ВПЛИВ МІЖЕЛЕКТРОДНОЇ ВІДСТАНІ НА БІОЕЛЕКТРИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРОБІОСИСТЕМ

Русин І.Б.¹, Медведєв О.В.², Дячок В.В.¹

¹Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, 79013, м. Львів
rib7@i.ua;

²Філія «Науково-дослідний інститут автомобілебудування «Еталон»
вул. Городоцька, 174, 79022, м. Львів
mov2@ukr.net

Отримання біоелектрики за допомогою рослинно-мікробних електробіосистем є екологічним способом отримання відновлюваної енергії без нанесення шкоди довкіллю. Даний метод альтернативної енергетики передбачає збір біоелектрики за допомогою розташування електродів у зоні ризосфери рослин, де відбувається трансфер електронів та протонів на електроди за допомогою ризосферних мікроорганізмів. Електробіосистема являє собою пристрій, в якому поєднуються біологічні компоненти: рослини та ризосферні мікроорганізми та технологічні компоненти у вигляді електродів та електричного ланцюга. Як біологічні, так і технічні компоненти, такі як вид рослин, інтенсивність фотосинтезу, електродні матеріали, міжелектродна відстань, величина навантаження, мають велике значення для функціонування електробіосистем. У статті представлено дослідження впливу міжелектродної відстані на біоелектричний потенціал та силу струму біотопів ряски *Lemna minor* L. в лабораторних умовах із метою виявлення ефективних електродних схем. Було сконструйовано електробіосистеми з *L. minor*, отриманою із забруднених каналів довкола м. Львова, із природним середовищем: забрудненою водою каналів із додаванням свіжої води, в які були поміщені електроди, до яких короткочасово підключали резистори 500 Ом і 1000 Ом. Показано зростання показників біоелектрики зі скороченням відстані між електродами від 10 см до 1 см як за використання опорів, так і без застосування навантаження. Виявлений ефект позитивного впливу редукування міжелектродної відстані на силу струму та біоелектричний потенціал має велике значення для конструювання продуктивних електробіосистем із *L. minor*. Електробіосистеми з міжелектродною відстанню 1 см характеризувалися на 0,140–0,881 мА вищими показниками сили струму від електробіосистем із 10-сантиметровою міжелектродною відстанню залежно від навантаження. Виявлений ефект розкриває спосіб максимізації отримуваної біоелектрики під час конструювання електробіосистем. **Ключові слова:** відновлювана енергія, біоелектрика, електрод, електробіосистема, рослина.

Effect of interelectrode distance on bioelectric parameters of electro-biosystems. Rusyn I., Medvediev O., Diachok V.

Production of bioelectricity using plant-microbial electro-biosystems is an environmentally friendly way to obtain renewable energy without harming the environment. This method of alternative energy involves the collection of bioelectricity by placing electrodes in the area of the rhizosphere of plants, where electrons and protons transfer to the electrodes by rhizosphere microorganisms. Electro-biosystem is a device that combines biological components: plants and rhizosphere microorganisms and technological components: electrodes and electrical circuit. Both biological and technical components, such as plant species, intensity of photosynthesis, electrode materials, interelectrode distance, magnitude of load play a great role for the functioning of electro-biosystems. The article presents a study of the influence of interelectrode distance on the bioelectric potential and current of duckweed *Lemna minor* L. biotops in the laboratory in order to identify effective electrode schemes. To develop electro-biosystems with *L. minor*, duckweed were obtained from contaminated ditches around Lviv with the natural environment: water-contaminated ditches with the addition of fresh water, where electrodes were placed, to which 500 Ω m and 1000 Ω resistors were connected for a short period. The growth of bioelectricity parameters is shown with a decrease of the distance between the electrodes from 10 cm to 1 cm both when using resistors and without applying a load. The revealed effect of positive influence of interelectrode distance reduction on current and bioelectric potential is important for construction of productive electro-biosystems with *L. minor*. Electro-biosystems with an interelectrode distance of 1 cm were characterized by 0.140 - 0.881 mA higher current than electro-biosystems with a 10 cm interelectrode distance depending on the load. The effect of interelectrode distance reveals a way to maximize the obtained bioelectricity in the design of electro-biosystems. **Key words:** renewable energy, bioelectricity, electrode, electro-biosystem, plant.

Постановка проблеми. Розташування електродів в електробіотехнологіях отримання біоелектрики з біотопу рослин є важливим фактором їхньої ефективної роботи [1–3]. Нині розроблено два основні типи розміщення електродів в електробіосистемі: пластинчаста та тубулярна. Пластинчаста конфігурація передбачає розташування катодів та анодів у вертикальних чи горизонтальних площинах у зоні коріння рослин [4]. За тубулярної конфігурації катоди та аноди розташовуються циліндрично один довкола одного у зоні ризидепозиту [5; 6].

Актуальність дослідження. Планарна архітектура дає змогу зменшити внутрішній опір електробіосистеми. Необхідним є створення умов для швидшого транспортування іонів до катодної сфери, щоб зменшити внутрішній опір, тим самим збільшити продуктивність системи [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ченг та ін. [8] показали, що, зменшуючи відстань між електродами в електробіосистемі, базованій лише на мікроорганізмах, можна збільшити її потужність. Даних про взаємозв'язок міжелектродної відстані

та отримуваної біоелектрики в електробіосистемах, базованих на рослинах та мікроорганізмах, обмаль, що і стало предметом даного дослідження. Ряска мала *Lemna minor* L. була вибрана як біологічний компонент модельних електробіосистем. Її приналежність до гіматофітів та властивість не прикріплюватися коренями до ґрунту дають змогу легко змінювати положення електродів довкола плаваючих коренів рослин. Дана рослина як компонент електробіосистем є маловивченою, інший її вид представлений у небагаточисельних роботах [9].

Ряска *Lemna* L. належить до дрібних багаторічних, плавучих та занурених у воду рослин [10; 11]. Це один із найбільш поширених видів ряски в Україні, а також у всьому світі. Ряска мала зустрічається на всіх п'яти континентах, а також на океанічних островах [10–12]. Космополізм рослини та висока швидкість росту роблять її привабливим об'єктом вивчення для електробіотехнологій. Час подвоєння біомаси ряски становить лише 1.34–4.54 дні [13]. Природними біотопами *L. minor* L. є стоячі і забруднені органікою води. Ряска здатна швидко й ефективно очищувати забруднені водойми та метатенки від нітратів і фосфатів [14–16], що є додатковим плюсом як компонента електробіосистем.

Беручи до уваги важливість та маловивченість відстані між електродами і характеристики та фіторе mediaційний потенціал ряски із метою виявлення ефективних електродних схем для конструювання продуктивних електробіосистем, ми поставили перед собою завдання дослідити вплив міжелектродної відстані пластинчастої конфігурації електродної системи

на біоелектричний потенціал та силу струму модельних біотопів *Lemna minor* L у лабораторних умовах.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилися в лабораторних умовах. Для модельних електробіосистем використовувалися пластикові контейнери діаметром 120 мм та висотою 120 мм, в які поміщалися ряска *L. minor* L., отримана із забруднених каналів довкола м. Львова, у кількості 60 листків/мл та забруднена вода каналів із додаванням свіжої води як її середовище. Як електродні системи використовувалися моно-макросистеми з парою електродів [17] із такими розмірами: катоду 87 мм x 28 мм x 14 мм та аноду 78 мм x 36 мм x 1 мм. Електроди повністю занурювали у воду довкола коріння ряски на різну відстань від 100 мм до 10 мм (рис. 1).

Покази біоелектричного потенціалу реєстрували за допомогою цифрового мультиметра UT890C UNIT-T. Біоелектричний потенціал та силу струму фіксували з короткостроково під'єднаними резисторами 500 Ом і 1000 Ом та без резисторів: потенціал відкритого кола та струм короткого замикання. Густина ряски обчислювали шляхом прямого підрахунку кількості листків в 1 мл середовища. Наведені в роботі результати представлені як середнє значення для всіх повторюваних експериментів та їхні стандартні похибки ($x \pm SE$). Статистичну оцінку істотності різниці між середніми значеннями обчислено за допомогою F-тесту для 95%-го рівня достовірності.

Предметом досліджень були динамічні та залежні від міжелектродної відстані та густини популяції ряски коливання біоелектричного потенціалу та сили струму рослинно-мікробних асоціацій модельних електробіосистем.

Змінюючи міжелектродну відстань між катодом і анодом від 10 см до 1 см у рослинно-мікробних електробіосистемах, було виявлено зростання сили струму короткого замикання зі зменшенням цієї відстані, що представлено в табл. 1. Зі скороченням відстані між катодом та анодом на кожний 1 см реєстрована сила струму зростає у середньому на 0,098 мА.

Рис. 1. Схема проведення експерименту вивчення впливу міжелектродної відстані 100 мм на біоелектричний потенціал популяції ряски, де R – резистор, V – вольтметр, P – рослина, K – катод, A – анод

Таблиця 1
Вплив міжелектродної відстані на силу струму короткого замикання модельної електробіосистеми з ряскою ($x \pm SE$, $n=10$)

Міжелектродна відстань, см	Струм короткого замикання, мА
10	2,081±0,033
9	2,175±0,065
8	2,284±0,079
7	2,325±0,102
6	2,430±0,085
5	2,524±0,072
4	2,610±0,061
3	2,716±0,074
2	2,801±0,065
1	2,962±0,077

Ефект позитивного впливу редукування міжелектродної відстані на силу струму та біоелектричний потенціал проявлявся також за короткочасового підключення резисторів 500 Ом та 1000 Ом. Як видно з рис. 2, за підключення резистора 500 Ом за відстані 1 см між катодом і анодом можна було зареєструвати вищу силу струму, ніж коли відстань між ними становила 10 см. Подібно зростає біоелектричний потенціал за зменшення міжелектродної відстані за навантаження 500 Ом (рис. 3) та 1000 Ом (рис. 4). Біоелектричний потенціал зростає на 0,089 В за скорочення міжелектродної відстані з 10 см до 5 см та на 0,092 В зі зменшенням відстані з 5 см до 1 см за короткочасового підключення резистора 500 Ом. Під час застосування резистора 1000 Ом ця різниця була менш вираженою: біоелектричний потенціал зростає на 0,012 В та 0,010 В (рис. 4).

Очевидно, зменшення відстані між електродами створює оптимальні умови для більш повного та швидшого транспорту електронів до аноду та протонів до катоду. Менша міжелектродна відстань знижує контакти з мікроорганізмами – конкурентами електронів та протонів. Ще однією причиною виявленого ефекту може бути взаємозв'язок опору та струму. Зменшення відстані між електродами призводить до зменшення внутрішнього опору, результатом якого є збільшення сили струму. Як зазначено в роботах [19; 20], відстань між електродами в мікробних електробіосистемах повинна бути якомога ближчою, щоб подолати втрати біоелектрики. У дослідженнях із мікробними електробіосистемами [21] було показано, що електробіосистеми з електродами, розміщеними на відстані 10 см, показують вищі показники біоелектрики, ніж ті, що розміщені на відстані 12 та 15 см. Оскільки принцип роботи як мікробних, так і мікробно-рослинних електробіосистем є спільним, як показують наші результати, даний принцип та схема є ефективними і для рослинно-мікробних електробіосистем.

Під час застосування резисторів отримувана сила струму знижується та біоелектричний потенціал дещо зростає. За низьких опорів у ланцюгу електробіосистеми існує інтенсивніший потік електронів порівняно з більш високими опорами, більш активно відбувається субстратний метаболізм, коли мікроорганізми віддають електрони на анод [21]. Електрони володіють швидшою міграцією за менших опорів, аніж за більш високих опорів, і це, своєю чергою, збільшує окислення на аноді [21]. Вироблення струму зменшується, а напруга незначно збільшується в міру збільшення опору [21; 22].

Рослинно-мікробна електробіосистема генерує біоелектричну енергію завдяки мікробному окисленню органічних продуктів як рослинного походження, так і складників субстрату, яку можна

ВПЛИВ МІЖЕЛЕКТРОДНОЇ ВІДСТАНІ...

Рис. 2. Вплив міжелектродної відстані на силу струму електробіосистеми з *L. minor* за короткочасового навантаження 500 Ом ($x \pm SE$, $n = 5$)

Рис. 3. Вплив міжелектродної відстані на біоелектричний потенціал електробіосистеми з *L. minor* за короткочасового навантаження 500 Ом ($x \pm SE$, $n = 5$)

Рис. 4. Вплив міжелектродної відстані на біоелектричний потенціал електробіосистеми з *L. minor* за короткочасового навантаження 1000 Ом ($x \pm SE$, $n = 5$)

зібрати завдяки електродам. Електробіосистему можна розглянути як гібридний біоелектрохімічний пристрій [21], тому як міжелектродна відстань, так і величина навантаження мають велике значення для його функціонування.

Головні висновки. Для конструювання продуктивних електробіосистем з *L. minor* ефективними є електродні системи з міжелектродною відстанню

1 см та навантаженням 500 і 1000 Ом. Зі скороченням міжелектродної відстані зростають отримувані біоелектричні параметри модельних електробіосистем у лабораторних умовах. Ефект позитивного впливу редукування міжелектродної відстані на силу струму та біоелектричний потенціал проявлявся як за короткочасового підключення резисторів 500 Ом та 1000 Ом, так і без застосування навантаження.

Література

- Kalathil S., Patil S.A., Pant D. Microbial Fuel Cells: Electrode materials/ K. Wandelt, P. Vadgama . Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface science and Electrochemistry. Amsterdam : Elsevier, 2017. 5560 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-409547-2.13459-6.
- Nitisoravut R., Regmi R. Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 76. P. 81–89. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.064.
- Kabutey F.T., Zhao Q., Wei L., Ding J., Antwi P., Quashie F.K., Wang W. An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 110 (C). P. 402–414. DOI: 10.1016/j.rser.2019.05.016.
- Helder M., Strik D.P.B.T.B., Hamelers H.V.M., Buisman C.J.N. The flat-plate plant microbial fuel cell: The effect of a new design on internal resistances. *Biotechnology for Biofuels*. 2012. Vol. 5. 70. DOI: 10.1186/1754-6834-5-70.
- Timmers R.A., Strik D.P., Hamelers H.V., Buisman C.J. Electricity generation by a novel design tubular plant microbial fuel cell. *Biomass & Bioenergy*. 2013. Vol. 51. P. 60–67. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.01.002.
- Wetser, K., Dieleman, K., Buisman, C., & Strik, D.P.B.T.B. Electricity from wetlands: Tubular plant microbial fuels with silicone gas-diffusion biocathodes. *Applied Energy*. 2017. Vol. 185. P. 642–649. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.122.
- Sleutels T.H.J.A., Hamelers H.V.M., Rozendal R.A., Buisman C.J.N. Ion transport resistance in microbial electrolysis cells with anion and cation exchange membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34. P. 3612–3620. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.03.004.
- Cheng S., Liu H., Logan B.E. Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science & Technology*. 2006. Vol. 40. P. 2426–2432. DOI: 10.1021/es051652w.
- Hubenova Y., Mitov M. Conversion of solar energy into electricity by using duckweed in direct photosynthetic plant fuel cell. *Bioelectrochemistry*. 2012. Vol. 87. P. 185–191. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2012.02.008.
- Landolt E. *The family of Lemnaceae. A monograph study / Biosystematic investigation on the family of duckweeds*. Zurich: Geobotanischen Institute, 1986. P. 566.
- Lemna minor* L. – ряска маленькая / И.А. Губанов и др. *Иллюстрированный определитель растений Средней России* : в 3-х т. Москва : Т-во науч. изд. КМК, Институт технологических исследований, 2002. Т. 1. С. 409.
- Ceschin S., Abati S., Ellwood N.T.W., Zuccarello V. Riding invasion waves: spatial and temporal patterns of the invasive *Lemna minuta* from its arrival to its spread across Europe. *Aquatic Botany*. 2018. Vol. 150. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.aquabot.2018.06.002.
- Ziegler P., Adelmann K., Zimmer S., Schmidt C., Appenroth K.J. Relative in vitro growth rates of duckweeds (Lemnaceae) – the most rapidly growing higher plants. *Plant Biol*. 2014. Vol. 17. P. 33–41. DOI: 10.1111/plb.12184.
- Cheng J., Landesman L., Bergmann B.A., Classen J.J., Howard J.W., Yamamoto Y.T. Nutrient removal from swine lagoon liquid by *Lemna minor* 8627. *Trans ASAE*. 2002. Vol. 45. P. 1003–1010.
- Iqbal J., Javed A., Baig M.A. Growth and nutrient removal efficiency of duckweed (*lemna minor*) from synthetic and dumpsite leachate under artificial and natural conditions. *PLoS One*. 2019. Vol. 14. № 8. e0221755. DOI: 10.1371/journal.pone.0221755.
- Ceschin S., Crescenzi M., Iannelli M.A. Phytoremediation potential of the duckweeds *Lemna minuta* and *Lemna minor* to remove nutrients from treated waters. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 15806–15814. DOI: 10.1007/s11356-020-08045-3.
- Русин І.Б., Медведєв О.В. Спосіб отримання біологічної електрики з глибинних шарів ґрунту: пат. 112093 Україна: МПІК 2016.01, H05F 7/00, H01M 8/16; заявл. 9.03.2016; опубл. 12.12.2016. Бюл. № 23. 5 с.
- Strik D.P.B.T.B., Hamelers H.V.M., Snel J.F.H., Buisman C.J. *International Journal of Energy Research*. 2008. Vol. 32. № 9. P. 870–876. DOI: 10.1002/er.1397.
- Jang J.K., Pham T.H., Chang I.S., Kang K.H., Moon H., Cho K.S., Kim B.H. Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. *Process Biochemistry*. 2004. Vol. 39. P. 1007–1012.
- Hadagali A., Shalini R., Pratima B. Comparative studies on electrodes for the construction of microbial fuel cell. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. 2012. Vol. 3. № 4. P. 785–789.
- Sangeetha T., Muthukumar M. Influence of electrode material and electrode distance on bioelectricity production from sago-processing wastewater using microbial fuel cell. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2013. Vol. 32, № 2. P. 390–395. DOI: 10.1002/ep.11603
- Venkata Mohan S., Saravanan R., Veer Raghavulu S., Mohanakrishna G., Sarma P.N. Bioelectricity production from wastewater treatment in dual chambered microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched microflora: Effect of catholyte. *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99. P. 596–603. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.12.026.