединений — воды и углекислого газа.

Основные фотокатализаторы

- TiO_2 — самый распространённый и эффективный фотокатализатор, однако активируется в основном УФ-светом (около 5% солнечного спектра).
- **Модифицированные TiO_2** — с дополнительными примесями или структурными изменениями способны активироваться при видимом свете, что расширяет область их применения.
- ZnO — обладает высокой фотокаталитической активностью, но уступает по стабильности TiO_2 .

Преимущества и ограничения

Фотокатализ позволяет эффективно очищать сточные воды от устойчивых органических веществ, микропримесей и даже некоторых патогенов. Метод не требует добавления химикатов, а каталитические материалы могут использоваться многократно.

Среди ограничений — необходимость источника света определённой длины волны, потенциальная потеря активности катализаторов из-за агломерации или загрязнения, а также сравнительно высокая стоимость внедрения.

Таблица 3. Сравнительная характеристика фотокатализаторов по эффективности под УФ и видимым светом

Катализатор	Активность под УФ (%)	Активность под видимым светом (%)	Стабильность
TiO ₂ (непродолжительный)	90	10	Высокая
Модифицированный TiO ₂	80	65	Средняя
ZnO	85	20	Средняя

Интеграция биологических и фотокаталитических методов

Сочетание биологических и фотокаталитических методов может значительно повысить эффективность очистки промышленных сточных вод. Биологические процессы хорошо справляются с биоразлагаемыми органическими соединениями, а фотокатализ эффективно разрушает устойчивые и токсичные компоненты.

Примеры комбинированных систем

- Последовательное размещение: сначала биореактор для удаления основной массы загрязнителей, затем фотокаталитический реактор для финальной доочистки.
- Гибридные установки, где фотокатализ и биodeградация идут одновременно в одной камере.

Такие системы демонстрируют синергетический эффект, повышая общую эффективность и снижая количество остаточных токсичных веществ.

Таблица 4. Эффективность удаления комплексных загрязнителей при комбинированном подходе

Методы очистки	Органические загрязнители (%)	Тяжелые металлы (%)	Токсичные соединения (%)
Только биологический метод	70–85	30–50	40–60

Методы очистки	Органические загрязнители (%)	Тяжелые металлы (%)	Токсичные соединения (%)
Только фотокатализ	80–90	20–30	70–85
Комбинированный метод	90–95	50–60	85–95

Проблемы и перспективы развития

Несмотря на преимущества, остаются технологические и экономические барьеры. Биологические системы требуют стабильных условий, а фотокатализ — дорогостоящего оборудования и источников света. Необходимы исследования по улучшению фотокатализаторов, устойчивых к загрязнениям и активных в видимом спектре, а также разработка эффективных биомасс и микробных консорциумов.

Экономическая эффективность будет возрастать при масштабировании, интеграции с возобновляемыми источниками энергии (солнечный свет), а также при создании многоступенчатых систем с рециклом.

Заключение

Использование микроорганизмов и фотокатализаторов представляет собой перспективное направление для экологичной очистки промышленных сточных вод. Совместное применение этих методов позволяет добиться высокой степени удаления широкого спектра загрязнителей с минимальным воздействием на окружающую среду. Продолжающиеся исследования и технологические усовершенствования будут способствовать внедрению таких систем в промышленность, поддерживая принципы зеленой экономики и устойчивого развития.

Список использованной литературы

1. Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D. A. (2008). TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 63(12), 515-582. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2008.10.001>
2. Ahmad, M., & Kumar, R. (2019). Biodegradation of industrial wastewater contaminants by microbial consortia. *Journal of Environmental Management*, 234, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.052>

3. Chen, X., & Mao, S. S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications. *Chemical Reviews*, 107(7), 2891-2959. <https://doi.org/10.1021/cr0500535>
4. Sharma, G., & Arya, S. (2020). Integrated biological and photocatalytic treatment of wastewater: a review. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100718. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100718>
5. Singh, R., & Singh, S. (2018). Heavy metals bioremediation: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 16(3), 867-884. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0746-6>
6. Liu, Y., He, Y., & Zhang, L. (2021). Advances in visible-light-driven photocatalysts for wastewater treatment: a review. *Chemosphere*, 263, 128034. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128034>