ЕФЕКТИВНІСТЬ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД З ВИКОРИСТАННЯМ ІММОБІЛІЗОВАНИХ МІКРООРГАНІЗМІВ НА НОСІЯХ РІЗНИХ ТИПІВ

Андрій Гриневич[1], Лариса Саблій[2], Вероніка Жукова[3], Ірина Ляшок[4]

[1,2,3] Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
37, проспект Берестейський, м. Київ, 03056, Україна
[4] Київський національний університет технологій та дизайну
2, вул. Мала Шияновська, Київ, 01011, Україна
[1] abarabaha@gmail.com, orcid.org/0009-0009-3963-838X
[2] доктор технічних наук, larisasabliy@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4217-3535
[3] кандидат технічних наук, verolis86@gmail.com, orcid.org/0000-0002-8296-7519
[4] кандидат технічних наук, lyashok.io@knutd.edu.ua, orcid.org/0000-0001-9171-1075

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.52.16-23

Анотація. У роботі досліджено ефективність біотехнології очищення стічних вод з використанням іммобілізованих мікроорганізмів, формування на полімерних носіях біологічної плівки та її здатність забезпечувати очищення стічних вод від органічних забруднюючих речовин. Визначали зміну показника хімічного споживання кисню за різної тривалості очищення: 6, 8 і 12 год. Після нарощування біомаси з використанням активного мулу протягом 14 діб носії переносили до проточних біореакторів та визначали зміну концентрації органічних речовин залежно від типу носія. Встановлено, що за тривалості 8 год усі носії забезпечували досягнення гранично допустимих концентрацій за ХСК для скиду стічних вод у водні об'єкти. Найвищу ефективність мав носій «Соти» - 80–87% зниження ХСК за початкових значень - 500, 200 та 80 мг/дм^3. Використання носіїв «Йорж» і «Хвиля» показало ефект очищення за ХСК – 50-77%, залежно від умов досліду. Виявлено, що на носій «Йорж» було іммобілізовано найбільшу біомасу – до 390 мг/дм^3, однак надмірна товщина біоплівки обмежувала дифузію кисню та знижувала інтенсивність окиснення. Отримані результати показали високу ефективність біологічного очищення стічних вод з використанням іммобілізованих на носіях мікроорганізмів – до 90%, проте свідчать про суттєвий вплив на процес очищення конструкції носія та важливість раціонального вибору типу носія.

Ключові слова: біотехнологія, мікроорганізми, біоплівка, активний мул, стічні води, очищення стічних вод, іммобілізація, полімерні носії.

ВСТУП

Забруднення водних ресурсів біогенними елементами залишається однією з ключових екологічних проблем, що вимагає впровадження ефективних технологій очищення стічних вод, особливо для систем з нерівномірним гідравлічним навантаженням (приватні підприємства, об'єкти промислового та цивільного будівництва, тощо). Одним з найбільш перспективних рішень для таких умов є використання біотехнологій із застосуванням прикріпленої біомаси, де ключовим елементом, що, в основному, буде визначати ефективність процесу, виступає носій біологічної плівки.

Процес іммобілізації мікроорганізмів та формування стійкої біоплівки залежить від комплексу факторів як біотичних, так і

© Гриневич А., Саблій Л., Жукова В., Ляшок І., 2025

абіотичних, серед яких визначальними є фізико-хімічні властивості поверхні носія, його шорсткість, пористість та матеріал [1-3]. Важливу роль відіграють гідрофільність і заряд поверхні, які безпосередньо впливають на швидкість адгезії мікроорганізмів [4-5]. За матеріалом існуючі носії класифікують на неорганічні, інертні органічні та реактивні органічні [6].

Неорганічні матеріали (цеоліт, кераміка, вулканічні породи) характеризуються високою механічною стійкістю та значною питомою поверхнею (300–1000 $м^2/м^3$ для цеолітів) [7], що забезпечує резистентність біоценозу до шокових навантажень [8]. Завдяки йонообмінним властивостям цеоліти демонструють високу ефективність (понад 90%) видалення із води амонійного азоту [9]. Проте, суттєвими недоліками неорганічних носіїв є повільне заростання біо-плівкою, низька проникність та схильність до кольматації, що частково вирішують використанням їх модифікованих форм [10].

Альтернативою виступають реактивні органічні матеріали (альгінат, рослинна сировина), які є біосумісними та здатні слугувати додатковим джерелом вуглецю. Однак їх широке застосування обмежується низькою механічною міцністю, швидкою біодеградацією та нестабільністю процесу очищення [11].

На сьогодні найбільш поширеними на практиці є носії з неінертних органічних полімерів (поліетилен, поліпропілен, поліуретан). Для них характерні довговічність, стійкість до біодеградації та розвинену структуру [12]. Поліетиленові носії (HDPE) є стандартом для MBBR-систем, а пористі поліуретанові матеріали забезпечують екстремально високу площу поверхні (до 3000 $м^2/м^3$) [13]. Головним недоліком синтетичних полімерів є їхня гідрофобність, що ускладнює первинне прикріплення біомаси [14]. Для покращення характеристик розробляють різні модифікації: гідрофільно модифіковані поверхні та магнітні носії, проте їх впровадження часто стримують економічні чинники [15, 16].

Окрім фізико-хімічних властивостей матеріалу, критичний вплив на ефективність біореактора має конфігурація носія, яка визначає гідродинамічні та аеродинамічні умови в біореакторі, подачу і розподіл води та повітря, перемішування та його інтенсивність, масоперенос кисню та субстратів тощо [17]. Наявність пор та їх структура не лише збільшують площу контакту, але й захищають біоплівку від механічного зсуву, створюючи умови для симультанного перебігу аеробних та анаеробних процесів. Оптимальна зовнішня поверхня носія повинна сприяти формуванню рівномірної активної біоплівки без дифузійних обмежень [18-19].

На сьогодні ринок пропонує значне різноманіття полімерних носіїв різної конфігурації, починаючи від простих гранульованих або циліндричних форм і закінчуючи складними просторовими структурами з розвиненою поверхнею [20]. Проте така варіативність створює проблему відсутності універсальних критеріїв стандартизації, що значно ускладнює вибір оптимального рішення та коректне порівняння ефективності різних форм між собою [21].

Враховуючи вищезазначене, існує нагальна потреба у систематизації даних та проведенні порівняльного аналізу роботи носіїв різних типів.

Мета дослідження. Визначити і порівняти ефективність очищення стічних вод від органічних речовин з використанням іммобілізованих мікроорганізмів на носіях різних типів у проточних умовах.

Дослідження були виконані колективом кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології під керівництвом д.т.н.. проф. Саблій Л.А., відповідно до господарського договору між КПІ ім. Ігоря Сікорського і ТОВ «ФІБЕРІКА» у 2025 році.

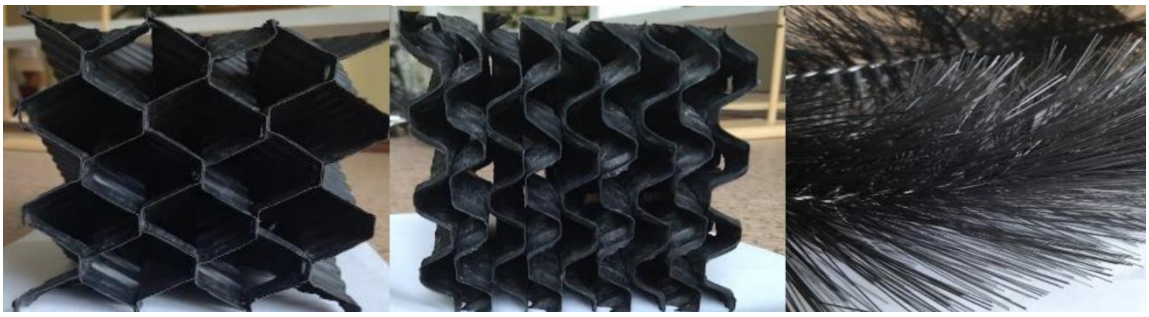


Рис. 1. Носії для іммобілізації мікроорганізмів: «Соти», «Хвиля», «Йорж» (зліва направо)
Fig. 1. Carriers for microorganism immobilization: "Honeycomb", "Wave", "Brush" (left to right)

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для проведення експериментальних досліджень використовували носії для іммобілізації мікроорганізмів трьох зразків різної конструкції, умовно названі «Хвиля», «Соти» та «Йорж» (рис. 1).

Дослідження виконували на двох експериментальних установках, кожна складалася з трьох ідентичних біореакторів діаметром 19,3 см та висотою 20 см. Робочий об'єм рідини в кожному реакторі становив 5 дм^3, висота води - 17 см. Перед початком експерименту було проведено гідравлічні випробування для перевірки герметичності біореакторів та працездатності обладнання (насосів, аераторів, компресорів тощо).

Іммобілізацію біомаси на носіях проводили з використанням активного мулу, відібраного на Бортницькій станції аерації (м. Київ), яка здійснює очищення міських стічних вод Києва та прилеглих населених пунктів. Процес нарощування біомаси на поверхні носіїв тривав упродовж 14 діб, при цьому в усіх біореакторах забезпечували однакові умови культивування мікроорганізмів. Насичення води киснем та перемішування середовища в аеробних умовах здійснювали шляхом дрібнобульбашкової аерації з використанням компресорів Resun AIR 3000.

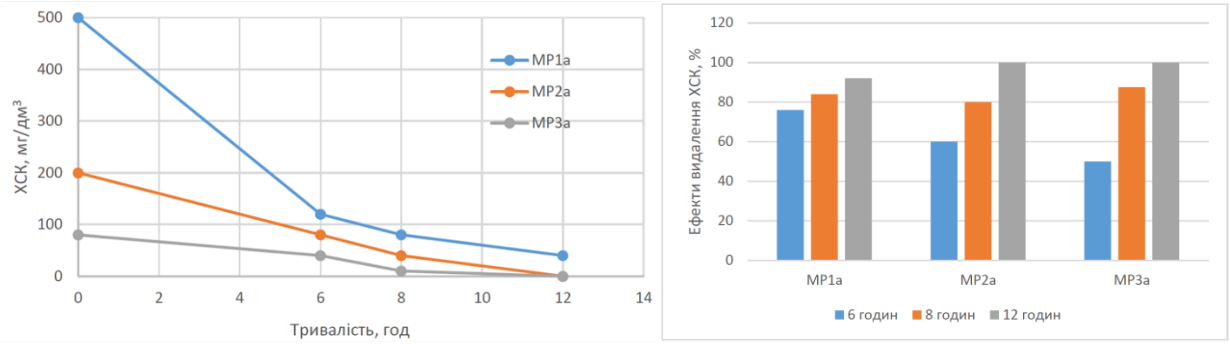
Аналіз характеристик біологічної плівки та активного мулу проводили з використанням стандартних методів та методик. Показник хімічного споживання кисню (ХСК) визначали прискореним біхроматним методом із кроком 40 одиниць (для значень менше 500 мг/дм^3) та 200 одиниць (для значень понад 500 мг/дм^3). Для визначення концентрації (дози) активного мулу використовували методику аналізу завислих речовин гравіметричним методом. Зважування зразків виконували на аналітичних терезах OHAUS Pioneer PA214C та OHAUS Scout Pro, а висушування до постійної маси здійснювали у сушильній шафі Labexpert.

РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Ефективність очищення стічної води від органічних речовин з використанням носія типу «Соти»

Після завершення формування біоплівки (14 діб) носії помістили в біореактори експериментальної установки для проведення досліджень на модельних розчинах. Регулювання тривалості перебування стічної води в біореакторах (6, 8 та 12 годин) забезпечували шляхом зміни подачі периферійних перистальтичних насосів-дозаторів. Дослідження аеробного процесу видалення органічних речовин з води за показником ХСК проводили впродовж 15 діб.

Аналіз величини біомаси на носіях показав пряму залежність між концентрацією органічних забруднень та кількістю іммобілізованої біоплівки. Концентрація біомаси за сухою речовиною (у перерахунку на одиницю об'єму води, що займав носій у біореакторі) становила 219, 133 та 86 мг/дм^3 для біореакторів 1, 2 та 3, відповідно. Візуально зафіксовано найбільш інтенсивне обростання носія у модельному розчині МР1а (початкове ХСК - 500 мг/дм^3), тоді як зі зниженням навантаження за органічними речовинами величина біомаси зменшувалась.



а б

Рис. 2. Залежність ХСК від тривалості очищення різних модельних розчинів (а) та ефективність очищення за ХСК за тривалості 6, 8, 12 год (б) у біореакторах з носієм «Соти» в аеробних умовах

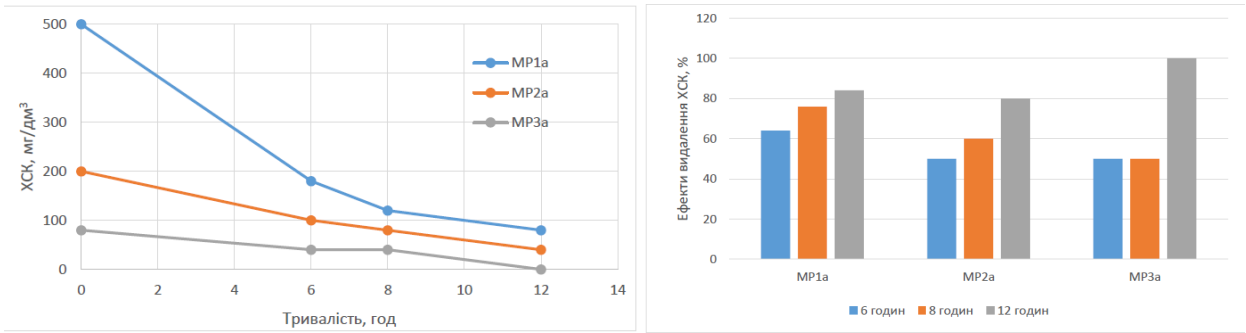
Fig. 2. Dependence of COD on treatment duration for different model solutions (a) and COD removal efficiency at 6, 8, and 12 h duration (b) in bioreactors with the "Honeycomb" carrier under aerobic conditions.

З рис. 2, а очевидно, що найбільше абсолютне зниження ХСК зафіксовано для розчину MP1a (з початковим $ХСК_{поч}$ – 500 мг/дм^3), найменше – для MP3a (з $ХСК_{поч}$ - 80 мг/дм^3) за тривалості аеробного процесу 6 годин. Встановлено, що вже за такої тривалості кінцеві значення ХСК для всіх модельних розчинів не перевищували гранично допустиму концентрацію для скиду стічних вод у природну водойми (ГДК - 125 мг/дм^3).

Як показали результати, наведені на рис. 2, б, подальше збільшення тривалості очищення понад 6 годин не мало значного впливу на ХСК очищеної води, проте для забезпечення стабільності показників та досягнення ефективності очищення на рівні 80–87% раціональною рекомендованою тривалістю обрано 8 годин.

Ефективність очищення стічної води від органічних речовин з використанням носія типу «Йорж»

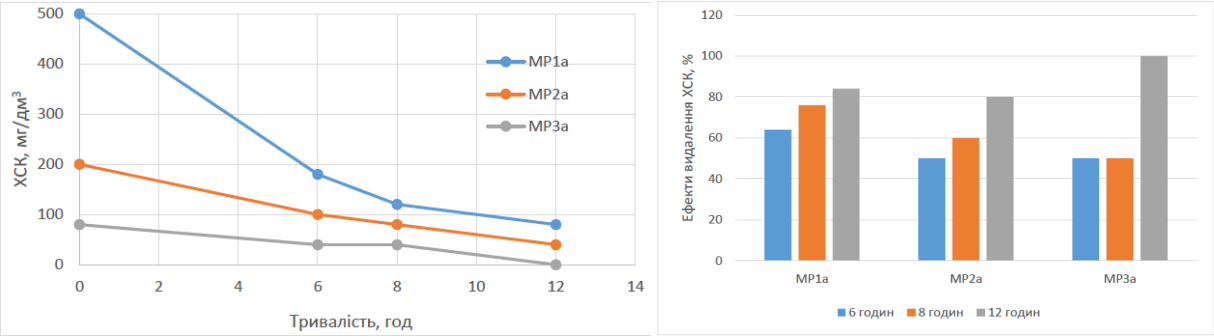
Аналогічний цикл досліджень впродовж 15 діб було проведено для носія «Йорж». Характер формування біоплівки мав схожу тенденцію - максимальне накопичення іммобілізованої біомаси спостерігали у реакторі з модельним розчином MP1a (початкове ХСК - 500 мг/дм^3), що підтверджує візуальний аналіз (рис. 3, а). Зі зменшенням концентрації субстрату інтенсивність біообростання знижувалася.



а б

Рис. 3. Залежність ХСК від тривалості очищення різних модельних розчинів (а) та ефективність очищення за ХСК за тривалості 6, 8, 12 год (б) у біореакторах з носієм «Йорж» в аеробних умовах

Fig. 3. Dependence of COD on treatment duration for different model solutions (a) and COD removal efficiency at 6, 8, and 12 h duration (b) in bioreactors with the "Brush" carrier under aerobic conditions



а б

Рис. 4. Залежність ХСК від тривалості очищення різних модельних розчинів (а) та ефективність очищення за ХСК за тривалості 6, 8, 12 год (б) у біореакторах з носієм «Хвиля» в аеробних умовах

Fig. 4. Dependence of COD on treatment duration for different model solutions (a) and COD removal efficiency at 6, 8, and 12 h duration (b) in bioreactors with the "Wave" carrier under aerobic conditions

Аналіз кінетики очищення (рис. 3) свідчить про поступове зменшення концентрації органічних речовин за ХСК зі збільшенням тривалості. Для розчину з високим ХСК (МР1а, 500 мг/дм^3) за 6 годин обробки ХСК знизилося лише до 180 мг/дм^3, що перевищує нормативне значення ГДК. Збільшення тривалості процесу очищення з 6 до 8 годин призвело до сповільнення зниження показника ХСК, проте саме за тривалості 8 годин досягається необхідна якість очищення за даним показником.

Для розчинів з меншим ХСК$_{поч}$ (МР2а – 200 мг/дм^3 та МР3а – 80 мг/дм^3) нормативні показники досягаються вже за 6 годин. Однак, враховуючи необхідність уніфікації процесу для стоків з високим вмістом забруднень (МР1а), як робочу тривалість для носія «Йорж» також обрано 8 годин.

Ефективність очищення стічної води від органічних речовин з використанням носія типу «Хвиля»

На третьому етапі досліджень присвячено використовували носій «Хвиля». Визначена концентрація прикріпленої біомаси (за сухою речовиною) у біореакторах 1, 2 та 3 становила 240, 176 та 95 мг/дм^3, відповідно, що корелює з концентрацією органічних речовин у розчині за показником ХСК.

Графіки, зображені на рис. 4 показують, що для висококонцентрованого розчину МР1а суттєве зменшення органічного забруднення за ХСК спостерігали протягом перших 8 годин з досягненням ХСК очищеної води у відповідності до нормативів ГДК. Подальше подовження процесу до 12 годин характеризується сповільненням процесу очищення. Для розчинів з середнім та низьким ХСК (МР2а та МР3а) стабільне досягнення необхідних показників якості води за ХСК спостерігали вже через 6 годин аеробної обробки.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

За результатами експериментальних досліджень аеробного очищення стічних вод встановлено, що збільшення концентрації органічних забруднень сприяє інтенсивнішому наростанню біомаси на всіх типах носіїв. Максимальну концентрацію іммобілізованої біоплівки зафіксовано на носії конструкції «Йорж» (до 390 мг/дм^3), проте надмірна товщина біообростань призвела до дифузійних обмежень кисню та зниження ефективності процесу очищення стічних вод. Натомість носій «Соти» з меншою концентрацією біомаси (220 мг/дм^3), забезпечив формування тонкої активної біоплівки з оптимальним масопереносом, що дозволило досягти найвищих показників видалення органічних забруднень. Зокрема, за тривалості процесу 8 годин ефективність очищення стічних вод від органічних речовин за ХСК для носія «Соти» досягала 80–88% для всіх початкових величин ХСК, тоді як для носіїв «Йорж» і «Хвиля» цей показник не

перевищував 50–76%. Таким чином, найбільш раціональним для використання в компактних очисних спорудах є носій плоскої конфігурації «Соти», який забезпечує найвищу якість очищеної води за показником ХСК та відповідність нормативним вимогам для безпечного відведення її у природні водойми.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Ahmad M. et al.** Effects of porous carrier size on biofilm development, microbial distribution and nitrogen removal in microaerobic bioreactors // Bioresource Technology, 2017, 234, 360–369. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.076
2. **Tarjányi-Szikora S. et al.** Comparison of different granular solids as biofilm carriers // Microchemical Journal, 2013, 107, 101–107. https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.05.027
3. **Müller-Renno C. et al.** Novel materials for biofilm reactors and their characterization // Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 2013, 146, 207–233. https://doi.org/10.1007/10_2013_264
4. **Mao Y. et al.** Accelerated startup of moving bed biofilm process with novel electrophilic suspended biofilm carriers // Chemical Engineering Journal, 2017, 315, 364–372. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.041
5. **Deng L. et al.** New functional biocarriers for enhancing the performance of a hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor system // Bioresource Technology, 2016, 208, 87–93. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.057
6. **Zhao Y. et al.** Insights into biofilm carriers for biological wastewater treatment processes: Current state-of-the-art, challenges, and opportunities // Bioresource Technology, 2019, 288, 121619. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121619
7. **Barwal A., Chaudhary R.** Impact of carrier filling ratio on oxygen uptake & transfer rate, volumetric oxygen transfer coefficient and energy saving potential in a lab-scale MBBR // Journal of Water Process Engineering, 2015, 8, 202–208. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.10.008
8. **Zhang Y. et al.** Photobiodegradation of phenol with ultraviolet irradiation of new ceramic biofilm carriers // Biodegradation, 2010, 21(6), 881–887. https://doi.org/10.1007/s10532-010-9348-x
9. **Tang B. et al.** Variation of the characteristics of biofilm on the semi-suspended bio-carrier produced by a 3D printing technique: investigation of a whole growing cycle // Bioresource Technology, 2017, 244, 40–47. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.132
10. **Zhang X. et al.** Biofilm characteristics in natural ventilation trickling filters (NVTFs) for municipal wastewater treatment: comparison of three kinds of biofilm carriers // Biochemical Engineering Journal, 2016, 106, 87–96. https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.11.009
11. **Zhu S. M. et al.** Biological denitrification using poly(butylene succinate) as carbon source and biofilm carrier for recirculating aquaculture system effluent treatment // Bioresource Technology, 2015, 192, 603–610. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.021
12. **Tang K. et al.** Removal of pharmaceuticals, toxicity and natural fluorescence through the ozonation of biologically-treated hospital wastewater, with further polishing via a suspended biofilm // Chemical Engineering Journal, 2019, 359, 321–330. https://doi.org/10.3390/w12041059
13. **Bassin J. P. et al.** Effect of increasing organic loading rates on the performance of moving-bed biofilm reactors filled with different support media: assessing the activity of suspended and attached biomass fractions // Process Safety and Environmental Protection, 2016, 100, 131–141. https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.007
14. **Feng G. et al.** Bacterial attachment and biofilm formation on surfaces are reduced by small-diameter nanoscale pores: how small is small enough? // npj Biofilms and Microbiomes, 2015, 1, 15022. https://doi.org/10.1038/npjbiofilms.2015.22
15. **Yang X. L. et al.** Selection and application of agricultural wastes as solid carbon sources and biofilm carriers in MBR // Journal of Hazardous Materials, 2015, 283, 186–192. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.036
16. **Zhang X. et al.** Surface modification of basalt fiber with organic/inorganic composites for biofilm carrier used in wastewater treatment // ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(2), 2596–2602. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04089
17. **Sun L., Wang J., Liang J., Li G.** Boric acid cross-linked 3D polyvinyl alcohol gel beads by NaOH-titration method as a suitable biomass immobilization matrix // Journal of Polymers and the Environment, 2019, 27. https://doi.org/10.1007/s10924-019-01610-z
18. **Geiger M., Rauch B.** Diffusion depth: a crucial factor for MBBR carrier // Filtration + Separation, 2017, 54(3), 30–32. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(17)30035-6
19. **Swain A. K. et al.** Industrial wastewater treatment by aerobic inverse fluidized bed biofilm reactors (AIFBBRs): a review // Journal of Water

Process Engineering, 2018, 23, 61–74. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.017

20. **Hlihor R. M. et al.** Biosorption potential of dead and living Arthrobacter viscosus biomass in the removal of Cr(VI): batch and column studies // Process Safety and Environmental Protection, 2017, 108, 44–56. https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.016

21. **Pesciaroli L. et al.** Pleurotus ostreatus biofilms exhibit higher tolerance to toxicants than free-floating counterparts // Biofouling, 2013, 29(8), 1043–1055. https://doi.org/10.1080/08927014.2013.825901

REFERENCES

1. **Ahmad, M., Liu, S., Mahmood, N., Mahmood, A., Ali, M., Zheng, M., & Ni, J. (2017).** Effects of porous carrier size on biofilm development, microbial distribution and nitrogen removal in microaerobic bioreactors. *Bioresource Technology, 234.* 360–369. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.076

2. **Tarjányi-Szikora, S., Oláh, J., Makó, M., Palkó, G., Barkács, K., & Záray, G. (2013).** Comparison of different granular solids as biofilm carriers. Microchemical Journal, 107. 101–107. https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.05.027

3. **Müller-Renno, C., Buhl, S., Davoudi, N., Aurich, J. C., Ripperger, S., Ulber, R., Muffler, K., & Ziegler, Ch. (2013).** Novel materials for biofilm reactors and their characterization. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, 146.* 207–233. https://doi.org/10.1007/10_2013_264

4. **Mao, Y., Quan, X., Zhao, H., Zhang, Y., Chen, S., Liu, T., & Quan, W. (2017).** Accelerated startup of moving bed biofilm process with novel electrophilic suspended biofilm carriers. *Chemical Engineering Journal, 315.* 364–372. https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.041

5. **Deng, L., Guo, W., Ngo, H. H., Zhang, X., Wang, X. C., Zhang, Q., & Chen, R. (2016).** New functional biocarriers for enhancing the performance of a hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor system. *Bioresource Technology, 208.* 87–93. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.057

6. **Zhao, Y., Liu, D., Huang, W., Yang, Y., Ji, M., Nghiem, L. D., Trinh, Q. T., & Tran, N. H. (2019).** Insights into biofilm carriers for biological wastewater treatment processes: Current state-of-the-art, challenges, and opportunities. *Bioresource Technology, 288.* 121619. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121619

7. **Barwal, A. & Chaudhary, R. (2015)** Impact of carrier filling ratio on oxygen uptake & transfer rate, volumetric oxygen transfer coefficient and energy saving potential in a lab-scale MBBR. *Journal of Water Process Engineering, 8.* 202–208. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.10.008

8. **Zhang, Y., Liu, H., Shi, W., Pu, X., Zhang, H., & Rittmann, B. E. (2010).** Photobiodegradation of phenol with ultraviolet irradiation of new ceramic biofilm carriers. *Biodegradation, 21(6).* 881–887. https://doi.org/10.1007/s10532-010-9348-x

9. **Tang, B., Zhao, Y., Bin, L., Huang, S., & Fu, F. (2017).** Variation of the characteristics of biofilm on the semi-suspended bio-carrier produced by a 3D printing technique: investigation of a whole growing cycle. *Bioresource Technology, 244.* 40–47. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.132

10. **Zhang, X., Li, J., Yu, Y., Xu, R., & Wu, Z. (2016).** Biofilm characteristics in natural ventilation trickling filters (NVTFs) for municipal wastewater treatment: comparison of three kinds of biofilm carriers. *Biochemical Engineering Journal, 106.* 87–96. https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.11.009

11. **Zhu, S.-M., Deng, Y.-L., Ruan, Y.-J., Guo, X.-S., Shi, M.-M., & Shen, J.-Z. (2015).** Biological denitrification using poly(butylene succinate) as carbon source and biofilm carrier for recirculating aquaculture system effluent treatment. *Bioresource Technology, 192.* 603–610. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.021

12. **Tang, K., Ooi, G., Spiliotopoulou, A., Kaarsholm, K., Sundmark, K., Florian, B., Kragelund, C., Bester, K., & Andersen, H. (2020).** Removal of pharmaceuticals, toxicity and natural fluorescence through the ozonation of biologically-treated hospital wastewater, with further polishing via a suspended biofilm. *Chemical Engineering Journal, 359. 321–330.* https://doi.org/10.3390/w12041059

13. **Bassin, J. P., Dias, I. N., Cao, S. M. S., Senra, E., Laranjeira, Y., & Dezotti, M. (2016).** Effect of increasing organic loading rates on the performance of moving-bed biofilm reactors filled with different support media: assessing the activity of suspended and attached biomass fractions. *Process Safety and Environmental Protection, 100.* 131–141. https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.007

14. **Feng, G., Cheng, Y., Wang, S.-Y., Borca-Tasciuc, D. A., Worobo, R. W., & Moraru, C. I. (2015).** Bacterial attachment and biofilm formation on surfaces are reduced by small-diameter nanoscale pores: how small is small enough? *Biofilms and Microbiomes, 1.* 15022. https://doi.org/10.1038/npjbiofilms.2015.22

15. **Yang, X.-L., Jiang, Q., Song, H.-L., Gu, T.-**

T., & Xia, M.-Q. (2015). Selection and application of agricultural wastes as solid carbon sources and biofilm carriers in MBR. *Journal of Hazardous Materials, 283.* 186–192. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.036

16. **Zhang, X., Zhou, X., Ni, H., Rong, X., Zhang, Q., Xiao, X., Huan, H., Liu, J. F., & Wu, Z. (2018).** Surface modification of basalt fiber with organic/inorganic composites for biofilm carrier used in wastewater treatment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6(2).* 2596–2602. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04089

17. **Sun, L., Wang, J., Liang, J., & Li, G. (2019)** Boric acid cross-linked 3D polyvinyl alcohol gel beads by NaOH-titration method as a suitable biomass immobilization matrix. *Journal of Polymers and the Environment, 27.* https://doi.org/10.1007/s10924-019-01610-z

18. **Geiger, M. & Rauch, B. (2017)** Diffusion depth: a crucial factor for MBBR carrier. *Filtration + Separation, 54(3).* 30–32. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(17)30035-6

19. **Swain, A. K., Sahoo, A., Jena, H. M., & Patra, H. (2018).** Industrial wastewater treatment by aerobic inverse fluidized bed biofilm reactors (AIFBBRs): a review. *Journal of Water Process Engineering, 23.* 61–74. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.017

20. **Hlihor, R. M., Figueiredo, H., Tavares, T., & Gavrilescu, M. (2017).** Biosorption potential of dead and living Arthrobacter viscosus biomass in the removal of Cr(VI): batch and column studies. *Process Safety and Environmental Protection, 108.* 44–56. https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.016

21. **Pesciaroli, L., Petruccioli, M., Federici, F., & D'Annibale, A. (2013).** Pleurotus ostreatus biofilms exhibit higher tolerance to toxicants than free-floating counterparts. *Biofouling, 29(8).* 1043–1055. https://doi.org/10.1080/08927014.2013.825901

Efficiency of biological wastewater treatment using immobilized microorganisms on different types of carriers

Andrii Hrynevych, Larysa Sablii, Veronika Zhukova, Iryna Liashok

Abstract. The paper investigates the efficiency of wastewater treatment biotechnology using immobilized microorganisms, the formation of biofilm on polymer carriers, and its ability to ensure the removal of organic pollutants from wastewater. Changes in the Chemical Oxygen Demand (COD) index were determined at different treatment durations: 6, 8, and 12 hours. After biomass cultivation using activated sludge for 14 days, the carriers were transferred to flow bioreactors, and the change in organic matter concentration was determined depending on the carrier type. It was established that with a duration of 8 hours, all carriers ensured the achievement of maximum permissible concentrations (MPC) for COD for discharging wastewater into water bodies. The "Honeycomb" carrier demonstrated the highest efficiency – 80–87% COD reduction at initial values of 500, 200, and 80 mg/dm³. The use of "Brush" and "Wave" carriers showed a COD treatment effect of 50–77%, depending on the experimental conditions. It was revealed that the largest amount of biomass was immobilized on the "Brush" carrier – up to 390 mg/dm^3; however, the excessive biofilm thickness limited oxygen diffusion and reduced oxidation intensity. The obtained results showed high efficiency of biological wastewater treatment using microorganisms immobilized on carriers – up to 90%, but indicate a significant influence of the carrier design on the treatment process and the importance of a rational choice of carrier type.

Keywords: biotechnology, microorganisms, biofilm, activated sludge, wastewater, wastewater treatment, immobilization, polymer carriers.

Стаття надійшла до редакції 15.11.2025