

« . . . , . . . »

Використання фотобіоелектрохімічних систем в процесах очищення стічних вод підприємств харчової промисловості дозволяє не лише досягнути високих показників очищення, а й одночасно отримувати енергоносії – водень або електроенергію. Процес формування електрохімічно-активної біоплівки має першочергове значення для подальшого ефективного функціонування фотобіоелектрохімічної системи. Представлену математична модель розроблено на основі кінетичного рівняння Міхаеліса-Ментен для процесу формування біоплівки, який включає почергову повну та часткову заміну поживного середовища за використання ацетату натрію як єдиного джерела вуглецю та енергії. Для досліджуваної асоціації електрохімічно-активних мікроорганізмів розраховано значення константи Міхаеліса-Ментен та максимальної швидкості споживання субстрату, які дорівнюють 152,9 мг ХСК/дм³ та 0,26 мгХСК/(мгХ·год) відповідно. На основі розробленої моделі проаналізовано процес росту біомаси електрохімічно-активних мікроорганізмів в процесі культивування. Побудовано залежність максимальної питомої густини струму від тривалості культивування на початковому етапі формування біоплівки на аноді фотобіоелектрохімічної системи та показано, що склад та концентрація поживного субстрату, а також алгоритм заміни анодного розчину, мають вплив на тривалість формування електрохімічно-активної біоплівки.

Ключові слова: стічні води, фотобіоелектрохімічна система, константа Міхаеліса-Ментен.

L.S. ZUBCHENKO, YE.V. KUZMINSKIY

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

MODELING OF ELECTROACTIVE BIOFILM FORMATION PROCESS IN PHOTOBIOELECTROCHEMICAL SYSTEM

The photobioelectrochemical systems as new devices can be used for hydrogen end electricity production with simultaneous wastewater treatment. The area of application is different organic wastewater treatment for example, agricultural and food industry wastewater. The productivity of the photobioelectrochemical systems depends on many factors, but the microbial composition of the electrochemically-active biofilm has the determinative influence on the system's operation. The process of an electrochemically active biofilm formation has the leading importance for the further functioning of the photobioelectrochemical system. The mathematical model presented in this study, is developed on the basis of the Michaelis-Menten kinetic equation for the biofilm formation process in batch system. The biofilm formation process involved the alternation complete and partial replacement of the nutrient medium. Sodium acetate was used as the single source of carbon and energy for inhibition the fermentative microorganisms' growth. The Michaelis-Menten constant and the maximum consumption rate for the association of electrochemically active microorganisms are determined. The values are equal 152.9 mg COD/ dm³ and 0.26 mg COD/ (mgX·h). The model allows prediction the electrochemically active microorganisms and methanogenic microorganisms growth characteristics during the start-up period of the biofilm formation in the photobioelectrochemical system. The dependence of the specific current density on the duration of cultivation at the initial stage of the anode biofilm formation in photobioelectrochemical system was calculated. it was shown that the composition and concentration of the nutrient substrate, as well as the anodic solution replacement algorithm, have a significant effect on the duration of the electrochemically active biofilm formation. These results demonstrated the possibility of the process management, during the electrochemically active biofilm formation.

Key words: wastewater, photobioelectrochemical system, Michaelis-Menten constant.

Значення коефіцієнта μ залежить від умов середовища та стану організму. Вважається, що в оптимальних умовах μ досягає свого максимального значення μ_{max} . Це означає, що швидкість зростання організму буде найбільшою, коли він знаходиться в оптимальних умовах середовища та в оптимальному стані. Тому, якщо ми хочемо збільшити швидкість зростання організму, ми повинні створити для нього оптимальні умови середовища та забезпечити його оптимальним станом.

(1798 р.),

$$\Delta N = \mu N_1 \Delta t \quad N = N_1 \cdot e^{\mu t} \tag{1}$$

N_1 – початкова кількість організмів;
 t – час;
 μ – коефіцієнт зростання.

[1].

(1845 р.)

У 1845 році французький математик і фізіолог П'єр-Філіпп Рамбуєр ввів поняття «логістичної функції». Ця функція описує зростання організму в обмежених умовах, коли кількість організмів досягає певного рівня, названого «несучою здатністю» середовища. Рамбуєр вивчив вплив кількості організмів на швидкість зростання і виявив, що швидкість зростання зменшується по мірі наближення до несучої здатності середовища. Це означає, що організм не може зрости неограниченно великим, оскільки ресурси середовища обмежені.

[1]:

$$\Delta X = \mu X \Delta t - \beta X^2 \Delta t \quad \frac{dx}{dt} = \mu X - \beta X^2 \tag{2}$$

X – кількість організмів;
 ΔX – зміна кількості організмів;
 μ – коефіцієнт зростання;
 β – коефіцієнт конкуренції.

(1942 р.),

[1]:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_s + S} \tag{3}$$

μ – швидкість зростання;
 μ_{max} – максимальна швидкість зростання;
 S – концентрація субстрату;
 K_s – константа Міхаеліса.

$$q = q_{max} \frac{S}{K_s + S} \tag{4}$$

q – швидкість перетворення субстрату.

Q_{\max} –
 S –
 K_s –

у процесі роботи агрегату, а саме: у процесі розкрутки турбіни, у процесі зупинки турбіни, у процесі зміни частоти обертання турбіни, у процесі зміни навантаження агрегату, у процесі зміни режиму роботи агрегату, у процесі зміни параметрів середовища, у процесі зміни параметрів агрегату, у процесі зміни параметрів електроенергії, у процесі зміни параметрів системи керування, у процесі зміни параметрів системи контролю, у процесі зміни параметрів системи захисту, у процесі зміни параметрів системи діагностики, у процесі зміни параметрів системи ремонту, у процесі зміни параметрів системи обслуговування, у процесі зміни параметрів системи безпеки, у процесі зміни параметрів системи екології, у процесі зміни параметрів системи охорони здоров'я, у процесі зміни параметрів системи освіти, у процесі зміни параметрів системи культури, у процесі зміни параметрів системи мистецтва, у процесі зміни параметрів системи спорту, у процесі зміни параметрів системи туризму, у процесі зміни параметрів системи галузі, у процесі зміни параметрів системи країни, у процесі зміни параметрів системи світу.

[2].

[3, 4].

[3].

() [5],

() [6].

[3].

[7]

().

[8], [2]

(-)

()

() [2].

[2]:

$$\frac{dS}{dt} = D(S_0 - S) - q_e x_e - q_m x_m \tag{5}$$

$$\frac{dx_e}{dt} = \mu_e x_e - K_{d,e} - \alpha_1 x_e \tag{6}$$

$$\frac{dx_m}{dt} = \mu_m x_m - K_{d,m} - \alpha_1 x_m \tag{7}$$

D – ;
 S_0, S – ;
 μ, μ_m, q_e, q_m – ;
 x_e, x_m – ;
 $K_{d,e}, K_{d,m}$ – ;
 $x_e + x_m \geq X_{\max,1}$:

$$\alpha_1 = \frac{(\mu_e - K_{d,e})x_e + (\mu_m - K_{d,m})x_m}{(x_e + x_m)} \tag{8}$$

: $\alpha_1 = 0$.

$$M = M + M \tag{9}$$

$$\frac{dM}{dt} = -Y_M q_e + \frac{\gamma}{Vx_e} \frac{I}{mF}$$

$$\mu_e = \mu_{\max,e} \frac{S}{K_{S,e} + S} \frac{M}{K_M + M} \tag{10}$$

$$q_e = q_{\max,e} \frac{S}{K_{S,e} + S} \frac{M_o}{K_M + M} \tag{11}$$

μ_{\max} – ;
 q_{\max} – ;
 K_S – ;
 M , , – ;
 (10) (11) (3) (4).

[3, . 44]:

$$\mu_m = \mu_{\max,m} \frac{S}{K_{S,m} + S} \frac{K_i}{K_i + I} \tag{12}$$

K_i – ;
 I –

[9],

15–35

([9])
 (5 –),

()
 26,7±1,66
 95%.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max,e}} + \frac{K_{s,e}}{q_{max,e}} \frac{1}{S}, \quad (13)$$

$q_{max,e}$ –

$K_{s,e}$ –

q_e –

1200 /³.

1)

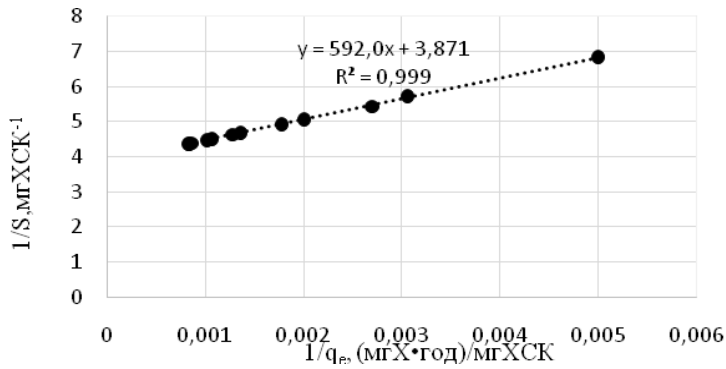
$q_{max} = 0,26$

/(),

$K_{s,e} = 152,9$

/³.

[13]



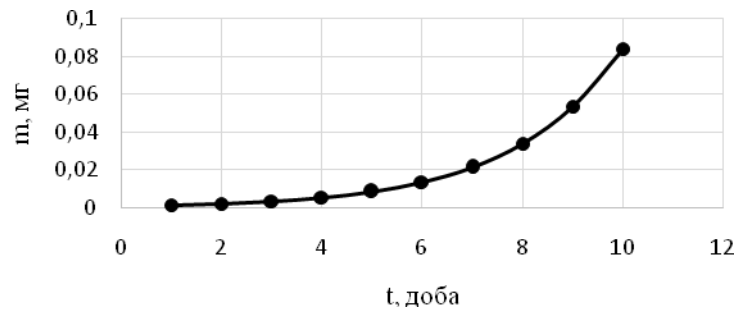
(3-8, 12).

.1.

$(X_{,tot}, X_{,act}, X_{,sus}, X_m),$
 (max) [10, 11].

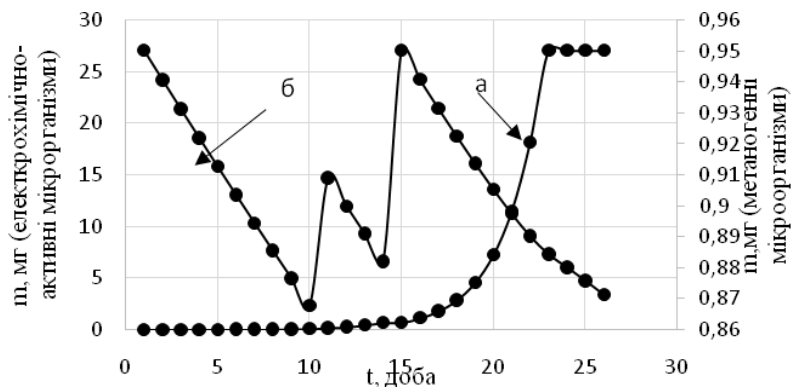
[14].

1.



[9].

.2.



(.2).

.3.

()

(9

17-18

(.3)

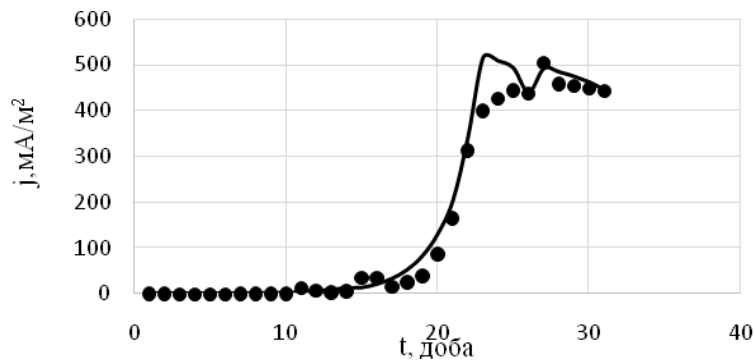
$q_{max, e}$	0,26 (6,2)		$/(\cdot)$, $/(\cdot)$
$\mu_{max, e}$	0,03 (0,72)	[10]	$^{-1}, (\cdot^{-1})$
$q_{max, m}$	3,53 (84,8)	, () ([3])	$/(\cdot)$, $/(\cdot)$
$\mu_{max, m}$	0,0125 (0,3)	([3])	$^{-1}, (\cdot^{-1})$
X	10		
$X_{, tot}$	0,77	, ([10, 12])	
$X_{, act}$	0,0013	([10])	
X_m	0,95	[11]) , (
$K_{s, max}$	27		
$K_{s,}$	152,9		$/ \cdot^3$
$K_{s, m}$	84,8	([3])	$/ \cdot^3$
$K_{d, e}$	0,04		$^{-1}$
$K_{d, m}$	0,01		$^{-1}$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{zF}{M_s} \int_{t_1}^{t_2} S dt, \tag{14}$$

0,4.

I – ;
 t – ;
 z – ;
 F – ;
 M_s – ;
 S – t .

4.



.4.

5-6 – 0,15 / ².

11,9 / ².

4-6 / ²,

/ ³ 0,26 / (.)

152,9

1. . . . M . – 2010. – .3. – 1. – С. 62–66.

2. Pinto R. P. A unified model for electricity and hydrogen production in microbial electrochemical cells / R. P. Pinto, B. Srinivasan, B. Tartakovsky // Preprints of the 18th IFAC World Congress. – Milano, Italy. – 2011. – P. 5046–5051.

3. Wanner O. Mathematical Modeling of Biofilms / O. Wanner, H. J. Eberl, E. Morgenroth, D. R. Noguera, C. Picioreanu, B. E. Rittmann, M. C. M. van Loosdrecht. – London : IWA Publishing, 2006. – 178 p.

4. Williamson K. A model of substrate utilization by bacterial films / K. Williamson, P.L. McCarty // J.

Water Pollut. Control Fed. – 1976. – 48(1). – P. 9 – 24.

5. Marcus A. K. Conduction-based modeling of the biofilm anode of a microbial fuel cell / A. K. Marcus, C. I. Torres, B. E. Rittmann//Biotechnology and Bioengineering. – 2007. – 98(6). – P. 1171–1182.

6. Zhang X. C. Modelling of a microbial fuel cell process / X. C. Zhang, A.Halme // Biotechnology Letters. – 1995. – 17(8). – P. 809 – 814.

7. Picioreanu C. A computational model for biofilm-based microbial fuel cells / C. Picioreanu, I. M. Head, K. P. Katuri, M. C. M. van Loosdrecht, K. Scott // Water Research. – 2007. – 41(13). – P. 2921–2940.

8. Bernard O. P. Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process / O. Bernard, Z. Hadj-Sadok, D. Dochain, A. Genovesi, J. P. Steyer // Biotechnology and Bioengineering. – 2001. – 75(4). – P. 424–438.

9. Zubchenko L. Characteristics of biofilm formation process in the bioelectrochemical systems, working in batch-mode of cultivation / L. Zubchenko, Ye. Kuzminskiy // Chem. Chem. Technol. – 2017. – Vol. 11. – P. 105–110.

10. Heidrich E. S. Quantification of effective exoelectrogens by most probable number (MPN) in a microbial fuel cell / E. S. Heidrich, T. P. Curtis, S. Woodcock, J. Dolfig // Bioresource Technology. – 2016. – P. 218. – P. 27–30.

11. Witczak P. Microbiota of anaerobic digesters in a full-scale wastewater treatment plant / P. Witczak, A. Cydzik-Kwiatkowska, P. Rusanowska // Archives of Environmental Protection. – 2017. – Vol. 43. – P. 53–60.

12. Yang Z.C. Rapid detection and enumeration of exoelectrogenic bacteria in lake sediments and a wastewater treatment plant using a coupled WO_3 nanoclusters and most probable number method / Z. C. Yang, Y. Y. Cheng, F. Zhang, B. B. Li, Y. Mu, W. W. Li, H. Q. Yu // Environ. Sci. Technol. Lett. – 2016. – P. 133–137.

13. Watson V. J. Hydrogen production from continuous flow, microbial reverse-electrodialysis electrolysis cells treating fermentation wastewater / V. J. Watson, M.Hatzell, B. E. Logan // Bioresource Technology. – 2015. – P. 195. – P. 51–56.

14. Pinto R. P. Dynamic Modelling and Optimisation of Microbial Fuel Cells and Microbial Electrolysis Cells: PhD thesis / Pinto Roberto Pires. – École Polytechnique de Montréal, 2011. – 180 p.

References

1. Sydorov Yu. Vykorystannia rivniannia Mono dlia iteratziynoh orozrahunku periodychnyh protzesiv fermentatzii / Yu. Sydorov // Biotechnolohiya. – 2010. – P. 3. – P. 62–66.

2. Pinto R. P. A unified model for electricity and hydrogen production in microbial electrochemical cells / R. P. Pinto, B. Srinivasan, B. Tartakovsky // Preprints of the 18th IFAC World Congress. – Milano, Italy. – 2011. – P. 5046–5051.

3. Wanner O. Mathematical Modeling of Biofilms / O. Wanner, H. J. Eberl, E. Morgenroth, D. R. Noguera, C. Picioreanu, B. E. Rittmann, M. C. M. van Loosdrecht. – London : IWA Publishing, 2006. – 178 p.

4. Williamson K. A model of substrate utilization by bacterial films / K. Williamson, P.L. McCarty // J. Water Pollut. Control Fed. – 1976. – 48(1). – P. 9 – 24.

5. Marcus A. K. Conduction-based modeling of the biofilm anode of a microbial fuel cell / A. K. Marcus, C. I. Torres, B. E. Rittmann//Biotechnology and Bioengineering. – 2007. – 98(6). – P. 1171–1182.

6. Zhang X. C. Modelling of a microbial fuel cell process / X. C. Zhang, A.Halme // Biotechnology Letters. – 1995. – 17(8). – P. 809 – 814.

7. Picioreanu C. A computational model for biofilm-based microbial fuel cells / C. Picioreanu, I. M. Head, K. P. Katuri, M. C. M. van Loosdrecht, K. Scott // Water Research. – 2007. – 41(13). – P. 2921–2940.

8. Bernard O. P. Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process / O. Bernard, Z. Hadj-Sadok, D. Dochain, A. Genovesi, J. P. Steyer // Biotechnology and Bioengineering. – 2001. – 75(4). – P. 424–438.

9. Zubchenko L. Characteristics of biofilm formation process in the bioelectrochemical systems, working in batch-mode of cultivation / L. Zubchenko, Ye. Kuzminskiy // Chem. Chem. Technol. – 2017. – Vol. 11. – P. 105–110.

10. Heidrich E. S. Quantification of effective exoelectrogens by most probable number (MPN) in a microbial fuel cell / E. S. Heidrich, T. P. Curtis, S. Woodcock, J. Dolfig // Bioresource Technology. – 2016. – P. 218. – P. 27–30.

11. Witczak P. Microbiota of anaerobic digesters in a full-scale wastewater treatment plant / P. Witczak, A. Cydzik-Kwiatkowska, P. Rusanowska // Archives of Environmental Protection. – 2017. – Vol. 43. – P. 53–60.

12. Yang Z.C. Rapid detection and enumeration of exoelectrogenic bacteria in lake sediments and a wastewater treatment plant using a coupled WO_3 nanoclusters and most probable number method / Z. C. Yang, Y. Y. Cheng, F. Zhang, B. B. Li, Y. Mu, W. W. Li, H. Q. Yu // Environ. Sci. Technol. Lett. – 2016. – P. 133–137.

13. Watson V. J. Hydrogen production from continuous flow, microbial reverse-electrodialysis electrolysis cells treating fermentation wastewater / V. J. Watson, M.Hatzell, B. E. Logan // Bioresource Technology. – 2015. – P. 195. – P. 51–56.

14. Pinto R. P. Dynamic Modelling and Optimisation of Microbial Fuel Cells and Microbial Electrolysis Cells: PhD thesis / Pinto Roberto Pires. – École Polytechnique de Montréal, 2011. – 180 p.

/Received : 2.03.2018 . /Printed : 24.3.2018 .

: . . . ,