

КОНСТРУЮВАННЯ МУЛЬТИЕЛЕКТРОДНИХ ЕЛЕКТРО-БІОСИСТЕМ З *LEMNA MINOR*

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

¹Національний університет «Львівська Політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, 79013, м. Львів

²Філія «Науково-дослідний інститут автомобілебудування «Еталон»
вул. Городоцька, 174, 79022, м. Львів
rib7@i.ua, mov2@ukr.net

Конструювання мультиелектродних електро-біосистем є ефективною стратегією у досягненні високих значень електропродуктивності мікробних електро-біосистем та малодослідженим способом для рослинно-мікробних паливних елементів. Біотехнологія рослинно-мікробних електро-біосистем є молодію науковою галуззю, що відокремилася в 2008 році від біотехнології мікробних електро-біосистем. Електро-біосистеми, базовані на рослинах, генерують біоелектрику завдяки електроактивним мікроорганізмам ризосфери рослин. Утилізуючи органічні фотосинтетанти та сполуки субстрату, вони передають електрони і протони на електроди, в результаті чого продукується біоелектрика. Вивчення стекування мультиелектродних модулів рослинно-мікробних електро-біосистем є важливим кроком для підвищення їх потужності. У статті вивчено мультиелектродні електро-біосистеми, базовані на *Lemna minor*, та досліджено вплив на біоелектричні параметри їх стекування шляхом послідовного з'єднання. Сконструйовано ефективні одиничні мультиелектродні електро-біосистеми з *L. minor* із середнім вольтажем відкритого кола 0,983 В та 1,170 В відповідно для 4- та 8-електродних електро-біосистем. 4-електродна електро-біосистема виявилася більш економічно вигідною за 8-електродну, оскільки при у 2 рази нижчих затратах на електродні матеріали демонструвала лише в 1,2 рази нижчі біоелектричні параметри для цього об'єму електро-біосистеми. У результаті стекування 7 бюджетних та компактних 4-електродних електро-біосистем шляхом їх послідовного з'єднання досягнуто зростання біоелектричного потенціалу до 6,001 В, при цьому сила струму короткого замикання залишилася на вихідному рівні. Конструювання мультиелектродних електро-біосистем та їх послідовне з'єднання є перспективним способом подолання проблеми низької потужності, способом підвищення їх біоелектричних параметрів та вагомим кроком до широкомасштабного впровадження водних рослинно-мікробних електро-біосистем, базованих на *L. minor*. *Ключові слова*: відновлювана енергія, біоелектрика, електрод, електро-біосистема, рослина.

Design of multi-electrode electro-biosystems with *Lemna minor*. Rusyn I., Medvediev O., Djachok V.

The design of multi-electrode electro-biosystems is an effective strategy in achieving of high values of electrical productivity of microbial electro-biosystems and a little-studied method for plant-microbial fuel cells. Biotechnology of plant-microbial electro-biosystems is a young scientific field that separated in 2008 from the biotechnology of microbial electro-biosystems. Plant-based electro-biosystems generate bioelectricity through electro-active microorganisms of the plant rhizosphere. By utilizing organic photosynthetants and substrate compounds, they transfer electrons and protons to the electrodes, resulting in bioelectricity. The study of the stacking of multi-electrode modules of plant-microbial electro-biosystems consider as an important step to increase their capacity. In this paper, we studied multielectrode electro-biosystems based on *Lemna minor* and investigated the effect on bioelectric parameters of their stacking by series connection. Efficient single multi-electrode electro-biosystems with *L. minor* with an average open-circuit voltage of 0.983 V and 1.170 V, were designed, for 4- and 8-electrode electro-biosystems, respectively. The 4-electrode electro-biosystem proved to be more cost-effective than the 8-electrode one, because at 2 times lower costs for electrode materials it showed only 1.2 times lower bioelectric parameters for a given volume of the electro-biosystem. As a result of stacking of 7 budget and compact 4-electrode electro-biosystems by their series connection, an increase in the bioelectric potential to 6,001 V was achieved, while the short-circuit current remained at the initial level. The design of multi-electrode electro-biosystems and their serial connection is a promising way to overcome the problem of low power, a way to increase their bioelectric parameters and a significant step towards large-scale introduction of aquatic plant-microbial electro-biosystems based on *L. minor*. *Key words*: renewable energy, bioelectricity, electrode, electro-biosystem, plant.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. Стекування електро-біосистем, базованих на мікроорганізмах, у мультиелектродні електро-біосистеми є вагомим способом підвищення їх ефективності й отримання високих значень електропродуктивності та водночас малодослідженим питанням у галузі рослинно-мікробних паливних елементів. Ефективність об'єднання модулів мікробних електро-біосистем, енергоефективність яких була пропорційною до кількості використуваних одиничних систем, було досліджено [1, 2],

продемонстровано ефекти паралельного та послідовного їх з'єднання [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перші дослідження об'єднання рослинно-мікробних електро-біосистем представлені в роботах [4–6]. Десять електро-біосистем із мохами були з'єднані в один комплекс для досягнення вищих значень біоелектричних параметрів [4]. Три контейнери з рослинами *A. africanus* та електродними системами були послідовно з'єднані, в результаті чого біоелектричний потенціал зріс в 1,88 рази [6]. Можливість

використання мультиелектродних електро-біосистем з рослинами була показана в роботах [7, 8].

Мета та завдання дослідження. Беручи до уваги актуальність проблеми, недостатній рівень її вивчення та великі перспективи стекування одиничних електро-біосистем для підвищення їх енергоефективності, ми поставили перед собою завдання розробити ефективну та бюджетну одиничну мультиелектродну електро-біосистему з *L. minor* та дослідити стекування шляхом послідовного з'єднання її 7 модулів в лабораторних умовах із метою підвищення біоелектричних параметрів.

Виклад основного матеріалу.

Методи дослідження. Для проведення експериментів було сконструйовано 4-електродні та 8-електродні електро-біосистеми з *Lemna minor* L., які містилися в контейнерах об'ємом 700 мл із розмірами 120 мм x 95 мм x 60 мм. Схема розташування електродних систем у контейнерах наведена на рис. 1. У кожен контейнер поміщали 200 г піщаного субстрату, отриманого з дна ставка, 600 мл води зі ставка із додаванням свіжої водопровідної води

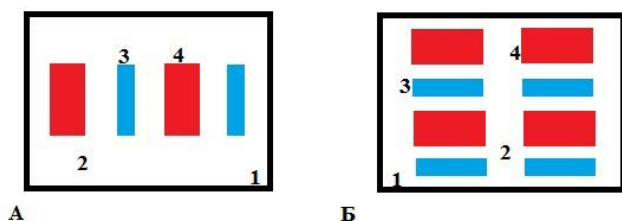


Рис. 1 Схема розташування електродів у 4-електродній (А) та 8-електродній (Б) електро-біосистемах з *L. minor*:

1 – контейнер, 2 – субстрат, 3 – анод, 4 – катод

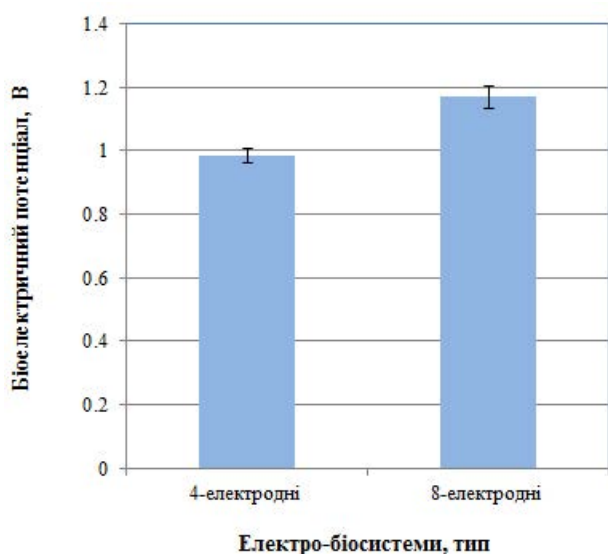


Рис. 2. Вплив збільшення кількості електродів з 4 до 8 на біоелектричний потенціал електро-біосистеми з *L. minor* ($x \pm SE$, $n=5$)

та рослину ряску *L. minor*, отриману із забрудненого ставка поблизу м. Львова в кількості 60 листків/мл у поверхневому шарі. Як електродні системи використовувалися пари електродів [9]: катод 87 мм x 28 мм x 14 мм та анод 78 мм x 36 мм x 1 мм. Електроди занурювали у субстрат в зону коріння рослин.

Дроти, що виходили з катодів на поверхню, об'єднували між собою, аналогічно об'єднували дроти від анодів. Електро-біосистеми розміщували біля вікон, де вони отримували природне освітлення.

Покази біоелектричного потенціалу відкритого кола та силу струму короткого замикання реєстрували за допомогою цифрового мультиметра UT890C UNIT-T. 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 їх 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 показники біоелектричного потенціалу і сили струму 4- та 8-електродних електро-біосистем з *L. Minor*, як одиничних систем, так і у разі їх стекування.

Результати дослідження та їх обговорення. Для розроблення ефективної та бюджетної одиничної мультиелектродної електро-біосистеми з *L. minor* та визначення впливу кількості електродів на біоелектричні параметри нами було сконструйовано 4-електродну та 8-електродну електро-біосистеми. У разі збільшення кількості електродів вдвічі біоелектричний потенціал зростав на 0,187 В (рис. 2), а сила струму зростала на 1,311 мА (рис. 3). Незначне зростання біоелектричних показників за збільшення кількості електродів до 8, очевидно, пов'язано з майже оптимальною площею електродів на

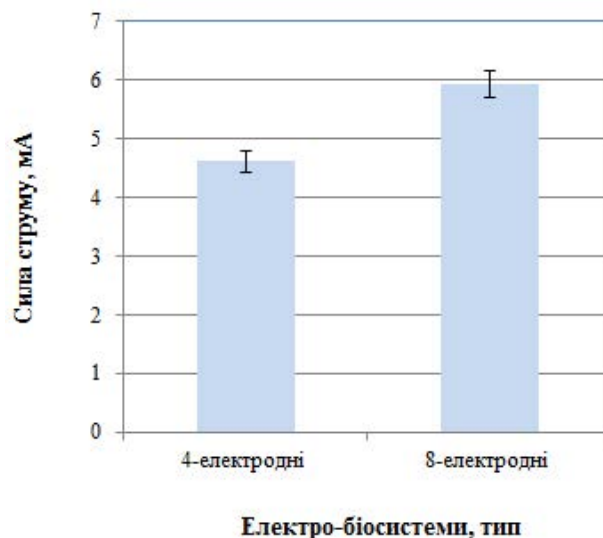


Рис. 3. Вплив збільшення кількості електродів з 4 до 8 на силу струму електро-біосистем з *L. minor* ($x \pm SE$, $n=5$)

цей об'єм електро-біосистеми у разі 4-електродної електро-біосистеми.

Хоча 8-електродна електро-біосистема характеризувалася суттєво вищими значеннями біоелектрики ($P < 0.05$), перевищування становило лише 1,2 раза. Враховуючи те, що при цьому для її конструювання використано в 2 рази більше електродів, 4-електродну електро-біосистему було обрано як більш бюджетну й ефективну одиничну мультиелектродну електро-біосистему з *L. minor* для подальших експериментів зі стекуванням.

Послідовне стекування 7 одиничних 4-електродних електро-біосистем привело до зростання біоелектричного потенціалу в 6,10 раза (рис. 4).

Біоелектричний потенціал піднявся з 0,983 В до 6,001 В. Аналогічні тренди зафіксовані у роботах із ґрунтовими електро-біосистемами з рослинами при послідовному з'єднанні 3 електро-біосистем, базованих на *A. africanus*, де показано ріст біоелектричного потенціалу з 0,690 В до 1,300 В [6], та *S. palustris*, де показано ріст потенціалу з 1,1 В до 3,23 В [8]. Водночас послідовне з'єднання не мало впливу на струм короткого замикання, який залишився на вихідному рівні, як показано також для електро-біосистем, базованих на мікроорганізмах [3] та рослинах і мікроорганізмах [5, 8].

Головні висновки. Сконструйовано компактні мультиелектродні 4- та 8-електродні водні електро-біосистеми, базовані на *L. Minor*; із середнім воль-

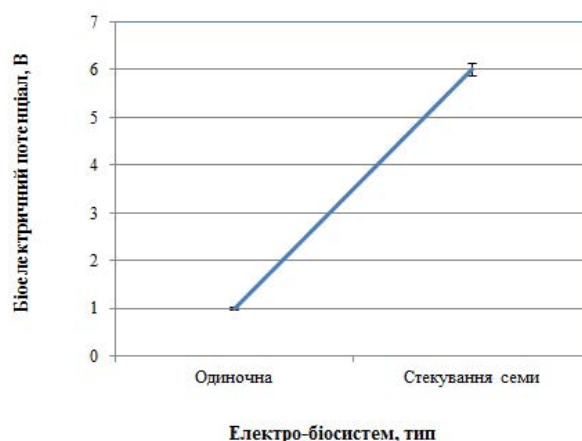


Рис. 4. Вплив послідовного стекування 7 одиничних 4-електродних електро-біосистем з *L. minor* на біоелектричні параметри ($x \pm SE$, $n=5$)

тажем відкритого кола 0,983 В та 1,170 В відповідно. Стекування шляхом послідовного з'єднання 7 бюджетних 4-електродних електро-біосистем дозволило досягнути зростання біоелектричного потенціалу в 6,10 раза. Виявлений ефект стекування 4-електродних електро-біосистем відкриває можливість для підвищення значень біоелектричного потенціалу для водних електро-біосистем, базованих на рясці, без потреби у надмірному збільшенні площ та кількості електродів.

Література

1. Ieropoulos I.A., Stinchcombe A., Gajda I., Forbes S., Merino-Jimenez I., Pasternak G., Sanchez-Herranz D., Greenman J. Pee power urinal – microbial fuel cell technology field trials in the context of sanitation. *Environmental Science: Water Research Technology*. 2016. Vol. 2. P. 336–343. doi: 10.1039/C5EW00270B
2. Walter X.A., Merino-Jiménez I., Greenman J., Ieropoulos I. PEE POWER® urinal II – Urinal scale-up with microbial fuel cell scale-down for improved lighting. *Journal of Power Sources*. 2018. Vol. 15. № 392. P. 150–158. doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.02.047
3. Aelterman P., Rabaey K., Pham H.T., Boon N., Verstraete W. Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Environmental Science Technology*. 2006. Vol. 40, № 10. P. 3388–3394. doi: org/10.1021/es0525511
4. Bombelli P., Dennis R.J., Felder F., Cooper M.B., Iyer D.M.R., Royles J., Harrison S.T., Smith A.G., Harrison C.J., Howe C.J. Electrical output of bryophyte microbial fuel cell systems is sufficient to power a radio or an environmental sensor. *Royal Society Open Science*. 2016. Vol. 3, 160249. doi: org/10.1098/rsos.160249
5. Pamintuan K.R.S., Clomera J.A.A., Garcia K.V., Ravara G.R., Salamat E.J.G. Stacking of aquatic plant-microbial fuel cells growing water spinach (*Ipomoea aquatica*) and water lettuce (*Pistia stratiotes*) / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 191, 012054. The 4th International Conference on Water Resource and Environment (WRE 2018) 17–21 July 2018, Kaohsiung City, Taiwan. Kaohsiung City: IOP Publishing. doi: 10.1088/1755-1315/191/1/012054(2018)
6. Gomora-Hernandez J.C., Serment-Guerrero J.H., Carreno-de-Leon M.C., Flores-Alamo N. Voltage production in a plant-microbial fuel cell using *Agapanthus africanus*. *Revista Mexicana de Ingenieria Quimica*. 2020. Vol. 19, № 1. P. 227–237. doi: 10.24275/rmiq/IA542
7. Pamintuan K.R.S., Reyes C.S.A., Lat D.K.O. Compartmentalization and polarization studies of a Plant-Microbial Fuel Cell assembly with *Cynodon dactylon*. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 181, № 01007. doi: 10.1051/e3sconf/202018101007
8. Rusyn I.B., Medvediev O.V., Valko V.T. Enhancement of bioelectric parameters of multi-electrode plant-microbial fuel cells by combining of serial and parallel connection. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2021. Vol. 18, № 6. P. 1323 – 1334. doi: 10.1007/s13762-020-02934-3
9. Русин І.Б., Медведєв О.В. Спосіб отримання біологічної електрики з глибинних шарів ґрунту: пат. 112093 Україна: МПК 2016.01, H05F 7/00, H01M 8/16; заявл. 9.03.2016; опубл. 12.12.2016. Бюл. № 23. 5 с.