

УДК 579.088; 158.54

**Щурська К. О., к.т.н., Зубченко Л. С., асистент,
Кузьмінський Є. В., д.х.н., професор** (Національний технічний
університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», м. Київ)

ФОРМУВАННЯ БІОПЛІВКИ З ВИСОКИМИ ЕКЗОЕЛЕКТРОГЕННИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ В БІОЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМАХ

Перспективність біоелектрохімічних систем полягає у можливості одночасного виробництва в них електричної енергії та очищення стічних вод, які є сировиною для цього процесу. Ключову роль у такому біотехнологічному процесі відіграє анодна біоплівка, яка може бути сформована різними способами. Приведено результати досліджень процесу формування біоплівки з високою екзоелектрогенною активністю на аноді біоелектрохімічних систем, субстратом для яких є стічні води з біодоступними забруднюючими компонентами. Як природне джерело екзоелектрогенів обрано активний мул станції аерації. Показано, що поєднання відомих процедур формування анодної біоплівки дозволяє скоротити тривалість утворення біоплівки зі збереженням значень густини сили струму.

Ключові слова: біоелектрохімічна система, екзоелектрогени, біоплівка з екзоелектрогенними властивостями.

Вступ. Розробка новітніх біотехнологій очищення стічних вод різноманітного походження з можливістю одночасного отримання відновлюваних високоефективних енергоносіїв є вкрай актуальною проблемою.

Біоелектрохімічний спосіб продукування електричної енергії відноситься до порівняно нової та перспективної біотехнології отримання відновлюваних джерел енергії. Важливою перевагою цього способу є можливість використання стічних вод, що містять біодеградабельні органічні сполуки, що забезпечить одночасну їх утилізацію. Установка, в якій відбувається такий процес, називається біоелектрохімічною системою (БЕХС) [1].

БЕХС в очищенні стічних вод. БЕХС – це біореактор, в якому відбувається перетворення енергії хімічних зв'язків органічних сполук в електричну шляхом біокаталітичних реакцій в анаеробних умовах. І хоча цей спосіб трансформації енергії відомий з початку ХХ століття,



енергетична криза XXI століття спонукала вчених до більш глибокого вивчення питання отримання електричної енергії в БЕХС [2].

В основі роботи БЕХС лежить здатність певних мікроорганізмів до позаклітинного перенесення електронів на анод в процесі споживання органічних речовин. В таких системах анод є кінцевим акцептором електронів, в той час, коли донором електронів виступають органічні сполуки поживного середовища.

Типова БЕХС складається з анода і катода, які розділені між собою протонобмінною мембраною. На аноді БЕХС розчинені органічні сполуки зі стічних вод окиснюються мікроорганізмами-екзоелектрогенами, які передають електрони на анод. Утворені в процесах метаболізму протони дифундують через протонобмінну мембрану до катода. Електрони через зовнішнє електричне коло переносяться до катода, де витрачаються в реакції утворення води з протонів і кисню. Таким чином відбувається генерування електричного струму. Мікроорганізми таких систем називають екзоелектрогенами [1; 3].

Для функціонування БЕХС вуглецевмісний компонент субстрату розглядається як один з найважливіших факторів, що впливає на процес продукування електричної енергії. Для виробництва електричної енергії в БЕХС може бути використане велике різноманіття речовин як по одинці, так і у вигляді суміші (наприклад, стічні води з високим вмістом органічних речовин).

Як субстрат для таких систем можуть бути використані різного роду стічні води. Так, стічні води пивоварних заводів в якості субстрату для БЕХС є пріоритетом серед дослідників, в першу чергу через їхню низьку концентрацію. Крім того, вони придатні для продукування електроенергії через біодоступність більшості компонентів таких стічних вод і через відсутність високих концентрацій інгібуючих речовин (наприклад аміаку, як це має місце у стічних водах тваринництва) [4].

Іншим цікавим прикладом використання стічних вод в БЕХС для продукування електричної енергії є відходи лікєро-горілчаного виробництва [5]. Після 22 годин перебування стічної води в БЕХС досягалося зменшення значення ХСК стічної води на 80-90% і генерування питомої потужності до 124,03 мВт/м².

В роботі [6] досліджено процеси виробництва електричної енергії в БЕХС при використанні як субстрату стічних вод кондитерських фабрик з одночасним знебарвленням азобарвника брильянтового червоного X-3В.

Отже, отримання електроенергії в БЕХС зі стічних вод є перспективним і багатообіцяючим напрямом сучасних досліджень.

Способи формування анодної біоплівки БЕХС. Згідно з сучасними уявленнями біоплівка – це безперервне багат шарове утворення клітин мікроорганізмів, прикріплених до поверхні розділу фаз і один до одного і занурених в біополімерний матрикс. Біоплівка характеризується прикріпленням до твердої поверхні, структурною різноманітністю, значним генетичним різноманіттям, складними взаємодіями в межах угруповання і позаклітинною матрицею з полімерних речовин.

В БЕХС знайшли своє застосування біоплівки двох видів: з чистих культур та зі змішаної асоціації.

Біоплівка із консорціуму бактерій є стійкішою до змін навколишнього середовища та бактеріальних забруднень ззовні, що є вкрай важливим при її використанні у БЕХС, що працюють на нестерильних стічних водах, які до того ж мають багатокомпонентний та непостійний склад.

Більшість сучасних БЕХС базуються на змішаних мікробіальних культурах, як правило, відібраних у природному середовищі.

Для формування біоплівки з екзоелектрогенною активністю існує ряд прийомів, в основі яких лежить створення у системі умов, які будуть сприяти розвитку мікроорганізмів-екзоелектрогенів та пригнічувати решту бактерій.

Традиційно формування такої біоплівки проводять шляхом циклічного внесення посівного матеріалу і поживного середовища до анодної камери [7]. Зазвичай цикл закінчується при повному споживанні органічних речовин мікроорганізмами. По закінченню кожного циклу вносять новий посівний матеріал та поживне середовище, попередньо очистивши анодну камеру. Контроль процесу проводять шляхом вимірювання сили струму чи напруги, яку генерують мікроорганізми у БЕХС. Процес формування біоплівки вважають закінченим, коли декілька циклів підряд БЕХС досягає стабільного значення вимірюваного параметра (сили струму, напруги). Описана процедура є довготривалою, а іммобілізовані мікроорганізми біоплівки представлені не лише екзоелектрогенами.

Для скорочення часу формування біоплівки застосовують двостадійну процедуру виділення екзоелектрогенів. При цьому на початку процедури відбувається формування первинної біоплівки із організмів активного мулу за умов накладання постійного потенціалу у 0,2 В. На другій стадії в реактор із сформованою біоплівкою занурю-



ють чистий матеріал, з якого виготовлено електрод. Ця стадія також супроводжується додатковим потенціалом на електродах до 0,2 В. Сформована у такий спосіб біоплівка має вищу екзоелектрогенну активність, а сама процедура є не такою тривалою.

Інша прискорена методика виділення і формування біоплівки з електрогенною активністю викладена у роботі [8]. Вона основана на тому, що більшість екзоелектрогенів, виявлених в БЕХС, є метал-відновлюючими бактеріями. Запропонована прискорена процедура полягає у вирощуванні первинної біоплівки на аноді БЕХС з подальшим перенесенням її на середовище з кристалічним оксидом заліза (III), який виступає акцептором електронів. Після вирощування природного угруповання на такому середовищі у ньому переважають мікроорганізми зі здатністю відновлювати залізо (III). Саме їх знову переносять в анодну камеру БЕХС для подальшої іммобілізації на аноді.

Постановка задачі досліджень. Метою даної роботи є формування анодної біоплівки з високою екзоелектрогенною активністю, поєднуючи та порівнюючи відомі прийоми виділення та іммобілізації мікроорганізмів-екзоелектрогенів.

Методика проведення експерименту. Процес виділення та формування біоплівки проводили в аноксидних умовах при температурі 25° С. Як джерело екзоелектрогенів використано анаеробний активний мул з Бортницької станції аерації ВАТ «АК Київводоканал».

Вимірювання значень потенціалів електродів проводилися відносно хлорсрібного електрода порівняння.

Процедуру виділення екзоелектрогенів проводили в лабораторній установці двокамерної БЕХС циліндричної форми. В обох камерах створено аноксидні умови. Як анод використано йорж з вуглецевих волокон на титановому дроті та вуглецеву тканину на титановому дроті, як катод – вуглецеву повсть, покриту платиною. Камери розділено протонпроникною мембраною Nafion 112 площею 10 см².

Катодна камера (об'ємом 200 см³) заповнювалася розчином бі-фосфатного буфера з рН 7 складу г/дм³: КН₂РО₄ – 1,50, К₂НРО₄ – 2,19, NH₄Cl – 0,31, KCl – 0,13, (NH₄)₂SO₄ – 0,45, NaCl – 0,90, MgSO₄·7H₂O – 0,18, CaCl₂·2H₂O – 0,10, NH₄Cl – 0,50. Також до католіту було додано K₃Fe(CN)₆ в концентрації 50 мМ.

Анодну камеру (об'ємом 200 см³) заповнювали таким же розчином буферного розчину з додаванням ацетату натрію в концентрації 10 мМ, а також слідовими кількостями мікроелементів та вітамінів для нормального росту та розмноження мікроорганізмів.

Третя стадія виділення екзоелектрогенів проводилася в ємностях з розчином біфосфатного буфера, слідовими концентраціями вітамінів на мінералів, а також з додаванням солей Fe(III) (100 мМ розчин) та ацетату натрію (10 мМ розчин) як акцепторів та донорів електронів відповідно. Після виділення екзоелектрогенів їх було іммобілізовано на аноді лабораторної установки БЕХС.

Процедури формування біоплівки проводили в напівперіодичному режимі культивування.

Формування первинної біоплівки проводили за методикою, запозиченою з літературних джерел [1; 8] та адаптованою до умов проведення експерименту. Для цього в анодну камеру, заповнену фосфатним буферним розчином, розчином ацетату натрію, вітамінів та мінералів, як інокулянт додавали 10 см³ анаеробного активного мулу.

Для покращення процесу формування біоплівки на електроди було накладено додаткову напругу в 0,2 В. Для моніторингу процесу іммобілізації екзоелектрогенів на електродах вимірювали силу струму, спричиненого процесами окиснення органічних сполук, в БЕХС.

Споживання органічних сполук поживного середовища визначали вимірюючи значення ХСК розчину до і після культивування.

Після вичерпання органічних сполук у середовищі проводили повну заміну розчину анодної камери, але вже без додавання інокулянту.

Біоплівку зі стабільними екзоелектрогенними характеристиками було сформовано після 6 таких циклів.

Другу стадію формування біоплівки проводили в таких же розчинах поживного середовища та католіту, але як джерело екзоелектрогенів було використано не активний мул, а анодну тканину із сформованою біоплівкою екзоелектрогенів. Для цього в анодну камеру лабораторної установки БЕХС було поміщено чистий електрод та сформовану на першій стадії біоплівку на вуглецевій тканині. На ці електроди було накладено додаткову напругу 0,2 В. Таким чином на чистому вуглецевому електроді відбувалася іммобілізація екзоелектрогенів, виділених на попередній стадії. Культивування проводилося в напівперіодичних умовах із регулярною заміною поживного середовища, але без додавання інокулянту.

Результати проведеного експерименту та їх обговорення

В процесі культивування спостерігалася зростання густини струму з утворенням першого піку в 134 ± 5 мкА/см² на 12 добу, що характеризувався таким значенням протягом 3 діб, після чого мало місце зниження значення густини струму. Після внесення в анодну



камеру поживного середовища знову спостерігалось підвищення значення густини струму (рис. 1).

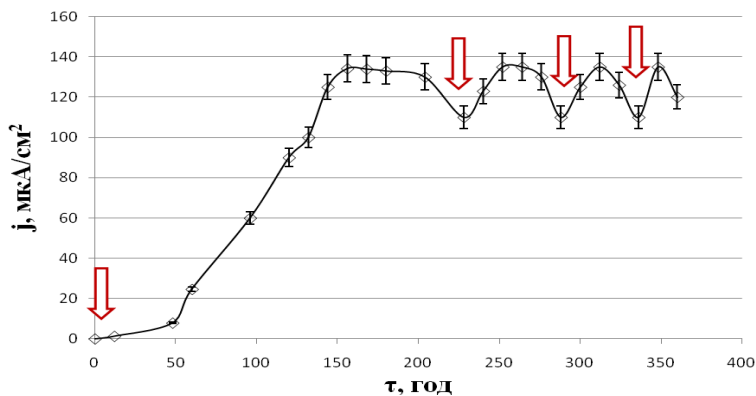


Рис. 1. Залежність значення густини струму біоплівки j від тривалості експерименту τ (стрілками показано час внесення поживного середовища в анодну камеру)

Протягом перших 50 годин культивування значення густини струму було незначним (рис. 1), що можна пояснити несформованістю біоплівки на аноді. Окрім того, концентрація екзоелектрогенів у вихідному інокуляті є вкрай низькою, порівняно із іншими представниками природного угруповання, які не проявляють екзоелектрогенних властивостей.

Загалом, отримана залежність має характерний вигляд для кривої росту бактеріальної культури в періодичному режимі культивування. Протягом перших 50 годин спостерігається лаг-фаза, яка відповідає періоду фізіологічного пристосування, що включає індукцію ферментів. Оскільки джерела енергії та вуглецю в поживному середовищі (ацетат натрію) відрізняються від тих, що були у попередній культурі (високомолекулярні органічні сполуки стічних вод), то адаптація до нових умов може вимагати синтезу тих ферментів, в яких раніше не було необхідності.

Ділянка графіка, обумовлена наступними 100 годинами, відповідає фазі експоненціального росту. Різке підвищення густини струму свідчить про те, що на поверхні анода прикріпилися екзоелектрогени і починають формувати біоплівку та використовувати анод як кінцевий акцептор електронів. Окрім того, на цій фазі росту має місце максимальна швидкість ділення іммобілізованих клітин екзоелектрогенів.

Потім настає фаза стаціонарного росту, при якій лімітуючим фактором стає доступність найважливіших поживних речовин. Вста-

новлюється рівновага між клітинним ростом, діленням та процесом відмирання клітин.

Після цього настає фаза відмирання клітин, при якій вичерпування органічних сполук в поживному середовищі призводить до зменшення екзоелектрогенної активності біоплівки. Після внесення поживних речовин разом із новою порцією інокуляту (на рис. 1 зображено стрілками) у реакційне середовище екзоелектрогенна активність біоплівки зростає і протягом подальших 4 циклів досягає значення 135 ± 5 мкА/см².

Скорочення ділянки графіка, що відповідає стаціонарній фазі росту, протягом подальших циклів, можна пояснити збільшенням кількості мікроорганізмів у біоплівці, тому швидкість споживання субстрату зростає.

Оскільки при повторних циклах досягається стабільне значення густини стуму, процес формування біоплівки можна вважати закінченим.

Порівнюючи отримані результати з відомими у літературі [7; 9], можна зробити висновок, що отримане значення густини струму утвореною за такою процедурою біоплівкою є майже вдвічі нижчим (135 мкА/см² порівняно з 230 мкА/см²). Це можна пояснити тим, що утворену біоплівку сформували мікроорганізми, які здатні використовувати інші акцептори електронів. В анаеробних умовах такими кінцевими акцепторами електронів можуть бути власні метаболіти. Різницю значень густини струму також можна пояснити тим, що в процесі формування біоплівки проводилася не лише заміна поживного середовища, а й внесення нових порцій інокуляту, що не мало місця у роботі [7; 9].

При цьому максимальне значення густини струму встановлюється протягом майже у тричі меншого терміну (6 діб, проти 17 діб). Таке скорочення часу формування біоплівки можна пояснити вищою температурою культивування (30° С у даній роботі, а в літературі 22° С).

Отже, отримані значення густини струму є незначними. Формування ж біоплівки з вищою екзоелектрогенною властивістю потребує трудомісткої та довготривалої процедури збагачення біоплівки екзоелектрогенами, яка полягає у повторному механічному відділенні біоплівки з поверхні анода, ресуспендуванні клітин та повторній іммобілізації відділених клітин [7].

Альтернативою цій процедурі є застосування двостадійного способу виділення екзоелектрогенів. При цьому на початку процедури відбувається формування первинної біоплівки із організмів ак-



тивного мулу за умов накладання напруги у 0,2 В на електроди. На другій стадії в реактор із анодом із сформованою біоплівкою та стерильним поживним середовищем занурюють чистий анодний матеріал.

Такий процес повторного формування біоплівки екзоелектрогенів досліджувався нами за періодичних умов культивування, а сформовану у такий спосіб біоплівку було прийнято називати вторинною. Після занурення чистого (без мікроорганізмів) вуглецевого матеріалу у анодну камеру БЕХС з уже сформованою анодною біоплівкою формування нової біоплівки з екзоелектрогенною властивістю спостерігалось за значно коротший час. Лаг-фаза формування вторинної біоплівки триває 20 год проти 50 год. А максимальне значення густини струму такої біоплівки досягається вже на шістдесятю годину експерименту (рис. 2).

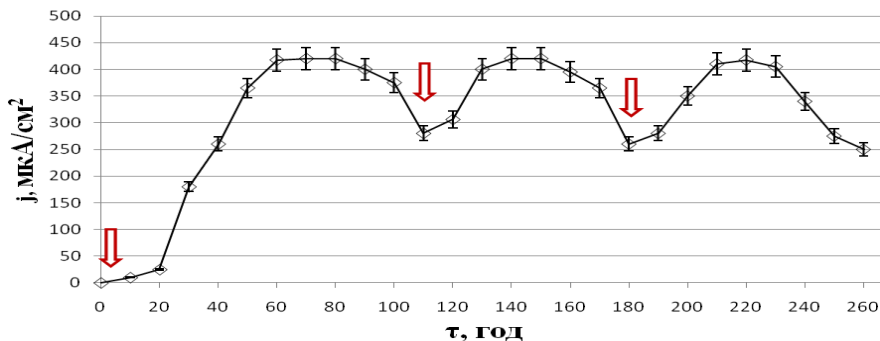


Рис. 2. Залежність густини струму j під час другої стадії формування біоплівки від тривалості експерименту τ (стрілками показано час внесення поживного середовища в анодну камеру)

На другій стадії формування біоплівки, як і в процесі формування первинної, має місце характерна для фаз росту бактеріальної культури залежність. Проте в цьому випадку фаза стаціонарного росту досягається за коротший термін (60 годин проти 150 годин), що можна пояснити більшою кількістю екзоелектрогенних мікроорганізмів на поверхні анодної поверхні.

Протягом трьох повторних циклів значення густини струму досягало приблизно одного й того ж значення 420 ± 10 мА/см².

Подальше повторне додавання чистих вуглецевих матеріалів не дозволяло отримати біоплівку із більшою густиною струму.

Порівнюючи отримані результати з відомими з літератури, можна зробити висновок, що сформована у такий спосіб вторинна біоплівка має подібні до згаданих у літературі екзоелектрогенні власти-

вості (420 мкА/см^2 проти 480 мкА/см^2), хоча густина струму первинної біоплівки була відмінною. Це доводить той факт, що подібна процедура дозволяє виділити екзоелектрогени та сформувати біоплівку із інокуляту з різною густиною екзоелектрогенних мікроорганізмів.

Дещо вищих значень густини струму біоплівки було досягнуто за використання процедури селекції екзоелектрогенних мікроорганізмів із природних асоціацій [10]. Ця процедура основана на тому факті, що більшість екзоелектрогенів, виявлених в БЕХС, є метал-відновлюючими бактеріями. Запропонована прискорена процедура полягає у вирощуванні первинної біоплівки на аноді БЕХС з подальшим перенесенням її на середовище з кристалічним оксидом заліза (III), який виступає акцептором електронів. Після вирощування природного угруповання на такому середовищі у ньому переважають мікроорганізми зі здатністю відновлювати залізо (III). Саме їх знову переносять в анодну камеру БЕХС, в якій вони будуть використовувати як кінцевий акцептор електронів анод, а не кристалічний оксид заліза (III).

У нашому випадку як інокулят для цієї процедури було обрано вторинну анодну біоплівку.

Зразки з різним розведенням культуральної рідини було пронумеровано згідно таблиці.

Таблиця

Зразки культуральної рідини

№ зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ступінь розведення	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9

Після серії розведень ресуспендованих клітин у середовищі та культивуванні протягом 14 діб при температурі 30°C у розчині, який на початку експерименту був червоного кольору завдяки оксиду заліза (III), спостерігалися сформовані чорні частинки у зразках 1 – 5. В решті зразків таких утворень не спостерігалося. Згідно даних роботи [9] ці чорні частинки можуть бути представлені сполуками Fe_3O_4 та FeCO_3 , які утворилися в результаті відновлення трьохвалентного заліза в двохвалентне електронами, виділеними в процесі метаболізму екзоелектрогенами.

Оскільки в зразках 6 – 9 утворення чорних частинок не спостерігалося, можна зробити висновок, що концентрація екзоелектрогенів у них вкрай низька, тому для подальшої роботи ці зразки не використовувалися.



Зразки 1 – 5 використовували для подальших досліджень, а саме для формування біоплівки на аноді та визначення екзоелектрогенної активності такої біоплівки.

Сформована із різних зразків біоплівка мала різні значення густини струму – рис. 3.

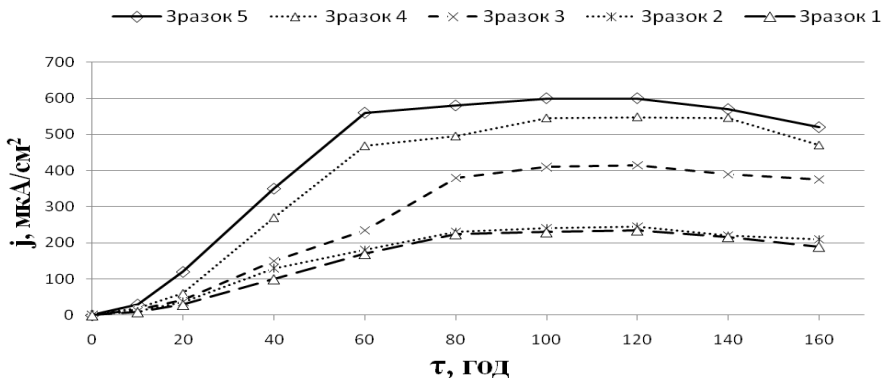


Рис. 3. Залежність густини струму анодної біоплівки j від тривалості культивування τ

Найвище значення густини струму отримано при використанні, як інокуляту для біоплівки, зразка № 5. Отримане максимальне значення густини струму біоплівки становило 600 мкА/см^2 . Для цього зразка тривалість лаг-фази була мінімальною (10 годин), а максимальне значення густини струму було отримано за більш короткий термін – на 60-й годині експерименту.

Висновки. Дослідження тристадійної процедури формування високоефективної анодної біоплівки з екзоелектрогенними властивостями показали, що поєднання відомих процедур формування біоплівки дозволяє скоротити тривалість утворення біоплівки. Так, друга та третя стадії утворення біоплівки тривають майже вдвічі менше за першу (60 та 80 годин порівняно з 150 годинами). В цей же час значення густини струму зростають від 135 мкА/см^2 до 420 мкА/см^2 (на другій стадії) та 600 мкА/см^2 (на третій стадії).

1. Logan B. E. Microbial fuel cells: methodology and technology / B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W. Verstraete, K. Rabaey // Environmental Science & Technology. – 2006. №40. – P. 5181 – 5192. 2. Du Z. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy / Z. Du, H. Li, T. Gu // Biotech Advances. – 2007. – № 25. – P. 464–482. 3. Lovley D. R. The microbe electric: conversion of organic matter to electricity Current / D. R. Lovley // Opinion in Biotechnology. – 2008. – № 19. – P. 1–8. 4. Feng Y.

Brewery wastewater treatment using air-cathode microbial fuel cells / Y. Feng, X. Wang, B. E. Logan, H. Lee // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2008. – № 78. – P. 873–88. **5.** Huang J. Electricity generation during wastewater treatment: An approach using an AFB-MFC for alcohol distillery wastewater/ J. Huang, P. Yang, Y. Guo, K. Zhang // *Desalination*. – 2011. – № 276(1). – P. 373–378. **6.** Sun J. Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single chamber microbial fuel cell / J. Sun, Y-Y. Hu, Z. Bi, Y.Q. Cao // *Bioresource Technology*. – 2009. – № 100. – P. 3185–3192. **7.** Liu Y. Improvement of the anodic bioelectrocatalytic activity of mixed culture biofilms by a simple consecutive electrochemical selection procedure / Y. Liu, F. Harnisch, K. Fricke, R. Sietmann, U. Schröder // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2008. – V. 24 (4). – P. 1006–1011. **8.** Wang A. A rapid selection strategy for an anodophilic consortium for microbial fuel cells / A. Wang, D. Sun, N. Ren, C. Liu, W. Liu, B. E. Logan, W. M. Wu // *Bioresour Technol*. – 2010. – № 101(14). – P. 5733–5735. **9.** Roden E. E. Dissimilatory Fe(III) reduction by the marine microorganism *Desulfuromonas acetoxidans* / E. E. Roden, D. R. Lovley // *Appl. Environ. Microbiol*. – 1993. – № 59. – P. 734–742. **10.** Bond D. R. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes / D. R. Bond, D. R. Lovley // *Appl. Environ. Microbiol*. – 2003. – Vol. 69. – P.1548–1555.

Рецензент: д-р техн. наук, професор Саблій Л. А. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»)

Shchurska K. O., Candidate of Engineering, Zubchenko L. S., Assistant, Kuzminskyi Y. V., Doctor of Chemical Sciences, Professor (National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv)

METHOD OF HIGH EXOELECTROGENIC BIOFILMS FORMATION IN BIOELECTROCHEMICAL SYSTEMS

The prospects of bioelectrochemical systems are simultaneous electricity production in them and wastewater treatment, which can be a raw materials for this process. Anode biofilm plays a main role in this biotechnological process. The biofilm can be formed in different ways. The results of research of highly exoelectrogenic anode biofilm forming for bioelectrochemical systems are presented. The substrates for such bioelectrochemical systems are bioavailable components of waste waters. As a natural source of exoelectrogens



activated sludge from aeration station was chosen. It is shown that the combination of known procedures for anode biofilm forming reduces the duration of its formation while preserving the values of the current density in the bioelectrochemical systems.

Keywords: bioelectrochemical system, exoelectrogens, biofilm with exoelectrogenic properties.

Щурская К. А., к.т.н., Зубченко Л. С., ассистент, Кузьминский Е. В., д.х.н., профессор (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев)

ФОРМИРОВАНИЕ БИОПЛЕНКИ С ВЫСОКИМИ ЭКЗОЭЛЕКТРОГЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ В БИОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Перспективность биоелектрохимических систем состоит в возможности одновременного производства в них электрической энергии и очистки сточных вод, выступающих сырьем для этого процесса. Ключевую роль в таком биотехнологическом процессе играет анодная биопленка, которая может быть сформирована различными способами. Приведены результаты исследований процедуры формирования анодной биопленки с высокой экзоэлектрогенной активностью для биоэлектрохимических систем, субстратом для которых выступают сточные воды с биодоступными загрязняющими компонентами. Как природный источник экзоэлектрогенов выбран активный ил станции аэрации. Показано, что определенное сочетание известных процедур формирования анодной биопленки позволяет сократить продолжительность процесса образования биопленки с сохранением значений плотности силы тока.

Ключевые слова: биоэлектрохимическая система, экзоэлектрогены, биопленка с экзоэлектрогенными свойствами.
