

УДК 628.35:628.3.07

<https://doi.org/10.31713/vt320253>

Квартенко О. М. [1; ORCID ID: 0000-0001-5634-1128],

Д.Т.Н., доцент

¹Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ МЕМБРАННИХ БІОРЕАКТОРІВ В ГАЛУЗІ БІОТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯМ СТИЧНИХ ВОД

Метою роботи є вивчення сучасних конструкцій МБР, правил їх експлуатації, проблем які виникають при експлуатації, методів регенерації мембран.

В роботі наведено сучасні конструкції мембранних реакторів, основні характеристики та умови застосування різних типів мембранних модулів. Представлено порівняльні характеристики експлуатації технологічних схем. Визначено основні етапи експлуатації МБР: запуск та стабілізація системи; поточна експлуатація (регулювання потоку стічних вод, повітря – контроль параметрів процесу – очищення мембран – видалення надлишкового мулу); профілактичне обслуговування та ремонт; технічне обслуговування. Проведено аналіз біоплівки обрастання та їх вплив на експлуатацію мембранних біореакторів. Визначені основні фактори впливу на забруднення мембран. Представлено переваги та недоліки систем МБР у порівнянні з традиційними методами. Наведено класифікацію забруднень мембран та методів їх очищення.

Ключові слова: мембранний біореактор; етапи експлуатації; забруднення мембран; види регенерації мембран.

Вступ. Мембранний біореактор представляє собою комбінацію процесів біологічної очистки і ультрафільтрації. Модуль МБР складається з полімерних мембран (рис. 1, а) між якими розташовуються шар пластівців біоплівки (рис. 1, б). Вода під тиском проходить через водопроникні поволоконні мембрани з розміром пор від 0,03 мікрон до 0,5 мікрон (рис. 1, в). В залежності від розміру пор мембран можна отримати воду якості ультрафільтрації чи мікрофільтрації.

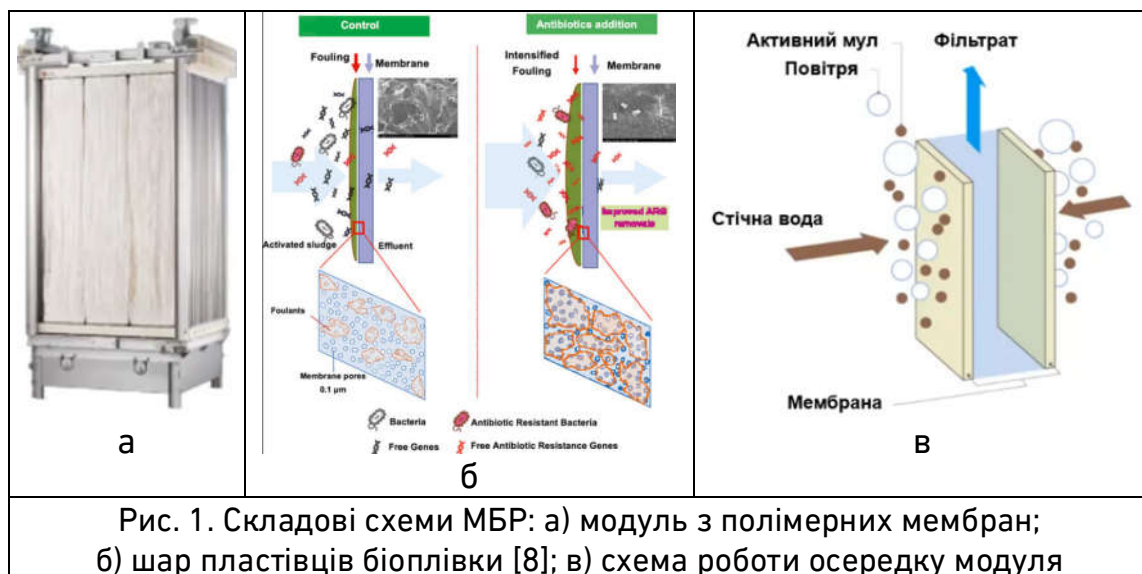
Технологія була розроблена ще в 60-х роках. Але справжній розвиток на ринку вона отримала в останні 20–30 років в результаті появи цілого спектру недорогих матеріалів для мембран.

Метою роботи є вивчення сучасних конструкцій МБР, методів регенерації мембран та проблем які виникають при їх експлуатації.

Для виробництва полімерних мембран зазвичай використовують: полівініліденфторид (PVDF), поліетілсульфон (PES),

поліетилен (PE), поліпропілен (PP). Кожна мембрана має тонкий поверхневий шар, що забезпечує необхідну перміселективність, а під нею більш товстий та пористий шар, що є опорою (каркосом), яка забезпечує механічну стійкість мембрани.

В практиці очищення води, зазвичай, використовують наступні конфігурації мембран: з полими волокнами, спіральні, плоскорамні, плісировані, трубчаті [1]. Найбільш поширеними є половолоконні та плоскі мембрани [1]. Половолоконні модулі мають питому поверхню 300–600 м²/м³, плоскі – 50–150 м²/м³. Питома проникність плоских мембран складає 15–30 л/м³ год, половолоконних – 10–30 л/м³ год [2].



В теперішній час всі існуючі мембранні модулі для МБР систем можливо поділити на три типи: порожнистоволоконні, плоско-рамні та мультитрубні (рис. 2).



Рис. 2. Типи мембранні модулів: а) порожнистоволоконні; б) плоско-рамні; в) мультитрубні

Характеристика та умови застосування різних типів мембранних модулів для систем МБР (табл. 1). Серед працюючих мембранних біореакторів більшу частину (> 90%) складають мембранні біореактори зануреного типу (табл. 2).

Таблиця 1

Характеристика та умови застосування різних типів мембранних модулів [3]

Тип модуля	Порожнисто-волоконні	Плоско-рамні	Мультитрубні
Тип фільтрації	Ультрафільтрація		
		мікрофільтрація	
Напрямок фільтруван.	Зовні – всередину		Зсередини – назовні
Тип установки	Занурені		Суша
Витрата м ³ /добу	Не обмежений	Від 2 000	≤2 000
Переваги	Компактність	Тривалий термін (6–8 років) експлуатації: Низька частота промивок та витрати реагентів	Найбільш компактна установка при відсутності мембранних резервуарів
Недоліки	Високі витрати реагентів на промивку та частота регенерації	Великі витрати повітря на регенерацію мембран	Швидке забруднення; Висока енергоємність Незначний термін експл.

Таблиця 2

Порівняльні характеристики експлуатації технологічних схем (рис. 3)

МБР і зануреним модулем фільтрації	МБР і зовнішнім модулем фільтрації
Дешевша вартість МБР модулів та споживання електроенергії	Дорожча вартість МБР модулів та споживання електроенергії
Складніше в обслуговуванні (використання хімічних реагентів для регенерації мембран негативно впливає на розвиток біомаси)	Простий при обслуговуванні та заміні модулів. Гнучкість режимів роботи та промивок.
Придатний для великих установок	Придатний для використання на невеликих об'єктах

Підвищені дози активного мулу ($8\text{--}12\text{ г/дм}^3$) дозволяють забезпечуючи стабільну якість очищення і стійкий до зовнішніх чинників біоценоз активного мулу. Ступінь очищення стічних вод в мембранному біореакторі становить за показниками БПК – $98,7\text{--}99,7\%$, ХПК – $80\text{--}90\%$, азоту амонійному – $98,5\text{--}99,8\%$, фосфору – $90\text{--}95\%$ [1]. Ефективність видалення бактерій – $99,99\%$, вірусів – 99% [1; 4]. В таблиці 3 наведено порівняння показників якості води за технологіями: «аеротенки-вторинні відстійники» та МБР.

Таблиця 3

Порівняння показників якості води за технологіями:
«аеротенки-вторинні відстійники» та МБР

Порівняльні параметри	Активний мул	МБР
Зважені частинки, мг/дм^3	10–15	<0,1
ХПК, $\text{мгO}_2/\text{дм}^3$	40–50	<30
Мікробіологічне число		50 КОЕ/мл
Споживання енергії, кВтгод/м^3	0,2–0,4	0,7–1,5

Слід відзначити можливість переобладнання традиційних технологій (аеротенки-вторинні відстійники) до технологій мембранних біореакторів. Варіанти конфігурації використання МБР технології наведено на (рис. 3).

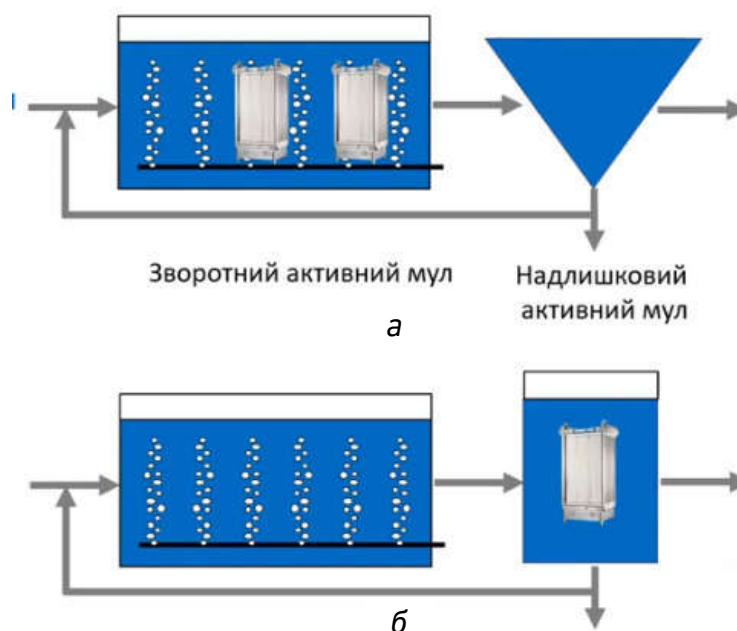


Рис. 3. Схеми використання МБР реакторів при реконструкції діючих очисних споруд за технологією «аеротенки-вторинні відстійники»: а) МБР і зануреним модулем фільтрації; б) МБР із зовнішнім модулем фільтрації

Така реконструкція дозволяє отримати наступні переваги при будівництві та експлуатації: компактність та відсутність вторинних відстійників (рис. 4); високі концентрації активного мулу; можливість експлуатації біореактора як з дуже малим, так і дуже великим віком мулу (наприклад, 1 доба або менше або більш ніж 30 діб); зберігання повільно зростаючих мікроорганізмів, таких як нітрифікуючі бактерії; швидкий запуск завдяки збереженню всієї біомаси; можливість повторного використання очищеної води.

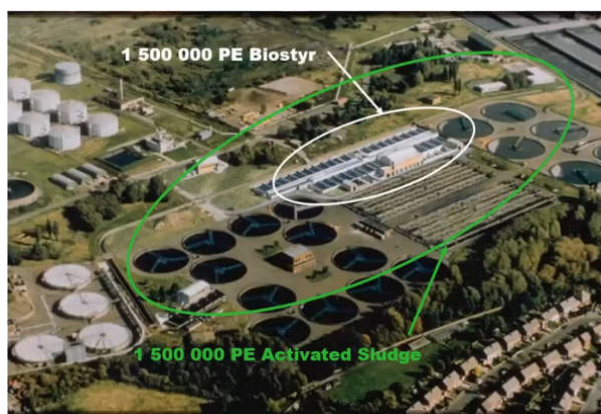


Рис. 4. Реконструкція очисних споруд м. Манчестер: зеленим виділено площу яку займають аеротенки-вторинні відстійники; білим – площа цехів МБР

Основні елементи будь-якого мембранного процесу пов'язані з загальною продуктивністю перміату: опір мембрани; гідродинамічні умови на межі поділу мембрана – рідина; забруднення та очистка поверхні мембрани.

Основні етапи експлуатації МБР:

1. Запуск та стабілізація системи:

- Забезпечення оптимальних умов для розвитку мікроорганізмів, що беруть участь у біологічному очищенні (поживне середовище, температура, рН).
- Адаптація мікроорганізмів до складу стічних вод та умов експлуатації.
- Моніторинг параметрів системи для оцінки стабільності процесу (концентрація розчиненого кисню, рН, температура).

2. Поточна експлуатація:

- Регулювання потоку стічних вод та обсягу повітря: підтримка оптимального навантаження на систему та забезпечення необхідного рівня аерації для біологічного процесу.



- Контроль параметрів процесу: регулярний моніторинг концентрації активного мулу, вмісту розчиненого кисню, рН, температури та інших показників, що впливають на ефективність очищення.

- Очищення мембран: мембрани з часом забруднюються, що призводить до зменшення їхньої пропускної здатності. Необхідно регулярно проводити хімічне або фізичне очищення мембран для відновлення їхньої ефективності.

- Видалення надлишкового мулу: збільшення концентрації активного мулу в МБР досягається за рахунок тривалого утримування його в системі. Необхідно видаляти надлишковий мул для підтримки оптимальної концентрації та ефективності роботи.

3. Профілактичне обслуговування та ремонт:

- Перевірка обладнання: регулярна перевірка насосів, компресорів, мембранних модулів та інших компонентів системи на предмет зносу та пошкоджень.

- Планова заміна обладнання: заміна мембран та інших компонентів системи після закінчення терміну їхньої експлуатації.

- Калібрування та налаштування обладнання: регулярна перевірка та налаштування датчиків та інших приладів для забезпечення точності вимірювань.

4. Технічне обслуговування та контроль:

- Забезпечення безпеки: дотримання правил безпеки при роботі з хімічними реагентами та обладнанням.

- Навчання персоналу: підготовка кваліфікованого персоналу для обслуговування та ремонту системи.

- Ведення документації: облік всіх операцій з експлуатації, обслуговування та ремонту системи.

Одним із найскладніших питань експлуатації мембранних біореакторів є своєчасне видалення забруднень з поверхні та пор мембрани. Складність завдання полягає в тому, що високий вік мулу призводить до накопичення в водному середовищі інертних сполук завдяки його мінералізації, а розчинені мікробні продукти або розчинні фракції мулової суміші відповідають за блокування пор мембрани, що не видаляється фізичною очисткою і, таким чином, значно знижує проникність мембрани [5; 6].

Крім того, в процесі роботи мембранних модулів в порах та на поверхні мембрани утворюється динамічний шар відкладень, який сприяє фізичному видаленню значної кількості макромолекул, колоїдних речовин, ферментів, позаклітинних полімерних речовин,

що збільшує загальну ефективність очистки стічних вод в середньому на 10–20% [1]. На забруднення мембран також впливають: доза мулу, розмір пластівців мулу, в'язкість, позаклітинні полімерні речовини, відносна гідрофобність і поверхневий заряд.

Унаслідок досліджень [4] було встановлено, що товщина шару біоплівки становила 5–12 мм. Верхній її шар, окисна зона світло-коричнювого кольору, мав товщину біля 1 мм, нижній – відновна зона темного кольору мала товщину до 11 мм [4].

Дослідження налипань [4] виявили в них велику кількість макропластику (частинок розміром > 5мм): 29 г/кг (сухої ваги налипань) та мікропластику (розміром ≤5мм): 4,33 г/кг, або 1940 шт/кг. В налипаннях на мембранах виявлено також високу зольність – 62,2 % [4]. Серед зольних елементів переважали сполуки кальцію – до 21% золи або 12,7% сухої речовини налипань.

Всі забруднення мембран діляться на три основні типи: забруднення, які можуть бути видалені фізичною очисткою; забруднення, які можуть бути видалені хімічною очисткою; безповоротні забруднення, які не можуть бути видалені.

У зв'язку з цим при експлуатації мембранних біореакторів застосовують продувку повітрям зовнішньої поверхні мембран; зворотну промивку впродовж 30–120 с кожні 10–25 хв роботи; хімічну очистку гіпохлоритом натрію або гідроксидом натрію для видалення гумінових речовин, білків, вуглеводів та органічну кислотну очистку для видалення неорганічних забруднень. При наявності великої кількості забруднень на поверхні мембрани, її видаляють з реактору та замочують у слабokonцентрованому розчині гіпохлорита натрію на протязі 12–30 год.

Для зменшення забруднення мембран також використовують періодичну зупинку процесу фільтрування. В цей момент потоки рідини та повітря навколо мембрани уносять з її поверхні частинки забруднень, а дифузійний та конвективний потоки – розчинені та колоїдні домішки [1; 7].

Висновки. 1. Сучасні конструкції мембранних модулів для МБР систем можливо поділити на: порожнистолоконні, плоско-рамні та мультитрубні. 2. Визначено основні етапи експлуатації МБР: запуск та стабілізація системи; поточна експлуатація (регулювання потоку стічних вод, повітря – контроль параметрів процесу – очищення мембран – видалення надлишкового мулу); профілактичне обслуговування та ремонт; технічне обслуговування. 3. Встановлено, що одним із найскладніших питань експлуатації мембранних



біореакторів є своєчасне видалення забруднень з поверхні та пор мембрани. 4. Виявлено що основними забрудненнями мікропор є розчинені мікробні продукти або розчинні фракції мулової суміші, що не видаляється фізичною очисткою. 5. Для промивки мембранних біореакторів застосовують продувку повітрям зовнішньої поверхні мембран; зворотну промивку впродовж 30–120 с кожні 10–25 хв роботи; хімічну очистку гіпохлоритом натрію або гідроксидом натрію для видалення гумінових речовин, білків, вуглеводів та органічну кислотну очистку для видалення неорганічних забруднень.

1. Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology / J. Radjenovic, M. Matosic, I. Mijatovic, M. Petrovic, D. Barcelo. *Handbook of Environmental Chemistry. Water Pollution*. 2008. Vol. 5, Part S/2. P. 37–101. 2. Нагорна О. К. Особливості застосування та експлуатації мембранних біореакторів для біологічної очистки стічних вод. *Науковий Вісник Будівництва*. С. 177–181. 3. Христенко А. М. Експлуатація споруд біологічної очистки стічних вод з використанням мембранних технологій : дис. ... д-ра філософії / Харківський національний університет будівництва та архітектури. Харків, 2023. 143 с. 4. Sayed S. K. I., El-Ezaby K. H., Groendijk L. Treatment of potato processing wastewater using a membrane bioreactor. *Ninth International Water Technology Conference IWTC9 2005* : Sharm El-Sheikh, Egypt. 2005. P. 53–68. 5. T. Itonaga, K. Kimura, Y. Watanabe. Influence of suspension viscosity and colloidal particles on permeability of membrane used in membrane bioreactor (MBR). *Water Sci. Technol.* 2004. Vol. 50. P. 301–309. 6. S. Rosenberger, H. Evenblij, S. te Poele, T. Wintgens, C. Laabs. The importance of liquid phase analyses to understand fouling in membrane assisted activated sludge processes—six case studies of different European research groups. *J. Membr. Sci.* 2005. Vol. 263. P. 113–126. 7. Do A. T. Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) for Treatment of Landfill Leachate and Removal of Micropollutants: A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy / University of South Florida, USA. South Florida, 2011. 195 p. 8. Yijing Zhu, Yayi Wang, Shuai Zhou, Xuxin Jiang, Xiao Ma, Chao Liu. Robust performance of a membrane bioreactor for removing antibiotic resistance genes exposed to antibiotics: Role of membrane foulants. *Water Research*. 1 March 2018.

REFERENCES:

1. Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology / J. Radjenovic, M. Matosic, I. Mijatovic, M. Petrovic, D. Barcelo. *Handbook of Environmental Chemistry. Water Pollution*. 2008. Vol. 5, Part S/2. P. 37–101. 2. Nahorna O. K. Osoblyvosti zastosuvannia ta ekspluatatsii mebrannykh bioreaktoriv dlia biolohichnoi ochystky stichnykh vod. *Naukovyi Visnyk Budivnytstva*. S. 177–181. 3. Khrystenko A. M. Ekspluatatsiia sporud biolohichnoi ochystky stichnykh vod z vykorystanniam membrannykh tekhnolohii : dys. ... d-ra filosofii / Kharkivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury. Kharkiv, 2023. 143 s. 4. Sayed S. K. I., El-Ezaby K. H., Groendijk L. Treatment of potato processing wastewater using a

membrane bioreactor. *Ninth International Water Technology Conference IWTC9 2005* : Sharm El-Sheikh, Egypt. 2005. P. 53–68. **5.** T. Itonaga, K. Kimura, Y. Watanabe. Influence of suspension viscosity and colloidal particles on permeability of membrane used in membrane bioreactor (MBR). *Water Sci. Technol.* 2004. Vol. 50. P. 301–309. **6.** S. Rosenberger, H. Evenblij, S. te Poele, T. Wintgens, C. Laabs. The importance of liquid phase analyses to understand fouling in membrane assisted activated sludge processes—six case studies of different European research groups. *J. Membr. Sci.* 2005. Vol. 263. P. 113–126. **7.** Do A. T. Anaerobic Membrane Bioreactor (AnMBR) for Treatment of Landfill Leachate and Removal of Micropollutants: A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy / University of South Florida, USA. South Florida, 2011. 195 p. **8.** Yijing Zhu, Yayi Wang, Shuai Zhou, Xuxin Jiang, Xiao Ma, Chao Liu. Robust performance of a membrane bioreactor for removing antibiotic resistance genes exposed to antibiotics: Role of membrane foulants. *Water Research*. 1 March 2018.

Kvartenko O. M. [1; ORCID ID: 0000-0001-5634-1128],
Doctor of Engineering, Associate Professor

¹*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*

FEATURES OF THE DESIGN AND OPERATION OF MEMBRANE BIOREACTORS IN THE FIELD OF BIOTECHNOLOGY AND WASTEWATER TREATMENT

The purpose of the work is to study modern designs of MBRs, rules for their operation, problems that arise during operation, and methods of membrane regeneration. The paper presents modern designs of membrane reactors, the main characteristics and conditions of application of different types of membrane modules. Comparative characteristics of the operation of technological schemes are presented. It has been shown that increased doses of activated sludge (8–12 g/dm³) allow ensuring stable purification quality. The degree of wastewater purification in a membrane bioreactor is BOD – 98.7–99.7%, COD – 80–90%, ammonium nitrogen – 98.5–99.8%, phosphorus – 90–95%. The efficiency of bacteria removal is 99.99%, viruses – 99%. Schemes of conversion of traditional technologies (aerotanks-secondary clarifiers) to membrane bioreactor technologies are presented. It is emphasized that reconstruction allows for advantages in construction and operation: compactness of structures; high concentrations of activated sludge; storage of slowly growing microorganisms (nitrifying bacteria). The main stages of MBR operation are determined: system startup and stabilization; ongoing operation (regulation of wastewater and air flow – control of process parameters – membrane cleaning – removal of excess sludge); preventive maintenance and repair; maintenance.



An analysis of biofilm fouling and their impact on the operation of membrane bioreactors was conducted. The main factors influencing membrane fouling were identified. The advantages and disadvantages of MBR systems compared to traditional methods were presented. A classification of membrane fouling and methods for their cleaning was provided.

Keywords: membrane bioreactor; stages of operation; membrane contamination; types of membrane regeneration.

Отримано: 17 червня 2025 року
Прорецензовано: 02 вересня 2025 року
Прийнято до друку: 25 вересня 2025 року