

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БІОПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ЕКОБІОТЕХНОЛОГІЇ

Колтишева Д.С.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, koltysheva.dina@iit.kpi.ua

Abstract

The deterioration of the environment, which is becoming more acute every year, poses a number of urgent tasks for scientists. Biofuel cells as bioelectrochemical systems in which current is generated by bioconversion of waste are promising in ecobiotechnology. Microbial fuel cells, microbial electrolysis cells, plant biofuel cells and a number of others are promising for solving the problems of waste disposal and electricity generation.

Keywords: *biofuel cells, electricity, ecobiotechnology. plant, wastewater.*

Ряд екологічних проблем: погіршення якості води у водоймах, вичерпання викопних паливних ресурсів, зміни клімату, погіршення стану повітря у містах щороку все гостріше постають перед людством. Більшість технологій очищення стічних вод, які використовують, є енерговитратними, а у випадку використання хімічного очищення можуть спричиняти вторинне забруднення [1]. Пошук та розробка альтернативних способів отримання енергії, вирішення екологічних проблем є актуальним завданням на сьогодні. До того ж ряд міжнародних угод, зокрема Паризька кліматична угода (2015) в межах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (UNFCCC) вказує про необхідність регулювання заходів зі зменшення викидів діоксиду вуглецю. Враховуючи, що виробництво електричної та теплової енергії на сьогоднішній день переважно здійснюють за використання викопних джерел енергії, таких як нафта та газ, які спричиняють емісію парникових газів, що кумулюються в атмосфері, пошук, розробка та впровадження технології, що будуть знижувати такий негативний вплив є вкрай важливим завданням.

Біопаливні елементи є біоелектрохімічними системами, в яких можлива одночасна біоконверсія відходів з виробництвом електроенергії або акумулювання енергії в біоводень [2].

Біопаливні елементи - це біоелектрохімічні системи, що як правило, містять анод та катод і один з електродів обов'язково має біологічну складову: у вигляді живих клітин або ж ферментів. Втім біопаливні елементи можуть мати і суттєві відмінності - наявність/відсутність мембрани, наявність/відсутність анодної/катодної камери (наприклад, можливе використання повітряного катода), наявність біологічної компоненти в анодному або катодному компартменті або ж одразу в обох (табл.1).

Таблиця 1. Види біопаливних елементів та їх призначення [3].

Вид БПЕ	Призначення
Мікробний опріснювальний елемент (МОЕ)	Опріснення морської води
Біосенсиори на основі БПЕ (зокрема ферментні паливні елементи (ФПЕ))	Створення інвазивних та неінвазивних біосенсорів для медичного застосування
«Біокомп'ютери»	Реагування зміною струму на зміни параметрів у біореакторі в режимі реального часу, інтеграція з системами автоматизації
Роботи на основі БПЕ	Генерування струму для автономної роботи роботів у віддалених районах (космос, пустелі, тощо)
Мікробний елемент захоплення вуглецю (МЗВЕ)	Очищення стічних вод та зниження емісії вуглекислого газу
Седиментний мікробний паливний елемент (СМПЕ) :	
Ґрунтовий мікробний паливний елемент (Г-МПЕ)	Біоремедіація ґрунтів з генерацією струму
З плаваючими макрофітами екосистеми мікробний паливний елемент (ПМЕ-МПЕ)	Очищення водойм та стічних вод з генерацією струму
Донний мікробний паливний елемент (Д-МПЕ)	Автономний генератор струму для морських буїв
Біоінженерні ставки мікробний паливний елемент (БС-МПЕ)	Очищення стічних вод з генерацією струму
Мікробний електросинтез на основі БПЕ	Зниження емісії вуглекислого газу, трансформація електричної енергії в хімічну, ферментація
БПЕ з мембранними біореакторами (МБР)	Зниження рівню заростання мембран
Фотобіоелектрохімічні системи ФБЕХС	Генерування струму та отримання біоводню
Мікробний паливний елемент МПЕ	Генерування електроенергії
Мікробний електролізний елемент (МЕЕ)	Отримання енергоносіїв (біоводень)

За використання біопаливних елементів, що містять живі клітини в багатьох випадках передусє етап формування анодної біоплівки, що збагачена

екзоелектрогенами. В анодній камері можливе як використання чистих культур екзоелектрогенів, так і мікробного консорціуму, останній є більш стійким до змін якісного та кількісного складу середовища, що поступає на очищення в анодну камеру, що особливо важливо при застосуванні біопаливних елементів для очищення відходів, зокрема стічних вод [4]. Імобілізовані на аноді екзоелектрогенні бактерії мають основну роль у генеруванні електричної енергії в біопаливному елементі. В бактеріях, які належать до родів *Rhodospira*, *Shewanella*, *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Geobacter*, *Geopsychrobacter*, *Desulfuromonas*, *Desulfobulbus*, *Clostridium*, *Geothrix* було виявлено здатність перенесення електронів до аноду [5-7]. Механізми перенесення поки перебувають на стадії дослідження, але розглядають 3 основні: перенесення електронів на великі відстані за допомогою «електронних човників» (флавіни); пряме перенесення електронів через цитохроми с-типу зовнішньої поверхні мембрани; перенесення електронів на великі відстані через провідні пілі або «мікробні нанодоти». Біоплівкова матриця екзоелектрогенів є електропровідною та містить позаклітинні компоненти переносу електронів. Через більшу кількість цитохромів, що утворюють провідні нанодоти, біоплівка *Geobacter* є набагато більш провідною та товстішою, ніж біоплівка *Shewanella*. Питання імобілізації біоплівки, що збагачена екзоелектрогенами досліджують підбираючи селективні умови [8].

Теорія, яка на сьогодні пояснює функціонування біоплівки та здійснення міжклітинних взаємодій у ній – відчуття кворуму *quorum sensing* (QS). QS впливає на експресію генів мікроорганізмів у біоплівці, так було показано при функціонуванні МПЕ, що клітини дріжджів виду *S.cerevisiae* можуть продукувати такі три види молекул кворумування: фенілетанол, триптофол і тирозол [9]. Дані молекули здатні здійснювати позаклітинне перенесення електронів, а також встановлено, що суміш ароматичних спиртів може покращити продуктивність МПЕ. В роботі Christwardana та ін. [9] було показано, що імобілізація молекул кворумування, а саме фенілетанола і триптофола, на аноді з вуглецевого фетру з поліетиленіміном збільшує провідність біоплівки та щільність потужності становить $159,46 \pm 10,68 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$ та $156,57 \pm 5,84 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Також встановлено, що молекулами QS для бактерій є хінолони [10], а автоіндуктори QS в Γ^- -бактеріях належать до N-ацилхомосеринових лактонів [11]. Для Γ^+ -бактерій сполуки, які мають зв'язок з QS – це молекули олігопептидного типу, а для обох видів бактерій було знайдено автоіндуктор-2 (AI-2), який дозволяє здійснювати міжвидові комунікації [12].

Нерівномірний розподіл молекул кворумування, та явище гасіння кворуму *quorum quenching* (QQ) може призвести до нерівномірного розподілу біоплівки на електроді, а також порушення провідності електронів всередині неї.

Вперше про біопаливні елементи згадано в роботах професора ботаніки Даремського університету (Великобританія) Майкла Кресс Поттер. Вчений продемонстрував, що організми можуть продукувати струм і виробляти напругу,

коли він досліджував, як мікроорганізми розкладають органічні сполуки. Пізніше в 1911 році Поттер відкрив електричну енергію з культур клітин *Saccharomyces* і *Escherichia coli* за допомогою платинових електродів. Це відкриття спонукало його створити базовий мікробний паливний елемент. Протягом XX століття дослідження біопаливних елементів сприяло кращому розумінню біоелектрохімічних перетворень, а у 1960-х роках ідея паливних елементів стала популярною, коли Національне управління з аеронавтики і дослідження космічного простору США (NASA) виявили інтерес до перетворення органічних відходів на електроенергію під час тривалих космічних польотів [13]. Проте широке поширення та впровадження невідновних джерел енергії протягом XX століття зменшили інтерес до цієї технології, і цікавість до неї зросла протягом останніх 20 років в ряді країн. Ряд робіт дослідників з України, США, Китаю, Німеччини, Польщі, Єгипту та інших країн спрямовані на вирішення конструктивних, технологічних та мікробіологічних питань застосування біопаливних елементів для їх впровадження в різних за масштабами застосувань, зокрема як джерело енергії для автономних роботів EcoBot та Gastrobot. Gastrobot був першим роботом, який працював на енергії біопаливних елементів. EcoBot є автономним роботом і на сьогодні існує 4 види (розробка їх триває від 2002 р. до сьогодні). У якості біологічного агента в моделі EcoBot-I БПЕ містить *E.coli*, та використовує сахарозу в якості субстрату, в EcoBot-II в БПЕ міститься активний мул, який може використовувати мух та гнилі фрукти, тому робот на основі такого біопаливного елемента є більш автономним за попередню модель. EcoBot III здатен захоплювати воду і поживні речовини з навколишнього середовища, EcoBot IV знаходиться в стадії розробки. Такі роботи можуть бути застосовані у районах, де необхідні автономні роботи та неможливе втручання людини, наприклад при дослідженні роботами водойм на великій глибині, в космосі, в пустельних районах тощо [14].

БС-МПЕ (Біоінженерні ставки - мікробний паливний елемент) є технологією, що поєднує очищення стічних вод з одночасним генеруванням електроенергії з застосуванням вищих водних рослин. Завдяки різниці потенціалів, що виникає в штучних водоймах, в яких здійснюють очищення стічних вод можливе утворення електроенергії. Фотосинтезуючи, рослини продукують кисень, в той час як в придонних ділянках концентрація кисню нижча. Важливим є підбір рослин, зважаючи на їх морфологічні та біохімічні характеристики: пористість коренів, розвиток флоєми та аеренхіми, вміст хлорофілу для збільшення продуктивності БС-МПЕ як для вилучення забруднюючих речовин, так і для генерування електричної енергії [15].

Перспективне використання біопаливних елементів як масштабних, так і компактних. Так в роботі Русин І.Б. та Медведєв О.В. було показано можливість використання компактних багатоелектродних біопаливних елементів для живлення малопотужних пристроїв, таких як цифрового термометра/гігрометра

на 1,5 В та струмом 4,3–105,2 мкА та метеостанції або світлодіодів на 3 В та струмом 10,1–36,4 мкА за використання *Helxine soleirolii* [16].

Також розглядають використання трикамерних біопаливних елементів для опріснення морської води. В середню камеру подають морську воду, і завдяки електрорушійній силі, що виникає в біопаливному елементі на анод через аніонобмінну мембрану поступають аніони, на катод - катіони і таким чином в середній камері, в якій міститься морська вода - знижується вміст іонів. Це особливо важливо для посушливих, пустельних регіонів, де є нестача прісної води [17].

Очищення стічних вод з отримання електричної енергії – ще одна перспективна біотехнологія (мікробний паливний елемент). В анодну камеру, в якій міститься анод зі сформованою біоплівкою, збагаченою екзоелектрогенами, подають стічні води. Анодна екзоелектрогенна біоплівка (сформований консорціум мікроорганізмів), біоелектрохімічно перетворює в основному органічні речовини, що присутні у стічній воді, при цьому відбувається виділення електронів, протонів і вуглекислого газу. Електрони по зовнішньому ланцюгу, а протони через мембрану поступають на катод, а CO_2 стає побічним продуктом, що утворюється в цій технології. Електрони, протони та кисень сполучаються на катоді, утворюючи молекули води.

Водневі біопаливні елементи (мікробні електролізні елементи) мають подібний принцип перетворень в анодній камері до мікробних паливних елементів, але відмінність полягає в тому, що в катодній камері електрони та протони формують молекулу водню [18]. Недоліком такої технології є необхідність прикладання джерела напруги, оскільки потенціал перетворення органічних речовин до вуглекислого газу, протонів та електронів більший за потенціал утворення водню з протонів. Таким чином електрорушійна сила є від'ємною і не сприяє самочинному перебігу реакції. Електрорушійна сила $E_{\text{сум}}$ біопаливних елементів розраховується як різниця між потенціалом катодної напівреакції $E_{\text{кн}}$ та анодної напівреакції $E_{\text{ан}}$ (1). Самочинно відбуваються реакції, в яких $E_{\text{сум}} > 0$

$$E_{\text{сум}} = E_{\text{кн}} - E_{\text{ан}} \quad (1)$$

Незважаючи на теоретично мінімальну прикладену напругу 0,14 В, більшість МВЕ працювали при прикладеній напрузі 0,3–1,0 В, оскільки частина енергії витрачається на омичні та інші втрати [19, 20].

Для вирішення питання необхідності прикладання зовнішнього джерела напруги розглядають використання інтегрованих систем мікробних паливних та мікробних електролізних елементів [20], а також такі, що поєднують мікробні електролізні та фотоелементи [21] завдяки чому електроенергія, яку необхідно прикладати є більш екологічно чистою.

Оскільки одним з продуктів на аноді внаслідок біоконверсії є вуглекислий газ, а в катодній камері необхідне використання кисню, тому розглядають

перспективу використання в катодній камері мікроводоростей. Зважаючи на те, що фотосинтезуючи, водорості крім продукування кисню, споживають вуглекислий газ та нарощують біомасу, яка може бути використана для виробництва біодизеля та інших продуктів з доданою вартістю, використання водоростей в катодній камері є перспективним напрямом досліджень [22, 23].

Для забезпечення фотосинтетичних процесів мікроводоростей необхідне освітлення катодної камери. Bazdar та ін. [24] встановили, що при постійному освітленні люмінесцентною лампою білого світла інтенсивністю 3500, 5000, 7000, 10000 лк, напруга МПЕ становить 509, 544, 524, 465 $\pm$ 4 мВ відповідно. Штучне освітлення сприятиме збільшенню витрат на технологію. Нами була встановлена можливість застосування сонячного освітлення для тривалого використання мікробного паливного елемента з мікроводоростями в католіті (рис.1).

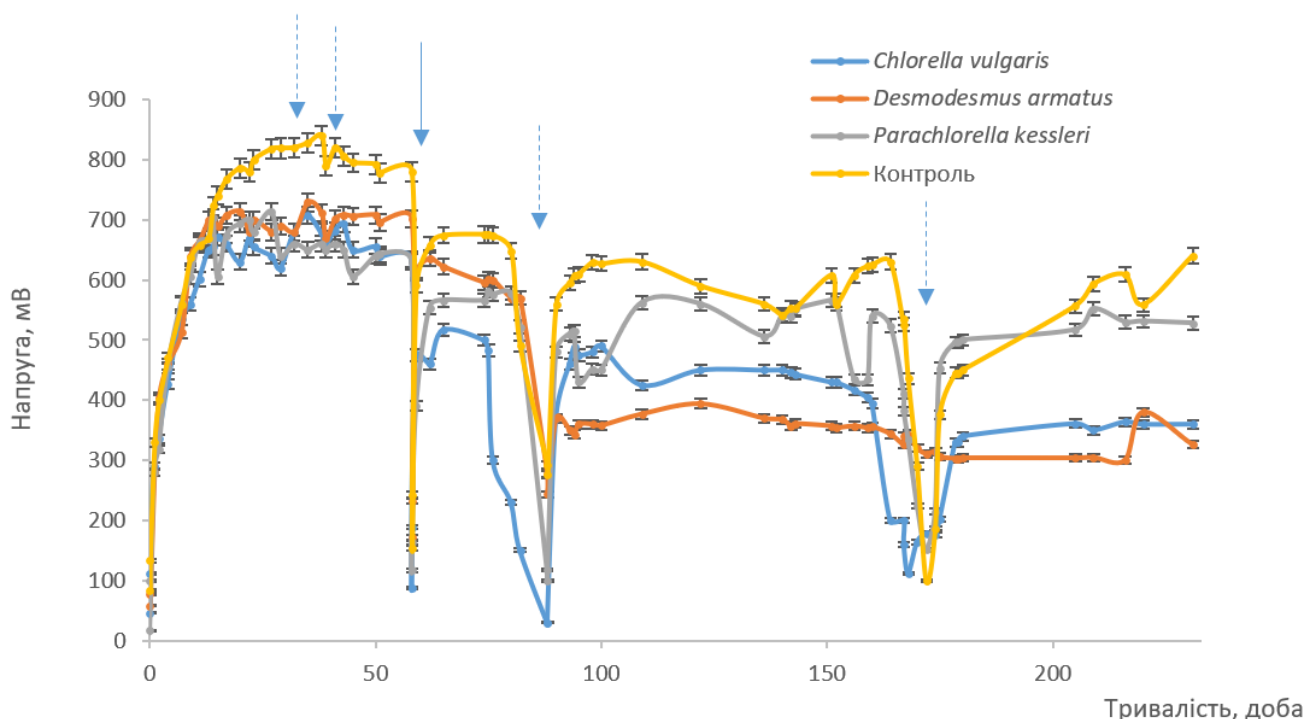


Рис.1. Зміна напруги МПЕ без навантаження з часом.

Пунктирна стрілочка – додавання CH_3COONa (1г/дм^3), суцільна стрілочка – повна заміна аноліту з додаванням CH_3COONa (1г/дм^3). Контроль містить середовище Тамія без додавання культури мікроводоростей

Концентрація розчиненого кисню в католіті впливає на виробництво електроенергії. Виробництво кисню збільшується зі збільшенням освітленості, і, як наслідок, збільшується щільність струму МПЕ. Проте явище фотогальмування, кінетичний і масовий опір транспорту кисню до катода вимагає вибору оптимальної освітленості камери біокатода. Оптимальна освітленість залежить від виду мікроводоростей, як зазначають Редді та ін. [25]; наприклад, 5000 лк є оптимальною освітленістю для *C. vulgaris*, тоді як 14,800 лк для *Scenedesmus obliquus*, 7252 лк *Desmodesmus* sp.

На ефективність фотосинтезу і, отже, на потужність МПЕ впливають пори року. Було доведено [26], що влітку ефективність МПЕ з біокатодом нижча через фотоінактивацію RuBisCo при сильному освітленні. З іншого боку, недостатнє освітлення взимку та восени може спричинити фотообмеження, а також зменшити вироблення кисню [27].

Wu та ін. [28] зазначають, що потреба в темній стадії є обов'язковою, тому що високі рівні освітленості та висока концентрація кисню можуть пригнічувати фотосинтез і викликати фотоокислення. У темряві виробляється менше електроенергії, оскільки мікрободорості не продукують кисень, натомість водорості використовують його для дихання. Для стабільного генерування струму розглядають можливість занурення електрода на 50% [29]. Таким чином, у темряві кисень повітря стане акцептором електронів на катоді, а кисень католіту буде використовуватися мікрободоростями для дихання.

У католіті вуглець у формі CO_2 або HCO_3^- можна подавати за допомогою методів *ex situ* та *in situ*. У методі *ex situ* CO_2 вуглекислий газ очищається зовні або бікарбонат додається до католіту. Метод *in situ* передбачає подачу попередньо очищеної стічної води в анодній камері, яка містить продукти метаболізму екзоелектрогенів, зокрема CO_2 , в катодну камеру [25]. Метод *in situ* є більш стійким і безпечним для навколишнього середовища, але його важко контролювати, і він залежить від метаболізму екзоелектрогенних мікроорганізмів. Крім того, необхідно враховувати обмеження фіксації вуглецю різними видами водоростей [30]. Накопичена біомаса мікрободоростей може бути використана для добавки у анодну камеру. Розглядають також варіації вилучення ліпідів для отримання біодизелю, пігментів та інших речовин.

Висновки. Технології біопаливних елементів перспективні у багатьох галузях, однак на сьогодні ще залишається багато питань, які пов'язані з масштабуванням, функціонуванням, ефективністю перетворення субстратів, формування екзоелектрогенної біоплівки, конструктивними рішеннями, вартості мембран або композитів, що будуть замінювати іонселективні мембрани. Також необхідно дотримуватись забезпечення недопускання потрапляння кисню з катодної в анодну камеру, оскільки це знижуватиме ефективність перетворення відходів в електричну енергію через окиснення субстрату. Також актуальні питання переведення вуглекислого газу з анодної камери в катодну, що може бути здійснено *in situ* або *ex situ* - тобто у вигляді розчиненого бікарбонату або у вигляді газової суміші, що збагачена вуглекислим газом або ж аноліту, що містить вуглекислий газ. Втім незважаючи на ряд питань, що стоять перед дослідниками, ця технологія є перспективною для очищення стічних вод, для опріснення, генерування електричної енергії, автономного живлення роботів, продукування газоподібних (біоводень) та рідких (біодизель) видів палива.

Список використаної літератури:

1. Щурська К., Зубченко Л., Кузьмінський Є. Дослідження впливу умов культивування екзоелектрогенів на біоелектрохімічний процес виділення водню. Наукові вісті НТУУ "КПІ". 2012. № 3. С. 88–92.
2. Кузьмінський Є. В. Паливні елементи. І. Сучасний стан розроблення /Є. В. Кузьмінський, К. О. Щурська, І. А. Самаруха // Відновлювана енергетика.- 2013. - № 1. - С. 90-96. - Режим доступу:http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2013_1_18
3. Koltysheva D., Shchurska K., Kuzminskyi Y. PROMISING AREAS OF BIOFUEL CELL USE. *Biotechnologia Acta*. 2020. Vol. 13, no. 4. P. 5–13. URL: <https://doi.org/10.15407/biotech13.04.005>
4. Shchurska K, Zubchenko L, Sobczuk H, Kuzminsky Y. High exoelectrogenic biofilms formation in microbial fuel cells. *Innovative Biosystems and Bioengineering*. 2019;3(4):246–252. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/ibb.2019.3.4.185159>
5. Liu H., Hu H. Microbial Electrolysis: Novel Biotechnology for Hydrogen Production from Biomass. *Microbial Technologies in Advanced Biofuels Production*. Boston, MA, 2011. P. 93–105. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1208-3_6
6. Hydrogen gas production in a microbial electrolysis cell by electrohydrogenesis / N. Wrana et al. *Journal of Cleaner Production*. 2010. Vol. 18. P. S105–S111. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.018>
7. Biofilm Biology and Engineering of *Geobacter* and *Shewanella* spp. for Energy Applications / Y. Hu et al. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. Vol. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.786416>
8. Kakarla R, Min B. Photoautotrophic microalgae *Scenedesmus obliquus* attached on a cathode as oxygen producers for microbial fuel cell (MFC) operation. *Int J Hydrogen Energy*. 2014;39(19):10275–83. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.158>
9. Carbon felt molecular modification and biofilm augmentation via quorum sensing approach in yeast-based microbial fuel cells / [M. Christwardana, D. Frattini, K. D. Duarte та ін.]. // *Applied energy*. – 2019. – №238. – С. 239–248.
10. Quorum sensing autoinducers enhance biofilm formation and power production in a hypersaline microbial fuel cell / O.Monzon, Y. Yang, Q. Li, P. J. Alvarez. // *Biochemical Engineering Journal*. – 2016. – №109. – С. 222–227.
11. Bacterial signals N-acyl homoserine lactones induce the changes of morphology and ethanol tolerance in *Saccharomyces cerevisiae* [Електронний ресурс] / [G. Ren, A. Ma, W. Liu та ін.] // *AMB Express*. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13568-016-0292-y>.
12. Li Y. H. Quorum sensing and bacterial social interactions in biofilms [Електронний ресурс] / Y. H. Li, X. Tian // *Sensors*. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/12/3/2519>.
13. Overview of Recent Advancements in the Microbial Fuel Cell from Fundamentals to Applications: Design, Major Elements, and Scalability / S. G. A. Flimban et al. *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 17. P. 3390. URL: <https://doi.org/10.3390/en12173390>
14. Bhaumik A. From AI to robotics: mobile, social, and sentient robots. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business. 2018, 403 p.
15. Rusyn I., Gómora-Hernández J. C. Constructed wetland microbial fuel cell as enhancing pollutants treatment technology to produce green energy. *Biotechnology Advances*. 2024. Vol. 77. P. 108468. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108468>
16. Rusyn I., Medvediev O. Stacking and design optimization of novel plant microbial fuel cell based on dwarf indoor decorative and culinary plants as a compact biobattery for a low energy consumption devices. *Bioresource Technology Reports*. 2024. Vol. 26. P. 101860. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101860>

17. Vogl A. Untersuchungen zur mikrobiellen Brennstoffzelle zur energetischen Nutzung hochkonzentrierter Abwässer. 2016 Oct 16 [cited 2020 Jun 12]; Available from: <https://hss-opus.ub.ruhr-uni-bochum.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/5016>.
18. Очищення стічних вод солодового заводу з одержанням біоводню/ М. Ю. Козар et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013. Vol. 6, no. 10(66). P. 33. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.19141>
19. Liu H., Hu H. Microbial Electrolysis: Novel Biotechnology for Hydrogen Production from Biomass. *Microbial Technologies in Advanced Biofuels Production*. Boston, MA, 2011. P. 93–105. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1208-3_6
20. Biorefinery perspectives of microbial electrolysis cells (MECs) for hydrogen and valuable chemicals production through wastewater treatment / A. Kadier et al. *Biofuel Research Journal*. 2020. Vol. 7, no. 1. P. 1128–1142. URL: <https://doi.org/10.18331/brj2020.7.1.5>
21. Зубченко Л.С. Моделювання процесу формування біоплівки електрохімічно-активних мікроорганізмів в фотобіоелектрохімічній системі /Л. С. Зубченко, Є. В. Кузьмінський. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – Вип. 2. – С. 51 – 59.
22. Saratale RG, Kuppam C, Mudhoo A, Saratale GD, Periyasamy S, Zhen G, et al. Bioelectrochemical systems using microalgae – A concise research update. *Chemosphere*. 2017;177:35–43. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.132>
23. Enamala MK, Dixit R, Tangellapally A, Singh M, Dinakarrao SMP, Chavali M, et al. Photosynthetic microorganisms (Algae) mediated bioelectricity generation in microbial fuel cell: Concise review. *Environ Technol Innov*. 2020;19(100959):100959. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2020.100959>
24. Bazdar E, Roshandel R, Yaghmaei S, Mardanpour MM. The effect of different light intensities and light/dark regimes on the performance of photosynthetic microalgae microbial fuel cell. *Bioresour Technol*. 2018;261:350–60. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.026>
25. Reddy C. N., Nguyen H. T., Noori M. T., Min B. (2019) 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 technology* 292:122010.
26. Mohan S. V., Srikanth S., Chiranjeevi P., Arora S., Chandra, R. (2014) Algal biocathode for in situ terminal electron acceptor (TEA) production: Synergetic association of bacteria–microalgae metabolism for the functioning of biofuel cell. *Bioresour technology* 166:566–574.
27. Kokabian B., Gude V. G. (2015) Sustainable photosynthetic biocathode in microbial desalination cells. *Chemical Engineering Journal* 262:958–965.
28. Wu X. Y., Song T. S., Zhu X. J., Wei P., Zhou C. C. (2013) Construction and operation of microbial fuel cell with *Chlorella vulgaris* biocathode for electricity generation. *Applied biochemistry and biotechnology* 171(8):2082–2092
29. Ling J., Xu Y., Lu C., Lai W., Xie G., Zheng L., Li G. (2019) Enhancing Stability of Microalgae Biocathode by a Partially Submerged Carbon Cloth Electrode for Bioenergy Production from Wastewater. *Energies* 12(17):3229.
30. González del Campo A., Cañizares P., Rodrigo M. A., Fernández F. J., Lobato J. (2013). Microbial fuel cell with an algae-assisted cathode: a preliminary assessment. *Journal of Power Sources* 242:638–645.