



Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНІШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315

<https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.331379>

РЕГЕНЕРАЦІЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ МЕМБРАН ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ

Ольга ШЛИХТЕР, Артур КОСОГІН, Ірина КОСОГІНА

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського

пр. Берестейський 37, корп. 4, 03056, м. Київ, Україна

e-mail: shlikhter.olga@lil.kpi.ua

Анотація

Воєнні дії серйозно впливають на стан водних ресурсів України через пошкодження нафтоховищ, складів паливно-мастильних матеріалів та знищення інфраструктури підприємств і очисних споруд, що призводить до значного забруднення водних об'єктів. Забезпечення населення якісною питною водою за даних умов (локально) можливе із застосуванням мембранних технологій. В результаті експлуатації комерційних та побутових мембранних систем на поверхні зворотноосмотичних мембран утворюються відкладення (фоулінг), через що знижується продуктивність системи, а мембрани потребують заміни на нові. На даний момент відпрацьовані комерційні та побутові мембрани зворотного осмосу практично не утилізуються. В роботі запропоновано здійснювати регенерацію відпрацьованих мембран у три стадії з наступним використанням регенованих мембран у технології очищення стічних вод з пониженням рейтингу зворотноосмотичних мембран до нанофільтраційних або ультрафільтраційних.

Ключові слова: якість води, очищення води, мембрани, зворотний осмос, фоулінг, окисник, регенерація.

Рівень забруднення поверхневих та підземних вод зростає з кожним роком, виною тому є пошкодження критичної інфраструктури внаслідок воєнних дій, антропогенний вплив на водні ресурси, а також скид у відкриті водойми недостатньо очищених стічних вод. Муніципальні та промислові відходи, хімічні добрива, гербіциди та пестициди, які не були належним чином утилізовані, потрапляють у ґрунт, просочуються в деякі водоносні горизонти і погіршують якість ґрунтових вод [1, 2].

Наразі існуючі традиційні системи водопідготовки не здатні ефективно очистити воду через значне погіршення її якості. Мембранні технології із застосування зворотноосмотичних (ЗО) мембран є ефективним рішенням, яке може забезпечити гарантовану якість води.

Метою роботи є встановлення закономірностей регенерації відпрацьованих побутових та комерційних зворотноосмотичних мембран з пониженням рейтингу фільтрації для їх повторного використання в технології очищення стічних вод. Встановлення параметрів регенерації відпрацьованих елементів дозволить отримувати мембрани із заданими характеристиками, які зможуть бути використані на рівні з новими. Повторне використання регенованих елементів буде сприяти зменшенню кількості відходів та концепції циркулярної економіки у водопідготовці.

Мембранні процеси широко використовуються як в різних технологічних процесах, так і в галузі охорони навколишнього середовища для очищення, розділення і концентрування водних розчинів. Також мембранні процеси використовуються для створення комбінованих технологічних схем очищення стічних вод і для організації замкнутих водооборотних систем. До основних мембранних методів поділу рідких систем відносяться ультрафільтрація, нанофільтрація та зворотний осмос.

За продуктивністю мембранних технологій вирізняють: промислові, комерційні та побутові системи. Основною проблемою експлуатації мембранних систем є їх чутливість до якості води, яка подається на очищення та утворення на поверхні мембранних елементів відкладень (фоулінгу) різного типу. Розрізняють органічний фоулінг, колоїдний фоулінг, біофоулінг та неорганічний фоулінг (скейлінг). Органічний фоулінг формується на поверхні мембрани через осадження органічних речовин у примембранному шарі, наприклад гумінових речовин, які надають воді високої кольоровості. Колоїдний фоулінг формується на поверхні мембран через наявність у воді сполук заліза, мангану та силікатів, які при взаємодії з розчиненим у воді киснем утворюють малорозчинні сполуки, наприклад гідроксид заліза. Біофоулінг – це закріплення на поверхні мембран мікроорганізмів (бактерії, віруси), які присутні у воді, а відкладення неорганічних речовин (скейлінг) виникає у разі локального пересичення в примембранному шарі карбонатів та сульфатів кальцію та інших сполук (рисунок 1).

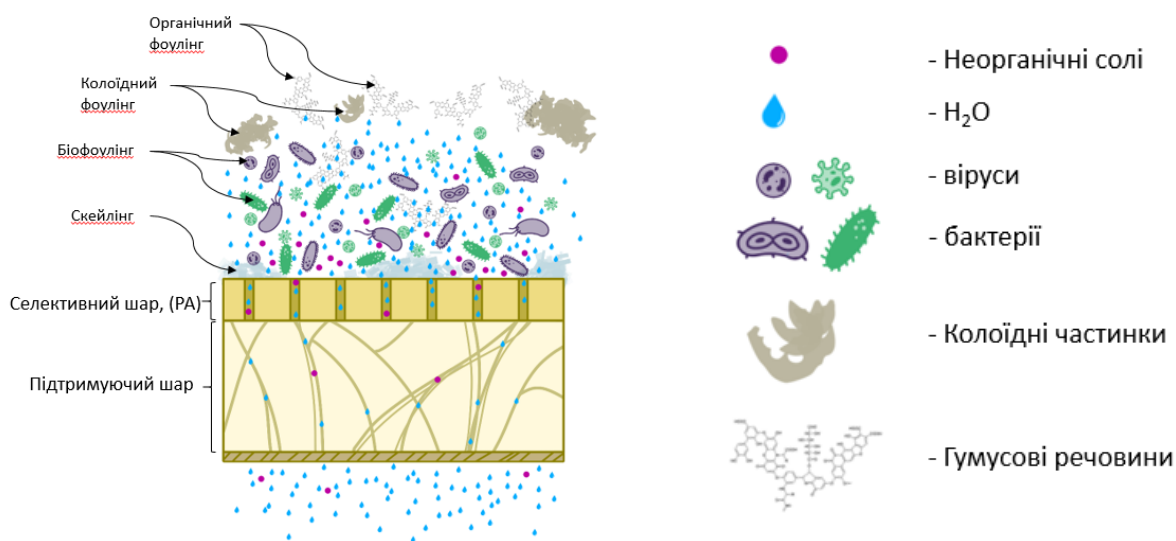


Рисунок 1. Схематичне зображення відпрацьованої зворотноосмотичної мембрани

Як результат, в системах очищення спостерігається спочатку падіння продуктивності та збільшення перепаду тиску на мембранах. В промислових системах для запобігання утворенню різних типів фоулінгу на поверхні мембран використовують спеціальні реагенти антискаланти та біоциди або здійснюють регенерацію мембран. Промислові ЗО мембранні елементи піддаються регенерації за визначеною схемою і строк експлуатації може сягати до 6 років.

Традиційно прийнято для промислових систем використовувати регенерацію у два етапи: спочатку проводять лужну обробку із використанням спеціальних розчинів на основі NaOH, під час якої з поверхні мембрани видаляється органічний та колоїдний фоулінг. На другий

стадії регенерації зазвичай проводять кислотну обробку мембран спеціальними розчинами на основі лимонної або хлоридної кислоти, під час якої з поверхні мембран видаляється скейлінг.

В той же час, в комерційних та побутових установках можливість запобігти утворенню фоулінгу відсутня, тому строк служби мембран зворотного осмосу суттєво нижчий – лише один рік, по завершенню якого відпрацьовані мембрани складаються. За даними Global Water Intelligence (GWI-2024) [3], щорічно накопичуються 380 тис. штук на рік відпрацьованих комерційних мембранних елементів, які активно використовувалися споживачами, з яких 1900 т/рік елементів просто викидаються та не утилізуються належним чином.

З метою збільшення строку служби елементів, запропоновано метод переробки мембранних елементів комерційного та побутового ряду шляхом їх регенерації [4,5]. В роботі для лужної регенерації використано товарний продукт Ecoclean 211 (виробник Ecosoft, Україна), а для кислотної регенерації – Ecoclean 203 (виробник Ecosoft, Україна). Також необхідно врахувати, що для таких систем традиційна двостадійна регенерація не є ефективною, бо на поверхні мембран формується біофоулінг, видалення якого потребує використання сильних окисників.

Такими окисниками можуть бути пероксид водню (H_2O_2), перманганат калію ($KMnO_4$), озон (O_3) та хлорвмісні реагенти, наприклад $NaClO$ [6]. Недоліком застосування H_2O_2 є необхідність в значній тривалості обробки мембранного елемента з метою очищення поверхні матеріалу; недоліком використання $KMnO_4$ як окисника є складність контролю за ступенем окиснення мембранного елемента в процесі регенерації, адже у випадку перевищення необхідної тривалості розпочинається процес руйнування самого полотна мембрана. Іншим недоліком перманганату калію як окисника є токсичність даного реагенту. Недоліком використання озону для видалення забруднень з поверхні мембрани є потреба в постійному контролі його концентрації для її підтримання на одному рівні, що пов'язано із низькою розчинністю озону.

Попередніми дослідженнями [7] виявлено достатньо високу ефективність застосування розчину $NaClO$ для регенерації мембранного полотна. При дозі натрію гіпохлориту 10 000 мг/дм³ за тривалості обробки 24 години та підтримання рН середовища в діапазоні від 10 до 12, досягнуто відновлення поверхні мембрани до 72 % в порівнянні з новою, що вказує на доцільність повторного використання мембран.

Однак через високу окисну здатність гіпохлориту взаємодія окисника відбувається не лише із відкладеннями, а й з полотном мембрани, що призводить до часткового руйнування селективного шару мембрани [8]. Встановлено, що після окисної обробки розчином $NaClO$ зростає проникність полотна мембрани та падає селективність мембрани, як результат, регеновані мембрани повторно можуть бути використані в технології очищення стічних вод з пониженням рейтингу, тобто як нанофільтраційні або ультрафільтраційні мембрани в залежності від ступеня руйнування полотна мембрани.

Розраховано, що орієнтована вартість регенерації одного відпрацьованого комерційного мембранного елемента за запропонованою 3-стадійною схемою не буде перевищувати 1200 грн, що при початковій вартості нового елемента в середньому 6300 грн вказує на безперечну доцільність здійснення регенерації відпрацьованих елементів.

В подальшому планується проведення комплексу досліджень із встановлення необхідної дози окисника та умов проведення для контрольованої (із заданим ступенем відновлення) регенерації відпрацьованих комерційних та побутових мембран. Крім того, планується провести пілотні дослідження щодо встановлення реального строку експлуатації відновлених мембранних елементів.

Роботу виконано в рамках проєкту прикладних наукових досліджень «Хімічно модифіковані мембрани для оперативного виявлення у природних водах нітрогенвмісних сполук як маркерів вибухових речовин» за рахунок коштів Державного бюджету України (Державний реєстраційний номер 0124U001095).

Література

1. What Causes Tap Water Contamination. Drinking Water. URL: https://www.cdc.gov/drinking-water/causes/?CDC_AAref_Val=https://www.cdc.gov/healthywater/drinking/contamination.html (date of access: 04.06.2025).
2. Quality of Ground Water. U.S. Geological Survey Publications Warehouse. URL: <https://pubs.usgs.gov/gip/gw/quality.html#:~:text=Ground%20water%20may%20contain%20dissolved,chloride,%20bicarbonate,%20and%20sulfate> (date of access: 04.06.2025).
3. GWI. URL: <https://www.globalwaterintel.com/documents/tariff-survey-2024> (date of access: 04.06.2025).
4. Modification of used commercial reverse osmosis membranes to nanofiltration modules for the production of mineral-rich packaged drinking water / B. Govardhan et al. Applied Water Science. 2020. Vol. 10, no. 11. URL: <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01312-1> (date of access: 04.06.2025).
5. Extending the life of water reuse reverse osmosis membranes using chlorination / B. M. Souza-Chaves et al. Journal of Membrane Science. 2021. P. 119897. URL: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119897> (date of access: 04.06.2025).
6. Oh J. H., Jang A. Application of chlorine dioxide (ClO₂) to reverse osmosis (RO) membrane for seawater desalination. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2016. Vol. 68. P. 281–288. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.09.006> (date of access: 04.06.2025).
7. Production of physiologically complete drinking water using modified reverse osmosis membrane elements / A. Tyvonenko et al. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2023. Vol. 2, no. 10 (122). P. 6–13. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277491> (date of access: 04.06.2025).
8. Study on hypochlorite degradation of aromatic polyamide reverse osmosis membrane / G.-D. Kang et al. Journal of Membrane Science. 2007. Vol. 300, no. 1-2. P. 165–171. URL: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.05.025> (date of access: 04.06.2025).

REGENERATION OF USED REVERSE OSMOSIS MEMBRANES

Olga SHLIKHTER

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteisky Ave., Building 4, 03056, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-5193-3756>

Artur KOSOHIN

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteisky Ave., Building 4, 03056, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0003-3087-709X>

Iryna KOSOGINA

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
37 Beresteisky Ave., Building 4, 03056, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9795-7110>

Annotation

Military operations seriously affect the state of Ukraine's water resources due to the damage to oil storage facilities, fuel and lubricant warehouses and the destruction of the infrastructure of enterprises and water treatment facilities, which leads to significant pollution of water bodies. Providing the population with high-quality drinking water under these conditions (locally) is possible with the use of membrane technologies. As a result of the operation of commercial and domestic membrane systems, deposits (fouling) form on the surface of reverse osmosis membranes, which reduces the system's productivity, and the membranes need to be replaced with new ones. At the moment, used commercial and domestic reverse osmosis membranes are practically not recycled. This work proposes to regenerate used membranes in three stages with the subsequent use of regenerated membranes in wastewater treatment technology with a decrease in the rating of reverse osmosis membranes to nanofiltration or ultrafiltration.

Keywords: water quality, water purification, membranes, reverse osmosis, fouling, oxidant, regeneration.