



Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство» (5 червня 2024 р., м. Київ, Україна)

Handbook of the XXIV International Science Conference
«Ecology. Human. Society» (June 5, 2024, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315

<https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2024.304089>

ТЕХНОЛОГІЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ МЕМБРАННИМИ МЕТОДАМИ

Катерина БАЙДУР, Анна СТЕЦЮК, Нікіта КОЛОМАЦЬКИЙ

Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського

Берестейський пр., 37, Київ, 03057, Україна

e-mail: catherinebaidur@gmail.com

Анотація

Робота описує застосування баромембранних процесів зворотного осмосу та ультрафільтрації для очищення води. Проаналізовано недоліки та переваги для чотирьох видів апаратів мембранної очистки з різним способом укладання мембран. Показано, що ефективність очистки води в різних апаратах залежить від їх конструкції та типу частинок, від яких необхідно очистити воду.

Ключові слова: мембрани, зворотній осмос, очищення води, ультрафільтрація, пермеат, фільтруючі елементи, концентрат.

Людство активно використовує водні ресурси, і ми регулярно отримуємо велику кількість інформації про різні проблеми навколишнього середовища через масові медіа та інші джерела. Ці проблеми варіюються за ступенем серйозності, географічним розповсюдженням та тривалістю. Дрібні проблеми дійсно можуть бути вирішені окремими особами, тоді як більш складні та поширені потребують стратегій великого масштабу [1].

Так, наприклад, загострюється проблема доступу до питної води. Населення Землі стрімко зростає, а отже і світові потреби у воді також. Тому передбачається, що протягом найближчих десятиліть проблема водоочистки загостриться. Одним із можливих рішень цієї проблеми були представлені технології мембранного розділення [2]. Введення цих технологій у широкомасштабне застосування може позитивно вплинути на відновлення водних ресурсів та зменшення глобальної кризи.

Технологія очищення води в значній мірі визначається фізико-хімічними і біологічними показниками її якості й необхідним ступенем її поліпшення. При опрісненні води солеміст повинен бути знижений до величини, що робить воду придатною для питних цілей ($P < 1000$ мг/л) [3].

Застосування мембрани для очищення поверхневих вод забезпечує багато переваг порівняно з іншими способами очищення. У виробництві питної води мембрани замінюють традиційні технології розділення завдяки хорошему відновленню ресурсів з точки зору якості очищеної води, ефективного відновлення поживних речовин і сталого функціонування, особливо в тих випадках, коли інші способи очищення неможливі [2, 4].

До мембранних методів розділення належать ультрафільтрація, зворотній осмос, первапарація та діаліз і електродіаліз і термомембранні процеси.

В доповіді зосереджена увага на баромембранних процесах зворотного осмосу та ультрафільтрації. В їх основі лежить явище осмосу – самовільного проникнення розчинника

через мембрану до встановлення рівноваги [5]. На рис.1 представлено апаратурно-технологічну схему установки зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-ФЗА».

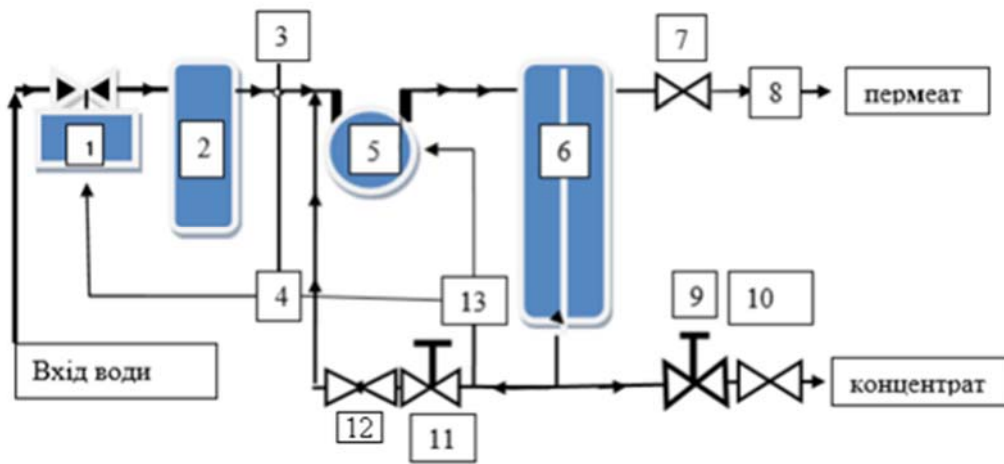


Рис.1. Апаратурно-технологічна схема установки зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-ФЗА».

Специфікація: 1 – вхідний електрохлипак; 2 – вхідний мікропористий поліпропіленовий фільтр; 3 – манометр на виході поліпропіленового фільтра; 4 – датчик тиску на виході поліпропіленового фільтра; 5 – насос високого тиску; 6 – модуль зворотноосмотичної фільтрації; 7 – ротаметр на магістралі відведення пермеату; 8 – лічильник витрати пермеату; 9 – вентиль регулювання витрати концентрату; 10 – ротаметр витрати концентрату; 11 – вентиль рециклінгу; 12 – ротаметр рециклінгу; 13 – манометр робочого тиску і керуючий датчик аварійного відключення

За способом укладання мембран апарати для баромембранних процесів поділяються на чотири основних типи: апарати з пласкокамерними фільтруючими елементами; апарати з трубчастими фільтруючими елементами; апарати з рулонними або спіральними фільтруючими елементами та апарати з мембранами у вигляді порожнистих волокон [6].

1. Апарати з пласкокамерними фільтруючими елементами. Апарати типу «фільтр-прес» із пласкокамерними фільтруючими елементами є одними з найпростіших мембранних апаратів. Застосовуються при порівняно невисокій продуктивності установок, але ці модулі є дорогими порівняно з альтернативними [3, 7].

Основою цих апаратів є фільтруючий елемент, який складається з двох мембран, що укладені по обидві сторони плаского пористого матеріалу – дренажа. Дренажні листи розміщені на навеликій відстані один від одного (0.5 – 5 мкм), утворюючи міжмембранний простір для проходження розчину, що розділяється. Пакет фільтруючих елементів затискується між двома фланцями і стягується болтами. Розчин, що розділяється, послідовно проходить через всі фільтруючі елементи, концентрується і видаляється із апарата. Перміат (фільтрат), який пройшов через мембрану, виходить через дренажні шари в радіальному напрямку [8].

Апарат вирізняється простотою виготовлення, зручністю монтажу і експлуатації, можливістю швидкої зміни мембран. Також такі апарати особливо перспективні для проведення ультрафільтраційних процесів, оскільки процес розділення відбувається при відносно високих швидкостях розчину, що дозволяє значно зменшити вплив концентраційної поляризації [3].

Недоліками таких апаратів є наявність центральних перетоків, які знижують корисну та питому площу мембран і можуть бути причиною місцевої розгерметизації та попадання розчину в перміат. Більше того, дренажні пластини і турбулізатори конструктивно складні і потребують високої точності виготовлення. Також варто згадати про високу металоємність.

2. Апарати з трубчастими фільтрувальними елементами. Апарати з трубними модулями (трубчастими фільтрувальними елементами) в основному обмежуються застосуванням в ультрафільтрації, для яких перевага в опору до забруднення мембран через добрі гідродинамічні умови переважає їх вартість [3].

Трубчастий фільтрувальний елемент (ТФЕ) представляє собою змінний і зазвичай нероз'ємний вузол апаратів для проведення зворотнього осмосу і ультрафільтрації, що складається з напівпроникної мембрани і дренажного каркасу. Дренажний каркас виконується з трубки, яка забезпечує міцність елемента і відведення терміату, і мілкопористої підложки, що включає втиснення мембрани в дренажні канали трубки під дією робочого тиску суміші.[9]

За конструкцією ТФЕ діляться на три типи: з напівпроникною мембраною на внутрішній поверхні трубки; з напівпроникною мембраною на зовнішній поверхні трубки; з комбінованим розміщенням напівпроникної мембрани на трубці [8].

ТФЕ з напівпроникною мембраною на внутрішній поверхні трубки має загальні для даного типу переваги: мала теплоємність, незначний гідравлічний опір потоку терміату, гарні гідродинамічні умови роботи мембрани, змога механічної очистки елементів від осаду без їх розбірки, захищеність мембрани від пошкодження під час установки ТФЕ в апарати. Недоліки такої конструкції проявляються в малій питомій робочій поверхні мембран, підвищеної вимоги до точності формування внутрішнього діаметра каркаса(трубки). Конструкції з мембраною, розміщеною на зовнішній поверхні трубки, де-факто є удосконаленою версією першого типу, оскільки всі недоліки перетворили на переваги.

Комбіноване розміщення напівпроникної мембрани підвищує питому роботу поверхні в 1,6-1,8 рази більше, ніж в описаній вище конструкції. Але в таких конструкціях утворюються значні гідравлічні опори. Внаслідок перелічених вище недоліків ці конструкції ТФЕ не знайшли широкого промислового застосування.

3. Апарати з фільтруючими елементами рулонного (спірального) типу. Спіральні (або рулоновані, рулонні, сувійні) мембранні модулі для зворотного осмосу набули найбільшого поширення в системах підготовки води через високу питому поверхню, малу матеріалоємність, відносну простоту в експлуатації [10].

В основному вони складаються з мембрани з оболонкою, пермеатної трубки, пермеатної прокладки та живильної прокладки [6].

В робочих умовах, розділюваний розчин подається через торець в напірні канали рулонованого модуля, частина розчину проходить крізь мембрану, утворюючи пермеат, потрапляє в центральну трубу і відводиться з апарату. Інша частина розчину рухається вздовж мембрани і виводиться з іншого торця модуля, утворюючи ретентат. В процесі мембранного розділення концентрація розчинених речовин в пермеаті зменшується, а в ретентаті зростає. Канали мембранного модуля утворюються сіткою-сепаратора, яка знаходиться між витками рулону [11].

Розрізняють чотири типи апаратів з рулонними мембранними елементами: з рулонними мембранними елементами з декількома пакетами та однією пермеатовідвідною трубкою; зі спільно навитими рулонними мембранними елементами; з рулонними мембранними елементами з кількома пермеатовідвідними трубками; з рулонними мембранними елементами, що мають канали для збору пермеату.

Хоч мембранні апарати рулонного типу і є найсучаснішим методом очистки води, все ще залишаються аспекти, які потребують удосконалення: висока чутливість до забруднень, потреба у значній кількості енергії, а також обмеження в селективності та проникності [12].

4. Апарати на основі ФЕВ з паралельним розміщенням волокон. Перший апарат з порожнистими волокнами, розроблений фірмою “Dow Chemical” (США) був виконаний у вигляді кожухотрубчастого теплообмінника. Такий апарат забезпечував можливість подачі розділяемого розчину як зовні так і всередину капіляра волокон. Апарат має корпус зі штуцерами для входу та виходу розділяемого його розчину із фланцями для кріплення збірників пермеата і трубних решіток. Порожністі волокна у вигляді пучків розміщені в корпусі апарата паралельно його осі, а в кінці волокон за допомогою епоксидної смоли закріплені в трубних решітках. Розділяемий розчин поступає через штуцер і рухається вздовж зовнішньої поверхні волокон. Під дією тиску частина рідини проходить через стінки волокон і по їх внутрішніх капілярах відводиться в збірники, утворюючи фільтрат. Концентрований розчин безперервно виводиться з апарата. [13, 14, 15]

Розглянутий апарат має суттєві недоліки, наприклад, відносно невисоку щільність упаковки мембран, складність кріплення і герметизації пучків волокон. Тому в промисловості такий апарат майже не використовується.

Таких недоліків немає в апаратах з ФЕВ у вигляді одного пучка. Волокна зібрані в пучок за допомогою навитої нитки, яка одночасно забезпечує необхідний зазор між окремими волокнами, що покращує розподіл вихідного розчину всередині пучка волокон. Дана конструкція дозволяє забезпечувати рух розділяемого рідини не тільки по зовнішній поверхні, але і по капілярам волокон. В цьому випадку необхідно змінити підвод вихідного розчину, відвод фільтрата і концентрата. Для підвищення інтенсивності перемішування вихідного розчину в апарат монтують розподільчу трубу, яка має в центральній частині отвори для подачі вихідного розчину всередину пучка волокон [16, 17, 18, 19, 20].

Апарати з ФЕВ у вигляді одного пучка волокон мають високу щільність укладки мембран і низьку матеріаломісткість, однак недостатня інтенсивність перемішування розділяемого розчину і жорстке кріплення волокон в перетинках, не дозволяють використовувати дані конструкції для обробки розчинів і очистки стічних вод, що мають зважені частинки.

Висновки. Апарати з пласкокамерними фільтруючими елементами є простими для виготовлення, зручними для монтажу і експлуатації, є можливість швидкої зміни мембран. Проте недоліки таких апаратів – це центральні перетоки, які знижують корисну та питому площу мембран і можуть бути причиною місцевої розгерметизації та попадання розчину в перміат. Апарати з трубними модулями мають невисоку теплоємність, незначний гідравлічний опір потоку перміату, гарні гідродинамічні умови роботи мембрани, змогу механічної очистки елементів від осаду без їх розбірки. Недоліки: мала питома робоча поверхня мембран, підвищена вимога до точності формування трубки. Спіральні мембранні модулі - найсучасніший метод очистки води, але такі апарати мають високу чутливість до забруднень, потребу у значній кількості енергії і обмеження в селективності та проникності. Апарати з порожнистими волокнами мають суттєві недоліки: відносно невисоку щільність упаковки мембран, складність кріплення і герметизації пучків волокон. Відмічених недоліків значно менше в апаратах у вигляді одного пучка. Такі апарати мають високу щільність укладки мембран і низьку матеріаломісткість, однак недостатня інтенсивність перемішування розчину і жорстке кріплення волокон в перетинках не дозволяють використовувати дані конструкції для обробки розчинів і очистки стічних вод, що мають зважені частинки.

Література

1. Lars H. Water pollution - methods and criteria to rank, model and remediate chemical threats to aquatic ecosystems / H. Lars, B. Andreas. – Sweden, Uppsala: Uppsala University, 2008.
2. Torove L. The effect of coupling coagulation and flocculation with membrane filtration in water treatment: A review / Leiknes Torove. // Journal of Environmental Sciences. – 2009. – Vol.21. – P.8–12.
3. Навчальний посібник з дисциплін «Водопостачання промислових підприємств», «Системи водовідведення промислових підприємств» / [В. І. Сокольник, Д. В. Прутцьков, О. Г. Добровольська та ін.]. – Запоріжжя: ЗДІА, 2018. – 195 с.
4. Direct membrane filtration for wastewater treatment and resource recovery: A review / [H. Selina, E. Majid, F. H. Kolbrun та ін.]. // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol.710., 136375.
5. Моделювання процесів мембранного розділення: навчальний посібник / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.В. Гулієнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 166 с.
6. Roles and performance enhancement of feed spacer in spiral wound membrane modules for water treatment: A 20-year review on research evolvement / [L. Weichen, Z. Yuting, L. Danyang та ін.]. // Water Research. – 2021. – Vol.198., 117146.
7. Brock T. Membrane filtration / Thomas Brock., 1983. – 381 с.
8. Конспект лекцій з курсу „Процеси та апарати хімічної технології”, розділ «Мембранні процеси» для студентів II-V курсів усіх спеціальностей / Укл.: О.О. Тертишний, О.В. Тертишна. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2011. – 79 с.
9. Довідник з властивостей, методів аналізу та очищення води. У 2х частинах/А.А. Кульський, І.Т. Гороновський, А.М. Когановський, М.А. Шевченка. – Київ: Наукова думка. - 1980. - 1206 с.
10. Дослідження процесу зворотного осмосу. Методичні вказівки для проведення науково-дослідної роботи студентів з кредитного модуля «Моделювання процесів мембранного розділення» [Електронний ресурс]: / НТУУ „КПІ”; уклад. С.В. Гулієнко– Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 14 с.
11. Дослідження процесу зворотного осмосу. Методичні вказівки для проведення науково-дослідної роботи студентів з кредитного модуля «Моделювання процесів мембранного розділення» / НТУУ „КПІ”; уклад. С.В. Гулієнко– Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 14 с.
12. A review of spiral wound membrane modules and processes for groundwater treatment / [N. T. Rita, B. Patrick, O. A. Frank та ін.]. // Frontiers in Membrane Science and Technology. – 2024. – Vol.3., 1343651.
13. Lacey R.E., Loeb S. Industrial processing with membranes. N.–Y.: Wiley – Interscience, 1972.
14. Reverse Osmosis Membrane Research. H.K. Lonsdale, H.E. Podall, Ed., N.–Y.: Plenum, 1972.
15. Sourirajan S. Reverse osmosis. London: Logos, 1970.
16. Cheryan M. Ultrafiltration and Microfiltration Handbook. Lancaster: Technomic, 1998.
17. Ford D.L., Anderson E.W., Kopp C.V. Concentration of solids in a suspension. US Patent No. 5 024 762, 1991.
18. Kuzumoto H., Ukai T., Uejima A. Fluid separation element. US Patent No. 4 623 460, 1986.
19. Watanabe M., Suda E. Filter element. US Patent No. 6 224 765, 2001.
20. Zeman L.J., Zydney A.L. Microfiltration and Ultrafiltration: Principles and Applications. N.–Y.: Marcel Dekker, 1996.

WATER PURIFICATION TECHNOLOGY USING MEMBRANE METHODS

Kateryna BAIDUR

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0004-6236-5811>

Anna STETSIUK

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0003-1251-8202>

Nikita KOLOMATSKYI

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0004-0929-7477>

DOI: <https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2024.304089>

Keywords: *membranes, reverse osmosis, water treatment, ultrafiltration, permeate, filter elements, concentrate.*

Abstract

The paper describes the application of baromembrane method based on reverse osmosis (RO) process and ultrafiltration processes for water purification. The advantages and disadvantages of four types of membrane purification devices with different membrane layouts are analyzed. It is shown that the efficiency of water purification in different devices depends on their structure and the type of contaminants from which water must be purified.