

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ІНН ФІЗИКО–ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ КАФЕДРА ПРИКЛАД-
НОЇ ФІЗИКИ

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

(код і назва)

на тему: **Дослідження параметрів мікробного паливного елемента**

Виконав: студент 4 курсу, групи ФФ–03

Золотко Дмитро Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник доцент, к.ф.–м.н. Гільчук А. В

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

(підпис)

Консультант 2, 3 доцент, к.ф.–м.н. Монастирський Г. Є.

(номер розділу)

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

(підпис)

Рецензент доцент, к.ф.–м.н. Пономаренко С. М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій дипло-
мній роботі немає запози-
чень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Київ – 2024

Національний Технічний Університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
 НН Фізико Технічний Інститут
 Кафедра прикладної фізики

Рівень вищої освіти — перший (бакалаврський) Спеціальність 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

«ЗАТВЕРДЖЕНО»

В.о.завідувача кафедри

 (підпис) Монастирський.Г.Є.
 (ініціали, прізвище)

« 10 » _____ вересня 2024р.

ЗАВДАННЯ
на бакалаврську роботу студенту

 Золотку Дмитру Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

 (підпис)

1. Тема роботи: Дослідження параметрів мікробного паливного елемента:
доцент, к.ф.-м.н. Гільчук А. В.

підтверджені наказом по університету від «___»___2024 р №

2. Термін подачі студентом роботи «_____» _____ 2024 р.

3. Об'єкт дослідження: Мікробна паливна комірка MudWatt.

4. Предмет дослідження: спостереження еволюції напруги мікробного паливного елемента та визначення залежності потужності від зовнішнього навантаження.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Обрати субстрат та зібрати паливну комірку. Проаналізувати роботу паливного елемента без зовнішнього навантаження. Проаналізувати роботу паливного елемента при різних зовнішніх навантаженнях. Проаналізувати вплив вологи субстрату на роботу приладу. Знайти максимальне значення напруги та потужності приладу, визначити внутрішній опір.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: презентація — 12 аркушів А4.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Аналіз параметрів мікробної паливної комірки MudWatt.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
2	доцент, к.ф.–м.н. Монастирський Г. Є.	10.09.2023 - 31.10.2024	11.06.2024
3	доцент, к.ф.–м.н. Монастирський Г. Є.	10.09.2023 - 31.10.2024	11.06.2024

9. Дата видачі завдання « 10 » вересня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Опрацювання літератури за темою	10.09.2023 - 31.10.2023	
2.	Написання літературного огляду	01.11.2023 - 28.12.2023	
3.	Проведення аналізу мікробного паливного елемента	05.04.2024 - 15.05.2024	
4.	Написання другої частини дипломної роботи	16.05.2024 - 25.05.2024	
5.	Підготовка тез	25.05.2024 - 28.05.2024	
5.	Виступ на конференції	15.06.2024	
6.	Написання третьої частини дипломної роботи	01.06.2024 - 07.06.2024	
7.	Написання висновків	08.06.2024 - 10.06.2024	
8.	Подання роботи на рецензування	14.06.2024	
9.	Підготовка доповіді та презентації	15.06.2024 - 20.06.2024	

Студент _____
(підпис)

Золотко Д.С.
(Ім'я, ініціали)

Керівник _____
(підпис)

доцент, к.ф.-м.н. Гільчук А. В.
(Ім'я, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломної роботи за обсягом становить 46 сторінок, містить 16 рисунків. Для дослідження було використано 16 бібліографічних найменувань.

Метою цієї роботи є дослідження ефективності мікробних паливних елементів на основі прикладу приладу MudWatt з різними субстратами, а також аналіз впливу додавання вологи на характеристики комірки.

Предметом дослідження є електричні характеристики приладу MudWatt, а також дослідження фізичних характеристик субстратів що можуть впливати на його електричні характеристики.

Об'єктом дослідження є процес генерації електричної енергії в мікробних паливних елементах, розгляд перспектив технології, та дослідження особливостей МПЕ на практиці за допомогою приладу MudWatt.

Досліджена еволюція напруги приладу з часом. Знайдена залежність потужності від зовнішнього опору навантаження у різні дні, та за різних значень напруги.

Був досліджений вплив вологи субстрату на ефективність роботи паливної комірки MudWatt та визначенні значення вологи, при яких прилад припиняє роботу, та також оптимальні значення вологи приладу

Також були порівнянні хімічні характеристики розчинів субстратів, щоб порівняти особливості хімічного складу різних субстратів, та прослідкувати зміну хімічного складу субстрату у комірці з часом.

Максимальна напруга приладу була зафіксована 31-го дня з початку експерименту і вона становила 620 мВ.

Максимальна потужність комірки досягається при внутрішньому опорі у 8886 Ом та складає 3,95 мВт.

Ключові слова: *мікробний паливний елемент, відновлювальна енергетика, екологія*

SUMMARY

The explanatory note of the thesis is 46 pages long and contains 16 figures. For the research, 16 bibliographic references were used.

The purpose of this work is to study the efficiency of microbial fuel cells based on the example of the MudWatt device with different substrates, as well as to analyze the effect of adding moisture on the characteristics of the cell.

The subject of the study is the electrical characteristics of the MudWatt device, as well as the study of the physical characteristics of substrates that can affect its electrical characteristics.

The object of the study is the process of generating electrical energy in microbial fuel cells, consideration of the prospects of technology, and the study of MFC features in practice using the MudWatt device.

The evolution of the device voltage over time is studied. The dependence of the power output on the external load resistance on different days and at different values of the tension was found.

The influence of the slurry moisture on the efficiency of the MudWatt fuel cell was investigated and the moisture values at which the device stops working, as well as the optimal moisture values of the device were determined.

The chemical characteristics of the substrate solutions were also compared to compare the chemical composition of different substrates and to track the change in the chemical composition of the substrate in the cell over time.

The maximum voltage of the device was recorded on the 31st day from the beginning of the experiment and it was 620 mV.

Translated with DeepL.com (free version)The maximum power of the cell is achieved at an internal resistance of 8886 Ohm and is 3.95 mW.

Keywords: microbial fuel cell, renewable energy, ecology

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	9
1.1 Основні відомості про МПЕ	9
1.2 Принцип роботи МПЕ	9
1.3 Основні типи МПЕ.....	10
1.4 Конфігурація МПЕ в залежності від типу субстрату	14
1.5 Обговорення та висновки.....	21
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.	23
2.1 Опис приладу MudWatt	23
2.2 Вибір і підготовка субстрату	26
2.3 Підготовка електродів	27
2.4 Особливості використаних штамів бактерій.....	29
2.6 Методи обрахунків	32
2.7 Обговорення та висновки.....	33
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	34
3.1 Визначення властивостей субстратів.....	34
3.2 Зміна напруги у приладі	36
3.3 Залежність потужності від зовнішнього опору навантаження	38
3.4 Обговорення та висновки.....	42
ВИСНОВКИ.....	43
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	44

ВСТУП

Мікробні паливні елементи (МПЕ) представляють собою інноваційні біоелектрохімічні системи, які використовують живі мікроорганізми для перетворення енергії органічних сполук на електричний струм. Ця технологія відкриває нові можливості для виробництва енергії та забезпечення сталого розвитку, дозволяючи вирішувати проблеми енергетичної ефективності та екології. МПЕ мають широкий спектр потенційних застосувань, включаючи виробництво електроенергії, переробку стічних вод та очищення води.

З огляду на сучасні глобальні проблеми, такі як зміна клімату, дефіцит енергії та забруднення навколишнього середовища, розробка і впровадження МПЕ є вкрай актуальною. МПЕ мають ряд переваг перед традиційними джерелами енергії та технологіями очищення стічних вод. Вони є відновлюваним джерелом енергії, що не забруднює навколишнє середовище, можуть використовувати широкий спектр органічних відходів і мають високу енергетичну ефективність. Особливо актуальним це є для України, де необхідні новітні технології для вирішення екологічних та енергетичних проблем.

Метою цієї роботи є дослідження ефективності мікробних паливних елементів на основі геобактерій MudWatt з різними субстратами, а також аналіз впливу додавання вологи на їх характеристики. Завдання дослідження включають: Аналіз електричних характеристик МПЕ з різними субстратами; вивчення впливу додавання вологи на ефективність МПЕ; дослідження характеристик розчинів ґрунтів, таких як TDS, вміст солей, електропровідність, ORP, pH та порівняння між собою; порівняння отриманих результатів з відомими даними та теоретичними моделями.

Об'єктом дослідження є процес генерації електричної енергії в мікробних паливних елементах, розгляд перспектив технології, та дослідження особливостей МПЕ на практиці за допомогою приладу MudWatt.

Предметом дослідження є електричні характеристики приладу MudWatt, а також дослідження фізичних характеристики субстратів що можуть впливати на його електричні характеристики.

У ході дослідження використовувались такі методи:

Визначення електричних характеристики MudWatt: регулярні вимірювання електричних характеристик (напруга, струм, потужність) MudWatt з використанням 2 різних субстратів за різної вологості.

Аналіз хімічних властивостей: Визначення TDS, вмісту солей, електропровідності, ORP та pH розчинів субстратів, та порівняння їх характеристик між собою.

Аналіз та інтерпретація даних: Аналіз електричних характеристик приладу, їх зміни з часом, та встановлення залежностей між фізичними властивостями субстратів та електричними характеристиками приладу.

В рамках цього дослідження було проаналізовано вплив додавання вологи на електричні характеристики МПЕ на основі геобактерій за допомогою приладу MudWatt. Отримані дані дозволили зробити висновки щодо значного впливу вологості субстрату на електричні характеристики приладу, а також були продемонстровані його основні електричні характеристики, такі як еволюція напруги з часом, внутрішній опір, а також показники потужності та сили струму за різних зовнішніх опорів навантаження.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості їх використання для оптимізації роботи MudWatt в реальних умовах. Був досліджений вплив вологи на ефективність роботи приладу, а також допустимі характеристики для нормальної роботи приладу.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Основні відомості про МПЕ

Мікробний паливний елемент (МПЕ) - це біоелектрохімічна система, що прямо перетворює хімічну енергію, що міститься у біорозкладних органічних речовинах, на електричну енергію за допомогою електрокаталітичного ефекту конкретних електроактивних бактерій, що діють на одну або обидві реакції окиснення субстрату та відновлення окисника, що складають класичну окисно-відновну реакцію.

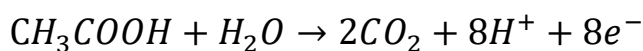
МПЕ можуть використовувати різні види бактерій та специфічні середовища, що дозволяє використовувати їх для нетипових задач, таких як живлення батарей глибоководних камер. Необхідно відмітити, що МПЕ не зможуть забезпечувати таку ж високу потужність як традиційні джерела енергії [1], проте, МПЕ можливо використовувати для багатьох специфічних задач, які є або комерційно не вигідними, або ж взагалі неможливими для традиційної енергетики. Крім того, у процесі своєї роботи найбільш перспективні сучасні види МПЕ використовують у якості субстрату промислові відходи, а тому ширше поширення цієї технології може призвести до покращення екологічної ситуації у світі [2].

1.2 Принцип роботи МПЕ

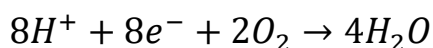
МПЕ генерує енергію завдяки перебігу окисних хімічних реакцій, що відбуваються у результаті життєдіяльності електрогенних бактерій. Такі реакції можуть залежати як від типу бактерій, так і від субстрату в якому вони знаходяться.

Наприклад, реакція при використанні ацетату в якості субстрату:

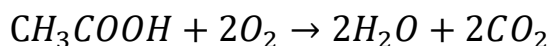
Анодна реакція:



Катодна реакція:



Загальна реакція:



У катодній та анодній реакції вивільняються вільні електронів, які пере-
дуються на електронний ланцюг. Як побічний продукт реакції утворюється вода,
оскільки молекули водня вступають у зв'язок з акцептором, у ролі якого у реак-
ції виступає повітря.

Ефективність використання того, чи іншого субстрату дуже залежить від
структури МПЕ, а також від бактерій, що використовуються для провокування
хімічних реакцій. [3]

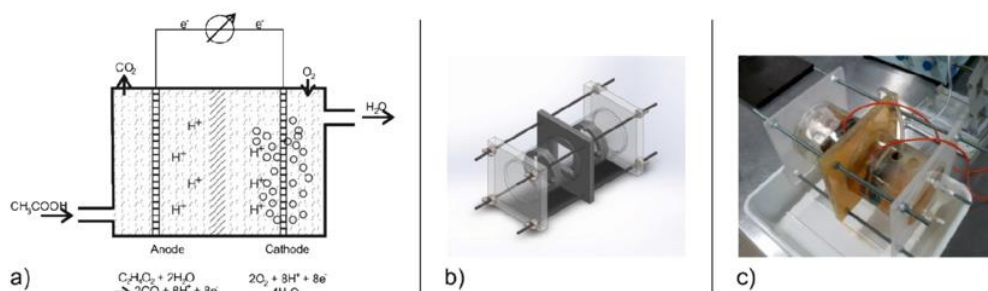


Рис. 1 МПЕ з ацетатом у якості субстрату [4].

1.3 Основні типи МПЕ

За типом МПЕ поділяються за структурою і вони можуть бути
однокамерними, двокамерними або складеними. Вибір структури приладу
напрямку залежить від специфіки задачі яку повинен вирішувати МПЕ.

1.3.1 Однокамерні МПЕ

Однокамерні мікробні паливні елементи
(МПЕ) є однією з конфігурацій, що
досліджуються для використання у
біотехнологічних застосуваннях,
зокрема для виробництва електроенергії
за допомогою біологічної окислювальної
діяльності.

Однокамерна конфігурація МПЕ є
простішою у порівнянні з

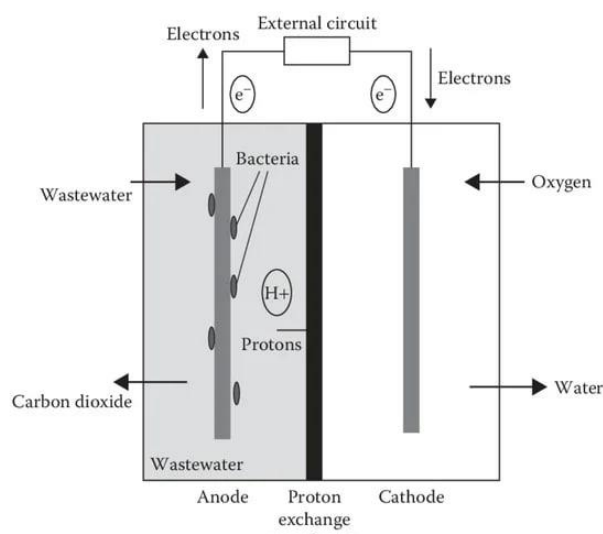


Рис. 2 структура однокамерного МПЕ [5]

двокамерною конфігурацією. Вона складається з анодної камери, яка з'єднана з катодом, що знаходиться на відкритому повітрі. У цій конфігурації електрон, після анаеробного перетравлення на аноді, передається до пористого катоду через зовнішню електричну схему, де кисень з повітря діє як акцептор електронів. Мембрана та пористий катод дозволяють передачу протонів до катоду та запобігають дифузії кисню до анодної камери. Ця конфігурація менш витратна через відсутність катодного відділення. Крім того, вона не потребує аерації киснем через католіт. Однокамерний мікробний паливний елемент має ефективніший процес відновлення кисню на катоді та вищий вихід потужності. Однак у цього типу розміщення є деякі обмеження для комерційних застосувань. Об'єм камери не може бути суттєво збільшений, оскільки це призводить до зменшення густини потужності при масштабуванні системи. Як результат, ця конфігурація не є практичною для промислового застосування.

Щоб вирішити ці виклики, можна збільшити міжелектродний зазор. Однак це призводить до суттєвого збільшення внутрішнього опору. Тому для вирішення цих проблем використовуються роздільники. Роздільники забезпечують покращену вибіркову ефективність та меншу дифузію кисню. Вони також повинні дозволяти більшу передачу протонів. Однак проблемою залишається вартість роздільників. Тому потрібна подальша увага для розробки нових технологій розділення, щоб оптимізувати ефективність та витрати МПЕ. [5, 6]

1.3.2 Двокамерні МПЕ

Найбільш поширена конфігурація, оскільки вона має мембрану для обміну іонами, що допомагає дифузії протонів і обмежує перехресний обмін розчинів та кисню між камерами.

Двокамерні мікробні паливні елементи (МПЕ) складаються з анодної та катодної камер, які розділені мембранами. Мікроорганізми у біофільмі на аноді в анодній камері здійснюють анаеробний розклад субстрату та генерують електрони. Ці електрони досягають катоду через зовнішній провідник, а протони переміщуються до катодної камери через мембрану. На катоді відбувається реакція редукції кисню (ORR). Для цієї реакції необхідне постійне постачання кисню у катодній камері.

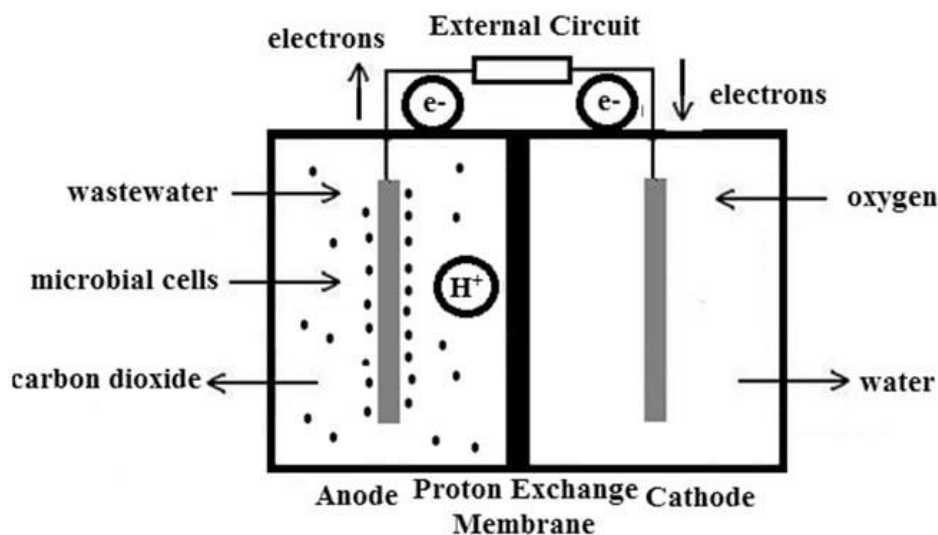


Рис. 3 Структура двокамерного МПЕ [7]

Двокамерні МПЕ були модифіковані та досліджені в різних варіаціях, включаючи типи Н-подібного, циліндричного, трубчастого, плоского та пластинчастого. Ці модифікації були здійснені для покращення ефективності роботи на великих масштабах. МПЕ типу Н мають зменшену передачу протонів через меншу площу поверхні, що призводить до меншої густини потужності. З іншого боку, МПЕ типу плоскої пластинки надають більшу площу мембрани, що сприяє передачі протонів і зменшує внутрішній опір. Трубчасті МПЕ також стали варіантом для великомасштабних операцій. Основною перевагою

двокамерних МПЕ є їхнє застосування для очищення стічних вод у великому масштабі з виробництвом енергії. Операційні параметри, необхідні для роботи промислового рівні, включають підтримання необхідного рівня рН, наявність достатньої концентрації кисню, зменшення внутрішнього опору та додавання електронних посередників. [6]

1.3.3 Складені МПЕ

Складені МПЕ - це конфігурація, у якій паливні елементи формують батарею шляхом додавання один одного в серію або паралельно. Це дозволяє підвищити вихідну напругу при з'єднанні в серію та збільшити струм при паралельному з'єднанні. Така структура є ефективним джерелом живлення для різних практичних застосувань.

Один з найпоширеніших типів складених МПЕ - це біполярно електродно складений МПЕ. Він включає анодну камеру, біполярний електрод, мембрану, катодну камеру і кінцеві пластини. Перевагами біполярних електродів є мінімізація втрат на опір, зниження втрат напруги через внутрішній опір МПЕ та легка виготовлюваність. У серійних з'єднаннях біполярні електроди забезпечують високу напругу без значних втрат у продуктивності. Однак вони мають певні недоліки, такі як ризик реверсії напруги, що може призвести до пошкодження біоплівки на аноді і знижує ефективність системи. Компактний дизайн ускладнює розділення анода від катода, що може бути проблематичним під час обслуговування або ремонту.

Вертикально складені МПЕ мають каскадну структуру з гравітаційним рухом електролітів, що робить їх ефективними для обробки стічних вод без використання насосів. Вони використовуються для живлення пристроїв, проте їх потужність обмежена через нерівномірний розподіл субстрату. У довгостроковій експлуатації концентрація органічних речовин може знижуватись на одному з кінців МПЕ, що призводить до значного зниження потужності та навіть до повної відмови через втрату активності мікроорганізмів

у біоплівці. Також вертикальні стеки можуть страждати від реверсії напруги через нерівномірний розподіл субстрату.

Горизонтально складені МПЕ, натомість, зазвичай потребують насосів для подачі субстрату (наприклад, стічних вод) до бактерій у камері аноду та окисдованих католітів до камери катоду. Це може бути вартісним та складним процесом порівняно з гравітаційним потоком у вертикальних стеках. Горизонтальні стеки часто використовуються для підвищення максимальної потужності, так як вони можуть бути легко масштабовані і з'єднані в серію чи паралель для досягнення більшої ефективності. Наприклад, дослідники досягли максимальної щільності потужності 51 Вт/м^3 та ефективності видалення хімічного питомого споживання кисню у розмірі 97% з масштабованого, паралельно з'єданого горизонтального стека об'ємом 72 літри, що використовувався для обробки стічних вод. [6]

1.4 Конфігурація МПЕ в залежності від типу субстрату

Вибір правильного субстрату для МПЕ має вирішальне значення для досягнення оптимальної ефективності та максимального вироблення електроенергії.

Оскільки процес перетворення органічних речовин у електричну енергію залежить від активності мікроорганізмів, вибір субстрату повинен враховувати природну здатність обраного штаму мікроорганізмів до окислення, а також специфічні вимоги до середовища та типу поживних речовин. Оптимальний субстрат має бути легкодоступним для мікроорганізмів, мати високу поживність та сприяти ефективному процесу електрогенерації. Правильно підібраний субстрат може значно підвищити продуктивність МПЕ та забезпечити стабільну роботу системи протягом тривалого часу. Зазвичай у якості субстрату для МПЕ використовують прості вуглеводи (глюкоза, ацетат), або складні вуглецеві джерела (стічні води, харчові джерела, органічні рештки)

1.4.1 Стічні води як субстрат для МПЕ

Стічні води як субстрат для МПЕ є дуже перспективним напрямком розвитку для МПЕ є використання стічних вод від великих промислових об'єктів для живлення МПЕ. Це дозволить суттєво підвищити екологічність сучасних промислових виробництв, при цьому підприємство зможе отримувати електроенергію з власних відходів. Вже наявні деякі прототипи та приклади використання МПЕ для очищення стічних вод [7, 5, 6], проте є деякі проблеми, які потрібно розв'язати для широкомасштабного впровадження МПЕ. Однією з основних проблем є складність складу стічних вод, які можуть містити різноманітні хімічні сполуки, включаючи різні види барвників та інші токсичні речовини. Деякі з цих сполук можуть бути трудно розкладені мікроорганізмами в МПЕ, що призводить до неповного очищення стічних вод або утворення токсичних продуктів розкладу. Цю проблему можна вирішити за допомогою зміну типу бактерій для колонії у різних сферах промисловості оскільки різні бактерії потребують різних джерел живлення, і можливо просто підібрати ефективну конфігурацію МПЕ для конкретних стічних вод для підприємства.

Ще однією проблемою є нестабільність роботи МПЕ при обробці великого обсягу стічних вод з високою концентрацією забруднення. Висока концентрація забруднення може призводити до інгібіції мікроорганізмів, які використовуються в МПЕ, а також до збільшення внутрішнього опору, що впливає на ефективність виробництва електроенергії.

Проте, технологія МПЕ все ще є важливою для ефективного очищення стічних вод. При використанні МПЕ для розкладання органічних речовин у воді, оскільки під час роботи МПЕ підприємство не втрачає, а навпаки, отримує електроенергію, що неможливо з традиційними методами очищення відходів. МПЕ також ефективно зменшують кількість твердих відходів для видалення та видаляють сульфідів зі стічних вод. Ця технологія дозволяє підвищити ріст електрохімічно активних мікроорганізмів та забезпечує видалення до 80% органічних речовин з води.

МПЕ можуть бути використані для обробки стічних вод від різних джерел, включаючи санітарні установи, підприємства з переробки харчових продуктів та тваринних відходів, текстильні фабрики, тощо. Вони мають потенціал високого рівня очищення від забруднюючих речовин. Енергетичний потенціал стічних вод залежить від складу стічних вод, але для стічних вод пивоварень максимальна потужність досягає 528 мВт/м^2 при додаванні 50 мм фосфатного буфера до відходів. [1,8,9]

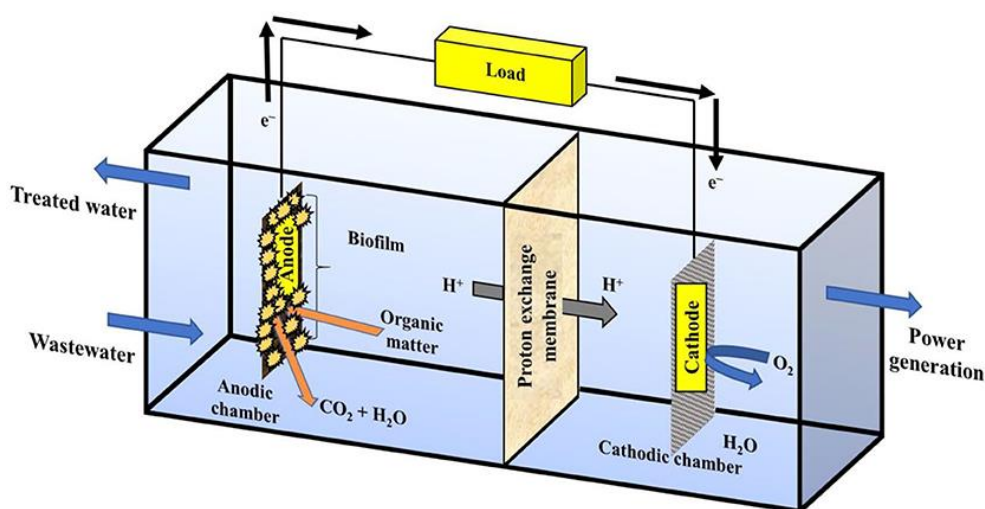


Рис 4. МПЕ з стічними водами у якості субстрату [10]

1.4.2 Земля як субстрат для МПЕ

МПЕ можуть отримувати енергію використовуючи землю, багно, та інші неможливі для традиційної енергетики джерела для енергії. Це можливо завдяки геобактеріям, які мають значний потенціал у якості бактерій для МПЕ. Вони відомі своєю здатністю використовувати різноманітні субстрати для електронної передачі, що відкриває широкі можливості для використання відходів як джерел енергії для паливних елементів. Деякі види геобактерій виявляють високу ефективність у передачі електронів до аноду без необхідності медіаторів, що може підвищити ефективність роботи паливних елементів.

З огляду на їхні переваги, геобактерії також виявляють здатність окислювати широкий спектр сполук, включаючи ароматичні речовини, що може

бути корисним у паливних елементах для обробки забруднених водних середовищ. Деякі бактерії також здатні синтезувати власні медіатори, що спрощує процес передачі електронів і знижує витрати на додаткові речовини, що використовуються в паливних елементах.

Незважаючи на переваги, геобактерії мають свої обмеження та проблеми. Деякі види залежать від специфічних умов у середовищі, таких як наявність оксидів заліза (III), що обмежує їхню здатність до передачі електронів у паливних елементах при відсутності відповідних умов. Також для ефективної передачі електронів від геобактерій до аноду може знадобитися використання медіаторів, якщо у колонії немає типу бактерій що синтезують власні, що призводить до додаткових витрат на матеріали та збільшує складність системи. Крім того, керування складом мікробних спільнот у паливних елементах, що використовують геобактерії, може бути складним завданням через їхню чутливість до змін у середовищі, а тому регулювання складу субстрату достатньо складне, що ще більше ускладнює виконання специфічних умов для певних видів бактерій. До того ж питома потужність МПЕ з геобактеріями невелика, і не може конкурувати з МПЕ, що використовують інші типи бактерій та субстратів.

Проте, це все ще цікава технологія завдяки універсальності МПЕ на основі геобактерій. Вони здатні працювати майже у будь яких середовищах, з деякими виключеннями, проте ще необхідно вирішити проблему з оптимальною конфігурацією колоній бактерій, та з можливістю регулювання складу субстрату для оптимізації роботи МПЕ для збільшення питомої потужності. [2]

1.4.3 Донний органічний осад як джерело живлення МПЕ

Бентосні бактерії використовуються у бентосних мікробних паливних елементах (БМПЕ), що генерують електричну енергію в морських донних середовищах поглинаючи органічний осад від померлих риб та мікрорганізмів. Вони активно взаємодіють з анодними та катодними електродами, що дозволяє

їм виконувати електронний транспорт через біофільми на електродних поверхнях або за допомогою екстрацелюлярних електронних переносників.

Бентосні бактерії мають потенціал як ефективні джерела енергії для МПЕ, здатних працювати в морських умовах. Вони можуть бути використані для живлення автономних датчиків та засобів зв'язку, а також для моніторингу морських екосистем та геобіологічних процесів. Проте, вони мають деякі суттєві недоліки.

Головними можливо виділити обмеженість масового транспорту та пасивізацію на аноді. У бентосних мікробних паливних елементах може виникати проблема з переміщенням реагентів (наприклад, субстратів або кисню) до аноду, де відбувається електронний транспорт, що обмежує ефективність пристрою. Також у результаті взаємодії анода з оточуючим середовищем (наприклад, наявність сульфідів або інших хімічних сполук) на аноді може утворюватися шар, що перешкоджає електронному транспорту через анод, знижуючи ефективність паливного елемента.

Для вирішення проблеми масового транспорту та пасивізації анодів потрібно розробити нові дизайни БМПЕ, які дозволять краще керувати потоком реагентів та продуктів реакції. Додаткові дослідження механізмів електронного транспорту допоможуть вдосконалити процес та збільшити ефективність БМПЕ. [12]

1.4.4 Ацетат як субстрат для МПЕ

Ацетат є одним з найпоширеніших і найефективніших субстратів, використовуваних у Мікробних Паливних Елементах (МПЕ). Його висока ефективність обумовлена рядом переваг, які він пропонує в порівнянні з іншими субстратами.

Проста молекулярна структура

Ацетат (CH_3COOH) має просту молекулярну структуру, яка складається з двох атомів вуглецю, трьох атомів водню і двох атомів кисню. Така структура легко піддається метаболізму електроактивними бактеріями. Ці бактерії використовують ацетат як джерело вуглецю та електронів, що полегшує процес генерації електроенергії. Проста структура ацетату також сприяє швидкому розщепленню і переносу електронів до аноду, що є критично важливим для ефективної роботи МПЕ.

Згідно з дослідженням [8], використання ацетату як субстрату призвело до досягнення потужності у 506 мВт/м^2 . Це свідчить про те, що ацетат є достатньо ефективним у контексті електрогенерації в МПЕ. Висока потужність, отримана при використанні ацетату, зумовлена тим, що електроактивні бактерії, такі як *Geobacter sulfurreducens*, можуть ефективно окислювати ацетат і передавати електрони до аноду.

Ацетат є широко доступним хімічним сполуком, який може бути отриманий як промисловим, так і біологічним шляхом. Він є продуктом анаеробного розкладання органічних матеріалів, таких як відходи сільського господарства або харчової промисловості. Доступність ацетату робить його привабливим для використання в МПЕ. Крім того, ацетат є стабільним субстратом, який не піддається швидкому розкладанню або втраті активності протягом тривалого часу зберігання.

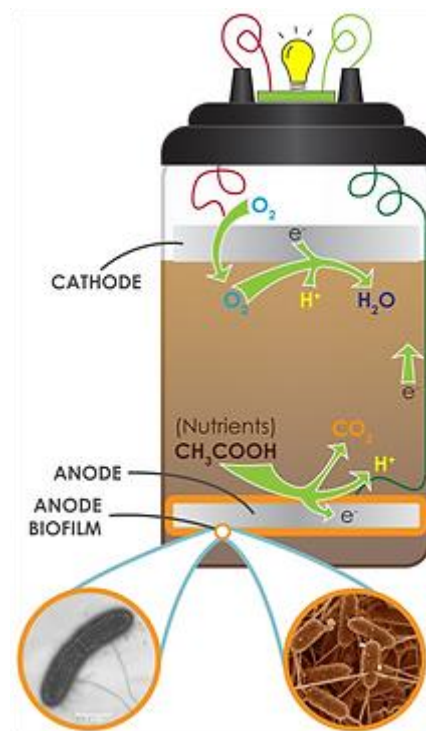


Рис 5. МПЕ з ацетатом у якості субстрату [13]

Окрім того, Ацетат також є одним з найбільш вивчених субстратів у контексті МПЕ. Багато наукових досліджень було проведено для вивчення його ефективності, оптимальних умов використання та впливу на різні мікроорганізми. Завдяки цьому існує велика кількість даних, які можуть бути використані для подальшого вдосконалення та оптимізації МПЕ. Ацетат може бути використаний у різних конфігураціях МПЕ, включаючи як однокамерні, так і двокамерні. [4]

1.4.5 Глюкоза як субстрат для МПЕ

Глюкоза є одним з найпоширеніших субстратів, використовуваних у МПЕ, завдяки її доступності та відносно низькій вартості. Однак, використання глюкози як субстрату в МПЕ має певні обмеження та виклики. Глюкоза, використана як субстрат у МПЕ, має меншу електроенергетичну ефективність порівняно з ацетатом. Дослідження [1] вказує на те, що ефективність становить лише 3%, порівняно з 42% для ацетату. Це пов'язано з втратою електронів на конкуруючі бактерії та інші метаболічні шляхи.

Глюкоза є шестикарбоновим цукром і важливим джерелом енергії для багатьох мікроорганізмів. Вона метаболізується через гліколіз з подальшим окисленням продуктів у циклі трикарбонових кислот. Проте у середовищах з глюкозою часто зустрічаються конкуруючі бактерії, які не є електроактивними, але споживають глюкозу, зменшуючи тим самим доступність цього субстрату для електроактивних бактерій. Крім того, у процесі метаболізму глюкози можуть утворюватися побічні продукти, які можуть бути токсичними для деяких видів бактерій, що також може негативно впливати на загальну ефективність процесу.

Іншим аспектом, який знижує ефективність глюкози як субстрату, є те, що деякі мікроорганізми можуть використовувати її для анаеробного дихання або ферментації, що призводить до утворення продуктів, які не сприяють генерації електроенергії. Ці процеси часто конкурують з електрогенезом, зменшуючи кількість електронів, доступних для переносу до аноду. Таким чином, глюкоза

може призводити до утворення біомаси і побічних продуктів замість електронів, що необхідні для ефективної роботи МПЕ.

Проте глюкоза має високі перспективи завдяки своїй доступності та високій теоретичній ефективності, оскільки вона має високу поживну здатність для мікроорганізмів та в ідеальних умовах може демонструвати високу ефективність роботи МПЕ.

1.5 Обговорення та висновки

У підсумку, мікробні паливні елементи (МПЕ) демонструють значний потенціал для вирішення ряду специфічних задач, таких як живлення глибоководних датчиків та очищення стічних вод із одночасним отриманням електроенергії. Важливими перевагами МПЕ є їхня здатність використовувати широкий спектр субстратів, що відкриває можливості для різноманітних застосувань. Однак, незважаючи на їхні перспективи, МПЕ мають певні проблеми, зокрема, недостатню потужність, що вимагає подальшої розробки більш ефективних та дешевих конфігурацій.

Однокамерні МПЕ мають просту конструкції та зменшені витрати завдяки відсутності катодної камери, проте обмежений обсяг камери, а при масштабуванні доволі суттєво падає густина напруги, що робить масштабування недоцільним; необхідність використання роздільників, що підвищує витрати.

Двокамерні МПЕ Можливо масштабувати, та вони мають значно менший внутрішній опір порівнянно з однокамерними системами, але потребують постійного постачання кисню до катодної камери, та мають вищі витрати на конструкцію і обслуговування.

Складені МПЕ мають високу вихідну напругу та струм, є ефективним джерелом живлення для практичних застосувань, проте мають ризик реверсії напруги, що може пошкодити біоплівку, а також досить складні у обслуговуванні.

Кожен тип МПЕ має свої унікальні характеристики, що визначають їхню придатність для різних застосувань. Однокамерні МПЕ є простими та менш витратними, але обмежені в масштабуванні. Двокамерні МПЕ, навпаки, забезпечують кращу ефективність при великих об'ємах, але потребують більш складної інфраструктури. Складені МПЕ, завдяки своїй модульності, дозволяють досягати високої продуктивності, але можуть бути вразливими до реверсії напруги.

МПЕ можуть використовувати різноманітні субстрати, що робить їх універсальними для різних умов, але найбільш цікавими на даний момент можливо назвати декілька наступних:

Стічні води: Використання стічних вод як субстрату дозволяє одночасно очищувати воду і генерувати електроенергію. Це екологічно вигідно, але складність складу стічних вод може ускладнювати процес та знижувати ефективність.

Ацетат: Є одним з найефективніших субстратів завдяки простоті молекулярної структури та високій доступності. Забезпечує високу потужність, але потребує стабільних умов для ефективного метаболізму.

Глюкоза: Широко доступна, але має нижчу електроенергетичну ефективність через конкуренцію з іншими мікроорганізмами та побічними продуктами метаболізму.

В цілому, технологія представляє інтерес як екологічно чисте відновлюване джерело енергії, проте для масового використання необхідно розробити більш універсальний дизайн, а також підібрати оптимальні конфігурації

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

2.1 Опис приладу MudWatt

MudWatt це однокамерним МПЕ, який використовує у якості субстрат бруд, в якому проживають мікроорганізми, що виступають у ролі каталізаторів хімічних окисно-відновних реакцій. У якості катооду та аноду використовуються графітові диски.

У MudWatt біофільм формується на поверхні анода, який оточений субстратом. Цей біофільм відіграє ключову роль у процесі генерації електроенергії, оскільки він метаболізує різні речовини та передає електрони від мікроорганізмів до анода.

У якості мікроорганізмів для роботи, прилад використовує штами *Shewanella* і *Geobacter*, вони здатні до екзогенного транспорту електронів та метаболізму широкого колу органічних речовин.

MudWatt потребує специфічних умов для ефективної роботи. Оскільки штами, що він використовує є анаеробними, то для можливості почати роботу необхідн забезпечити анаеробні умови. Також необхідно забезпечити вологе середовище для формування біофільму на аноді.

Для початку роботи MudWatt може знадобитися 3-4 дні, після чого він поступово досягне максимальної потужності. З часом потужність почне падати, оскільки колонія бактерій почне зменшуватися через вичерпання поживних речовин та вологи у субстраті.

Загалом, MudWatt є досить унікальним пристроєм, який використовує бактерії та бруд для генерації електроенергії, він дозволяє дослідити особливості роботи подібних приладів, а також має науковий інтерес с точки зору концепції використання бруду у якості джерела енергії. проте він має проблеми з можливістю комерційного застосування, оскільки як і у випадку з іншими однокамерними МПЕ його неможливо масштабувати зі збереженням ефективності роботи, в той час як у сучасній конфігурації MudWatt має замало потужності для живлення будь яких комерційних приладів. [2]

2.1.1. Структура приладу

Прилад являє собою класичну однокамерну конфігурацію МПЕ, та має наступну структуру: У анодній камері знаходиться анод занурений у ґрунт. Тут розміщуються біофільм з штамами мікроорганзмів, що виділяють електрони під час своєї життєдіяльності. У катодній камері розташований катод, що виступає у ролі електроліту, улектроди анода і катода з'єднані з дротами, які зв'язують між собою анод та катод, та живить плату. Анод та катод являють собою графітові диски, які щільно покривають собою увесь простір контейнера, для того щоб забезпечити анаеробність та не допускати полостей з повітрям.

Blinker Board (плата миготіння): Це електронна плата, яка отримує електрони від анода через дріт і використовує їх для живлення електроніки. Конденсатор і світлодіод: Конденсатор і світлодіод підключені до Blinker Board і використовуються для наглядної демонстрації роботи приладу шляхом блимання світлодіода. Конденсатор необхідний оскільки напруги приладу у звичайному стані недостатньо щоб заживити діод.

Контейнер: Це основний контейнер, де розташовані анодна і катодна камери разом з ґрунтом. Контейнер має спеціальну кришку з отворами під дроти, та з місцем для плати. Матеріалом контейнеру є пластик.

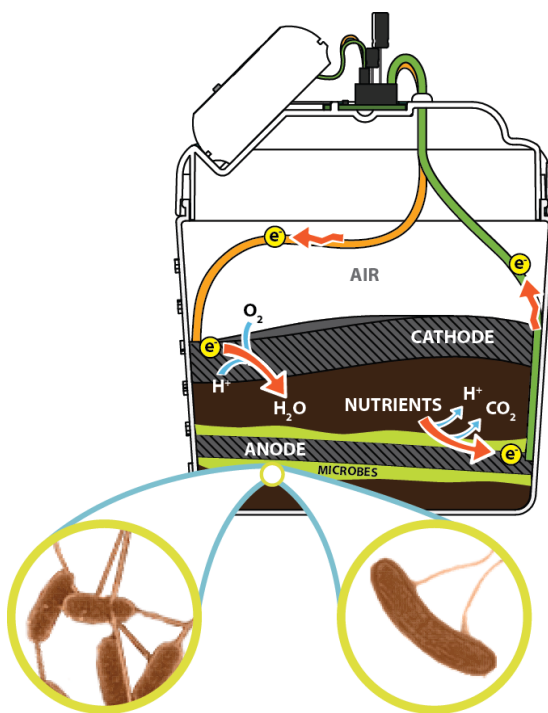


Рис. 6 Зовнішній вигляд MudWatt []

2.1.2. Особливості роботи з приладом:

Під час експлуатації MudWatt, необхідно враховувати особливості його функціонування як МПЕ, а також пов'язані з цим проблеми та переваги. Хоча в принципі пристрій може використовувати будь-який бруд як субстрат, але його максимальні параметри потужності залежать від кількості органічних залишків у обраному ґрунті та вологості. Цікавістю є те, що немає необхідності окремо добувати штами бактерій *Geobacter* та *Shewanella*, оскільки вони широко поширені у природі та здатні жити від різноманітних органічних речовин.

Також на ефективність MudWatt значно впливають такі параметрами, як вологість та наявність органічних залишків у ґрунті, що є необхідними для життєдіяльності бактерій. Біофільм на аноді формується залежно від цих умов, але пристрій не почне працювати у разі відсутності анаеробних умов у середовищі. Наприклад, за наявності у субстраті агроперліту, біофільм не утвориться, оскільки агроперліт розпушує ґрунт, що призводить до насичення ґрунту киснем, та заважає створити анаеробні умови.

Також, ініціація роботи MudWatt вимагає певного часу для досягнення максимальної потужності, що залежить від вологості, типу субстрату та типу МПЕ. Зазвичай цей час складає 2-3 дні до початку роботи та близько 10 днів для досягнення максимальної потужності, після чого відбувається спад. Це пов'язано з вичерпанням поживних речовин та вологи, необхідних для росту та розвитку бактерій.

Однією з головних особливостей MudWatt є неможливість припинення генерації електроенергії. Пристрій працює завдяки окисно-відновним хімічним реакціям, що провокують мікроорганізми у процесі своєї життєдіяльності, тож єдиним способом зупинити його роботу є загибель колонії. Це особливо помітно у випадку МПЕ, що використовують стічні води як субстрат, оскільки вони потребують постійного потоку поживних речовин для ефективної роботи.

2.2 Вибір і підготовка субстрату

Для проведення дослідження було обрано два типи субстратів: субстрат з домішками агроперліту та болотний ґрунт. Кожен з них було підготовлено відповідно до встановлених процедур для забезпечення необхідних умов для роботи мікробного паливного елемента MudWatt.

2.2.1 Субстрат з домішками агроперліту

Агроперліт використовується для поліпшення аерації та дренажу ґрунту, що, у випадку мікробного паливного елемента, створює умови, несприятливі для анаеробних бактерій. Це дозволяє перевірити, чи може MudWatt функціонувати в таких умовах.

Перед внесенням ґрунту до приладу MudWatt, ґрунт був очищений від каміння, великих корінців та інших великих решток. До субстрату з агроперлітом було додано 100 мл води. Окрім того, хімічні параметри розчину

грунту були зафіксовані для забезпечення повноти даних про умови експерименту:

2.2.2 Болотний ґрунт

Болотний ґрунт був обраний як тип субстрату, що містить природні умови для розвитку анаеробних бактерій, таких як *Geobacter* та *Shewanella*. Підготовка ґрунту включала очищення від каміння, великих корінців та інших великих решток. До болотного ґрунту також було додано 100 мл води.

Хімічні параметри розчину болотного ґрунту були зафіксовані двічі: до додавання води та після 27 днів з початку експерименту. Це дозволило зафіксувати зміни в хімічному складі ґрунту протягом експерименту.

2.3 Підготовка електродів

Підготовка електродів є важливим етапом для забезпечення коректної роботи мікробного паливного елементу (МПЕ) MudWatt. Для цього необхідно дотримуватися наступних кроків та умов.

З'єднання дротів з графітовими дисками:

1. Згинання дротів: на межі оголоної та неоголоної частини дроту потрібно зігнути дірт під кутом 90 градусів.
2. Захист кінців дротів: Дроти повинні бути акуратно поміщені в графітові диски на повну довжину оголеною частиною дроту. Важливо, щоб дріт не стирчав з диску, а повністю знаходився всередині до початку гумової частини дроту. Гумова частина дроту буде виходити з контейнеру, та підключатися до плати.

Установка електродів:

1. Розміщення аноду: Анод повинен бути щільно зажатий ґрунтом. Це необхідно для створення належних анаеробних умов, в яких мікроорганізми можуть ефективно функціонувати. Анод розміщується в нижній частині установки і покривається ґрунтом таким чином, щоб забезпечити максимальний контакт з органічними речовинами в ґрунті.

2. Розміщення катоду: Катод не повинен бути покритий землею, він має акуратно лежати на поверхні ґрунту. Це необхідно для забезпечення прямого доступу до повітря, що необхідно для ефективної роботи акцептору електронів, у нашому випадку це повітря. Забруднення катоду може зменшити його ефективність, а тому необхідно обережно цим.

3. Уникнення надмірної вологості: Важливо, щоб ґрунт не був надмірно вологим. Надмірна вологість може призвести до замочування електродів, що негативно впливає на їх роботу. У разі надмірної вологості ґрунту необхідно злити зайву вологу для досягнення оптимальних умов.

4. Рівномірність поверхні: Катод і анод повинні бути розташовані на максимально рівній поверхні. Це забезпечує стабільність електричних контактів та рівномірний розподіл електронів між електродами, що є критично важливим для ефективної роботи МПЕ.

Специфічні умови:

1. Доступ до повітря для катоду: Забезпечення прямого доступу катоду до повітря є необхідним для правильної роботи системи. Повітряний доступ дозволяє катоду ефективно виконувати функцію акцептора електронів.

2. Контроль вологості: Регулярний контроль вологості ґрунту дозволяє підтримувати оптимальні умови для діяльності мікроорганізмів. Зайва волога має бути видалена, щоб уникнути замочування електродів.

3. Закріплення аноду в ґрунті: Анод має бути міцно закріплений в ґрунті для забезпечення належного контакту з бактеріальним біофільмом. Це сприяє стабільній генерації електричного струму.

Таким чином, правильна підготовка та розміщення електродів забезпечує ефективну роботу MudWatt, сприяючи оптимальній взаємодії між бактеріями та електродами, що дозволяє досягти максимальних результатів в генерації електричної енергії.

2.4 Особливості використаних штамів бактерій

Створення біофільму є ключовим етапом у підготовці мікробного паливного елемента (МПЕ) MudWatt. Бактерії, які використовуються для формування біофільму, є анаеробними і володіють унікальними біологічними характеристиками.

Shewanella відома своєю здатністю до екзогенного транспорту електронів, що дозволяє їй метаболізувати різноманітні сполуки. Ця бактерія здатна передавати електрони на зовнішні акцептори, що робить її надзвичайно корисною для роботи МПЕ.

Geobacter демонструє здатність до дихання залізними сполуками і зазвичай живе в переважно анаеробних умовах, таких як глибокі шари ґрунту або морські відклади.

Усі експерименти проводились за умов кімнатної температури з незначними коливаннями, що забезпечувало стабільне середовище для розвитку бактерій. Вологість була додана до субстрату при його підготовці, для того щоб виявити вплив вологості на формування та функціонування біофільму.

Окрім того, Анаеробні умови є критичними для успішного формування біофільму. Було виявлено, що колонія бактерій не сформувалася у ґрунті з домішками агроперліту, що підтверджує теорію про неможливість розмноження колонії за відсутності анаеробних умов. Агроперліт розпушує ґрунт та сприяє насиченню його киснем, що створює несприятливі умови для анаеробних бактерій.

2.5. Налаштування і проведення експериментів, обладнання

Експерименти з дослідження характеристик мікробного паливного елемента MudWatt проводилися протягом тривалого часу з метою вивчення еволюції його електричних параметрів та визначення оптимальних умов для досягнення максимальної потужності. Всі експерименти проводилися при стабільних лабораторних умовах, забезпечуючи постійну температуру та вологість, що дозволяло мінімізувати зовнішні впливи на результати вимірювань.

2.5.1. Процедура проведення експериментів

Протягом 38 днів щоденно вимірювалася напруга приладу за допомогою цифрового мультиметра UNI-T UT33D+. Також здійснювалося вимірювання сили струму за допомогою мультиметра DT-838. Для визначення залежності потужності від зовнішнього опору навантаження була побудована схема з реостатом до 10 кОм. За допомогою цієї схеми експериментально визначався опір, за якого прилад досягає режиму узгодження, та робилися висновки щодо внутрішнього опору приладу.

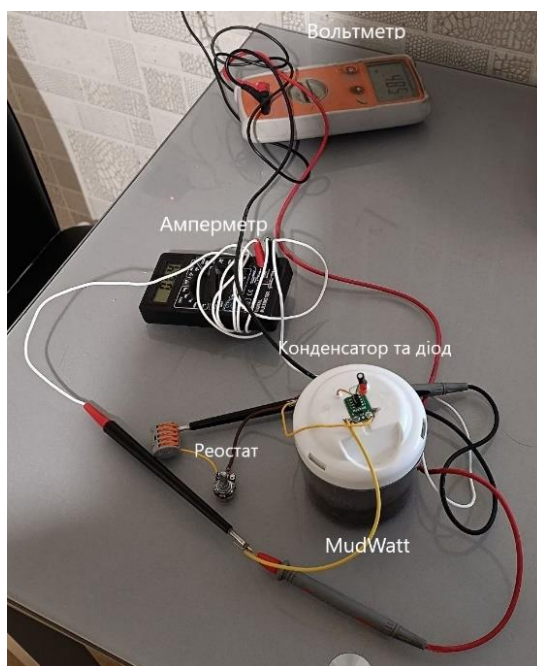


Рис.7 Фото зібранної схеми

2.5.2. Методика вимірювань

Для вимірювань була складена методика, якої я притримувався для отримання даних.

Щоденно вимірювалися параметри напруги приладу, для побудови наглядного графіку еволюції напруги по дням. Також визначалася потужність та її залежність від зовнішнього опору навантаження приладу.

За допомогою Arduino Uno та датчика-гігрометра FC-28 вимірювання вологості відносно параметрів повітря та води. Також для забезпечення точності датчик потрібно було погрузувати у субстрат завжди на ту ж глибину, на яку датчик був опущений до води.

Визначення хімічних характеристик розчинів ґрунтів відбувалося за допомогою приладу EZODO 7200. Перед кожним вимірюванням датчик приладу по черзі обмивався у 3 різних посудинах з дистильованою водою та витиралися, що давало змогу уникнути змішуванні різних субстратів на датчику, та забезпечувало точність вимірювання.

2.5.3. Використане обладнання

Для виконання експериментів використовувалося наступне обладнання:

- Цифровий мультиметри UNI-T UT33D+ та DT-838 для вимірювання сили струму та напруги.
- Реостат з максимальним опором 10 кОм для регулювання навантаження.
- Гігрометр FC-28 для вимірювання вологості ґрунту.
- Плата Arduino Uno використовувалася для підключення гігрометру FC-28 та передачу даних на ноутбук з подальшою обробкою отриманих параметрів у Arduino IDE
- Прилад EZODO 7200 (pH,ОВП*-метр/Кондуктометр/TDS-метр/Солемер/Термометр) для визначення хімічних характеристик розчинів ґрунтів.
- MudWatt

2.5.5. Цілі експерименту

Основною метою дослідження було вивчення еволюції електричних характеристик мікробних паливних елементів на прикладі приладу MudWatt, визначення особливостей його поведінки в різних умовах, а також встановити максимальне значення напруги, потужності та внутрішнього опору приладу. Окрім того, необхідно було визначити вплив вологи на ефективність роботи приладу, а також дослідити хімічні параметри розчинів субстратів, для того щоб дослідити можливу зміну хімічного складу у субстраті, та порівняти між собою різні субстрати.

2.6 Методи обрахунків

У даному дослідженні інформацію збирали протягом 38 днів з інтервалом вимірювання одну добу. Параметри напруги фіксувалися кожного дня о восьмій годині.

Для визначення потужності приладу було проведено декілька експериментів з зовнішніми навантаженнями у різні дні та з різними показниками напруги приладу, та результати були порівнянні між собою.

Для визначення вологості використовувалася плата Arduino Uno. У якості калібрувальних параметрів для гігрометра FC-28 використовувалися значення вологості чистої води та повітря, код для роботи Arduino та для коректного визначення параметрів вологи ґрунту був написаний на Arduino IDE. Для визначення хімічних параметрів використовувалися точні ваги для визначення маси ґрунту, який змішуватиметься з водою у співвідношенні 1:3. Параметри розчинів визначалися приладом EZODO 7200 та порівнювалися між собою для визначення закономірностей.

Для обрахунку потужності роботи приладу за різних зовнішніх опорів навантаження використовувався закон Ома:

$$P = I^2 \times R$$

Для обрахунку великих масивів даних та для побудови графіків на основі цих даних використовувався Python.

2.7 Обговорення та висновки

У цьому розділі було проведено детальний аналіз матеріалів та методів, які використовувалися для дослідження характеристик мікробного паливного елемента (МПЕ) MudWatt.

Було приділено увагу особливостям будови пристрою MudWatt, а також специфіку вибору та підготовки субстратів, правильної роботи з електродами у приладі, та розглянуті штами бактерій і їх поведінка у приладі. Також детально описано проведення експериментів, та методика обрахунків і були розглянуті потенційні джерела похибок.

У результаті можемо зробити певні висновки щодо особливостей роботи та конструкції MudWatt:

Для максимальної ефективності роботи з приладом необхідно забезпечити деякі специфічні умови, такі як потреба у анаеробному середовищі для роботи, а також необхідність підтримувати високий, проте не надмірний рівень вологи у субстраті. Волога позитивно сприяє на розвиток колонії бактерій, що пришвидшує початок роботи і збільшує максимальну потужність приладу, але потрапляння вологи на катод та анод може призвести до погіршення роботи електродів, а тому ґрунт повинен бути гарно змішаним з водою та не бути рідким.

Були продемонстровані прилади, що використовувалися для вимірювання, а також особливості роботи з цими приладами і їх основні параметри, та вказана методика обрахунків потужності та використанні програми, що використовувалися для побудови графічного відображення результатів вимірювань та обрахунків.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Визначення властивостей субстратів

Для дослідження параметрів мікробної паливної комірки необхідно визначити характеристики субстратів, та розуміти різницю між характеристиками субстратів.

3.1.1 визначення хімічних параметрів розчинів субстратів

Були визначені хімічні параметрів 2 різних типів субстратів, а також були порівнянні хімічні характеристики основного експериментального субстрату (болотний ґрунт) після довгого часу проведення експериментів. Вимірювання проводилися 27-го числа з початку експерименту, при цьому ґрунт з домішками агроперліту та болотний ґрунт (15-го числа) були завчасно збереженні у герметичних пакетах.

Для розчину ґрунту з агроперлітом були отримані наступні параметри:

- рН: 6.40 (Кисле середовище)
- Електропровідність: 479 μS
- TDS: 300 ppm
- Вміст солей: 218 ppm
- ОВП: 222 mV

З цим типом субстрату прилад не показав жодного результату, на 3 день після додавання цього ґрунту показники напруги виросли дуже незначно, на початку прилад демонстрував -72 мілівольт, а після 3 днів спостережень лише -62 мілівольт. Від'ємні значення тому що фактично прилад не зміг вийти на режим роботи та не видавав ніякої напруги. На 3 день було вирішено замінити субстрат, оскільки старий тип субстрату не давав якихось суттєвих результатів, хоча й дозволив підтвердити необхідність виконання таких специфічних умов, як анаеробність середовища.

Основним субстратом, для якого проводилися експерименти був болотний ґрунт, який використовувався весь час з початку експерименту. Хімічні параметри ґрунту були визначенні двічі, щоб дослідити можливі зміни хімічного складу, а також порівняти їх у разі наявності суттєвої різниці.

Вимірювання хімічних параметрів ґрунтів проводилися двадцять сьомого дня з початку експериментів, для порівняння хімічні параметрів субстрати були завчасно збереженні у герметичних пакетах, для запобігання впливу зовнішніх факторів на хімічний склад субстратів.

Перше вимірювання хімічних параметрів розчину субстрату проводилося для субстрату п'ятнадцятого дня з початку експерименту, та були отримані наступні параметри:

- рН: 8.34 (Лужне середовище)
- Електропровідність: 1034 μS
- TDS: 694 ppm
- Вміст солей: 507 ppm
- ОБП: 198 mV

Друге вимірювання хімічних параметрів субстрату було проведене двадцять сьомого дня з початку експерименту, були отримані наступні параметри:

- рН: 8.20 (Лужне середовище)
- Електропровідність: 746 μS
- TDS: 465 ppm
- Вміст солей: 310 ppm
- ОБП: 195 mV

У результаті вимірювань були зафіксовані певні зміни хімічного складу.

3.1.2 Аналіз хімічних особливостей ґрунтів

Ґрунт з агроперлітом виявився кислим середовищем з низьким вмістом солей, та слабкими електропровідними характеристиками, але високим рівнем ОБП, в той час як болотний ґрунт виявився лужним середовищем, з високим вмістом TDS солей, високим рівнем електропровідності та низьким рівнем ОБП.

Окрім того, було зафіксоване падіння рН, ОБП, електропровідності, TDS та вмісту солей для розчину субстрату з болотним ґрунтом з часом.

Якщо параметри рН та ОБП суттєво не відрізняються, та їх різниця може бути пов'язана з похибками вимірювання, а ось зміна таких параметрів як електропровідність, вміст солей та TDS представляє інтерес. Таке суттєве зменшення вмісту солей може свідчити про те, що бактерії споживають їх у процесі життєдіяльності, та з часом ці параметри можуть вичерпатися.

3.1.3 Вплив вологи на роботу приладу

Дуже важливим виявився параметр вологи у субстратах. Були визначенні параметри вологи перед та після першого додавання води до болотного ґрунту, та аналогічно для другого субстрату. Для вимірів був використаний гігrometer FC-28, для калібрування використані повітря і вода. Були отримані наступні значення вологості для субстрату: Шістнадцятого дня з початку експерименту визначалася вологість субстрату перед додаванням води та після додавання води.

Вони склали 16% та 29% вологості субстрату відповідно.

За вологості субстрату 16% прилад має напругу у 112 мілівольт, чого не достатньо для роботи діоду.

Двадцять шостого дня з початку експерименту визначалася вологість субстрату перед додаванням води та після додавання води.

Вони склали 14% та 34% вологості субстрату відповідно, і за вологості субстрату 14% прилад має напругу у 107 мілівольт, чого не достатньо для роботи діоду. а при значення вологості субстрату від 29% він проявляє високу працездатність.

3.2 Зміна напруги у приладі

Зміна напруги визначалася переважно для болотного ґрунту, оскільки ґрунт з домішками агроперліту не зміг розпочати роботу, та вийти на робочий режим.

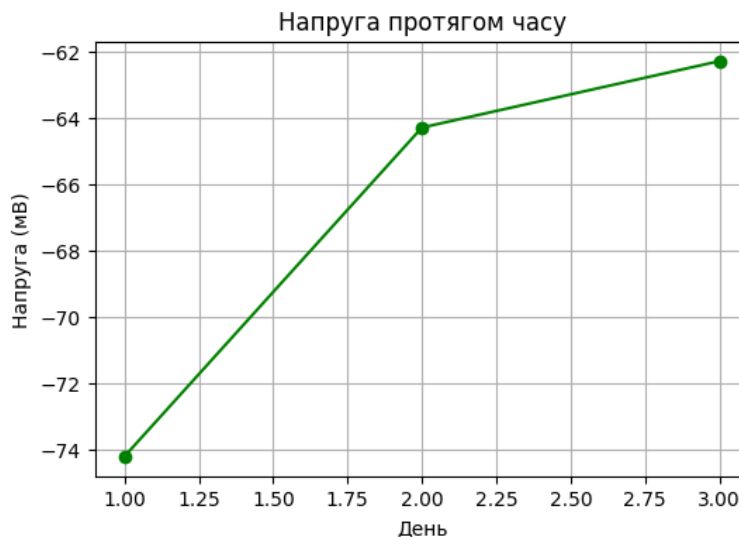


Рис. 8 Еволюція напруги при використанні землі з домішками агроперліту

На початку експерименту напруга стабілізувалася сьомого дня з початку експериментів, після чого напруга несутєво коливалася протягом семи днів, а значне падіння напруги спостерігалось лише на тринадцятий день експерименту.

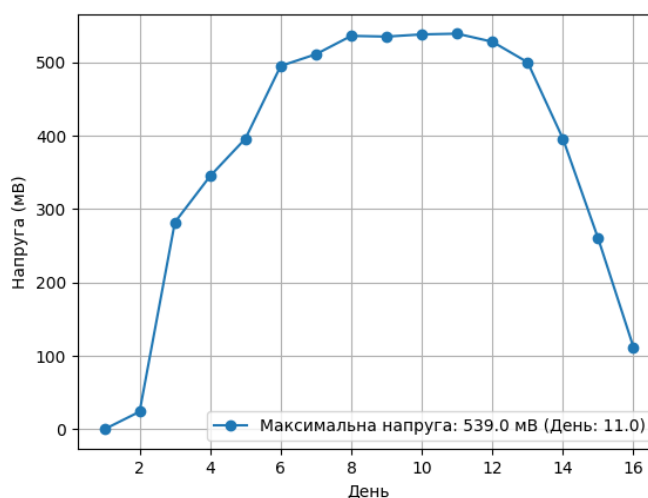


Рис. 9 Еволюція напруги при використанні болотного ґрунту

Після повного падіння напруги приладу було вирішено додати до субстрату 100 мілілітрів води, і це призвело до поновлення роботи приладу, напруга швидко зростала і досягла максимуму вже за два дні, але на третій день почалося незначне зниження напруги, яке продовжувалося протягом тижня до повного спаду.

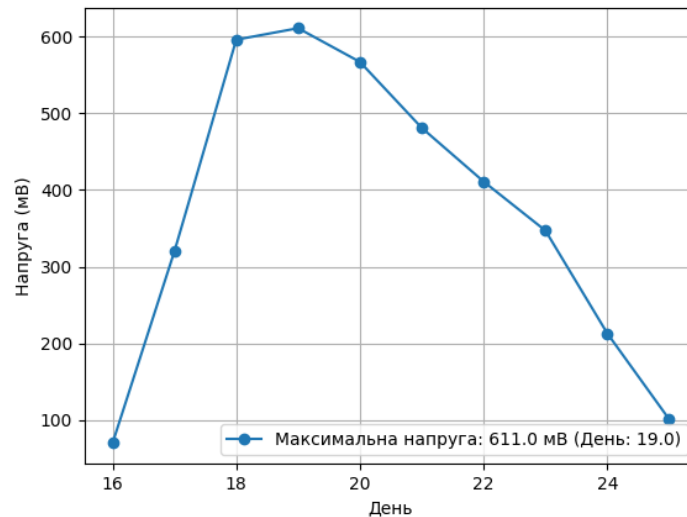


Рис. 10 Еволюція напруги при використанні болотного ґрунту (перше додавання води)

Подібні особливості еволюції напруги спостерігалися і при другому додаванні 100 мілілітрів води. Напруга стабілізувалася протягом трьох днів, та підтримувала сталі значення протягом чотирьох днів, а на четвертий день відбувся різкий ріст напруги, і був досягнутий новий максимум, та розпочалося зниження напруги, яке тривало протягом наступних шести днів.

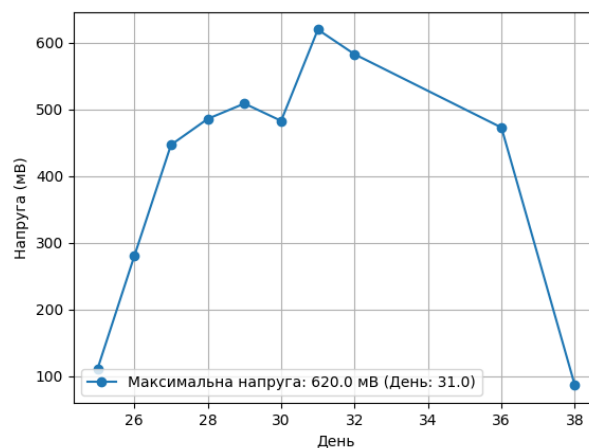


Рис. 11 Еволюція напруги при використанні болотного ґрунту (друге додавання води)

3.3 Залежність потужності від зовнішнього опору навантаження

Були проведені вимірювання сили струму та напруги при підключенні різних зовнішніх опорів навантаження. Виміри були

проведені 19-го, 29-го, 30-го, 31-го та 36-го дня з початку експерименту за різних напруг.

Були побудовані криві залежності потужності від опору. При досягненні рівності параметрів внутрішнього та зовнішнього опору навантаження ми досягаємо режиму узгодження, та визначаємо максимальну можливу потужність приладу, це дає нам можливість оцінити теоретичну ефективність роботи приладу як джерела живлення.

Для 19-го дня з початку експерименту при значенні напруги у 611 мілівольт була отримана наступна залежність потужності від зовнішнього опору навантаження:

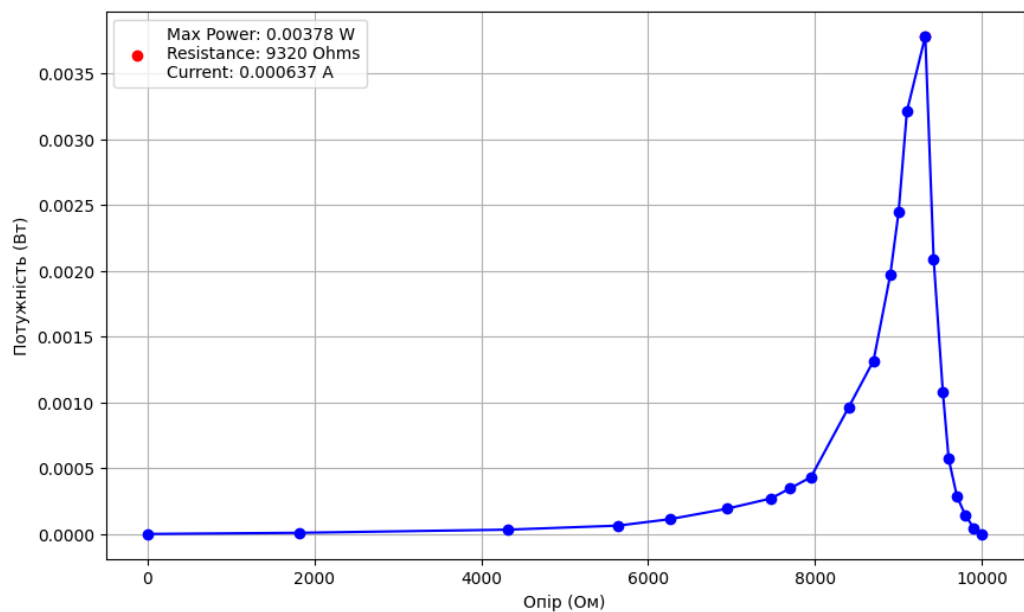


Рис. 12 Залежність потужності від зовнішнього опору навантаження

Для 29-го дня з початку експерименту при значенні напруги у 509 мілівольт була отримана наступна залежність потужності від зовнішнього опору навантаження:

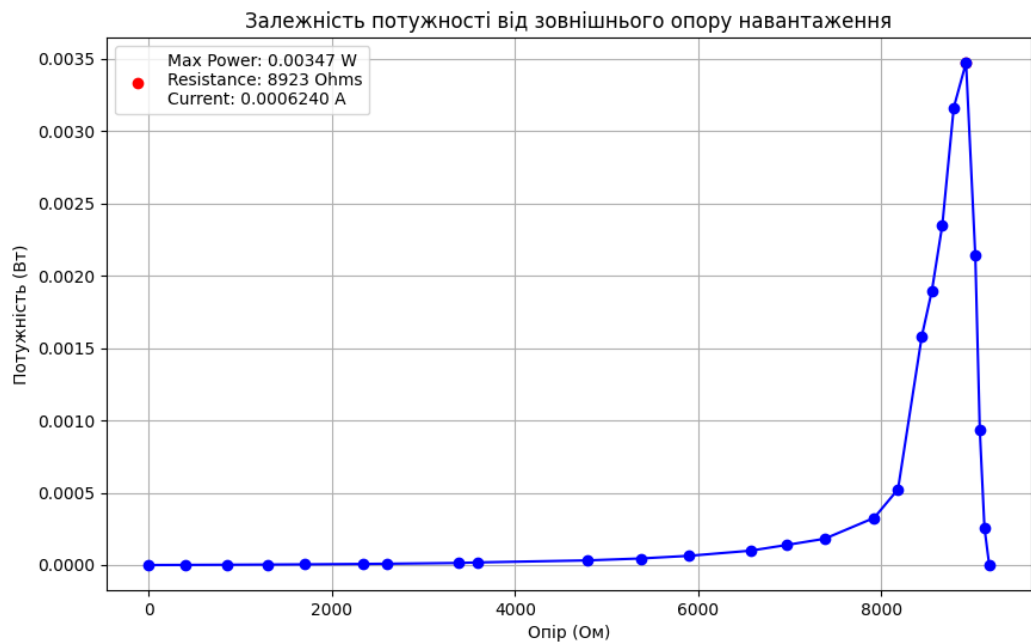


Рис. 13 залежність потужності від зовнішнього опору навантаження:

Для 30-го дня з початку експерименту при значенні напруги у 483 мілівольт була отримана наступна залежність потужності від зовнішнього опору навантаження:

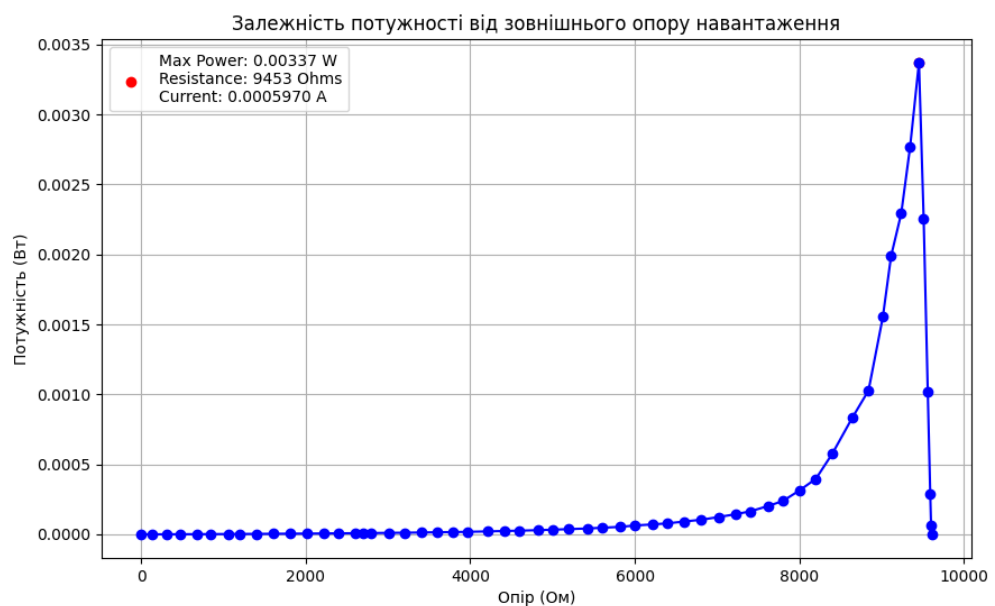


Рис. 14 залежність потужності від зовнішнього опору навантаження:

Для 31-го дня з початку експерименту при значенні напруги у 620 мілівольт була отримана наступна залежність потужності від зовнішнього опору навантаження:



Рис. 15 залежність потужності від зовнішнього опору навантаження:

Для 36-го дня з початку експерименту при значенні напруги у 473 мілівольт була отримана наступна залежність потужності від зовнішнього опору навантаження:

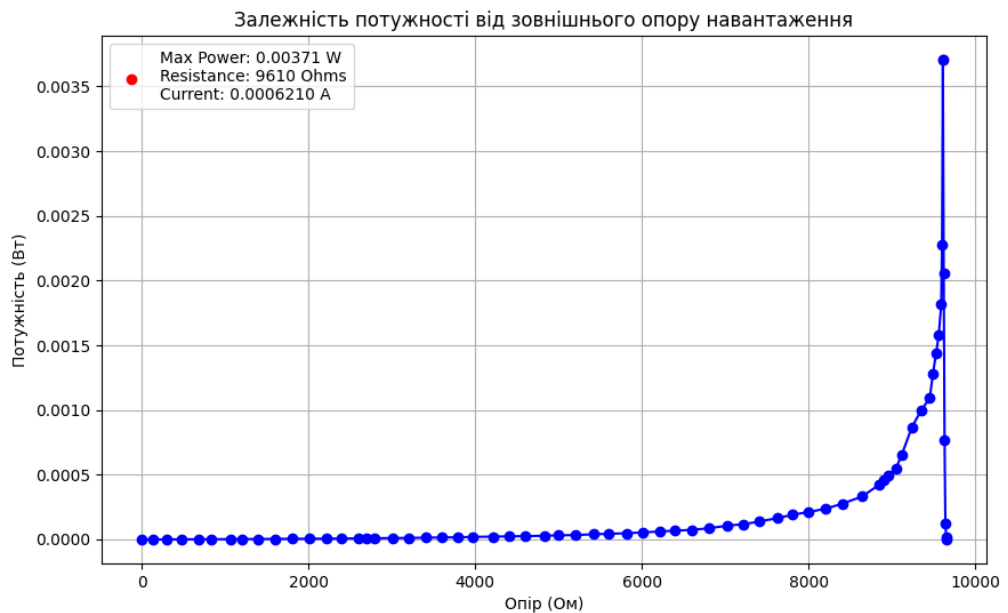


Рис. 16 залежність потужності від зовнішнього опору навантаження:

3.4 Обговорення та висновки

У ході дослідження були проведені детальні виміри хімічного складу ґрунту та його вологості, що дозволило виявити ключові параметри для забезпечення ефективної роботи досліджуваного приладу. Спочатку були визначені хімічні властивості ґрунту з агроперлітом, проте цей варіант не був використаний у подальших експериментах через неможливість створення біофільму на аноді. Водночас були проаналізовані хімічні характеристики болотного ґрунту, зразки якого були взяті на 15-й та 27-й день експерименту.

Аналіз показав значні відмінності між хімічними характеристиками ґрунту з агроперлітом та болотного ґрунту. Ґрунт з агроперлітом виявився кислим середовищем з низьким вмістом солей та слабкими електропровідними характеристиками, але з високим рівнем окислювально-відновного потенціалу (ОВП). Навпаки, болотний ґрунт характеризувався лужним середовищем, високим вмістом розчинених твердих речовин (TDS), високою електропровідністю та низьким рівнем ОВП. Основні відмінності між цими двома субстратами полягали у їхній електропровідності, рівні TDS та вмісту солей.

Паралельно було досліджено вплив вологості субстрату на формування бактеріальної колонії та ефективність роботи приладу. Виявилося, що за певних умов вологості бактерії не можуть формувати достатньо велику колонію, що необхідно для стабільної роботи приладу. Робота приладу припиняється за вологості ґрунту в 16%, оскільки напруга стає недостатньою для миготіння діода. Оптимальною вологістю для стабільної роботи приладу виявилися параметри вологості ґрунтів 29% та 34%.

Окрім цього, було досліджено еволюцію напруги з часом та залежність потужності від зовнішнього опору навантаження. Максимальна напруга в 620 мілівольт була досягнута на 31-й день з початку експерименту. Було також визначено, що максимальна потужність приладу склала 0.395 мВт при внутрішньому опорі у 8886 Ом.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуті типи МПЕ за структурою. Однокамерні МПЕ прості і менш витратні, але обмежені в можливості масштабування. Двокамерні МПЕ забезпечують кращу ефективність при великих об'ємах, але потребують складнішої інфраструктури. Складені МПЕ завдяки модульності дозволяють досягати високої продуктивності, але можуть бути вразливими до реверсії напруги.
2. Дослідження підтвердило можливість МПЕ використовувати специфічні субстрати, такі як ґрунт або органічні рештки. Ефективність роботи комірки залежить від підтримання оптимальних умов для життя колонії бактерій, що диктує специфічні обмеження при проектуванні МПЕ.
3. Для дослідження особливостей роботи паливних елементів був використаний однокамерний МПЕ MudWatt. Максимальна потужність приладу склала 0,395 мВт за зовнішнього опору навантаження у 8860 кОм. Внутрішній опір приладу склав 8860 кОм. Максимальна напруга приладу склала 620 мВ на 31-й день з початку експерименту.
4. Було виявлено, що підтримання достатнього рівня вологості субстрату є важливим фактором для стабільної роботи приладу. При 16% вологості прилад припиняє роботу, а стабільна робота досягається за вологості субстрату у 29% та 34%.
5. Дослідження хімічного складу розчинів субстратів необхідно для визначення хімічних параметрів субстрату, за яких прилад демонструє стабільну роботу. Досліджено хімічний склад розчину болотного ґрунту 15-го дня з початку експерименту та отримані наступні хімічні параметри: рН: 8.34, електропровідність: 1034 μS , TDS: 694 ppm, вміст солей: 507 ppm, ОБП: 198 mV.
6. Було зафіксовано зниження хімічних параметрів ґрунту на 27-й день експерименту: рН: 8.20, електропровідність: 746 μS , TDS: 465 ppm, вміст солей: 310 ppm, ОБП: 195 mV. Електропровідність зменшилася на 288 μS , TDS і вміст солей зменшилися на 229 та 197 ppm відповідно. рН та ОБП зменшилися на 0.14 та 3 mV відповідно.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review / K. Obileke, H. Onyeaka, E. L. Meyer, N. Nwokolo // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2021. — Т. 139. — С. 110751. — DOI: 10.1016/j.rser.2020.110751.
2. Jude C. D., Jude B. A. Powerful Soil: Utilizing Microbial Fuel Cell Construction and Design in an Introductory Biology Course // J Microbiol Biol Educ. — 2015. — Груд. — Т. 16, № 2. — С. 286—288. — DOI: 10.1128/jmbe.v16i2.934. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4690580/> ;
3. Inc. E. Sustainable and Circular Management of Resources and Waste Towards a Green Deal. — Elsevier, 2023. — DOI: 10.1016/C2021-0-02303-8.
4. Serra P., Espírito Santo A., Albuquerque A. An experimental setup for energy efficiency evaluation of microbial fuel cells // 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). — 2015. — С. 902—907. — DOI: 10.1109/ICIT.2015.7125212. — URL: https://www.researchgate.net/publication/282272317_An_experimental_setup_for_energy_efficiency_evaluation_of_microbial_fuel_cells
5. Roy H., Rahman T. U., Tasnim N., Arju J., Rafid M. M., Islam M. R., Pervez M. N., Cai Y., Naddeo V., Islam M. S. Microbial Fuel Cell Construction Features and Application for Sustainable Wastewater Treatment // Membranes. — 2023. — Т. 13, № 5. — С. 490. — URL: <https://www.mdpi.com/2077-0375/13/5/490>.
6. Flimban S. G. A., Ismail I. M. I., Kim T., Oh S.-E. Overview of Recent Advancements in the Microbial Fuel Cell from Fundamentals to Applications: Design, Major Elements, and Scalability // ResearchGate. — 2019. — URL: https://www.researchgate.net/publication/335588677_Overview_of_Recent_Advancements_in_the_Microbial_Fuel_Cell_from_Fundamentals_to_Applications_Design_Major_Elements_and_Scalability.
7. Singh A., Yakhmi J. Microbial fuel cells – Applications for generation of electrical power and beyond // Critical Reviews in Microbiology. — 2014. — Т. 42,

№ 1. — C. 1-17. — DOI:10.3109/1040841X.2014.905513. — URL: https://www.researchgate.net/publication/262931738_Microbial_fuel_cells_-_Applications_for_generation_of_electrical_power_and_beyond.

8. Power generation from wastewater using microbial fuel cells: A review / N. Bazina, T. G. Ahmed, M. Almdaaf, S. Jibia, M. Sarker // *Journal of Environmental Management*. — 2023. — T. 299. — C. 113619. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113619.

9. Single chamber microbial fuel cell (SCMFC) with a cathodic microalgal biofilm: A preliminary assessment of the generation of bioelectricity and biodegradation of real dye textile wastewater / W. Logroño, M. Pérez, G. Urquizo, A. Kadier, M. Echeverría, C. Recalde, G. Rákhely // *Chemical Engineering Journal*. — 2017. — T. 316. — C. 794—802. — DOI: 10.1016/j.cej.2017.02.029. C. 113619. — DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.113619](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113619).

10. Das, S., Raj, R., Das, S., & Ghangrekar, M. M. (2021). A Sustainable Approach for the Production of Green Energy With the Holistic Treatment of Wastewater Through Microbial Electrochemical Technologies: A Review. *Frontiers in Sustainability*, 5, 792028. <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.792028>

11. Single chamber microbial fuel cell (SCMFC) with a cathodic microalgal biofilm: A preliminary assessment of the generation of bioelectricity and biodegradation of real dye textile wastewater / W. Logroño, M. Pérez, G. Urquizo, A. Kadier, M. Echeverría, C. Recalde, G. Rákhely // *Chemical Engineering Journal*. — 2017. — T. 316. — C. 794—802. — DOI: 10.1016/j.cej.2017.02.029

12. Microbial fuel cell energy from an ocean cold seep / C. E. Reimers, P. Girguis, I. H. A. Stecher, L. M. Tender, N. Ryckelynck, P. Whaling // *Geobiology*. — 2006. — T. 4, № 2. — C. 123—136. — DOI: 10.1111/j.1472-4669.2006.00071.x.

13. Pham, D. (n.d.). Microbial Fuel Cells: An Organic Way of Energy. Retrieved from <https://dianapham34.wixsite.com/microbialfuelcells/history>

14. Science Projects. Turn Mud into Energy With a Microbial Fuel Cell // Science Buddies. — URL: https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Energy_p042/energy-power/microbial-fuel-cell-mud.

15. Fuel Cell Store. (n.d.). MudWatt Microbial Fuel Cell Kit. Retrieved from <https://test2.fuelcellstore.com/bioenergy-power/mudwatt-microbial-fuel-cell-kit>
16. Золотко Д. С., Монастирський Г. Є., Гільчук А. В. Мікробний паливний елемент // Навчально-науковий Фізико-технічний інститут. — 2023. — УДК 537. — 5 с. — URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/a0a8c78a-93d9-4236-9ee6-b081f30ba768/content>.