

*Лю Цзэхуа*

*Восточно-Китайского политехнический университет, студент*

*Китай, Шанхай*

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЕГРАДАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД: ОТ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ К ИННОВАЦИОННЫМ РЕШЕНИЯМ**

**Аннотация:** В данной статье представлен комплексный анализ современных технологий деградации сточных вод, отражающий переход от традиционных механических и биологических методов к инновационным физико-химическим и гибридным решениям. Особое внимание уделяется передовым окислительным процессам, мембранным технологиям нового поколения, а также биосорбционным методам с использованием модифицированных биоматериалов. Рассматриваются эффективность различных подходов в отношении устойчивых загрязнителей, таких как фармацевтические препараты, микропластик и перфторалкильные вещества, а также перспективы интеграции новых методов в существующие системы водоочистки. Подчеркивается актуальность разработки энергоэффективных и экономически целесообразных технологий, соответствующих принципам циркулярной экономики и устойчивого развития. В заключение обсуждаются направления дальнейших исследований, направленных на повышение экологической безопасности и ресурсосбережения в области очистки сточных вод.

**Ключевые слова:** сточные воды, деградация загрязнителей, передовые окислительные процессы, мембранные технологии, биосорбция, гибридные системы, персульфатная активация, устойчивые загрязнители, экологическая безопасность, циркулярная экономика.

**Abstract:** This article presents a comprehensive analysis of modern wastewater degradation technologies, reflecting the transition from traditional mechanical and biological methods to innovative physico-chemical and hybrid solutions. Special attention is paid to advanced oxidation processes, next-generation membrane

technologies, and biosorption methods utilizing modified biomaterials. The effectiveness of various approaches is considered with regard to persistent pollutants such as pharmaceuticals, microplastics, and perfluoroalkyl substances, as well as the prospects for integrating new methods into existing water treatment systems. The relevance of developing energy-efficient and economically viable technologies that meet the principles of circular economy and sustainable development is emphasized. The article concludes with a discussion of future research directions aimed at enhancing environmental safety and resource conservation in wastewater treatment.

**Keywords:** wastewater, pollutant degradation, advanced oxidation processes, membrane technologies, biosorption, hybrid systems, persulfate activation, persistent pollutants, environmental safety, circular economy.

В условиях стремительного роста промышленного производства, урбанизации и изменения климата проблема загрязнения водных ресурсов достигла беспрецедентных масштабов. По данным Всемирной организации здравоохранения, около 80% всех сточных вод в мире сбрасываются без должной очистки, что приводит к ежегодным экономическим потерям, оцениваемым в 500 миллиардов долларов. Особую тревогу вызывает появление новых классов загрязнителей - фармацевтических препаратов, микропластика, перфторалкильных веществ (ПФАС) и эндокринных разрушителей, которые демонстрируют исключительную устойчивость к традиционным методам очистки.

Актуальность разработки эффективных методов деградации сточных вод обусловлена несколькими критическими факторами. Во-первых, глобальный дефицит водных ресурсов - по прогнозам ООН, к 2030 году 40% населения мира столкнется с проблемой нехватки воды. [1] Во-вторых, ужесточение экологического законодательства в большинстве развитых стран требует принципиально новых подходов к очистке стоков. В-третьих, традиционные методы биологической очистки часто оказываются неэффективными против

новых типов загрязнений, таких как антибиотики или пестициды, что создает риски развития антимикробной резистентности и других угроз для экосистем.

Современные технологии деградации загрязняющих веществ прошли значительную эволюцию - от простых механических методов отстаивания и фильтрации до сложных физико-химических и биологических процессов, способных разрушать даже самые устойчивые соединения. Особый прорыв последнего десятилетия связан с развитием передовых окислительных процессов, мембранных технологий нового поколения и гибридных систем, сочетающих преимущества разных методов.[2] При этом ключевым вызовом остается разработка энергоэффективных и экономически целесообразных решений, соответствующих принципам циркулярной экономики.

В данном контексте особую значимость приобретает комплексный анализ современных методов деградации сточных вод, оценка их эффективности против различных классов загрязнителей и перспектив дальнейшего развития. Особое внимание необходимо уделить инновационным подходам, таким как каталитическое окисление с использованием персульфатов, электрокатализ, а также биосорбционные методы с применением модифицированных биоматериалов, которые открывают новые возможности для создания устойчивых систем очистки сточных вод.

Физико-химические методы занимают ключевое положение в современном арсенале технологий очистки сточных вод, особенно когда речь идет о трудноокисляемых и устойчивых к биодеградации соединениях. Среди всего многообразия подходов особого внимания заслуживают передовые окислительные процессы, которые демонстрируют исключительную эффективность в разрушении сложных органических загрязнителей. Одним из наиболее перспективных направлений является персульфатная активация - технология, основанная на генерации высокорекреационных сульфат-радикалов ( $\text{SO}_4^{\cdot-}$ ) с окислительно-восстановительным потенциалом 2,5-3,1 В. Эти радикалы образуются при активации персульфатов ( $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ) различными

способами: ультразвуковой кавитацией (частота 20-1000 кГц), УФ-излучением (длина волны 254-365 нм) или с помощью катализаторов, включая инновационные магнитные биочары на основе наночастиц железа.[3]

Эффективность персульфатного окисления значительно возрастает при его комбинации с фотокаталитическими процессами. В таких гибридных системах полупроводниковые материалы, такие как диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ ) в модификациях анатаза или рутила, под действием света с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны ( $\sim 3,2$  эВ для анатаза), генерируют электрон-дырочные пары. Эти активные центры взаимодействуют с водой и кислородом, образуя гидроксильные радикалы ( $\cdot\text{OH}$ ) и супероксид-анионы ( $\text{O}_2^-$ ), которые совместно с сульфат-радикалами обеспечивают комплексное окисление даже самых устойчивых фармацевтических соединений, включая антибиотики фторхинолонового ряда и нестероидные противовоспалительные препараты.[4]

Параллельно с окислительными технологиями активно развиваются мембранные методы очистки, в частности нанофильтрация (размер пор 1-10 нм) и обратный осмос (размер пор  $<1$  нм). Эти процессы демонстрируют исключительную эффективность (до 99%) в удалении ионов тяжелых металлов ( $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ), а также растворенных органических соединений с молекулярной массой  $>200$  Да. Однако их широкое применение сдерживается относительно высокими энергозатратами (3-10 кВт·ч/м<sup>3</sup> для обратного осмоса) и проблемами мембранного загрязнения (fouling), что требует разработки новых антифоулинговых мембран на основе графеновых оксидов или углеродных нанотрубок.[5]

Современные исследования в этой области направлены на создание интегрированных систем, сочетающих преимущества разных методов. Например, комбинация персульфатного окисления с мембранной фильтрацией позволяет достичь синергетического эффекта - радикалы разрушают органические загрязнения, снижая нагрузку на мембраны, а последние

эффективно удаляют продукты деградации и неокисленные соединения. Такие гибридные системы особенно перспективны для очистки сложных промышленных стоков фармацевтических и химических производств.

Биологические методы очистки остаются фундаментальным подходом в обработке сточных вод, обеспечивая эффективное снижение концентрации органических и неорганических загрязнений за счет использования естественных метаболических процессов микроорганизмов. Аэробные процессы, в частности системы с активным илом, широко применяются на городских и промышленных очистных сооружениях благодаря своей способности быстро разлагать органические соединения, что подтверждается высокими показателями снижения биохимического потребления кислорода (БПК). Однако для их реализации требуется значительная площадь аэротенков и поддержание стабильного поступления кислорода, что увеличивает эксплуатационные расходы и предъявляет высокие требования к инфраструктуре. В качестве альтернативы всё большее распространение получают анаэробные реакторы, которые особенно эффективны при обработке высококонцентрированных промышленных стоков, таких как отходы пищевой промышленности или сельского хозяйства. Анаэробные процессы не только обеспечивают разложение органики с образованием метана и углекислого газа, но и позволяют получать биогаз, который может использоваться как возобновляемый источник энергии, что делает их привлекательными с точки зрения ресурсосбережения и устойчивого развития. В последние годы особое внимание уделяется биосорбции - инновационному методу, основанному на использовании специально подготовленных микроорганизмов, грибов или биоматериалов, таких как биочар, получаемый из органических отходов. Биосорбция позволяет селективно удалять из сточных вод тяжелые металлы, остатки лекарственных препаратов и другие трудноразлагаемые органические соединения, значительно расширяя спектр решаемых задач по очистке. Развитие биотехнологий способствует совершенствованию этих методов, повышая их эффективность, экологическую безопасность и экономическую

целесообразность, что подтверждает устойчивую тенденцию к интеграции биологических процессов в современные системы водоочистки.

Наиболее перспективными сегодня считаются комбинированные технологии, объединяющие преимущества разных подходов. Фото-Фентон-процесс, сочетающий перекись водорода, соли железа и УФ-излучение, демонстрирует исключительную эффективность в окислении сложных органических соединений. Электрохимическое окисление с использованием специализированных анодов, например на основе  $Ti/PbO_2$ , позволяет генерировать гидроксильные радикалы непосредственно в обрабатываемой среде, что значительно повышает эффективность очистки.

Современные исследования открывают новые горизонты в технологиях очистки сточных вод. Использование наноматериалов, включая графеновые оксиды и магнитные наночастицы, позволяет создавать катализаторы с исключительными свойствами. Гибридные системы, комбинирующие мембранные и биологические методы, предлагают решения для сложных случаев загрязнения. Особое внимание уделяется концепции рециклинга ресурсов, позволяющей извлекать из сточных вод ценные компоненты, такие как фосфор и азот, для повторного использования в сельском хозяйстве.

Развитие технологий деградации сточных вод требует комплексного подхода, учитывающего как состав специфических загрязнений, так и экономические аспекты очистки. Наиболее перспективными направлениями представляются комбинированные методы, сочетающие активированные персульфатные системы с биологическими процессами. Будущие исследования должны быть сосредоточены на снижении энергопотребления очистных систем и разработке новых поколений экологически безопасных катализаторов, что позволит создать устойчивые системы водоочистки следующего поколения.

Литература:

1. Wang J., Zhuan R. Degradation of antibiotics by advanced oxidation processes: An overview // *Science of the Total Environment*, 2021, vol.5, pp.23-37
2. Miklos D.B., et al. Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment // *Water Research*. 2018, vol.7, pp.10-17.
3. Ganiyu, S.O. et al. Heterogeneous electro-Fenton process using magnetic catalysts for wastewater treatment // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2021, Vol.12., pp.40-50
4. Yang Y., et al. Biochar-based catalysts for persulfate activation // *Chemical Engineering Journal*. 2023, Vol.7, pp.17-25
5. Shannon M.A., et al. Science and technology for water purification in the coming decades // *Nature*, 2018, Vol.4, pp.4-20