

УДК 57:544.6

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНО-МИКРОБНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Курманбаев А.А., Жатканбаев Е.Е., Садыков А.М., Хасенова Э.Ж., Молдагулова А.К., Кульмагамбетова Р.Х., Усенова А.А., Шойынбаева А.С., Куртибай К.А.

ТОО «Экостандарт.КЗ», Нур-Султан, e-mail: wberel@gmail.com

В последнее время широкое применение получили топливные элементы на основе Constructed Wetlands осадочного типа. Одним из последних исследований является изучение возможности генерации электроэнергии в системах CW. Область применения: возобновляемые источники энергии, очистка водоемов, а также комбинирование процессов водоочистки канализационных очистных сооружений и генерации электроэнергии. Целью данной работы является определение оптимального дизайна растительно-микробных топливных элементов (РМТЭ), оценка электрогенной активности различных растений и проведение анализа состава микрофлоры. В работе приведены результаты по использованию комбинированных конструкций растительно-микробных топливных элементов, способных обеспечить очистку сточных вод и генерировать электроэнергию. Представлен дизайн разработанной конструкции – однокамерная установка РМТЭ, без применения мембран. Исследованы различные электрогенные параметры в зависимости от используемых электродных материалов, расстояния между электродами, формы, размера электродов и вида растений. Полученные результаты позволяют судить о высокой электрогенной активности микрофлоры на корнях водных растений пистии и эйхорнии. Оптимальным расстоянием между электродами является 100–200 мм. Также классическими микробиологическими методами проведен анализ состава микрофлоры на различных электродах, использованных на экспериментальных установках.

**Ключевые слова:** микробный топливный элемент, очистка, сточные воды, электроэнергия, микроорганизмы

## USING VEGETABLE-MICROBIAL FUEL CELL ELEMENTS TO OBTAIN ELECTRICAL CURRENT AND WASTEWATER TREATMENT

Kurmanbayev A.A., Zhatkanbayev Ye.Ye., Sadykov A.M., Khassenova E.Zh., Moldagulova A.K., Kulmagambetova R.Kh., Ussenova A.A., Shoiynbayeva A.S., Kurtibay K.A.

LLP «Ecostandart.KZ», Nur-Sultan, e-mail: wberel@gmail.com

Recently, fuel elements based on Constructed Wetlands sedimentary type have received widely used. One of the latest studies is the possibility of generating electricity in CW systems. Scope: renewable energy sources, cleaning of water bodies, as well as combining the processes of water treatment of sewage treatment plants and electricity generation. The aim of this work is to determine the optimal design of plant-microbial fuel elements (RMTE), evaluate the electrogenic activity of various plants and conduct an analysis of the composition of microflora. The work provides results on the use of combined structures of plant-microbial fuel elements that can provide wastewater treatment and generate electricity. The design of the developed design is presented – a single-chamber installation of RMTE, without the use of membranes. Various electrogenic parameters are taken depending on the electrode materials used, the distance between the electrodes, the shape, the size of the electrodes and the type of plants. The results obtained allow us to judge the high electrogenic activity of microflora on the roots of aquatic plants of pistias and eichnorria. The optimal distance between the electrodes is 100 – 200 mm. Also, classic microbiological methods, an analysis of the composition of microflora on various electrodes used on experimental installations was carried out.

**Keywords:** microbial fuel cell, purification, wastewater, electricity, microorganisms, electrode

Резкое увеличение спроса на воду и энергию при одновременном их дефиците усиливает вероятность гуманитарного кризиса. Как ожидается, в следующем десятилетии нехватка доступной пресной воды и рост потребления энергии составят 40% и 36% соответственно, что потребует устойчивых решений этих проблем [1]. Существующие способы очистки сточных вод страдают от дисбаланса в соотношении работа-энергия в обеспечении стандартов очистки [2].

В настоящее время общепризнанно, что сточные воды являются возобновляемыми источниками энергии, удерживающими в химических связях органического ве-

щества энергию в несколько раз большую, чем требуется для их очистки [3]. Концепции преобразования отходов в энергию и разработки менее энергоемких технологий управления сточными водами развивались и широко исследовались во всем мире. Разработка экономичных и энергонейтральных технологий в настоящее время является наиболее востребованным подходом [4].

Водоемы, в которые попал избыток органических веществ (например, из канализации или из стоков скотоводческих ферм), становятся «мертвой зоной»: в них зацветает вода и гибнет рыба и фауна. Чтобы этого не допустить, необходимо очищать воды от органических загрязнений. В среднем

развитые страны ежегодно тратят на такие мероприятия до 3% всей вырабатываемой энергии.

Для повышения степени очистки и снижения потерь энергии используется биологическая доочистка. Наиболее простым и эффективным способом служит почвенная очистка по технологии полей орошения и фильтрации, а также ветланды. К биологическим способам очистки относятся и растительно-микробные топливные элементы (РМТЭ), которые позволяют минимизировать потери энергии, превратив очистку сточных вод из энергозатратного процесса в способ получения электроэнергии.

В настоящее время применение РМТЭ распространилось на экологически чистые инженерные системы [5], для выработки биоэлектричества из рисовых полей [6], водно-болотных угодий [7], зеленых крыш [8] и плавучих водоемов [9]. Кроме того, существует потенциал для РМФС-включения в сельскохозяйственные угодья без какого-либо воздействия на производство продуктов питания [10]. Растения, выращиваемые в помещении, зеленые крыши и сады на крышах также могут использоваться в РМФС для выработки биоэлектричества, поддерживать качество воздуха и оказывать экосистемные услуги [11].

Целью данной работы является определение оптимального дизайна растительно-микробных топливных элементов (РМТЭ), оценка электрогенной активности различных растений и проведение анализа состава микрофлоры.

#### Материалы и методы исследований

В качестве растений для создания растительно-микробных топливных элементов были подобраны представители водной фитофлоры, произрастающие в водоемах и заболоченных местностях: пистия, эйхорния толстоножковая, камыш, рис. Растения подрощены до стадии кушения: пистия (лист – 10 см, корень – 5 см), эйхорния (лист – 20 см, корень – 18 см), камыш (стебель – 30 см, корень – 13 см), рис (стебель – 15 см, корень – 7 см).

Конструкция безмембранная. Электроды, включенные в систему, замыкают электрическую цепь. В качестве электродов послужили: алюминиевая сетка 3,23.2×13.4×2.4 мм ПВС (ТУ У00236010.001-97), угольные (графитовые) электроды диаметром 8 мм (ГОСТ 10720-75), графитовый электрод, а также лист из нержавеющей стали 2 мм, анод выполнен из тех же материалов.

Расстояние между электродами – 5, 10, 20 см. Два электрода подключались к пор-

тативному цифровому мультиметру типа UT33C+ с помощью медных проводов или через сопротивление в 1000 Ом. Производительность системы определяется путем измерения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания.

В качестве сточной воды использовался имитат следующего состава (г/л):  $\text{CH}_3\text{COONa}$  – 256,41 мг/л;  $\text{NH}_4\text{Cl}$  – 76,43 мг/л;  $\text{NaNO}_3$  – 30,36;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – 14,24 мг/л;  $\text{CaCl}_2$  – 14,7 мг/л;  $\text{MgCl}_2$  – 20,3 мг/л и раствор микроэлементов 10 мл/л [21]. На дно устройства нанесли болотный ил высотой не более 3 см. Синтетические сточные воды подавались на поверхность каждого CW-MFC. Изначальный показатель ХПК сточной синтетической воды в системе РМТЭ в среднем был в пределах 110-250 мгО<sub>2</sub>/л.

Измерения вольт-амперных характеристик проводили с помощью аппарата мультиметр Fluke 8808A.

Выделение, очистку и идентификацию микроорганизмов проводили общепринятыми классическими методами.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ Statistica 6,0, Microsoft Excel 97.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В рамках создания модельных РМТЭ в CW проведена серия экспериментов по получению электроэнергии на различных установках с использованием растений: пистия, водяной гиацинт, камыш и рис. Выращенные культуры устанавливали в экспериментальные РМТЭ.

Экспериментальные РМТЭ созданы на основе трубы ПВХ (поливинилхлорид) диаметром 150 мм, толщиной 2 мм, высотой 37 см. Рабочий объем РМТЭ составил 6 литров (рис. 1).

При культивировании растений на экспериментальных установках корни и окисляемый субстрат находятся в аэробных условиях, аэрируются воздухом в катодной камере РМТЭ. В нижнем отсеке РМТЭ содержится анод, где создаются анаэробные условия (рис. 1).

Предлагаемый РМТЭ не имеет в своей конструкции протонселективной мембраны. На аноде микроорганизмы ассимилируют органические вещества из воды, при этом свободные протоны диффундируют к катоду, где окисляются кислородом до воды. В качестве субстрата использована синтетическая сточная вода. Сточная вода подавалась с нижнего клапана со скоростью 6 л/сутки, таким образом, обновление объема осуществляется за 24 часа.

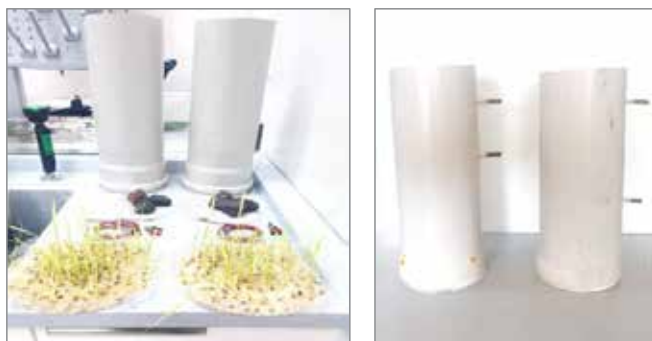


Рис. 1. Экспериментальные РМТЭ

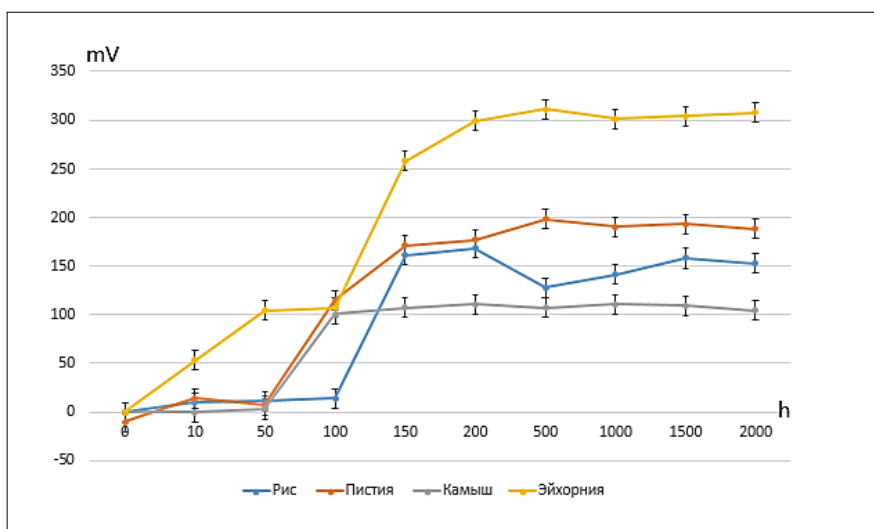


Рис. 2. Динамика электрогенной активности РМТЭ с различными растениями

Показатели напряжения, силы тока и разности потенциала определяли ежедневно с помощью мультиметра. Положительные показатели электрогенной активности получены при культивировании 50-100 ч, максимальные показатели достигались на 10-15-е сутки (рис. 2).

В рамках исследования высокую электрогенную активность проявили установки с графитовым электродом, где максимальный показатель напряжения достигнут на уровне 512 mV, при длительности культивирования 74 суток с использованием пистии, сила тока 1,61 mA (рис. 3).

Было исследовано РМТЭ с различными параметрами: расстояние между электродами (100-200 мм), растения (пистия, эйхорния, рис, камыш), форма и размеры электродов (классический графитовый электрод, графитовый стержневый электрод 8 мм), а также алюминиевая сетка.

В среднем между различным дизайном электродов существенных различий между

генерируемыми напряжением и силой тока РМТЭ в экспериментальных установках не наблюдалось (табл. 1). Однако важно отметить, что РМТЭ, содержащие электроды из нержавеющей стали, достигали наиболее высоких показателей напряжения тока 607 mV. При этом установки с графитом наиболее быстрее «запускались» и производили ток, в свою очередь электроды из алюминиевой сетки также показали высокий потенциал с максимальным показателем на уровне 468 mV.

Таким образом, анализ результатов, полученных в рамках исследования экспериментальных РМТЭ, позволил определить оптимальное расстояние между электродами в установке, которое составило 10 см. Наиболее высокий потенциал развивали электроды из нержавеющей стали и графита. Из растений более эффективными оказались пистия, затем рис и эйхорния, наименьшие показатели генерации тока отмечали при использовании камыша.

Таблица 1

Показатели электрогенной активности экспериментальных РМТЭ

№ п/п	Растения	Дизайн РМТЭ	Количество дней	Напряжение, мV	Сила тока, mA
1	Рис	Образец 1, нерж. металл, 10 см	74	405±1	0,15
2	Рис	Образец 2, нерж. металл, 20 см	74	220±1	0,15
3	Рис	Образец 3, алюм. сетка, 10 см	83	443±1	1,38
4	Рис	Образец 4, алюм. сетка, 20 см	83	222±1	1,10
5	Рис	Образец 5, графитовый стержень, 10 см	61	468±1	1,11
6	Рис	Образец 6, графитовый стержень, 20 см	61	222±1	1,17
7	Рис	Образец 7, графитовый стержень, 5 см	15	228±1	1,56
8	Пистия	Образец 8, нерж. металл, 20 см	74	431±1	1,00
9	Пистия	Образец 9, алюм. сетка, 10 см	83	478±1	1,11
10	Пистия	Образец 10, алюм. сетка, 20 см	83	408,4±1	1,05
11	Пистия	Образец 11, графитовый стержень, 10 см	61	447±1	1,27
12	Пистия	Образец 12, графитовый стержень, 20 см	61	88±1	0,58
13	Пистия	Образец 13, графитовый стержень, 20 см	15	180±1	1,58
14	Камыш	Образец 14, нерж. металл, 10 см	74	311±1	0,88
15	Камыш	Образец 15, нерж. металл, 20 см	74	180±1	0,58
16	Камыш	Образец 16, алюм. сетка, 10 см	83	444±1	0,53
17	Камыш	Образец 17, алюм. сетка, 20 см	83	428±1	0,71
18	Камыш	Образец 18, графитовый стержень, 10 см	61	401±1	0,25
19	Камыш	Образец 19, графитовый стержень, 20 см	61	103±1	0,21
20	Эйхорния	Образец 20, нерж. металл, 10 см	74	358±1	1,41
21	Эйхорния	Образец 21, нерж. металл, 20 см	74	301±1	1,15
22	Эйхорния	Образец 22, алюм. сетка, 10 см	83	468±1	0,75
23	Эйхорния	Образец 23, алюм. сетка, 20 см	83	388±1	0,38
24	Эйхорния	Образец 24, графитовый стержень, 10 см	61	408±1	0,97
25	Эйхорния	Образец 25, графитовый стержень, 20 см	61	255±1	0,57
26	Эйхорния	Образец 26, графитовый стержень, 5 см	15	270±1	0,44

По данным таблицы 2, наибольшим напряжением обладает вариант № 9, который состоит из электродов из нержавеющей стали, расположенных на расстоянии 10 см, с использованием пистии в качестве растительного элемента. Также высокое напряжение показали вариант № 5 (рис, графитовый стержень, 10 см) и № 8 (пистия, нержавеющая сталь, 20 см).

Проведена оценка электрогенного микробиоценоза, выделенного из электродов РМТЭ классическими методами. Для выделения микроорганизмов с электродов отбирали пробы методом смыва с дальнейшим проведением предельных разведений и посевом суспензий клеток на селективные питательные среды: СПА, МПА, Клигера, МРС и Сабуро (рис. 3).

В выделенных культурах доминировали бактерии с колониями бежевого цвета. Также встречались колонии желтого, розового

и черного цветов. Выявлено, что на электродах экспериментальных РМТЭ присутствовали грамотрицательные и грамположительные бактерии. Культуры чистые, имеют однородный рост по штриху посева, также клетки в мазке однородные.

По фенотипическим характеристикам и биохимическим свойствам большинство выделенных чистых жизнеспособных микроорганизмов были представителями рода *Bacillus*, остальные физиологические группы отнесены к следующим родам: *Shigella*, *Lactobacillus*, *Actinobacteria*, *Clostridium*, *Shewanella*, *Proteus*, *Pseudomonas*. Основное количество микроорганизмов выделены из аэробной зоны, из анаэробной только *Clostridium* и *Lactobacillus*.

Результаты химического анализа по определению ХПК на 15-е сутки показали снижение значения до 28 мгО<sub>2</sub>/л.

Таблица 2

Вольт-амперные показатели различных вариантов РМТЭ

№ п/п	Вариант опыта	Измерения в открытом контуре		Измерения через сопротивление, 989 Ом		Мощность, Вт
		Напряжение, мV	Сила тока, mA	Напряжение, мV	Сила тока, mA	
1	Образец 1	405	0,15	180	0,18	32,4
2	Образец 2	220	0,15	87	0,08	6,96
3	Образец 3	443	1,38	258	0,2	51,6
4	Образец 4	222	1,1	98	0,09	8,82
5	Образец 5	468	1,11	314	0,35	109,9
6	Образец 6	222	1,17	100	0,1	10
7	Образец 7	228	1,56	147	0,14	20,58
8	Образец 8	431	1	305	0,3	91,5
9	Образец 9	478	1,11	323	0,35	113,05
10	Образец 10	408,4	1,05	178	0,18	32,04
11	Образец 11	447	1,27	205	0,2	41
12	Образец 12	88	0,58	14	0,01	0,14
13	Образец 13	180	1,58	120	0,12	14,4
14	Образец 14	311	0,88	179	0,18	32,22
15	Образец 15	180	0,58	77	0,08	6,16
16	Образец 16	444	0,53	286	0,29	82,94
17	Образец 17	428	0,71	270	0,27	72,9
18	Образец 18	401	0,25	174	0,17	29,58
19	Образец 19	103	0,21	68	0,06	4,08
20	Образец 20	358	1,41	220	0,22	48,4
21	Образец 21	301	1,15	208	0,21	43,68
22	Образец 22	468	0,75	300	0,3	90
23	Образец 23	388	0,38	217	0,21	45,57
24	Образец 24	408	0,97	304	0,3	91,2
25	Образец 25	255	0,57	186	0,18	33,48
26	Образец 26	270	0,44	113	0,11	12,43



Рис. 3. Первичное выделение культур микроорганизмов

**Заключение**

Таким образом, нам удалось создать однокамерную установку растительно-микробных топливных элементов и произвести отбор эффективных электродных

материалов. В нашем исследовании наибольшую эффективность показали РМТЭ из нержавеющей стали и графита с оптимальным расстоянием между электродами в установке 10 см. Из растений более эф-

фективными оказались пистия, рис и эйхорния, наименьшие показатели генерации тока отмечали при использовании камыша.

Наибольшим напряжением обладал вариант опыта № 9 (468 mV), который состоит из электродов из нержавеющей стали, расположенных на расстоянии 10 см, с использованием растения – пистии, вариант № 5 (468 mV, рис, графитовый стержень, 10 см) и вариант № 8 (431 mV, пистия, нержавеющая сталь, 20 см).

Микробиоценоз с поверхности электрода и сточных вод составили следующие таксономические группы бактерий: *Bacillus*, *Shigella*, *Lactobacillus*, *Actinobacteria*, *Clostridium*, *Shewanella*, *Proteus*, *Pseudomonas*.

#### Список литературы

1. Jingyu H., Miwornunyuie N., Ewusi-Mensah D., Koomson D.A. Assessing the factors influencing the performance of constructed wetland–microbial fuel cell integration. *Water Sci. Technol.* 2020. Vol. 81(4). P. 631-643.
2. Yang Z., Pei H., Hou Q., Jiang L., Zhang L., Nie C. Algal biofilm-assisted microbial fuel cell to enhance domestic wastewater treatment: nutrient, organics removal and bioenergy production. *Chem. Eng.* 2018. Vol. 332. P. 277-285.
3. Pandey P., Shinde V.N., Deopurkar R.L., Kale S.P., Patil S.A., Pant D. Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery. *Appl. Energy.* 2016. Vol. 168. P. 706-723.
4. Reddy C.N., Nguyen H.T., Noori M.T., Min B. Potential applications of algae in the cathode of microbial fuel cells for enhanced electricity generation with simultaneous nutrient removal and algae biorefinery: Current status and future perspectives. *Bioresour. Technol.* 2019. Vol. 292. P. 122010.
5. Helder M., Strik D.P.B.T.B., Hamelers H.V.M., Kuhn A.J., Blok C., Buisman C.J.N. Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresour. Technol.* 2010. Vol. 101. Issue 10. P. 3541-3547.
6. Kazuko Takanezawa, Koichi Nishio, Souichiro Kato, Kazuhito Hashimoto, Kazuya Watanabe. Factors Affecting Electric Output from Rice-Paddy Microbial Fuel Cells. *Bio-science, Biotechnology, and Biochemistry.* 2010. Vol. 74. Issue 6. P. 1271–1273.
7. Sudirjo E., Buisman C.J.N., Strik D.P.B.T.B. Electricity generation from wetlands with activated carbon bioanode. *International Conference on Green Agro-industry and Bioeconomy IOP Publishing IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 2018. Vol. 131. P. 012-046.
8. Helder M., Chen W.S., Van Der Harst E.J., Strik D.P., Hamelers H.B.V., Buisman C.J., Potting J. Electricity production with living plants on a green roof: environmental performance of the plant-microbial fuel cell. *Biofuel Bioprod Biorefin.* 2013. Vol. 7(1). P. 52–64.
9. Wetser K., Liu J., Buisman C., Strik D. Plant microbial fuel cell applied in wetlands: spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass Bioenergy.* 2015. Vol. 83. P. 543–550.
10. Wetser K., Sudirjo E., Buisman C.J., Strik D.P. Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Appl Energy.* 2015. Vol. 137. P. 151–157.
11. Tapia N.F., Rojas C., Bonilla C.A., Vargas I.T. Evaluation of sedum as driver for plant microbial fuel cells in a semi-arid green roof ecosystem. *Ecol Eng.* 2017. Vol. 108. P. 203–210.