

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ НОСІЇВ ІММОБІЛІЗОВАНИХ МІКРООРГАНІЗМІВ В БІОТЕХНОЛОГІЯХ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Гриневич А.О., Саблій Л.А.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, abarabaha@gmail.com

Abstract

This article presents a study on the efficiency of a "Brush-type carrier" for microorganism immobilization in a laboratory bioreactor simulating wastewater treatment conditions. Methods for determining carrier dry weight and biomass concentration are described. Based on three experimental series, the average biomass concentration was determined, and structural features and attachment stability of the biofilm were analyzed.

Keywords: biotechnology, biofilm, wastewater treatment, immobilization, carriers

Вступ. Одним із перспективних напрямів удосконалення технологій біологічного очищення є застосування іммобілізованих мікроорганізмів, що закріплені на твердих носіях у вигляді біоплівки, з метою стабілізації їхньої метаболічної активності та підвищення ефективності біохімічних процесів, що особливо важливо для малих очисних споруд (до 7,5 м³/добу).

Іммобілізовані мікроорганізми сприяють інтенсифікації біологічного очищення завдяки збільшенню концентрації активної біомаси в об'ємі очисної споруди, зменшенню приросту надлишкового мулу, підвищенню стійкості до токсичних речовин і забезпеченню компактності споруд [1-5]. Технології з використанням біоплівок широко використовують для видалення сполук біогенних елементів [6-8], важких металів [9, 10], барвників [11].

Таким чином, їхнє широке впровадження дає змогу суттєво покращити експлуатаційні характеристики аеротенків та інших біореакторів.

На цей час для іммобілізації мікроорганізмів запропоновано велику кількість конструктивних та матеріальних рішень носіїв, серед яких полімерні гранули, волокнисті структури, пінополімери, синтетичні сітки та інші. Проте, незважаючи на широкий спектр доступних носіїв, проблема вибору оптимального типу залишається відкритою. Це зумовлено варіативністю складу стічних вод, гідродинамічних режимів, особливостей біоценозу мікроорганізмів та конструктивних характеристик очисних споруд. У зв'язку з цим актуальним завданням є дослідження функціональних властивостей окремих типів носіїв у конкретних умовах експлуатації [12, 13].

Метою роботи є встановлення можливостей і перспектив використання носія типу «йорж» в біореакторах для очищення стічних вод.

Матеріали та методи. Дослідження проводили на кафедрі біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Використовували 2 біореактори (загальний об'єм кожного – 5,56 дм³, робочий об'єм – 4,1 дм³), заповнені активним мулом (1 дм³) та водою (до рівня 140 мм від дна). Як носій застосовували нейлоновий «Йорж» (висота зразка – 125 мм, об'єм носія в реакторі – 4,39 дм³) та «сітка» (висота зразка – 125 мм, об'єм носія в реакторі – 3,66 дм³) (рис. 1.).

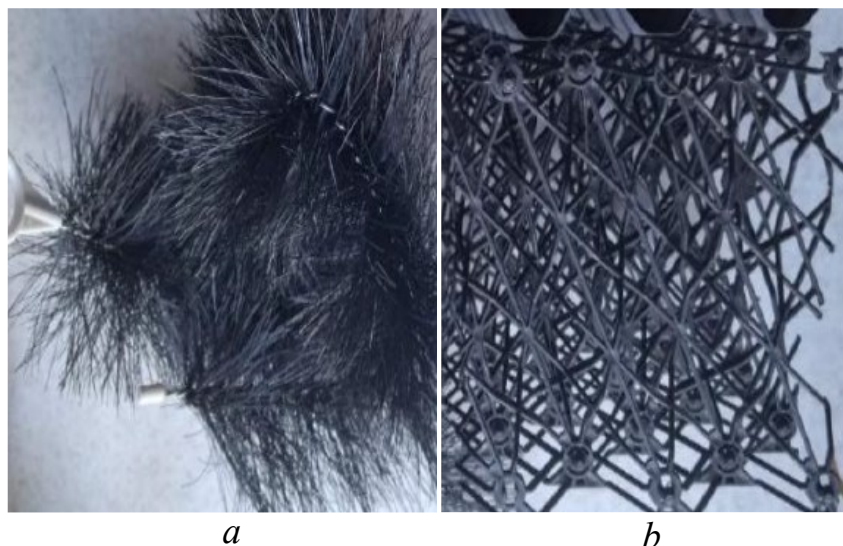


Рис. 1. Фото носіїв: а – «Йорж», б – «Сітка».

Для іммобілізації мікроорганізмів на носії використовували активний мул, відібраний з аеротенків Бортницької станції аерації, де відбувається очищення стічних вод міста Києва та прилеглих населених пунктів.

Для аерації рідини в біореакторі використовували донний аератор, підключений до компресора Resun AIR 3000. Щодня впродовж експерименту додавали живильний розчин (співвідношення БСК:N:P = 100:5:1), що містив глюкозу, KNO_3 та K_2HPO_4 .

Після завершення експерименту по нарощуванню біомаси проводили аналіз утвореної на носії біоплівки. Кількість біомаси визначали гравіметричним методом – шляхом висушування носія з біоплівкою до сталої маси та порівняння з масою сухого чистого носія. Концентрацію біомаси обчислювали відносно одиниці об'єму біореактора, зайнятого носієм (мг/дм^3), та одиниці площі поверхні носія (мг/см^2). Вимірювання проводили у трьох повтореннях.

Виконували 3 серії експериментів тривалістю нарощування біомаси на поверхні носія протягом 15 діб.

Результати та обговорення. У результаті експериментальних досліджень було отримано кількісні показники іммобілізації мікроорганізмів на носіях типу «Йорж» та «Сітка» в лабораторній установці біореакторів.

У першій серії експериментів зафіксовано найвищу концентрацію іммобілізованої біомаси для носія типу «Йорж»: $1392,8 \text{ мг/дм}^3$ у перерахунку на об'єм; $22,23 \text{ мг/см}^2$ на поверхню носія; для носія типу «Сітка», відповідно: $100,6 \text{ мг/дм}^3$ і $1,73 \text{ мг/см}^2$.

Для перевірки отриманих в першій серії експериментів значень показників біомаси на носії було виконано другу серію, в якій отримано такі значення, відповідно, для носія «Йорж»: $732,86 \text{ мг/дм}^3$; $11,69 \text{ мг/см}^2$; для носія «Сітка»: $61,28 \text{ мг/дм}^3$ і $1,18 \text{ мг/см}^2$.

Для остаточної оцінки носіїв за величиною біообростань було проведено третю серію, в якій концентрація біомаси зросла порівняно з другою, але не досягла показників першої серії для носія «Йорж»: $905,34 \text{ мг/дм}^3$; $16,12 \text{ мг/см}^2$; для носія «Сітка»: $78,62 \text{ мг/дм}^3$ і $1,38 \text{ мг/см}^2$, відповідно.

Узагальнивши результати трьох серій, розраховано середнє значення концентрації біомаси в зайнятому носієм об'ємі, яке склало 1010 мг/дм³. Це свідчить про стабільну здатність носія типу «Йорж» до підтримки високого рівня іммобілізованих мікроорганізмів протягом досліджуваного періоду.

Аналіз отриманих результатів дає змогу стверджувати, що носій типу «Йорж» демонструє високий потенціал для іммобілізації біомаси в умовах біореактора малої продуктивності. Його конструктивні особливості, зокрема розгалужена структура з великою питомою площею поверхні, сприяє активному закріпленню мікроорганізмів і розвитку біоплівки.

Максимальні показники біомаси, зафіксовані у першій серії експериментів, імовірно, пов'язані із сприятливими умовами стартової колонізації поверхні носія, коли відсутні обмеження, пов'язані з надлишковим накопиченням біомаси. Із плином часу в наступних серіях спостерігали зменшення концентрацій, що можна пояснити фізико-хімічними змінами в структурі біоплівки, зокрема збільшенням її товщини, виникненням внутрішніх градієнтів концентрації кисню, а також розвитком анаеробних зон усередині біообростань. У третій серії експерименту зафіксоване повторне зростання кількості біоплівки, що, ймовірно, пов'язано з частковим відшаруванням деградованих шарів біомаси та повторною колонізацією відкритих ділянок поверхні носія.

Дійсно, візуальні спостереження за носієм у біореакторі показали, що біоплівка на носії «Йорж» мала значну товщину. У її глибинних шарах утворювалися анаеробні мікрозони, де активно відбувались процеси анаеробного метаболізму. Як наслідок, утворення газів (наприклад, метану або азоту) призводило до механічного відшарування частини біоплівки від поверхні носія.

На відміну від носія «Йорж», носій типу «Сітка» продемонстрував значно нижчий рівень іммобілізації біомаси, що може бути пов'язано з менш розгалуженою структурою, зниженою питомою площею поверхні, матеріалом тощо. Водночас він не спричиняв відшарування біоплівки та забезпечував рівномірні умови аерації, що може бути перевагою в умовах тривалої експлуатації.

Таким чином, попри загалом високі показники іммобілізації, носій «Йорж» має низку функціональних обмежень. Основними з них є такі: надмірна товщина біоплівки, що зменшує ефективність аерації й може спричинити зниження біологічної активності в товщі біообростань; часткове опадання біообростань після струшування носія, що знижує стабільність роботи та довговічність експлуатації біореактора; неоднорідність структури біообростань, що ускладнює рівномірне підведення поживних речовин і кисню мікроорганізмам біоплівки.

Висновки. Носій типу «Йорж» продемонстрував високу ефективність як поверхня для іммобілізації мікроорганізмів у лабораторній установці біореактора, середня концентрація біомаси становила 1010 мг/дм³. Незважаючи на виявлені недоліки, зокрема утворення надмірно товстого шару біообростань, наявність анаеробних зон та нестійке прикріплення частини біомаси, носій «Йорж» забезпечив активний ріст мікроорганізмів і формування щільної біоплівки. Конструкція та фізичні властивості носія «Йорж» дають змогу

ефективно використовувати цей тип носія в системах біологічного очищення стічних вод, а подальші дослідження мають бути спрямовані на усунення виявлених технологічних обмежень.

Роботу виконано відповідно до договору між КПІ ім. Ігоря Сікорського та ТОВ «ФІБЕРІКА» (договір № Дндч/22.00/84/24 від 11 квітня 2024 р.).

Список використаної літератури:

1. Hou L., Hu K., Huang F., Pan Z., Jia X., Liu W., Yao X., Yang Z., Tang P., Li J. Advances in immobilized microbial technology and its application to wastewater treatment: A review // *Bioresource Technology*. 2024. Vol. 413. Article 131518. DOI: [10.1016/j.biortech.2024.131518](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131518).
2. Wang Y., Li B., Li Y., Chen X. Research progress on enhancing the performance of autotrophic nitrogen removal systems using microbial immobilization technology // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 774. Article 145136. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.145136](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145136).
3. Wahab R. A., Elias N., Abdullah F., Ghoshal S. K. On the taught new tricks of enzymes immobilization: an all-inclusive overview // *Reactive and Functional Polymers*. 2020. Vol. 152. Article 104613. DOI: [10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104613](https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104613).
4. Liu D., Yang X., Zhang L., Tang Y., He H., Liang M., Tu Z., Zhu H. Immobilization of biomass materials for removal of refractory organic pollutants from wastewater // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, No. 21. Article 13830. DOI: [10.3390/ijerph192113830](https://doi.org/10.3390/ijerph192113830).
5. Martins S., Martins C., Fiúza L. M. C. G., Santaella S. Immobilization of microbial cells: A promising tool for treatment of toxic pollutants in industrial wastewater // *African Journal of Biotechnology*. 2013. Vol. 12, No. 28. P. 4412–4418. DOI: [10.5897/AJB12.2677](https://doi.org/10.5897/AJB12.2677).
6. Liu X.-p., Li H.-q. Nitrogen removal performance and microorganism community of an A/O-MBBR system under extreme hydraulic retention time // *Desalination and Water Treatment*. 2019. Vol. 158. P. 105–113. DOI: [10.5004/dwt.2019.24268](https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24268).
7. Le L.-T., Nghiem L. D., Bui X.-T., Jahng D. Improve nitrogen removal of the biofilm single-stage PN/A process by optimizing the intermittent aeration strategy // *Environmental Technology & Innovation*. 2023. Vol. 30. Article 103078. DOI: [10.1016/j.eti.2023.103078](https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103078).
8. Li J., Feng M., Zheng S., Zhao W., Xu X., Yu X. The membrane aerated biofilm reactor for nitrogen removal of wastewater treatment: Principles, performances, and nitrous oxide emissions // *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 460. Article 141693. DOI: [10.1016/j.cej.2023.141693](https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141693).
9. Saini S., Tewari S., Dwivedi J., Sharma V. Biofilm-mediated wastewater treatment: a comprehensive review // *Materials Advances*. 2023. Vol. 4, No. 6. P. 1415–1443. DOI: [10.1039/d2ma00945e](https://doi.org/10.1039/d2ma00945e).
10. Ataabadi M., Hoodaji M., Tahmourespour A. Chromium (VI) bioremoval from contaminated wastewater using *Pseudomonas aeruginosa* ATHA23 producing biofilm supported on clinoptilolite // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. Vol. 45. P. 427–442. DOI: [10.1007/s10653-022-01345-2](https://doi.org/10.1007/s10653-022-01345-2).
11. Wang G.-Y., Ding J., He L., Wu T., Ding M.-Q., Pang J.-W., Liu L.-M., Gao X.-L., Zhang L.-Y., Ren N.-Q., Yang S.-S. Enhanced anaerobic degradation of azo dyes by biofilms supported by novel functionalized carriers // *Bioresource Technology*. 2023. Vol. 378. Article 129013. DOI: [10.1016/j.biortech.2023.129013](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129013).
12. Deena S. R., Kumar G., Vickram A. S., Singhanian R. R., Dong Ch.-D., Rohini K., Anbarasu K., Thanigaivel S., Ponnusamy V. K. Efficiency of various biofilm carriers and microbial interactions with substrate in moving bed-biofilm reactor for environmental wastewater treatment // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 359. Article 127421. DOI: [10.1016/j.biortech.2022.127421](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127421).
13. Zhang K., Li X., Ni S.-Q., Liu S. Comparison of different carriers to maintain a stable partial nitrification process for low-strength wastewater treatment // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022. Vol. 10. Article 851565. DOI: [10.3389/fbioe.2022.851565](https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.851565).