Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.66.56.011

УДК 504.4.062.2, 620.951

М. С. Гладышева, Н. Р. Молодкина

МИКРОБНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В СИСТЕМАХ ВОДООЧИСТКИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ

Аннотация. Современные методы очистки сточных вод часто сопряжены с высокими энергетическими затратами и образованием значительного объёма отходов, что стимулирует поиск альтернативных технологий, сочетающих эффективность и экологичность. Одним из таких решений являются микробные топливные элементы (МТЭ) – инновационные системы, которые могут быть применимы на очистных сооружениях сточных вод, вырабатывая электроэнергию за счёт метаболической активности микроорганизмов. В данной работе рассмотрены принципы функционирования МТЭ. Описаны конструктивные особенности различных типов микробных топливных элементов: однокамерных, двухкамерных, безмембранных и бентосных. Особое внимание уделено их применению в городских и промышленных системах водоочистки. Обсуждаются перспективы масштабирования технологии и интеграции в существующие инфраструктуры водоочистки. Представленные данные подтверждают высокий потенциал МТЭ как устойчивого подхода к решению экологических задач и снижению энергопотребления в водоочистных процессах.
Ключевые слова: микробные топливные элементы, экобиотехнология, электрогенные микроорганизмы, очистка сточных вод, энергоэффективность, промышленные стоки, устойчивые технологии.

Для цитирования: Гладышева М. С., Молодкина Н. Р. Микробные топливные элементы в системах водоочистки: перспективы внедрения // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып.1. С. 161–177. DOI: 10.35634/UdSU.2026.66.56.011

Введение

Сегодня сточные воды рассматриваются как ценный ресурс, из которого можно получать чистую воду, энергию и питательные вещества. Однако современные методы очистки имеют серьёзные недостатки, главным из которых остаётся высокий уровень энергопотребления [1]. Так, традиционные технологии с использованием активного ила требуют значительных затрат

электроэнергии, приводят к образованию больших объёмов отходов и не позволяют эффективно извлекать полезные компоненты, содержащиеся в сточных водах.

Промышленные предприятия ежегодно производят сброс почти 80% воды, используемой для реализации технологических процессов, которая в дальнейшем преобразуется в сточные воды и попадает в различные водоёмы, такие как океаны, реки и другие водные объекты. Сброс сточных вод в водные экосистемы приводит к ряду прямых и косвенных последствий, связанных с загрязнением окружающей среды и возможными техногенными рисками [2].

В зависимости от технологических требований и экономической целесообразности, очистку сточных вод можно осуществлять различными методами. В рамках работы рассмотрена традиционная система очистки с использованием активного ила. Данный метод характеризуется высокой энергозатратностью, образованием большого количества отходов и неспособностью извлекать ценные ресурсы, содержащиеся в сточных водах. Таким образом, существует потребность в экономически эффективных и рациональных технологиях очистки сточных вод. Стоит отметить, что высокая концентрация растворённых или взвешенных органических веществ, присутствующих в большинстве сточных вод, является потенциальным источником энергии [3, 4]. В связи с этим разработка энергоэффективных технологий очистки сточных вод приобретает особую значимость.

Одной из наиболее перспективных разработок в последние годы является микробный топливный элемент (МТЭ), который можно рассмотреть, как инновационный и экономически выгодный метод биоремедиации токсичных органических и неорганических загрязнителей с помощью выработки энергии.

Актуальность темы исследования обусловлена развитием технологий в области очистки сточных вод с использованием биологических топливных

элементов. Это связано с ростом затрат на электроэнергию, используемую для очистки воды. В связи с этим возникает необходимость в развитии альтернативных источников электроэнергии. Одним из таких источников является технология микробного топливного элемента. Кроме того, на основе этой технологии можно разработать универсальную систему автономной бактериальной генерации электроэнергии. Это позволит обеспечить бесперебойную работу мониторинговых систем, что является важным аспектом при проведении очистки сточных вод на предприятии.

Объекты исследования

В качестве основных объектов исследования были рассмотрены городские (бытовые) сточные воды и сточные воды промышленности, в том числе пищевой, рассматриваемые как потенциальный субстрат для функционирования микробных топливных элементов. В качестве объекта также рассмотрены различные конструкции МТЭ, включая однокамерные, двухкамерные, безмембранные, бентосные системы. Использование сточных вод в процессе их очистки на установках микробных топливных элементов является потенциалом для выработки дополнительной электроэнергии и возможности мониторинга качества очищаемых сточных вод. Также особое внимание уделялось изучению различных конструкций МТЭ, включая их преимущества и недостатки.

Принцип устройства микробного топливного элемента

Микробные топливные элементы представляют собой биоэлектрохимические устройства, которые способны осуществлять разложение органических отходов до более простых молекул, при помощи микроорганизмов, что ведет к высвобождению электронов и протонов, которое делает возможным производство электрической энергии. Данные устройства

обладают способностью непосредственно преобразовывать химическую энергию в электрическую посредством биокаталитических реакций, индуцированных микроорганизмами.

Примером классической конфигурации МТЭ является двухкамерная система: анаэробная анодная камера и аэробная катодная камера, которые разделены между собой анионообменной мембраной. На рисунке 1 представлена схема МТЭ, где 1 – корпус, 2 – анодная камера, 3 – анод, 4 – катодная камера, 5 – катод, 6 – ионообменная мембрана, 7 – углеродные стержни, 8 – входной патрубок анодной камеры, 9 – входной патрубок катодной камеры, 10 – внешние электрические контакты. Анаэробная анодная камера содержит микроорганизмы, функционирующие в условиях пониженного содержания кислорода или его полного отсутствия, в то время как катодная камера насыщается воздухом. В процессе работы МТЭ органический субстрат поступает в анодную камеру, являясь питательной средой для микроорганизмов. Электроны, генерируемые в процессе метаболической активности микроорганизмов, образовавших биопленку на анодном материале, переходят и далее транспортируются через внешнюю цепь к катоду. За счет аэрации катодной камеры микробного топливного элемента кислород вступает в реакцию с водородом, формируя воду, в то время как протоны мигрируют через мембрану из анодной камеры в катодную. Таким образом, можно сказать, что данная система функционирует аналогично гальваническому элементу, обладая потенциальной возможностью непрерывной работы в условиях постоянного поступления органических соединений [5].

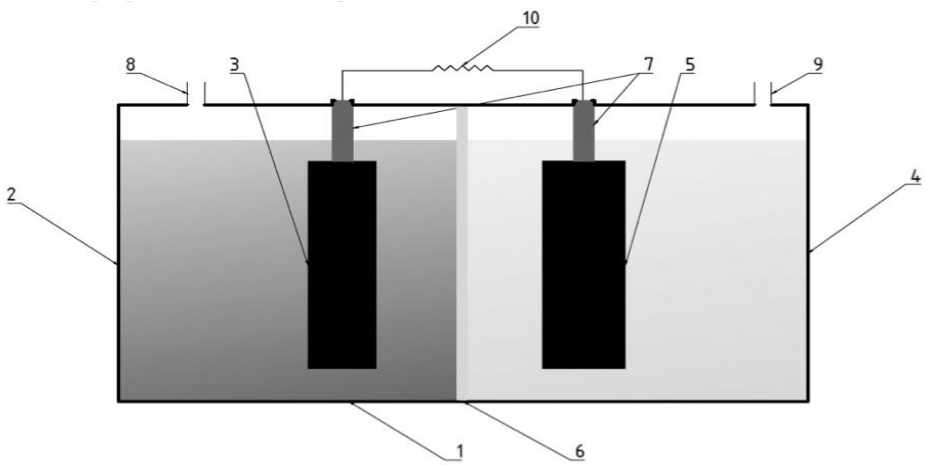


Рис. 1. Схема двухкамерного микробного топливного элемента

Конструкции микробных топливных элементов при очистке сточных вод

Несмотря на то, что на сегодняшний день МТЭ далеки от коммерческого применения, их конструкция была значительно усовершенствована для использования в рамках крупномасштабной очистки сточных вод [6].

Модель объединила преимущества системы с восходящим потоком и требованиями, предъявляемыми к двухкамерным МТЭ. Кроме того, ионообменная мембрана, используемая в двухкамерных системах, отличающаяся высокой стоимостью, обеспечивает стабильность МТЭ в течение длительного времени.

Говоря о других модификациях, можно отметить, что встречаются конструкции, где использовали безмембранный МТЭ для снижения затрат на строительство систем [7]. Данные конструкции, как и МТЭ с восходящим потоком, обладают преимуществами в удалении загрязнений, но часто сопровождаются низкой удельной мощностью и малым током.

Бентосные микробные топливные элементы или донные микробные топливные элементы, основанные на естественной разнице потенциалов между бескислородными отложениями и водой [8, 9] также могут использоваться при моделировании очистки сточных вод. В процессе выработки электроэнергии

микроорганизмы обычно используются для окисления субстратов и переноса электронов к аноду, либо установленному в осадок, либо расположенному поверх него, а затем электроны переносятся на катод, расположенный в вышележащей воде над осадком. В последние годы было успешно предложено и усовершенствовано множество конфигураций бентосных МТЭ. Их первоначальные конструкции в основном состояли из простых графитовых пластин, погруженных в осадок, в качестве анода, и катод, погруженный в воду, но результаты показывают, что такие конструкции являются очень хрупкими, а выработка электроэнергии, связанная с ними, была чрезвычайно низкой.

Характеристика сточных вод и выходного напряжения от МТЭ

Городские или бытовые сточные воды не только могут содержать большое количество потенциального сырья, которое может быть использовано в работе МТЭ для выработки электроэнергии, но также и множество загрязняющих веществ, [10, 11]. Говоря про очистку сточных вод, используя биологические методы, количество активного ила в результате обработки чрезвычайно велико. Затраты на эксплуатацию данных установок на очистных сооружениях сточных вод обычно составляют более 50% от общего объема инвестиций в управление [12]. Следовательно, общие затраты на очистку сточных вод могут быть значительно снижены за счет уменьшения затрат на обработку осадка.

В зависимости от конструкции МТЭ при испытаниях на моделированных городских сточных водах были достигнуты следующие результаты:

1. Однокамерный МТЭ: система способствовала общему снижению содержания ХПК и БПК5 на 60,0% и 69,0% соответственно [13].

2. Двухкамерный МТЭ: эффективность удаления ХПК составила 30,0%, максимальная плотность мощности – 25 мВт/м^2 [14].

Сточные воды пищевой промышленности могут быть наиболее применимы к совместной работе с МТЭ. Во-первых, например, при рассмотрении производства на свеклосахарном заводе, где сточные воды могут служить субстратом для микроорганизмов в МТЭ, главным образом из-за высокого содержания углеводов [15]. Во-вторых, при рассмотрении сточных вод, образующихся при переработке крахмала, которые вследствие своей специфики будут всегда содержать крахмал и белок в высокой концентрации, что позволяет использовать их в качестве энергетических ресурсов для применения в МТЭ. В-третьих, пивоваренные производства, использующие установки для осахаривания, ферментации и промывки, приводит к образованию значительного количества сточных вод. Сточные воды данных производств могут стать подходящим субстратом для микроорганизмов, при условии невысоких значений уровня химического потребления кислорода [16, 17].

В зависимости от конструкции МТЭ при испытаниях на смоделированных сточных водах пищевых производств были достигнуты следующие результаты:

1. Сточные воды от свеклосахарного производства:

– МТЭ с восходящим потоком анаэробного осадка – максимальная плотность мощности составила 1410,2 мВт/м^2. Эффективность удаления ХПК, сульфатов и красителей составила 53,2%, 52,7% и 41,1% соответственно [18].

– Анаэробный микробный топливный элемент – самый высокий показатель плотности мощности составил 115,5 ± 2,7 мВт/м^2 только при общей эффективности удаления ХПК 50,0–70,0% [19].

2. Сточные воды производства крахмала: уровень ХПК снизился с более чем 1700 мг/л до 50 мг/л, а максимальный ток составил 0,2 мА после 30 дней эксплуатации (конструкция МТЭ не уточняется) [20].

3. Сточные воды пивоваренных производств: из сточных вод пивоварни возможно удаление до 87,0% ХПК, показатель плотности мощности составил 30 мВт/м^2 [21].

В таблицах 1–5 представлены сводные сведения по конструкциям микробных топливных элементов.

Таблица 1

Сведения о конструкции однокамерного МТЭ

Тип МТЭ	Однокамерный МТЭ
Конструкция	Одна камера с анодом и катодом, часто с воздушным катодом
Возможные направления использования	Внедрение в процессы очистки бытовых сточных вод
Выходное напряжение	0,3–0,5 В [22]
Объем камеры	Лабораторные установки объёмом до 1 л
Преимущества	Простота, компактность, относительно низкая стоимость. Подходит для небольших объёмов сточных вод с низким содержанием органики. Возможность использования воздушного катода, что упрощает конструкцию
Недостатки	Низкая выходная мощность, необходимость использования конвертора выдаваемого напряжения

Таблица 2

Сведения о конструкции двухкамерного МТЭ

Тип МТЭ	Двухкамерный МТЭ
Конструкция	Две камеры, разделенные ионообменной мембраной
Возможные направления использования	Внедрение в процессы очистки промышленных стоков
Выходное напряжение	0,5–0,7 В [23]
Объем камеры	Лабораторные установки объёмом до 1 л. Пилотные установки объемом до 150 л [24]
Преимущества	Высокая удельная мощность благодаря разделению камер мембраной. Относительно высокая эффективность очистки сточных вод с высоким содержанием органики
Недостатки	Высокая стоимость из-за использования ионообменной мембраны. Сложность конструкции и сборки. Ограничения в масштабировании из-за стоимости и сложности

Таблица 3

Сведения о конструкции безмембранного МТЭ

Тип МТЭ	Безмембранный МТЭ
Конструкция	Одна камера без мембраны, анод и катод расположены в одном пространстве
Возможные направления использования	Внедрение в процессы очистки сточных вод с низким содержанием органики
Выходное напряжение	0,2–0,4 В [7]
Объем камеры	Лабораторные установки объёмом до 1 л
Преимущества	Простота конструкции, что облегчает изготовление и обслуживание
Недостатки	Низкая удельная мощность. Нестабильность работы при изменении состава сточных вод, что требует постоянного мониторинга. Ограниченная применимость для промышленных масштабов из-за низкой производительности

Таблица 4

Сведения о конструкции бентосный МТЭ

Тип МТЭ	Бентосный МТЭ
Конструкция	Анод погружается в донные отложения, катод находится в водной части
Возможные направления использования	Возможность применения в системах мониторинга
Выходное напряжение	0,6–0,8 [25]
Объем камеры	–
Преимущества	Использование естественных градиентов. Возможность работы в естественных условиях. Возможность долгосрочной работы. Большую применимость находит в решениях организации мониторинга окружающей среды
Недостатки	Зависимость от природных условий (температура, pH, состав осадков и др.) Низкая удельная мощность по сравнению с лабораторными системами.

Таблица 5

Сведения о конструкции МТЭ с восходящим потоком

Тип МТЭ	МТЭ с восходящим потоком
Конструкция	Анодная камера с восходящим потоком сточных вод, разделённая с катодной камерой посредством мембраны
Возможные направления использования	Внедрение в процессы очистки сточных вод, организация непрерывного процесса
Выходное напряжение	0,4–0,6 В [6]
Объем камеры	Пилотные установки объемом до 100 л
Преимущества	Высокая эффективность очистки благодаря непрерывному потоку сточных вод. Подходит для обработки больших объемов сточных вод. Возможность интеграции в существующие системы очистки
Недостатки	Сложность и высокая стоимость конструкции. Требуется детальная проработка всей системы для предотвращения засоров и неравномерного потока

Каждая из модификаций конструкций микробных топливных элементов имеет свои уникальные особенности, определяющие их применимость в определенных условиях. Так, однокамерный МТЭ выгоден именно за счёт простоты, компактности, а также относительно низкой стоимости, что делает его подходящим для малых объёмов бытовых стоков, однако его достаточно низкая выходная мощность требует применения дополнительных преобразователей напряжения. Двухкамерный МТЭ, за счет использования в конструкции ионообменной мембраны, показывает большую удельную мощность и эффективность очистки промышленных стоков, но его сложность и высокая цена конструкции усложняют масштабирование данных систем. Безмембранный МТЭ характеризуется упрощённой конструкцией, однако низкая стабильность и достаточно ограниченная производительность являются достаточно серьёзными недостатками данной конструкции. Донный МТЭ, применяющий естественные градиенты в донных осадках, демонстрирует высокое выходное напряжение, а также является перспективным для различных систем экологического мониторинга, однако его работа зависит от природных

условий, что в итоге может снижать стабильность показателей. Для МТЭ с восходящим потоком возможен постоянный и непрерывный процесс очистки, а также высокая эффективность обработки достаточно больших объёмов стоков, однако требует детальной проработки системы для избежания технических проблем, таких как засоры и неравномерное распределение потока, а также характеризуется высокой стоимостью конструкции.

Заключение

Микробные топливные элементы представляют собой перспективную технологию для внедрения в системы очистки сточных вод. В отличие от традиционных методов очистки МТЭ позволяют преобразовывать органические вещества, содержащиеся в сточных водах, в электрическую энергию, что открывает новые возможности для создания энергоэффективных и экологически устойчивых систем водоочистки.

Однако, несмотря на значительные успехи, внедрение МТЭ на крупномасштабных системах очистки сточных вод сталкивается с рядом вызовов – относительно низкую удельную мощность, высокую стоимость ионообменных мембран (говоря о двухкамерных системах МТЭ), а также необходимость оптимизации конструкций для повышения стабильности работы.

Микробные топливные элементы представляют собой инновационное решение для устойчивого управления водными ресурсами за счет сочетания очистки сточных вод и генерации энергии, что делает их ключевым элементом в переходе к циркулярной экономике. Развитие технологии может привести к созданию систем очистки, способных не только минимизировать воздействие на окружающую среду, но и внести свой вклад в энергетическую независимость предприятий. Таким образом, МТЭ открывают новые горизонты для экологически ориентированного подхода к управлению сточными водами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tauseef S.M., Tasneem A., Abbasi S.A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013, vol.19, pp. 704 – 741.
2. Prabakar D., Manimudi V. T., Suvetha K. S., Sampath S., Mahapatra D. M., Rajendran K., Pugazhendhi A. Advanced biohydrogen production using pretreated industrial waste: Outlook and prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018, vol. 96, pp. 306–324.
3. Do M.H., Ngo H.H., Guo W.S., Liu Y., Chang S.W., Nguyen D.D., Nghiem L.D., Ni B.J. Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review, Science of the Total Environment. 2018, vol. 639, pp.910–920.
4. Rozsenberszki T., Kook L., Hutvagner D., Nemestothy N., Belafi-Bako K., Bakonyi P., Kurdi R., Sarkady A. Comparison of anaerobic degradation processes for bioenergy generation from liquid fraction of pressed solid waste, Waste and Biomass Valorization. 2015, vol. 6, pp.465–473.
5. Шеуджен Т.М., Волченко Н.Н., Самков А.А. Исследование возможности функционирования твердофазных микробных топливных элементов новой конструкции // Проблемы науки. 2017. № 2. С. 1–3.
6. He Z., Minteer S.D., Angenent L.T. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell, Environmental Science Technology. 2015, vol.39, pp. 5262–5275.
7. Jang J.K., Pham T.H., Chang I.S., Kang K.H., Moon H., Cho K.S. Kim B.H. Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell, Process Biochemistry. 2014, vol.39, pp. 1007–1019.
8. Li Z.L., Kong L., Liu H. Electricity generation using a baffled microbial fuel cell convenient for stacking, Bioresource Technology. 2018, vol.99, pp. 1650–1655.
9. Lovley D.R. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches, Current Biotechnology. 2016, vol. 17, pp. 327–359.
10. Nandy A., Kumar V., Kundu P.P. Effect of electric impulse for improved energy generation in mediatorless dual chamber microbial fuel cell through electroevolution of Escherichia coli, Biotechnological Bioengineering. 2016, vol.79, pp. 796–801.

11. Min B., Logan B.E. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell, Environmental Science Technology. 2004, vol. 38, pp. 5809–5833.
12. Xiao B., Yang F., Liu J. Enhancing simultaneous electricity production and reduction of sewage sludge in two-chamber MFC by aerobic sludge digestion and sludge pretreatments, Hazard Mater. 2011, vol. 189, pp. 444–453.
13. Rodrigo M.A., Cañizares P., Lobato J., Paz R., Sáez C., Linares J.J. Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell, Power Sources. 2017, vol. 169, pp. 198–204.
14. Sciarria T.P., Tenca A., Epifanio A.D., Mecheri B., Merlino G., Barbato M. Using olive mill wastewater to improve performance in producing electricity from domestic wastewater by using single-chamber microbial fuel cell, Bioresource Technology. 2013. vol. 147, pp. 246–299.
15. Sharma S., Malaviya P. Bioremediation of tannery wastewater by chromium resistant novel fungal Isolate Fusarium Chlamydosporium SPFS2-g, Ecological Engineering. 2016, vol. 91, pp. 419–444.
16. Lu N., Zhou B., Deng L.F., Zhou S.G., Ni J.R. Starch processing wastewater treatment using a continuous microbial fuel cell with MnO_2 cathodic catalyst, Basic Science Engineering. 2009, vol. 17, pp. 65–73.
17. Gil G.C., Chang I.S., Kim B.H, Kim M., Jang J.K., Park H.S., Kim H.J. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell, Biosensors and Bioelectronics. 2003, vol. 18, pp. 327–334.
18. Pham T.H., Rabaey K., Aelterman P., Clauwaert P., Schamphelaire L., Boon N., Verstraete W. Microbial fuel cells in relation to conventional anaerobic digestion technology, Engineering Life Science. 2006, vol. 6, pp. 285–311.
19. Sadhukhan J., Lloyd J.R., Scott K., Premier G.C., Yu E.H., Curtis T., Head I.M. A critical review of integration analysis of microbial electrosynthesis (MES) systems with waste biorefineries for the production of biofuel and chemical from reuse of CO_2, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, vol. 56, pp. 116–148.
20. Liu S.T., Song H.L., Wei S., Yang F., Li X.N. Bio-cathode materials evaluation and configuration optimization for power output of vertical subsurface flow constructed wetland Microbial fuel cell systems, Bioresource Technology. 2014, vol. 166, pp. 575–601.

21. Huang J.S., Yang P., Guo Y., Zhang K.S. Electricity generation during wastewater treatment: an approach using an AFB-MFC for alcohol distillery wastewater, Desalination. 2011, vol. 276, pp. 373–381.
22. Koffi ND., Okabe S. High voltage generation from wastewater by microbial fuel cells equipped with a newly designed low voltage booster multiplier (LVBM), Scientific Reports. 2020, vol. 10.
23. Parkash A. Design and Fabrication of a Double Chamber Microbial Fuel Cell for Voltage Generation from Biowaste, Journal of Bioprocessing & Biotechniques. 2015, vol. 5.
24. Atasoy M., Owusu-Agyeman I., Plaza E., Cetecioglu Z. Bio-based volatile fatty acid production and recovery from waste streams: Current status and future challenges, Bioresource Technology. 2018, vol. 268, pp. 773 – 786.
25. Lazukin A., Saveliev A., Krestovnikov K. Low Input Voltage DC-DC Converter for Harvesting Energy by Microbial Fuel Cell, Software Engineering Application in Systems Design. 2022, vol. 6, pp. 613–627.

Поступила в редакцию: 15.04.25

Сведения об авторах

Гладышева Марина Сергеевна
Магистрант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А. Россия.
Email: msgladysheva@itmo.ru

Молодкина Нелли Ринатовна
Заведующий лабораторией факультета Экотехнологий, доцент факультета Экотехнологий, к.т.н., Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А. Россия.
Email: nrmolodkina@itmo.ru

M.S. Gladysheva, N.R. Molodkina

MICROBIAL FUEL CELLS IN WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS: PROSPECTS FOR IMPLEMENTATION

Annotation. Modern methods of wastewater treatment are often associated with high energy costs and the formation of a significant volume of waste, which stimulates the search for alternative technologies that combine efficiency and environmental friendliness. One such solution is microbial fuel cells (MFCs) – innovative systems that can be applied at wastewater treatment plants, generating electricity through the metabolic activity of microorganisms. This paper examines the operating principles of MFCs. The design features of various types of microbial fuel cells are described: single-chamber, dual-chamber, membraneless, and benthic. Special attention is paid to their application in urban and industrial water treatment systems. The prospects for scaling the technology and integrating it into existing water treatment infrastructures are discussed. The presented data confirm the high potential of MFCs as a sustainable approach to solving environmental problems and reducing energy consumption in water treatment processes.
***Keywords*:** microbial fuel cells, ecobiotechnology, electrogenic microorganisms, wastewater treatment, energy efficiency, industrial effluents, sustainable technologies.

For citation: Gladysheva M.S., Molodkina N.R. [Microbial fuel cells in wastewater treatment systems: prospects for implementation]. *Upravlenie tekhnosferoi,* 2026, vol. 9, issue 1, pp. 161–177. DOI: 10.35634/UdSU.2026.66.56.011. (In Russ.).

REFERENCES

1. Tauseef S.M., Tasneem A., Abbasi S.A. Energy recovery from wastewaters with high-rate anaerobic digesters, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013, vol.19, pp. 704 – 741.
2. Prabakar D., Manimudi V. T., Suvetha K. S., Sampath S., Mahapatra D. M., Rajendran K., Pugazhendhi A. Advanced biohydrogen production using pretreated industrial waste: Outlook and prospects, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018, vol. 96, pp. 306–324.
3. Do M.H., Ngo H.H., Guo W.S., Liu Y., Chang S.W., Nguyen D.D., Nghiem L.D., Ni B.J. Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review, Science of the Total Environment. 2018, vol. 639, pp.910–920.
4. Rozsenberszki T., Kook L., Hutvagner D., Nemestothy N., Belafi-Bako K., Bakonyi P., Kurdi R., Sarkady A. Comparison of anaerobic degradation processes for bioenergy generation from liquid fraction of pressed solid waste, Waste and Biomass Valorization. 2015, vol. 6, pp.465 - 473.
5. Sheudzhen T.M., Volchenko N.N., Samkov A.A. Issledovanie vozmozhnosti funktsionirovaniya tverdofaznykh mikrobnykh toplivnykh elementov novoi konstruktsii [Research on the possibility of functioning of solid-state microbial fuel cells of a new design] *Problemy nauki*. 2017, vol. 2, pp. 1–3. (In Russ.).

6. He Z., Minteer S.D., Angenent L.T. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell, Environmental Science Technology. 2015, vol.39, pp. 5262–5275.
7. Jang J.K., Pham T.H., Chang I.S., Kang K.H., Moon H., Cho K.S. Kim B.H. Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell, Process Biochemistry. 2014, vol.39, pp. 1007–1019.
8. Li Z.L., Kong L., Liu H. Electricity generation using a baffled microbial fuel cell convenient for stacking, Bioresource Technology. 2018, vol.99, pp. 1650–1655.
9. Lovley D.R. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches, Current Biotechnology. 2016, vol. 17, pp. 327–359.
10. Nandy A., Kumar V., Kundu P.P. Effect of electric impulse for improved energy generation in mediatorless dual chamber microbial fuel cell through electroevolution of Escherichia coli, Biotechnological Bioengineering. 2016, vol.79, pp. 796–801.
11. Min B., Logan B.E. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell, Environmental Science Technology. 2004, vol. 38, pp. 5809–5833.
12. Xiao B., Yang F., Liu J. Enhancing simultaneous electricity production and reduction of sewage sludge in two-chamber MFC by aerobic sludge digestion and sludge pretreatments, Hazard Mater. 2011, vol. 189, pp. 444–453.
13. Rodrigo M.A., Cañizares P., Lobato J., Paz R., Sáez C., Linares J.J. Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell, Power Sources. 2017, vol. 169, pp. 198–204.
14. Sciarria T.P., Tenca A., Epifanio A.D., Mecheri B., Merlino G., Barbato M. Using olive mill wastewater to improve performance in producing electricity from domestic wastewater by using single-chamber microbial fuel cell, Bioresource Technology. 2013. vol. 147, pp. 246–299.
15. Sharma S., Malaviya P. Bioremediation of tannery wastewater by chromium resistant novel fungal Isolate Fusarium Chlamydosporium SPFS2-g, Ecological Engineering. 2016, vol. 91, pp. 419–444.
16. Lu N., Zhou B., Deng L.F., Zhou S.G., Ni J.R. Starch processing wastewater treatment using a continuous microbial fuel cell with MnO2 cathodic catalyst, Basic Science Engineering. 2009, vol. 17, pp. 65–73.
17. Gil G.C., Chang I.S., Kim B.H, Kim M., Jang J.K., Park H.S., Kim H.J. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell, Biosensors and Bioelectronics. 2003, vol. 18, pp. 327–334.

18. Pham T.H., Rabaey K., Aelterman P., Clauwaert P., Schamphelaire L., Boon N., Verstraete W. Microbial fuel cells in relation to conventional anaerobic digestion technology, Engineering Life Science. 2006, vol. 6, pp. 285–311.
19. Sadhukhan J., Lloyd J.R., Scott K., Premier G.C., Yu E.H., Curtis T., Head I.M. A critical review of integration analysis of microbial electrosynthesis (MES) systems with waste biorefineries for the production of biofuel and chemical from reuse of CO2, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, vol. 56, pp. 116–148.
20. Liu S.T., Song H.L., Wei S., Yang F., Li X.N. Bio-cathode materials evaluation and configuration optimization for power output of vertical subsurface flow constructed wetland Microbial fuel cell systems, Bioresource Technology. 2014, vol. 166, pp. 575–601.
21. Huang J.S., Yang P., Guo Y., Zhang K.S. Electricity generation during wastewater treatment: an approach using an AFB-MFC for alcohol distillery wastewater, Desalination. 2011, vol. 276, pp. 373–381.
22. Koffi ND., Okabe S. High voltage generation from wastewater by microbial fuel cells equipped with a newly designed low voltage booster multiplier (LVBM), Scientific Reports. 2020, vol. 10.
23. Parkash A. Design and Fabrication of a Double Chamber Microbial Fuel Cell for Voltage Generation from Biowaste, Journal of Bioprocessing & Biotechniques. 2015, vol. 5.
24. Atasoy M., Owusu-Agyeman I., Plaza E., Cetecioglu Z. Bio-based volatile fatty acid production and recovery from waste streams: Current status and future challenges, Bioresource Technology. 2018, vol. 268, pp. 773 – 786.
25. Lazukin A., Saveliev A., Krestovnikov K. Low Input Voltage DC-DC Converter for Harvesting Energy by Microbial Fuel Cell, Software Engineering Application in Systems Design. 2022, vol. 6, pp. 613–627.

Received: 15.04.25

About the Authors

Gladysheva Marina Sergeevna
Master's student, ITMO University, 197101, Kronverkskiy pr., 49, lit. A, Saint-Petersburg, Russia. Email: msgladysheva@itmo.ru

Molodkina Nelli Rinatovna
Head of the Laboratory of the Faculty of Ecotechnologies, Associate Professor of the Faculty of Ecotechnologies, PhD, ITMO University, 197101, Kronverkskiy pr., 49, lit. A, Saint-Petersburg, Russia. Email: nrmolodkina@itmo.ru