

УДК 579.088; 158.54

БІОПАЛИВНІ ЕЛЕМЕНТИ. СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ В УКРАЇНІ

Є.В.Кузьмінський, К.О.Щурська

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", пр. Перемоги 37, 4 корпус, к.182., Київ, 03056, Україна

В роботі розглянуто сучасний стан розроблення і перспективи розвитку в Україні таких біоелектрохімічних систем як мікробні паливні елементи – електрохімічних пристроїв, в яких за допомогою мікроорганізмів здійснюється пряме перетворення хімічної енергії різноманітних органічних речовин (вуглеводів, жирів, білків та ін.) в електричну енергію чи біоводень в результаті біохімічних трансформацій. Розглянуто основні здобутки наукових колективів України, які досліджують біоелектрохімічні системи. Бібл. 10, рис. 1.

Ключові слова: відновлювана енергетика, біоелектрохімічна система, екзоелектрогени, мікробний паливний елемент.

BIOFUEL CELLS. CURRENT STATE AND PERSPECTIVES OF DEVELOPMENT IN UKRAINE

Kuzminskiy Y., Doctor of Science, Professor Shchurska K., PhD

Department of Environmental Biotechnology and Bioenergy National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prosp. Peremohy, Kyiv, Ukraine.

The current state of microbial fuel cells and prospects of development in Ukraine are reviewed in the work. Microbial fuel cells are electrochemical devices in which microorganisms directly convert the chemical energy of various organic substances (carbohydrates, fats, proteins, etc.) into electrical energy or biohydrogen as a result of biochemical transformations. The main achievements of research teams of Ukraine that are investigating bioelectrochemical systems are considered. References 10, fig. 1.

Key words: renewable energy, bioelectrochemical system, exoelectrogens, microbial fuel cell



Кузьмінський Є.В.
Kuzminskiy Y.V.

Завідувач кафедри екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доктор хімічних наук, професор, член Академії технологічних наук України, Американського та Міжнародного електрохімічних товариств, Нью-Йоркської академії наук, наукової ради НАН України з проблеми "Електрохімія". Автор більше 230 наукових публікацій та 30 патентів.

ORCID: 0000-0002-5632-8297

Head of the Department of environmental biotechnology and bioenergy of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Doctor of Chemical Sciences, Professor, Member of the Academy of Technological Sciences of Ukraine, American and International Electrochemical Societies, New York Academy of Sciences, Scientific Council of the National Academy of Sciences of Ukraine on the problem "Electrochemistry". The author has over 230 scientific publications and 30 patents.

ORCID: 0000-0002-5632-8297



Щурська К.О.
Shchurska K.O.

Доцент кафедри екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", кандидат технічних наук, лауреат Премії Верховної Ради України найталановитішим молодим ученим в галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок. Автор більше 20 наукових праць.

ORCID: 0000-0003-4440-3365

Associate Professor of the Department of environmental biotechnology and bioenergy of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", candidate of technical sciences, laureate of the Award of the Parliament of Ukraine for the most talented young scientist in the field of fundamental and applied researches and scientific and technical developments. Author of more than 20 scientific works.

ORCID: 0000-0003-4440-3365

Вступ. Сьогодні практично всі розуміють, наскільки актуально виникають питання енергозабезпечення, раціонального використання природних ресурсів та збереження довкілля. Оскільки взаємини цивілізації та біосфери на початку третього тисячоліття взагалі розглядаються як протидії двох багатьох в чому невід'ємних і різноманітних світів, зокрема: "світу людини" та "світу природи". Саме екологічні біотехнології, як технології що базуються на використанні законів розвитку живої природи, можуть стати одним з тих засобів, завдяки яким людство має зменшити техногенне навантаження на біосферу, підтримати безпечні умови свого існування та отримати в достатній кількості енергію принципово нового походження [9].

Сучасні перетворювачі хімічної енергії в електричну у вигляді паливних елементів та інших подібних пристроїв ще не в змозі задовольнити техніку XXI сторіччя, але можна стверджувати з високою вірогідністю, що вони вказують нам принципову можливість вирішення енергетичних проблем. І те, що при зіставленні біоелектрохімічних методів перетворення енергії в біологічних системах з її електрохімічним чи біоелектрохімічним перетворенням у рукотворному паливному чи біопаливному елементі (БПЕ) так багато спільного, свідчить про те, що обраний напрямок є вельми перспективним у вирішенні енергетичних проблем. Особливу зацікавленість становлять мікробні паливні елементи (МПЕ) – різновид біопаливних елементів, в яких відбувається генерування електричної енергії при утилізації органічних сполук бактеріями-екзоелектрогенами. Окрім генерування електричної енергії можливе також і продукування водню в іншому типі біопаливного елемента, а саме в біоелектрохімічних системах (БЕХС). Такі системи здатні за використання мікроорганізмів перетворювати безпосередньо енергію хімічних зв'язків органічних молекул у найбільш ефективно використовувану електричну енергію чи біоводень. Їхніми перевагами є можливість використання стічних вод як палива для функціонування БЕХС, оскільки стічні води з високою концентрацією органічних сполук є відновлюваним ре-

сурсом для одержання електричної енергії чи газоподібного водню [4, 10].

Постановка завдання. Метою даної роботи є огляд сучасного стану досліджень в галузі біопаливних елементів в Україні, а також визначення перспектив їхнього подальшого розвитку.

Сучасний стан розвитку БПЕ в Україні. Біопаливні елементи здатні вирішувати окрім енергетичних і екологічних проблеми переробки відходів, адже мікроорганізми мають здатність адаптуватись до навколишнього середовища. Оскільки необхідною умовою життєдіяльності усіх мікроорганізмів є водне середовище, тобто стоки, які містять органічні забруднення, є найбільш привабливим об'єктом для впровадження задекларованого підходу. Нагальна потреба утилізації та раціонального використання відходів органічного походження, а також інтенсивний пошук альтернативних джерел енергії, є важливим стимулом до широкомасштабних досліджень у галузі БПЕ. Особливо необхідно наголосити, що їх окупність буде визначатись не тільки напрацьованою електроенергією, але й витратами на очищення стоків. Так, наприклад, професор Brus E. Logan з Пенсільванського університету впевнений, що масштабне використання БПЕ для очищення стічних вод з одночасним отриманням електричної енергії дозволить США щорічно економити близько 25 млрд. доларів [6].

Біоелектрохімічний спосіб одержання енергоносіїв, який може бути реалізований в БПЕ, є абсолютно новим трендом для виробництва відновлюваної енергії з одночасним очищенням стічних вод. В МПЕ мікроорганізми окиснюють органічні речовини і переносять електрони безпосередньо на анод. Бактерії, здатні до переносу електронів на електрод безпосередньо або через ендогенно виділені медіатори, включають цілу низку видів, зокрема *Geobacter*, *Shewanella*, *Pseudomonas* та ін. Електрони переносяться на катод, виконуючи при цьому корисну роботу, де вони з'єднуються з киснем і протонами з подальшим утворенням води. Такий процес відбувається в традиційних МПЕ.

Окрім того, виділені в процесі окиснення органічних сполук протони і електрони можна

рекомбінувати в молекулярний водень. Для цього необхідно створити повністю анаеробні умови в МПЕ та прикласти додаткову напругу на катод, адже підвищення катодного потенціалу в електричному колі МПЕ дозволяє безпосереднє продукування водню з протонів та електронів, що виробляються бактеріями. Така модифікація традиційного МПЕ значно знижує енергетичні потреби для виробництва водню з органічних речовин, порівняно з виробництвом водню з води шляхом електролізу [3].

Принципово новим напрямком у розвитку мікробних паливних елементів є фотоелектрохімічні мікробні паливні елементи (ФМПЕ) [2, 8]. Фотоелектрохімічні мікробні паливні елементи є поєднанням фотоелектрохімічних ПЕ та власне МПЕ. Такий пристрій визначає собою ПЕ, у якому анод колонізований мікроорганізмами, які мають здатність до електрогенезу, а катод виготовлений з напівпровідника *p*-типу і є активним при опроміненні сонячним світлом. Використання напівпровідникового фотокатода сприяє процесу передачі електронів від мікроорганізмів у зовнішнє електричне коло ФМПЕ, а при відпові-

дному підборі напівпровідника, за анаеробних умов, дозволяє отримувати водень без додаткового прикладання напруги.

Останніми роками тематика БПЕ отримала новий потужний імпульс, обумовлений зростаючим інтересом до виробництва так званої "зеленої" (або екологічної) електроенергії, так як мікроорганізми здатні використовувати як паливо практично весь спектр органічних речовин, у тому числі різноманітні відходи. Так, згідно з даними авторів оглядової англійської статті [7], кількість публікацій з тематики МПЕ за останнє десятиліття стрімко зросла на порядок – зі 100 публікацій у 2006 році до 1020 у 2016 році, цитування – з 2000 до 32000, відповідно (див. Рис. 1а та б); для біоелектрохімічних систем: публікації з 15 до 280 публікацій за ті ж 10 років, цитування – з 200 до 5500, відповідно (див. Рис. 1с та d). Нажаль, хоча цей огляд і нараховує близько 500 посилань, неанглійські публікації українських вчених не наводяться, що і послугувало однією з мотивацій для підготовки цієї публікації щодо напрацювань вітчизняних вчених з тематики БПЕ.

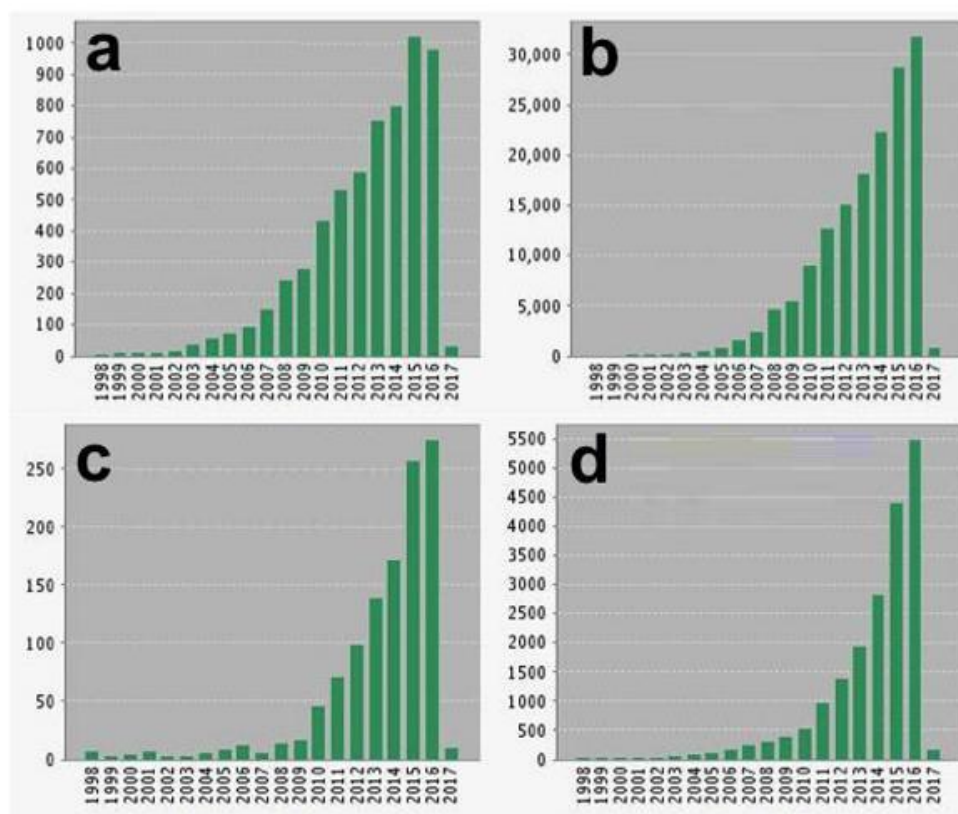


Рис.1. Кількісний аналіз наукової літератури з мікробних паливних елементів та біоелектрохімічних систем [7].

За цей же період часу за тематикою мікробних паливних елементів та біоелектрохімічних систем співробітниками кафедри екобіотехнології та біоенергетики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" було видано 3 монографії (Кузьмінський Є.В. та ін. Нетрадиційні електрохімічні системи перетворення енергії. Фото-, термо- та біопаливні елементи; Кузьмінський Є.В. та ін. Біоелектрохімічне продукування електричної енергії та водню; Y. Kuzminskiy et al. Bioelectrochemical hydrogen and electricity production. Theoretical bases, description and modeling of the process); 33 статті та близько 40 тез доповідей. Окрім того за керівництва проф. Кузьмінського Є.В. було підготовлено і захищено 2 кандидатські дисертації: у 2014 році Щурською К.О. на тему: "Обґрунтування параметрів біотехнологічного процесу отримання водню", у 2016 р. Самарухою І.А. на тему: "Біоелектрохімічне отримання електричної енергії за використання асоціації хемоорганотрофних мікроорганізмів", Зубченко Л.С. підготовлено до захисту у 2018 р. дисертацію на тему: "Отримання водню в біоелектрохімічних системах с фотокатодом"; Н.Б. Голуб у 2015 році захищена докторська дисертація на тему: "Науково-технологічні основи конверсії відновлюваної сировини в біоводень, біометан та біодизель", в якій також розглядаються БПЕ.

Дослідженнями процесів генерування електричного струму чистими культурами *Desulfuromonas Acetoxidans* IMV B-7384 займається також група вчених з кафедри мікробіології Львівського національного університету імені Івана Франка (Білий О. І., Василів О. М., Гнатуш С. О., Катерняк С., Масловська О. Д., Ференсович Я. П. та ін.). Особливістю їхніх досліджень є вивчення процесів генерування електричної енергії в МПЕ з чистими культурами. Зокрема, багато робіт присвячено дослідженням метаболізму бактерій *Desulfuromonas acetoxidans*, які є типовими представниками екзоелектрогенів, при внесенні різних сполук (як ферум (III) цитрату, фуксину і метиленового синього тощо) у реакційне середовище [5]. За результатами досліджень цієї групи учених було захищено ряд кандидатських

дисертацій. Зокрема у 2013 році Василів О. М. на тему: "Вплив солей перехідних металів 3d-типу на фізіолого-біохімічні властивості бактерій *Desulfuromonas acetoxidans*", у 2017 році Масловська О. Д. на тему: "Антиоксидантний захист і жирнокислотний склад *Desulfuromonas acetoxidans* IMV B-7384 за впливу ферум (III) цитрату", в яких розглянуто особливості метаболізму такого екзоелектрогену, як *Desulfuromonas acetoxidans*.

На превеликий жаль, інших досліджень в цій галузі в Україні більше не ведеться. В країні, яка є енергозалежною та має проблеми утилізації стічних вод, не проводяться дослідження з виробництва енергоносіїв за рахунок МПЕ. Як приклад низької зацікавленості в такому питанні є статистичні дані з кількості завантаження розділу Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment підручника Waste Water – Treatment and Reutilization [1]. Так, починаючи з 2011 року цей розділ було завантажено 2197 разів користувачами з США, 602 рази користувачами з Індії, в той час як з України всього 20 разів.

Такий низький інтерес можна пояснити недостатнім фінансуванням наукових досліджень у цій області, адже вивчення процесів генерування електрики в біоелектрохімічних системах на даному етапі передбачає використання дороговартісних матеріалів та обладнання.

Перспективи розвитку досліджень БПЕ в Україні. Подальший розвиток досліджень у цій галузі саме в Україні можливий за умови тісної співпраці фахівців з мікробіології, електрохімії, біотехнології та технологій водоочищення при достатньому фінансуванні. Багатообіцяючою є концепція БПЕ, за використання яких колосально розширюється спектр палива, що може бути спожите. Мікробні паливні елементи, які працюють на забруднених водах, в яких як окисник використовується розчинений кисень повітря, а органічні домішки як паливо, дадуть змогу одночасно вирішити дві важливі для України проблеми – енергозабезпечення та охорони довкілля.

Висновки. Нагальна потреба утилізації та раціонального використання відходів органічного походження, а також інтенсивний пошук альтернативних джерел енергії, є важливим стиму-

лом до широкомасштабних досліджень у галузі БПЕ. Особливо необхідно наголосити, що їх окупність буде визначатись не тільки напрацьованою електроенергією, але й витратами на очищення стоків. Тому головною метою цієї публікації є спроба залучити до опрацювання цих велими перспективних пристроїв більш широкого кола вітчизняних науковців.

1. *Einschlag F. S. G. Waste Water – Treatment and Reutilization / F. S. G. Einschlag. – Rijeka: InTech, 2011. – 446 p. ISBN 978-953-307-249-4.*

2. *Fang Q. Solar-Driven Microbial Photoelectrochemical Cells with a Nanowire Photocathode / Q. Fang, W. Gongming, L. Yat // Nano Lett. –2010. – № 10. – P. 4686–4691.*

3. *Kuzminskiy Y. Bioelectrochemical hydrogen and electricity production of Theoretical bases, description and modeling of the process / Y. Kuzminskiy, K. Shchurska, I. Samarukha, G. Łagod. – Lublin: Politechnika Lubelska, 2013. – 102 p.*

4. *Kuzminskiy Y. Different types of energy conversion for biohydrogen production processes / K. Shchurska, I. Samarukha, G. Łagod // Ecological Chemistry and Engineering (SEChE), "Proceeding of ECOpole". – 2011. – Vol. 5. – No. 2. – P. 389–394.*

5. *Maslovska O. The activity of enzymes of glutathione antioxidant system of *Desulfuromonas acetoxidans* IMV B-7384 under the influence of ferric (III) citrate / O. Maslovska, S. Hnatysh, S. Katernyak // Visnyk of the Lviv University. Series Biology. – 2015. – I. 70. – P. 213–220.*

6. *Min B. Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells / B. Min, J. R. Kim, S. E. Oh, J. M. Regan, B. E. Logan // Water Research. – 2005. – № 39. – P. 4961–4968.*

7. *Santoro C. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. / Santoro C., C. Arbizzani, B. Erable, I. Ieropoulos // Journal of Power Sources. – 2017. – № 356. – P. 225–244.*

8. *Zubchenko L. Characteristics of biofilm formation process in the bioelectrochemical systems, working in batch-mode of cultivation / L. Zubchenko, Y. Kuzminskiy // Chemistry & Chemical Technology. – 2017. – Vol. 11, № 1. – P. 105–110.*

9. *Кузьмінський С. В. Стан, проблеми та перспективи біоенергетики в Україні / С. В. Кузьмінський, Н. Б. Голуб, К. О. Щурська // Відновлювана енергетика. – 2009. – № 4(15). – С. 70–80.*

10. *Кузьмінський С. В. Біопаливні елементи – проблеми і перспективи розвитку. 2. Мікробні паливні елементи / С. В. Кузьмінський, П. І. Гвоздяк, Н. Б. Голуб // Мікробіологія і біотехнологія. – 2009. – №3. – С. 15–30.*

БІОПАЛИВНІ ЕЛЕМЕНТИ. СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ В УКРАЇНІ

Є.В.Кузьмінський, К.О.Щурська

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", пр. Перемоги 37, 4 корпус, к.182., Київ, 03056, Україна

В роботі розглянуто сучасний стан розроблення і перспективи розвитку в Україні таких біоелектрохімічних систем як мікробні паливні елементи – електрохімічних пристроїв, в яких за допомогою мікроорганізмів здійснюється пряме перетворення хімічної енергії різноманітних органічних речовин (вуглеводів, жирів, білків та ін.) в електричну енергію чи біоводень в результаті біохімічних трансформацій. Розглянуто основні здобутки наукових колективів України, які досліджують біоелектрохімічні системи. Бібл. 10, рис. 1.

Ключові слова: відновлювана енергетика, біоелектрохімічна система, екзоелектрогени, мікробний паливний елемент.

REFERENCES

1. *Einschlag F. S. G. Waste Water – Treatment and Reutilization / F. S. G. Einschlag. – Rijeka: InTech, 2011. – 446 p. ISBN 978-953-307-249-4.*

2. *Fang Q. Solar-Driven Microbial Photoelectrochemical Cells with a Nanowire Photocathode / Q. Fang, W. Gongming, L. Yat // Nano Lett. –2010. – № 10. – P. 4686–4691.*

3. *Kuzminskiy Y. Bioelectrochemical hydrogen and electricity production Theoretical bases, description and modeling of the process / Y. Kuzminskiy, K. Shchurska, I. Samarukha, G. Łagod. – Lublin: Politechnika Lubelska, 2013. – 102 p.*

4. *Kuzminskiy Y. Different types of energy conversion for biohydrogen production processes / K. Shchurska, I. Samarukha, G. Łagod // Ecological Chemistry and Engineering (SEChE), "Proceeding of ECOpole". – 2011. – Vol. 5. – No. 2. – P. 389–394.*

5. *Maslovska O. The activity of enzymes of glutathione antioxidant system of *Desulfuromonas acetoxidans* IMV B-7384 under the influence of ferric (III) citrate / O. Maslovska, S. Hnatysh, S. Katernyak // Visnyk of the Lviv University. Series Biology. – 2015. – I. 70. – P. 213–220.*

6. *Min B. Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells / B. Min, J. R. Kim, S. E. Oh, J. M. Regan, B. E. Logan // Water Research. – 2005. – № 39. – P. 4961–4968.*

7. *Santoro C. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review. / Santoro C., C. Arbizzani, B. Erable, I. Ieropoulos // Journal of Power Sources. – 2017. – № 356. – P. 225–244.*

8. *Zubchenko L. Characteristics of biofilm formation process in the bioelectrochemical systems, working in batch-mode of cultivation / L. Zubchenko, Y. Kuzminskiy // Chemistry & Chemical Technology. – 2017. – Vol. 11, № 1. – P. 105–110.*

9. *Kuzminskiy Ye. V. State, problems and prospects of bioenergy in Ukraine / Ye. V. Kuzminskiy, N. B. Golub, K. O. Shchurska // Vidnovluvana energetika. – 2009. – № 4(15). – С. 70–80. (Ukr.)*

10. *Kuzminskiy Ye. V. Біопаливні елементи – проблеми і перспективи розвитку. 2. Мікробні паливні елементи / Ye. V.*

Kuzminskiy, P. I. Gvozdyak // Microbiology&Biotechnology. – 2009. – №3. – С. 15–30. (Ukr.)

SYNOPSIS

The rapid reduction of fossil fuels induces society to develop new alternative energy technologies that would use renewable energy and helped to reduce human impact on the environment. The use of biofuel cells is declared as a promising trend for solving these problems. Of particular interest is their variety – microbial fuel cells, in which electricity is generated due to the decomposition of organic compounds by exoelectrogens. In addition to electricity generating, it is also possible to produce hydrogen in a different variety of biofuel cell, namely in bioelectrochemical systems. All these systems are united by their ability to convert the energy of chemical bonds of organic molecules directly into electricity or biohydrogen with using microorganisms. Their important advantage is the possibility of using wastewaters as a raw material for their own functioning, since wastewaters with a high concentration of organic compounds are a renewable resource for electricity or hydrogen production.

In the last decade in such developed countries as USA, Australia, Germany and China the biotechnological method of electricity and hydrogen production has developed.

An analysis of the literature about microbial fuel cells, done in the work of the research team of authors under the direction of C. Santoro, shows that over the past decade, the number of publications has grown rapidly in order (from 100

publications in 2006 to 1020 in 2016, quotes from 2000 to 32,000, respectively). Although this review has about 500 references, non-English publications of Ukrainian scholars are not provided.

Regarding research on this subject in Ukraine, there are two main groups of scientists, from the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Department of environmental biotechnology and bioenergy) and Ivan Franko National University of Lviv (Department of microbiology). The first group is headed by prof. Kuzminskiy Ye. V. The research of this group is aimed at the development of biotechnology of electricity and hydrogen production with the simultaneous utilization of wastewater with high concentration of organic compounds. The second group is headed by prof. Gnatush S. O. This group studies the metabolism of bacteria *Desulfuromonas acetoxidans*, which are typical representatives of exoelectrogens.

Unfortunately, there are no other studies in this area in Ukraine. This low interest can be explained by insufficient financing of scientific research in this area.

The prospects of large-scale development of biofuel cells lie in the area of sewage treatment, as they can be used to solve two problems: to receive electricity with the simultaneous high concentrated wastewater treatment. This problem can be solved quickly only with the close cooperation of interdisciplinary specialists in such fields of science and technology, as microbiology, electrochemistry, biotechnology and water treatment technologies, as well as provided that sufficient funding is provided.

Стаття надійшла до редакції 23.01.2018

Остаточна версія 21.01.2018