

ЕКОЛОГІЯ, ЕКОЛОГІЧНА КІБЕРНЕТИКА ТА ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 66.098:546.11

Є. В. Кузьмінський¹
Л. С. Зубченко¹

МІКРОБНІ ПАЛИВНІ ЕЛЕМЕНТИ: КЛАСИФІКАЦІЯ, ТИПОВІ КОНСТРУКЦІЇ ТА МАТЕРІАЛИ, ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Розглянуто основні конструкції мікробних паливних елементів, які використовують у лабораторних дослідженнях. Наведено їхні основні переваги та недоліки, а також принцип вибору конструкції біоелектрохімічної системи в залежності від призначення, мети та масштабів дослідження. Також проаналізовано способи культивування мікроорганізмів-екзоелектрогенів.

Ключові слова: біоелектрохімічна система, мікробний паливний елемент, періодичний спосіб культивування, катод, анод, біоплівка.

Вступ

У наш час розвиток нових технологій все частіше відбувається у напрямку підвищення їх енергоефективності та зменшення кількості відходів та побічних продуктів, зменшення витратних матеріалів.

Основною проблемою традиційної енергетики, що базується на використанні викопних корисних копалин, є поступове виснаження цих джерел палива, а також низка негативних екологічних ефектів (збільшення вмісту вуглекислого газу в атмосфері, забруднення ґрунту при видобуванні горючих корисних копалин, велика кількість забруднених стічних вод та шламів, що утворюються під час роботи теплоелектростанцій тощо). Тому, нові екологічно безпечні технології отримання енергії наразі активно розвиваються. Дуже часто відходи є енергетично багатими і можуть бути використані як енергетична сировина. Найпростішим прикладом отримання енергії з відходів є спалювання.

Такі біоелектрохімічні системи, як мікробні паливні елементи використовують процеси, що відбуваються в живих організмах, для отримання електричної енергії або водню [1]. Перевагою цих систем передусім є відсутність небезпечних відходів, які б забруднювали навколишнє середовище, та можливість використання відходів різних підприємств, багатих органічними речовинами (наприклад, стічна вода підприємств харчової промисловості), в якості вихідної сировини.

Не зважаючи на те, що робота над розробкою та удосконаленням мікробних паливних елементів ведеться відомими світовими інституціями США, Японії, Кореї, Китаю, Канади, вже тривалий час, актуальним залишається питання розробки такої конструкції, яка б мала максимально можливу продуктивність за використання дешевих доступних матеріалів.

Метою огляду є аналіз існуючих конструкцій мікробних паливних елементів, визначення можливих сфер застосування, виходячи з їх переваг та недоліків, визначення напрямків подальших досліджень.

Класифікація конструкцій біоелектрохімічних систем

Основним критерієм при виборі конструкції біоелектрохімічної системи є, власне, її призначення. Так, наприклад, якщо система призначена для отримання водню, то найчастіше використовують двокамерні реактори, будова яких дає змогу розділяти газові фази, які утворюються в анодному і в катодному просторі. Таким чином, гази, які мікроорганізми утворюють у процесі метаболізму, наприклад, вуглекислий газ, метан та ін., не змішуватимуться з воднем, що дуже важливо не тільки в промисловому виробництві, а й на стадії лабораторних досліджень.

Мікробні паливні елементи (МПЕ) є технологічним втіленням біоелектрохімічних систем і їх важко класифікувати в межах однієї ознаки.

За способом культивування розрізняють системи з безперервним (проточні) і періодичним режимом культивування. За компартментизацією: однокамерні, двокамерні і батареї мікробних паливних елементів. За наявністю мембрани: мембранні та безмембранні. Крім того, як підклас мембранних, вирізняють системи з повітряним катодом.

Окремо виділяють донні МПЕ (седиментні), які є історично першими і широко використовуються як генератори низькопотенційної енергії для різноманітних приладів на водних об'єктах, наприклад, обмежувальних буїв [1—3]. Проблема постачання енергії, віддаленим від берега об'єктам, пов'язана, перш за все, зі складністю обслуговування та несприятливими робочими умовами (морська та річкова вода — це активне корозійне середовище). Використання ліній електропередач для подібних пристроїв є досить трудомістким і нерациональним, а інші, наприклад, хімічні джерела живлення теж є незручними через обмежений період їх експлуатації та складність заміни та перезарядки в умовах відкритих акваторій. Седиментні МПЕ в таких умовах, є практично невичерпним джерелом енергії, оскільки збагачення донних відкладень органічним речовинами відбувається безперервно. В таких МПЕ (рис. 1) анод, занурений у мул донних відкладень, з'єднаний з катодом, який знаходиться у придонному аеробному шарі води. Наявність великої кількості органіки в мулових відкладеннях, обмежений доступ кисню на значних глибинах та наявність ламінарного руху придонної води, дає змогу функціонувати різноманітним мікробним угрупованням, до складу яких входять і мікроорганізми — анаероби. Саме такі мікроорганізми, зокрема представники родин *Geobacteraceae* та *Desulfovomonas* [4, 5], в найбільшій кількості зустрічаються в біоплівках на анодах МПЕ, що працювали в донних відкладеннях. В природних умовах акцепторами електронів для них є сполуки заліза і мангану [4]. Мікроорганізми родин *Geobacteraceae* та *Desulfovomonas* здатні споживати лише обмежене коло речовин. Оскільки мул донних відкладень це складна суміш органічних і неорганічних речовин, то для функціонування седиментного МПЕ важливою є наявність мікроорганізмів з іншими метаболічними шляхами, які розкладають складну органіку до простіших молекул: цукрів, органічних кислот, амінокислот, які, в свою чергу, споживають мікроорганізми-екзоелектрогени.

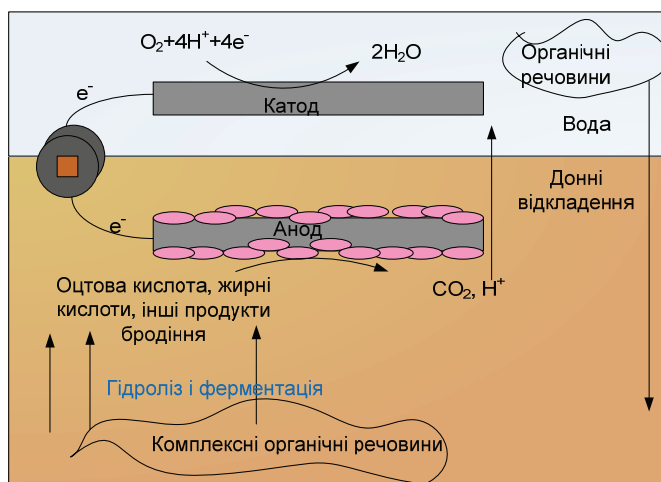


Рис. 1. Схема роботи седиментного МПЕ (створено авторами)

Двокамерні мікробні паливні елементи

Двокамерні МПЕ історично були одними з перших, які використовували і зараз залишаються популярними серед дослідників, незважаючи на складність втілення такої системи у великому масштабі [6]. Двокамерні елементи є найпростішими і являють собою дві комірки, розділені протонпроникною мембраною. В якості протонпроникного матеріалу можуть бути використані протонпроникні мембрани, сольовий місток, або навіть, керамічні пластини. В ідеалі, матеріал повинен дозволити переміщатися між камерами лише протонам, а не субстрату, кисню чи бактеріям.

Катод і анод поміщають у різні камери. Анодна камера містить бактерії, які здатні переносити електрони від зовнішньоклітинних структур на анод. Крім того, в анодну камеру також додають субстрат, та розчин мінералів і вітамінів. У анодній камері необхідно створити анаеробні умови, оскільки більшість екзоелектрогенів є анаеробними мікроорганізмами.

Якщо систему використовують для отримання електричної енергії, то умови у катодній камері мають бути аеробні, в такому випадку реакція, що відбувається на катоді, має вигляд:



Якщо систему використовують для отримання водню



то у катодній камері також створюють анаеробні умови, для попередження утворення води при проходженні реакції рекомбінації електронів і протонів з киснем, як більш термодинамічно вигідної в порівнянні з утворенням водню.

Крім того, для подолання термодинамічного бар'єру утворення водню недостатньо енергії, яка генерується у МПЕ, тому необхідно прикладати додаткову напругу від зовнішнього джерела енергії.

Однокамерні мікробні паливні елементи

Існують два види однокамерних біоелектрохімічних систем, які відрізняються умовами в яких перебуває катод. Розміщення анода і катода в одній камері приводить до того, що вони знаходяться в однакових анаеробних умовах по відношенню до кисню, оскільки таких умов вимагають мікроорганізми, іммобілізовані на аноді. Такий варіант підходить для використання системи для отримання водню, оскільки для цього обов'язковим є створення анаеробних умов в середовищі, де відбуваються катодні реакції.

Для отримання електроенергії, навпаки, доступ кисню є необхідною умовою функціонування елемента. Тому, для отримання електричної енергії у однокамерній біоелектрохімічній системі використовують катод, який контактує однією стороною з розчином, а іншою — з повітрям, яке знаходиться зовні камери — системи з повітряним катодом (рис. 2).

Недоліком таких конструкцій є те, що гідростатичний тиск рідини у реакторі витискає воду через пористий катод. Для уникнення цього використовують протонобмінні мембрани (ПОМ), безпосередньо на яких закріплюють катоди [8, 9].

Безмембранні мікробні паливні елементи фактично є підвидом однокамерних МПЕ. За відсутності протонобмінної мембрани (ПОМ) провідником для протонів слугує вода. ПОМ є ефективнішим переносником протонів, у порівнянні з водою, проте, вона лімітує загальний опір системи за рахунок різниці у швидкості дифузії протонів у воді і ПОМ. Недоліком таких конструкцій є те, що у мікробному угрупованні часто присутні мікроорганізми, які споживають водень, в тому числі метаногени. Це може привести до зменшення виходу водню [16]. Тим не менше, існують успішні роботи, в яких використовують однокамерні МПЕ [17, 5]. Відповідно до досліджень Б. Логана [8] перехід від двокамерної системи до однокамерної з повітряним катодом збільшує питому потужність системи від 45 мВт/м^2 (потужність двокамерного МПЕ з протонобмінною мембраною) до 262 мВт/м^2 (по відношенню до площі катода), а подальша модифікація з видаленням мембрани ще більше підвищує питому потужність від 262 мВт/м^2 — до 494 мВт/м^2 .

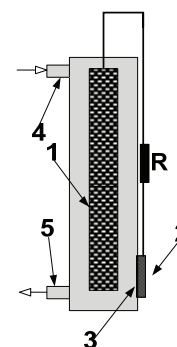


Рис. 2. Проточний однокамерний мікробний паливний елемент з повітряним катодом та протонпроникною мембраною: 1 — анод; 2 — катод; 3 — протонпроникна мембрана; 4 — подача поживного середовища; 5 — видалення відпрацьованого середовища [10]

Батарей мікробних паливних елементів

Батарей МПЕ являють собою ряди одинарних елементів (секцій), з'єднаних послідовно, або паралельно (рис. 3). Частіше використовують послідовне з'єднання МПЕ для підвищення загальної напруги, яку може генерувати система. У разі паралельного з'єднання можна досягнути генерування більшої кількості енергії, але при цьому можливість виникнення короткого замикання більша, ніж у разі послідовного з'єднання [11]. Особливістю такої конструкції є мала відстань між електродами і велика площа поверхні ПОМ у порівнянні з анодом і катодом [12].

Батарей мікробних паливних елементів зазвичай працюють у безперервному режимі, тобто постійно відбувається подача свіжого поживного середовища (субстрату) і відбір частини культурального середовища з камер. При чому існують конструкції, в яких кожна секція працює як автономний мікробний паливний елемент з окремими шляхами для живлення і відводу метаболітів, або ж секції можуть бути з'єднані між собою і середовище поступово переходить від однієї секції до іншої. Значним недоліком останньої конструкції є нерівномірне постачання поживних речовин

до різних секцій і поступове збіднення поживного середовища. Так, концентрація поживних органічних речовин в секціях, що знаходяться ближче до входу поживного середовища, буде значно вищою ніж на виході, що суттєво впливатиме на загальну продуктивність батареї МПЕ.

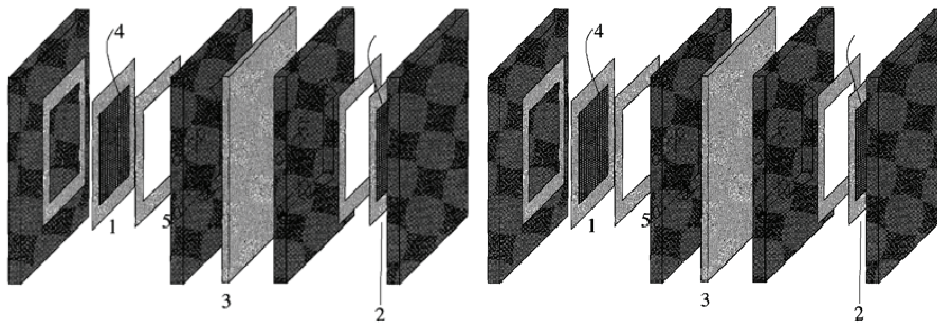


Рис. 3. Схематичне зображення батареї МПЕ [12]: 1 — анод; 2 — катод; 3 — протонобмінна мембрана; 4 — з'єднувальний провідник; 5 — поверхня для зразків

Особливості систем з періодичним і безперервним культивуванням

Системи з періодичним культивуванням. Однокамерні і двокамерні системи зазвичай є системами з періодичним культивуванням. Тобто їх функціонування відбувається за таким принципом: анодний та катодний розчини, поживне середовище і мікроорганізми у вигляді біоплівки на носії чи клітинної біомаси завантажуються в камери системи. Через певний час, коли всі поживні елементи спожиті мікроорганізмами, проводять перезавантаження камер. Такі системи є не дуже зручними для промислового використання, але, натомість дуже показовими при проведенні лабораторних досліджень. Це пов'язано з тим, що періодичний режим культивування потребує менше реагентів, є технологічно простішим і дозволяє дослідити, наприклад, особливості споживання поживних речовин мікроорганізмами під час росту культури. В періодичному режимі розвиток культури мікроорганізмів супроводжується певною послідовністю фаз розвитку. Тривалість фаз зумовлюється компонентним складом середовища, кількістю та станом посівного матеріалу, умовами культивування.

Недоліками періодичного культивування є зміна складу розчину з часом, тобто зменшується кількість поживних компонентів і збільшується кількість метаболітів.

Системи з безперервним культивуванням (проточні системи). У системах з безперервним культивуванням постійно відбувається подача свіжого поживного середовища і видалення частини розчину, який міститься в реакторі. Функціонування цих систем, залежно від того чи перемішується свіже середовище з культуральною рідиною, яка вже є в реакторі, чи витісняє його, відбувається за принципом повного змішування або повного витіснення відповідно. Таким чином, в системах з безперервним культивуванням склад розчину в реакторі підтримується сталим. Системи проточного типу зазвичай працюють за принципом хемостата або турбідостата.

У випадку хемостата у реакторі підтримують сталим певний параметр (рН, концентрація поживних речовин і т. д.), у разі турбідостатного культивування важливим є підтримання сталості концентрації клітин мікроорганізмів.

Біоелектрохімічні системи проточного типу частіше працюють за принципом хемостата, де контролюється сталість концентрації поживних речовин. Це пов'язано з тим, що клітини екзоелектрогенів, у більшості біоелектрохімічних систем знаходяться у іммобілізованому стані і немає потреби підтримувати їх постійну концентрацію шляхом додавання інокуляту. В такому випадку оновлення біомаси відбувається за рахунок наростання біоплівки. Водночас, відбувається і постійне вимивання з реактора частини біомаси, яка відділилася від анода. Підтримання сталості концентрації поживних речовин в біоелектрохімічній системі є важливим, оскільки це один із параметрів, від якого напряму залежить продуктивність усієї системи і його можна легко регулювати протягом усього часу роботи біоелектрохімічної системи. Інші параметри, що можуть впливати на продуктивність системи, такі як якість біоплівки (наприклад кількість екзоелектрогенних мікроорганізмів у ній), метаболічна активність мікроорганізмів та ін., важко піддаються регулюванню.

Проте, коли етап формування біоплівки проводять в умовах проточного культивування, використання режиму турбідостату також можливе, адже для ефективною іммобілізації важливим є не лише наявність мікроорганізмів у середовищі, а й постійне їх оновлення.

Проточними можуть бути як однокамерні, так і двокамерні МПЕ. У випадку двокамерних МПЕ анодний та катодний розчини подають та відбирають окремо (рис. 4). Швидкості подачі розчинів у різні камери можуть бути однаковими, або різними. Причому, швидкість подачі аноліту може значно перевищувати швидкість подачі католіту, що пов'язано з тим, що мікроорганізми на аноді потребують постійної подачі нових поживних речовин.

В однокамерних МПЕ, незважаючи на простоту конструкції, можливі кілька варіантів подачі розчину. Найпоширенішими є конструкції з висхідним потоком рідини, в яких робочий розчин подається в нижню частину МПЕ і під тиском продавлюється через камеру. Зверху відбувається відбір відпрацьованого поживного середовища. Таким чином, субстрат подається з дна системи, проходячи знизу-догори через анод до катода [11, 14].

Прикладом є система, зображена на рис. 4Б. Система з висхідним потоком рідини, являє собою реактор циліндричної форми. Як електроди використовують диски з вуглецевої тканини. Анод розміщують на дні реактора, а катод у верхній частині. Над анодом розміщують шар скловолкна і скляних кульок. Субстрат подається через отвір у дні реактора. Під час отримання електрики у катодному відділенні проводять аерацію [15]. Звичайно можливим є і низхідний потік у МПЕ (див. рис. 2).

В проточному (безперервному) культивуванні не відбувається виснаження поживного середовища, що має місце за періодичного культивування. Крім того, важливим є не лише подача нових поживних речовин, а і відбір метаболітів, оскільки вони можуть пригнічувати ріст і процеси метаболізму мікроорганізмів. Біоелектрохімічні системи з безперервним культивуванням є досить поширеними і зручними, оскільки саме такий режим культивування дозволяє підтримувати продуктивність системи на сталому рівні. Для масштабного впровадження біоелектрохімічних систем саме такий режим культивування є технологічно простим і ефективним.

Використання біоплівки та суспендованих клітин

Клітини мікроорганізмів, які беруть участь у процесі екзоелектрогенезу можуть знаходитися в реакторах у вигляді суспендованих клітин, тобто таких, що вільно переміщуються у розчині, яким заповнена анодна камера, або формувати біоплівку на поверхні електрода чи сполученого з ним наповнювача — іммобілізована біомаса. На сьогодні у більшості МПЕ використовують іммобілізовані клітини екзоелектрогенів.

Основними перевагами використання біоплівки є те, що за використання суспендованих клітин для забезпечення ефективної роботи системи необхідною є наявність великої кількості медіаторів, які б забезпечували транспорт електронів, виділених клітинами мікроорганізмів, до анода. Оскільки лише певні роди екзоелектрогенів, зокрема *Shewanella*, *Geobacter* і *Rhodoferrax*, здатні продукувати медіатори, то за використання змішаних культур для підвищення продуктивності процесу необхідно додавати штучні медіатори. Штучні медіатори за походженням найчастіше є барвниками, зазвичай це токсичні речовини, тому їх використання в природоохоронних технологіях є небажаним. Крім цього, висока вартість штучних медіаторів призводить до здороження всього процесу. Навіть за використання медіаторів значні втрати енергії спостерігатимуться на етапі перенесення електронів з розчину (від клітин екзоелектрогенів) до анода.

Мікроорганізми, що знаходяться у складі біоплівки, сформованої на аноді, можуть передавати електрони безпосередньо на поверхню анода через цитохроми, розміщені у зовнішній мембрані клітини [18]. Для клітин мікроорганізмів, які не мають доступу до поверхні анода, а знаходяться у товщі біоплівки прямий шлях передачі електронів є недоступним. Від клітин, які знаходяться у товщі біоплівки, електрони переносяться на анод через міжклітинний матрикс [19], який формується самими клітинами мікроорганізмів, розташованими впритул одна до іншої та пілеподібними відростками клітин, що пронизують міжклітинний простір і теж на поверхні мають молекули (зазвичай

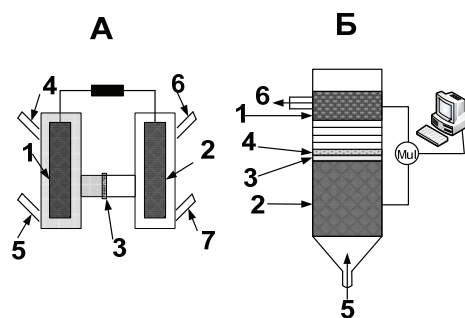


Рис. 4. Схематичне зображення проточних мікробних паливних елементів [13, 15]:

- А: 1 — анод; 2 — катод; 3 — протон обмінна мембрана; 4 — видалення поживного середовища; 5 — подача поживного середовища; 6 — вихід католіту; 7 — подача католіту;
- Б: 1 — катод; 2 — анод; 3 — шар скловолкна; 4 — шар скляних кульок; 5 — подача поживного середовища; 6 — видалення поживного середовища

білкового походження), які беруть участь у транспорті електронів (рис. 5). Товщина та щільність біоплівки залежить від мікроорганізмів, присутніх в асоціації, умов формування біоплівки, матеріалу анода [20].

За використання суспендованої біомаси важливим є підтримання клітин у завислому стані, що здійснюється перемішуванням. За рахунок перемішування покращується доступ поживних речовин до клітин мікроорганізмів та перенесення медіаторів від клітин до анода. У випадку відсутності перемішування з часом клітини мікроорганізмів осідають на дно реактора, в такому випадку підвищення продуктивності системи електрод занурюють в осад, створюючи штучні седиментні МПЕ.

Носієм для біоплівки в біоелектрохімічній системі слугує електрод (анод). Основною вимогою до матеріалу анода, окрім провідності є велика площа поверхні. Зазвичай для виготовлення анодів використовують вуглецеві матеріали: тканину, вуглецевий папір, волокна.

Деякі МПЕ мають в камерах, окрім анода чи катода, ще й наповнення у вигляді, наприклад, гранульованого завантаження. Призначення такого завантаження може бути різне. Завантаження у вигляді скляних кульок чи скловати [15] виконує функцію фізичного розділення анодної та катодної камер за використання проточної системи без протонобмінної мембрани.

Частіше використовують наповнення з матеріалів, здатних проводити електричний струм, наприклад графітові гранули [7, 22], подрібнене активоване вугілля і т. д. Активна поверхня 1 г подрібненого активованого вугілля досягає 1000 м². В роботі [23] гранулами активованого вугілля заповнювали металеву сітку, максимальна густина потужності МПЕ з анодом такого типу становила 4056,4 мВт/м³.

Завантаження розміщують так, щоб воно контактувало безпосередньо з анодом, або, навіть, замість анода (так званий гранульований анод). Використання графітового завантаження значно збільшує активну площу анода, що сприяє ефективній роботі та збільшенню загальної продуктивності МПЕ.

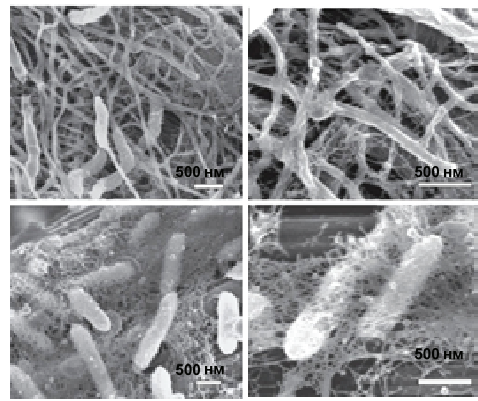


Рис. 5. Мікрофотографії біоплівки мікроорганізмів-екзоелектрогенів [21]

Фотобіоелектрохімічні системи

Отримання водню в біоелектрохімічних системах потребує прикладання додаткової напруги, для створення на аноді електрохімічного потенціалу достатнього для проходження реакції відновлення іонів водню. Для зменшення залежності системи від зовнішніх джерел енергії розроблені фотобіоелектрохімічні системи, що фактично є поєднанням фотоелектрохімічного паливного елемента з мікробним паливним елементом [24]. В таких системах біоелектрохімічна система може функціонувати окремо від фотоелектрохімічної, як звичайний мікробний паливний елемент, проте отримання водню можливе лише за їх сумісного функціонування та опромінення світлом.

Окрім поєднання цілих систем (чотирьохелектродна схема), можливе використання лише фотоелектрохімічного катода, здатного асимілювати сонячну енергію, з біоанодом [25]. Фотобіоелектрохімічна система виготовляється у вигляді двокамерного МПЕ, камери якого розділені протонпроникною мембраною. Для таких системи важливу роль відіграє вибір матеріалу для виготовлення фотокатода. Важливо, щоб потенціал валентної зони матеріалу катода був позитивніший ніж електрохімічний потенціал цитохромів зовнішньої мембрани клітини екзоелектрогенів, а край зони провідності — негативніший ніж електрохімічний потенціал, необхідний для відновлення молекули водню, відповідно.

Це принципово новий підхід в отриманні водню в біоелектрохімічних системах, оскільки він забезпечує їхнє функціонування незалежним від традиційних джерел енергії.

Область застосування біоелектрохімічних систем

В залежності від типу та особливостей будови біоелектрохімічні системи можуть застосовуватися в різних галузях. Седиментні МПЕ, як вже зазначалося, найчастіше використовують для об'єктів, розміщених у водних системах віддалених від берега. Це можуть бути погодні та сигнальні буї, різноманітні передавачі та сенсорні пристрої. Здатність мікроорганізмів-екзоелектрогенів споживати велику кількість органічних речовин дозволяє використовувати біоелектрохімічні системи в схемах очищення стічних вод, багатих органікою [26] (стічні води підприємств харчової

промисловості, рідкі відходи виробництва біодизелю). Для очистки стічних вод використовують як проточні МПЕ так і елементи з періодичним режимом, в залежності від складу води та місця біоелектрохімічної системи в схемі водоочищення. Отримання водню в біоелектрохімічних системах — один з основних напрямків їх використання, який, проте, потребує подальшого розвитку, оскільки виникають труднощі, пов'язані з необхідністю створення анаеробних умов та використанням додаткових джерел енергії.

Висновки

Біоелектрохімічні системи перетворення енергії представлені мікробними паливними елементами різноманітних типів, розмірів та конструкцій. Найбільшої популярності серед дослідників набули двокамерні мікробні паливні елементи, проте поступово відбувається перехід до однокамерних як простіших та дешевших. Варіації з матеріалом та формою анода також спрямовані на збільшення загальної продуктивності системи, найчастіше шляхом збільшення активної поверхні для взаємодії з мікроорганізмами та їх іммобілізації. Мікроорганізми-екзоелектрогени, що знаходяться у складі біоплівки, зазвичай вносять більший вклад у загальну продуктивність біоелектрохімічної системи ніж ті, що суспендовані в розчині анодної камери. Хоча більшість біоелектрохімічних систем, які зараз використовують, працюють у періодичному режимі культивування, для широкого промислового впровадження необхідно розробляти конструкції, які б працювали в безперервному режимі, оскільки перезапуск системи є досить складним процесом і займає багато часу, що ускладнює їх обслуговування. Використання завантаження може значно збільшувати площу поверхні анода, що позитивно впливає на продуктивність. Для збільшення потужності мікробні паливні елементи також об'єднують в батареї.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Girguis P. R. Fundamentals of benthic microbial fuel cells: theory, development and application / P. R. Girguis, M. E. Nielsen, C. E. Reimers // *Bioelectrochemical Systems: From Extracellular Electron Transfer to Biotechnological Application*; Edited by K. Rabaey, L. T. Angenent, U. Schröder, J. Keller. — IWA Publishing. — 2010. — P. 327—346.
2. Yohann R. J. T. A single sediment Microbial Fuel Cell powering a wireless telecommunication system / R. J. T. Yohann, M. Picot, A. Carer [et al.] // *Journal of Power Sources*, Elsevier. — 2013. — Vol. 241. — P. 703—708.
3. Lovley D. R. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms / D. R. Lovley // *Nature Reviews Microbiology*. — 2006. — Vol. 4. — P. 497—508. doi:10.1038/nrmicro1442.
4. Lovley D. R. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches / D. R. Lovley // *Current Opinion in Biotechnology*. — 2006. — Vol. 17. — P. 327—332.
5. Saravanan R. Membraneless dairy wastewater-sediment interface for bioelectricity generation employing sediment microbial fuel cell (SMFC) / R. Saravanan, A. Arun, S. Venkatamohan [et al.] // *African Journal of Microbiology Research*. — 2010. — Vol. 4 (24). — P. 2640—2646.
6. Oh S. T. Sustainable wastewater treatment: How might microbial fuel cells contribute / S. T. Oh, J. R. Kim, G. C. Premier [et al.] // *Biotechnology Advances*. — 2010. — Vol. 28. — P. 871—881.
7. Rabaey K. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation / K. Rabaey, W. Verstraete // *Trends in Biotechnology*. — 2005. — Vol. 23, № 6. — P. 291—298.
8. Logan B. E. Simultaneous wastewater treatment and biological electricity generation / B. E. Logan // *Water Science & Technology*, IWA Publishing. — 2005. — Vol. 52, № 1—2. — P. 31—37.
9. Zielke E. A. Design of a single chamber microbial fuel cell / E. A. Zielke // *Microbial Fuel Cell*. — 2005. — 35 p.
10. Greenman J. Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: Comparison with a biological aerated filter / J. Greenman, A. Galvez, L. Giusti, I. Ieropoulos // *Enzyme and Microbial Technology*. — 2009. — № 44. — P. 112—119.
11. Schwartz K. Microbial fuel cells: design elements and application of a novel renewable energy source / K. Schwartz // *Basic Biotechnology eJournal*. — 2007. — Vol. 2. — 8 p.
12. Lovley D. R. Electricity production with electricigens / D. R. Lovley., K. P. Nevin // *Bioenergy* / [Edited by J. Wall et al.]. — Washington, DC: ASM Press, — 2008. — P. 295—306.
13. Du Z. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy / Z. Du, H. Li, T. Gu // *Biotechnology Advances*. — 2007. — Vol. 25. — P. 464—482.
14. Biffinger J. C. Engineering microbial fuels cells: recent patents and new directions / J. C. Biffinger, B. R. Ringeisen // *Recent Patents on Biotechnology*. — 2008. — Vol. 2. — P. 150—155.
15. Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell / [J. K. Jang, T. H. Pham, I. S. Chang et al.] // *Process Biochemistry*. — 2004. — Vol. 39. — P. 1007—1012.
16. Biohydrogen production from Carbon Monoxide and Water by *Rhodospseudomonas palustris* P4 / [Y. K. Oh et al.] // *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. — 2005. — Vol. 10. — P. 270—274.
17. Call D. Hydrogen production in a single chamber microbial electrolysis cell lacking a membrane / D. Call, B. E. Logan // *Environ. Sci. Technol.* — 2008. — Vol. 42. — P. 3401—3406.
18. Exoelectrogens in microbial fuel cells toward bioelectricity generation: A review / R. Kumar, L. Singh, Z. Wahid, A. Din., M. Fadhil // *International Journal of Energy Research*. — 2015. — Vol. 39, № 8. — P. 1048—1067.
19. Lovley D. R. The microbe electric: conversion of organic matter to electricity / D. R. Lovley // *Current Opinion in Biotechnology*. — 2008. — Vol. 19. — P. 564—571.

20. Semenec L. Delving through electrogenic biofilms: from anodes to cathodes to microbes AIMS / L. Semenec, A. E. Franks // Bioengineering. — 2015. — Vol. 2, № 3. — P. 222—248.
21. Characterization of a filamentous biofilm community established in a cellulose-fed microbial fuel cell / S. Ishii, T. Shimoyama, Y. Hotta, K. Watanabe // BMC Microbiology. — 2008. — Vol. 8, № 6. — P. 1—12.
22. Kalathil S. Granular activated carbon based microbial fuel cell for simultaneous decolorization of real dye wastewater and electricity generation / S. Kalathil, J. Lee, M. H. Cho // New Biotechnology. — 2011. — Vol. 29, № 1. — P. 32—37. doi: 10.1016/j.nbt.2011.04.014.
23. Jin Y. Reaction mechanism on anode filled with activated carbon in microbial fuel cell / Y. Jin // Journal of Chemical and Pharmaceutical Research. — 2014. — Vol. 6, № 5. — P. 333—339.
24. Qian F. Solar-Driven Microbial Photoelectrochemical Cells with a Nanowire Photocathode / F. Qian, G. Wang, Y. Li // Nano Lett. — 2010. — № 10. — P. 4686—4691.
25. Bio-hydrogen production in light-assisted microbial electrolysis cell (MEC) with a dye sensitized solar cell / F. A. Folusho, K. Y. Kim, K. J. Chae, M. J. Choi, I. S. Chang, I. S. Kim // Photochem. Photobiol. Sci. — 2010. — № 9. — P. 349—356.
26. Букач О. В. Микробные топливные элементы: состояние исследований и практическое применение / О. В. Букач, Л. Л. Мякинкова // Инноватика и экспертиза. — 2014. — Вып 2 (13). — С. 51—59.

Рекомендована кафедрою хімії та хімічної технології ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.02.2016

Кузьмінський Євген Васильович — д-р. хім. наук, професор, завідувач кафедри екобіотехнології та біоенергетики;

Зубченко Людмила Сергіївна — асистент кафедри екобіотехнології та біоенергетики, e-mail: yellowjackets@ukr.net.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Ye. V. Kuzminskyi¹
L. S. Zubchenko¹

Microbial Fuel Cells: Classification, Standard Construction and Materials, the Scope of Applicability

¹National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

There have been analyzed the basic designs of microbial fuel cells used in laboratory studies. Their main advantages and disadvantages, and the choice of design principle of bioelectrochemical system depending on the destination, purpose and scope of the study has been shown in the article. The ways of culturing microorganisms-exoelectrogenes have been also reviewed.

Keywords: bioelectrochemical system, microbial fuel cell, batch mode of cultivation method, cathode, anode biofilm.

Kuzminskyi Yevhenii V. — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Head of the Chair of Environmental Biotechnology and Bioenergy;

Zubchenko Liudmyla S. — Assistant of the Chair of Environmental Biotechnology and Bioenergy, e-mail: yellowjackets@ukr.net

Е. В. Кузьминский¹
Л. С. Зубченко¹

Микробные топливные элементы: классификация, типовые конструкции и материалы, область применения

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Рассмотрены основные конструкции микробных топливных элементов, которые используются в лабораторных исследованиях. Приведены их основные преимущества и недостатки, а также принцип выбора конструкции биоэлектрохимической системы в зависимости от назначения, цели и масштабов исследования. Также проанализированы способы культивирования микроорганизмов-экзоэлектрогенов.

Ключевые слова: биоэлектрохимическая система, микробный топливный элемент, периодический способ культивирования, катод, анод, биопленка.

Кузьминский Евгений Васильевич — д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой экобиотехнологии и биоэнергетики;

Зубченко Людмила Сергеевна — асистент кафедри екобіотехнології та біоенергетики, e-mail: yellowjackets@ukr.net