

# СУЧАСНІ БІОТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД З ВИКОРИСТАННЯМ БІОРЕАКТОРІВ З ІММОБІЛІЗОВАНИМИ МІКРООРГАНІЗМАМИ

Самченко К. Ю.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, [samchenko.kateryna@iit.kpi.ua](mailto:samchenko.kateryna@iit.kpi.ua)

## Abstract

*The abstract examines global water scarcity and increasing wastewater generation due to rising water demand and human activities. The Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) is studied as an effective biological treatment solution. The design and operation of MBBR systems with suspended plastic biofilm carriers are discussed, focusing on their role in enhancing biomass concentration and nutrient removal. The structure and function of MBBR aeration tanks are analyzed, along with the characteristics of various commercial plastic carriers.*

**Keywords:** wastewater, biological treatment, moving bed biofilm reactor, carriers of immobilized microorganisms.

**Вступ.** Нестача води та неефективне управління стічними водами є одними з ключових викликів сталого розвитку в сучасному світі. За останнє сторіччя глобальне споживання води зросло у шість разів, і прогнозується, що до 2050 року попит досягне приблизно 6000 км<sup>3</sup> на рік, що значно перевищує нинішній рівень у 4600 км<sup>3</sup>. Таке зростання споживання води спричиняє утворення великої кількості стічних вод. До того ж, різноманітна людська діяльність призводить до забруднення стічних вод речовинами з високими показниками біохімічного та хімічного споживання кисню, фосфору, азоту, завислих речовин тощо. Останнім часом усе більше уваги приділяється також наявності у стічних водах токсичних забруднень, таких як лікарські препарати, дезінфікувальні засоби, барвники та хімічні реагенти. У відповідь на ці виклики було розроблено низку фізичних, хімічних, біологічних методів очищення, а також їх комбінацій, які активно впроваджують протягом останніх десятиліть [1]. Зокрема, технологія очистки стічних вод з використанням іммобілізованих мікроорганізмів полягає в тому, щоб за допомогою хімічних або фізичних засобів локалізувати клітини або ферменти в обмеженому просторі з подальшим їх застосуванням для водоочистки [2].

Мета роботи – проаналізувати конструктивні особливості, принципи роботи та ефективність застосування біореакторів з рухомим шаром носія (MBBR - moving-bed biofilm reactor) для біологічного очищення стічних вод, зосереджуючи увагу на ролі іммобілізованих мікроорганізмів, типах пластикових носіїв та ключових експлуатаційних параметрах, що впливають на стабільність і продуктивність системи.

**Матеріали та методи.** У роботі застосовано метод аналітичного огляду наукових джерел щодо біологічного очищення стічних вод із використанням біореакторів з іммобілізованими мікроорганізмами, зокрема систем MBBR. Розглянуто конструктивні особливості реакторів, типи пластикових носіїв та вплив технологічних параметрів (температури, рН, гідравлічного часу утримування, концентрації забруднень) на ефективність очищення. Узагальнено

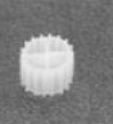
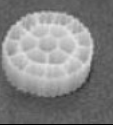
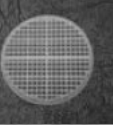
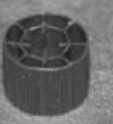
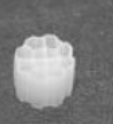
характеристики комерційних носіїв біоплівки та їх роль у стабільності і продуктивності систем.

**Результати та обговорення.** За останні 20 років біоплівкові реактори з рухомим шаром носія MBBR зарекомендували себе як проста, але надійна, гнучка і компактна споруда для біологічного очищення стічних вод. Використання MBBR дає змогу досягти ефективного зниження показника БСК, окислення аміаку та видалення інших сполук азоту для різних за складом стічних вод, враховуючи вимоги скиду у природні водойми [3].

У реакторах з рухомим шаром носія використовують пластикові елементи-носії для прикріплення біоплівки, які утримуються в завислому стані у всьому об'ємі реактора за рахунок турбулентної енергії, що передається аерацією, рециркуляцією рідини або енергією механічного перемішування. У більшості випадків реактор заповнюють носіями на одну-дві третини. Перфоровані пластини або сітки, розташовані на вихідному кінці реактора, пропускають очищену воду на наступний етап очищення, але затримують носії всередині реактора [3].

Було розроблено [2] низку носіїв різних конструкцій, матеріалів та технологій виробництва (табл. 1).

**Таблиця 1. Типи пластикових носіїв [2]**

| Назва виробника                  | Назва носія                   | Площа питомої поверхні насипного матеріалу, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup> | Номинальні розміри носія (висота; діаметр), мм | Зображення носія                                                                      |
|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Veolia, Inc.                     | AnoxKaldnes™ K1               | 500                                                                        | 7; 9                                           |  |
|                                  | AnoxKaldnes™ K3               | 500                                                                        | 12; 25                                         |  |
|                                  | AnoxKaldnes™ biofilm chip (P) | 900                                                                        | 2; 48                                          |  |
| Infilco Degremont, Inc.          | ActiveCell™ 450               | 450                                                                        | 15; 22                                         |  |
| Siemens Water Technologies Corp. | ABC4™                         | 600                                                                        | 14; 14                                         |  |
| Entex Technologies, Inc.         | Bioportz™                     | 589                                                                        | 14; 18                                         |  |

Спеціально розроблені носії біоплівки мають значний вплив на ріст біомаси, утримання мікроорганізмів і видалення забруднювальних речовин, що дає змогу значно покращити ефективність роботи реактора. Носії для біоплівок – це гідродинамічні платформи, які полегшують масообмін і сприяють росту біоплівки. У разі зміни характеристик стічних вод, параметрів та операційних процедур вони можуть створювати непроникну біоплівку, яка захищає мікроби від знищення. Кілька досліджень показали, що біоплівки мають довший термін виживання, вони набагато стійкіші, ніж завислі консорціуми мікроорганізмів, принаймні у випадку виживання, і більш стійкі до раптових змін параметрів навколишнього середовища, таких як концентрація речовини, рН, тип субстрату, температура і солоність [4].

MBBR сприяють створенню високоспеціалізованої біоплівки, яка добре підходить для конкретних умов в реакторі. Ця біомаса забезпечує високу об'ємну ефективність і підвищену стабільність процесу, що створює умови для компактнішого проєктування аеротенка [5].

Ефективність роботи системи MBBR значною мірою залежить від таких параметрів, як температура, рН, швидкість подачі та концентрація забруднювачів. Оптимальне органічне навантаження сприяє ефективній взаємодії мікроорганізмів із забруднювачами. Надмірне навантаження може пригнічувати ріст мікробів через токсичність субстрату. Оптимальна межа для видалення барвника конго червоний становила 60–72,3 мг/(л·добу), а для малатіону — 144–165 мг/(л·добу). Гідравлічний час утримування (HRT) визначає тривалість перебування стічної води у реакторі. Короткий HRT знижує ефективність через меншу взаємодію мікроорганізмів із забрудненнями, тоді як тривалий HRT підвищує ефективність, але потребує більших об'ємів, а також матеріальних та енергетичних витрат. Температура впливає на ріст біоплівки, розчинність субстрату та активність ферментів. Оптимальний діапазон для більшості бактерій — 20–45°C, з піковою активністю біодеградації близько 37°C. рН значно впливає на ферментативну активність і ріст мікроорганізмів. Оптимальний діапазон — 6.0–8.0. Найкращої біодеградації толуолу досягнуто за рН 6.85, тоді як кислі або лужні умови знижують ефективність [6].

На відміну від більшості інших біоплівкових процесів у зануреному шарі, у реакторах MBBR відбувається безперервний проточний процес, що усуває необхідність зворотного промивання носія для підтримки пропускної здатності і продуктивності; таким чином, втрати потужності та операційна складність етапу очищення зведені до мінімуму [3].

На відміну від процесів з активним мулом, біологічне очищення в MBBR не залежить від ефективності вторинного відстоювання, оскільки більша частина активної біомаси постійно утримується в реакторі. Концентрація завислих речовин на виході з реактора принаймні на порядок нижча. Тому MBBR сумісні з різними методами сепарації, а не лише зі звичайними відстійниками [3].

Збільшення ефективності MBBR досягається за допомогою декількох послідовно з'єднаних реакторів, кожен з яких призначений для виконання певної стадії очищення стічних вод в процесі багатоступеневої технології. Це доцільно,

оскільки кожен реактор сприяє розвитку спеціалізованої біоплівки, орієнтованої на досягнення певної мети очищення, виходячи з умов, встановлених в реакторі (наприклад, наявність акцептора електронів чи донора електронів) [3].

До недоліків MBBR можна віднести те, що на аерацію витрачається багато енергії, завдяки якій не тільки мікроорганізми отримують кисень, але й носії рухаються всередині реактора. У недосконало спроектованій системі через проблеми, пов'язані з гідродинамікою, може відбуватися утворення застійних зон. Такі системи можуть бути досить дорогими для впровадження, насамперед через початкові витрати на будівництво та встановлення реактора, а також придбання спеціальних носіїв [4].

Останнім часом інтеграцію MBBR із сучасною мембранною біореакторною технологією (гібрид MBBR-MBR) розглядають як перспективний напрямок, який може ще більше підвищити ефективність технологій очищення стічних вод [6].

**Висновки.** Отже, універсальність технології MBBR полягає в її здатності адаптуватися до різних умов очищення стічних вод завдяки використанню реакторів і пластикових носіїв із різною геометрією та питомою поверхнею. Це забезпечує високу ефективність у видаленні органічних речовин, сполук азоту та токсичних забруднень. Здатність MBBR інтегруватися в існуючі системи уможливорює модернізацію класичних аеротенків без значних конструктивних змін. Системи MBBR демонструють високу стабільність навіть за змінних умов експлуатації, знижуючи ризики порушення біологічних процесів. Крім того, гнучкість у проектуванні та можливість масштабування роблять цю технологію перспективною для подальшого впровадження в муніципальних та промислових очисних спорудах. Таким чином, MBBR є ефективною, надійною та екологічно доцільною технологією біологічного очищення стічних вод.

**Подяка:** д. т. н. Саблій Ларисі Андріївні, професору, професору кафедри біоенергетики, біоінформатики та екобіотехнології ФБТ за наукове керівництво.

### Список використаної літератури:

1. Duduku Saidulu, Abhradeep Majumder, Ashok Kumar Gupta, A systematic review of moving bed biofilm reactor, membrane bioreactor, and moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment: Comparison of research trends, removal mechanisms, and performance, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 9, Issue 5, 2021, 106112, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106112>.
2. Cui Mingchao, Chen Fanzhong, Fu Jiamo, et al. Progress in the Research on Immobilized Microorganism Technology for Wastewater Treatment. *Environmental Protection of Chemical Industry*. Vol. 23 (2003) NO. 5, p. 261-264.
3. WEF, MOP No 35 - Biofilm Reactors, 2011.
4. Santhana Raj Deena, Gopalakrishnan Kumar, A.S. Vickram, Reeta Rani Singhania, Cheng-Di Dong, Karunakaran Rohini, K. Anbarasu, S. Thanigaivel, Vinoth Kumar Ponnusamy, Efficiency of various biofilm carriers and microbial interactions with substrate in moving bed-biofilm reactor for environmental wastewater treatment, *Bioresource Technology*, Volume 359, 2022, 127421, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127421>.
5. What is IFAS, and how does it work? [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ssiaeration.com/what-is-ifas-how-does-it-work/#1>.
6. Ravi Kumar Sonwani, Ravi Prakash Jaiswal, Birendra Nath Rai, Ram Sharan Singh, Chapter 15 - Moving bed biofilm reactor- (MBBR-) based advanced wastewater treatment technology for the removal of emerging contaminants, Editor(s): Maulin Shah, Susana Rodriguez-Couto, Jayanta Biswas, *Development in Wastewater Treatment Research and Processes*, Elsevier, 2022, Pages 349-370, ISBN 9780323855839, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85583-9.00020-X>.