

КАРПЕНКО МАРГАРИТА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0003-3237-4130>

РАДОВЕНЧИК ВЯЧЕСЛАВ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0001-5361-5808>
e-mail: dokeco@ukr.net

НЕГАТИВНИЙ ВПЛИВ УСТАНОВОК ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ НА ДОВКІЛЛЯ ТА ПОШУК ШЛЯХІВ ЙОГО ЗМЕНШЕННЯ

Мембрана зворотного осмосу сприяє демінералізації питної води завдяки своїм структурним особливостям. Молекули води проходять крізь пори мембрани під тиском, при цьому молекули, більші за діаметр пор, відділяються і разом з концентратом скидаються в каналізаційну мережу. Відомо, що основними речовинами природних вод, що осаджуються на мембрані є: гідроокиси металів, силікати, алюмосилікати, гумінові речовини, поверхнево – активні речовини (ПАР), метакремнієва кислота (H_2SiO_2), натрій хлор ($NaCl$), карбонат кальцію), хлорид кальцію ($CaCl_2$), гідроксид магнію $Mg(OH)_2$, мікроорганізми.

Як свідчать дані досліджень, в результаті доочищення водопровідної води методом зворотного осмосу з використанням мембрани американської фірми *Filmtec* типу *TW30-1812-50*, при робочому тискові 18 атм повністю зникає запах, присмак, колірність та каламутність, загальна жорсткість знижується на 90–94%, вміст заліза – практично на 100%. На етапі очищення через активоване вугілля з води видаляються азот, нітрати та нітрити, зменшується вміст заліза та водневий показник.

Технологія зворотного осмосу є надзвичайно ефективною, адже видаляє до 99% усіх можливих забрудників води, проте з точки зору безпеки для довкілля має ряд недоліків: значна кількість води, яка не використовується в побуті, а скидається у каналізаційні мережі (пермеат/концентрат: 70/30); нерозбірні вугільні картриджі, мінералізатори та УФ-знезаражувачі, які збагачують та знезаражують воду після мембранної очистки; механічні поліпропіленові картриджі (піддаються регенерації); мембранні блоки (частково піддаються регенерації); монцентрат, насичений забруднюючими речовинами, які утворились внаслідок очищення води. Тому важливим є питання регенерації змінних блоків (фільтрів, картриджів та мембран). Це дозволить зменшити навантаження на довкілля, зменшити кількість викинутих мембран та зменшити затрати на обслуговування установок зворотного осмосу та покупку нових комплектуючих.

В ході досліджень визначено, що найкращим очистником мембран установок зворотного осмосу є водне кислотне середовище (тобто яке має рН від 2 до 3,5). Збільшення кислотності, тобто наближення рН до 2, забезпечує розчинення нерозчинних у воді солей кальцію, кремнезему, сполук заліза та органічних забрудників. Зрозуміло, що розчинами яблучної та оцтової кислот такого показника рН досягти неможливо, тому очищення мембрани за допомогою таких кислот буде частковим. Найбільшої ефективності очищення забруднених мембран вдалося при вилученні заліза з мембрани у кількості 1,6 г/л. за допомогою розчину яблучної кислоти.

Ключові слова: зворотній осмос, мембрани, регенерація, пермеат, концентрат, оцтова кислота, яблучна кислота.

KARPENKO MARGARITA

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID ID: 0000-0003-3237-4130

RADOVENCHIK VYACHESLAV

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID ID: 0000-0001-5361-5808

e-mail: dokeco@ukr.net

THE NEGATIVE IMPACT OF REVERSE OSMOSIS INSTALLATIONS ON THE ENVIRONMENT AND THE SEARCH FOR WAYS TO REDUCE IT

The reverse osmosis membrane contributes to the demineralization of drinking water due to its structural features. Water molecules pass through the pores of the membrane under pressure, while molecules larger than the diameter of the pores are separated and discharged together with the concentrate into the sewage network. It is known that the main substances of natural waters deposited on the membrane are: metal hydroxides, silicates, aluminosilicates, humic substances, surface-active substances (surfactants), metasilicic acid (H_2SiO_2), sodium chloride ($NaCl$), calcium carbonate, calcium chloride ($CaCl_2$), magnesium hydroxide $Mg(OH)_2$, microorganisms.

According to research data, as a result of further purification of tap water by the reverse osmosis method using the membrane of the American company *Filmtec* type *TW30-1812-50*, at a working pressure of 18 atm, the smell, aftertaste, color and turbidity completely disappear, the overall hardness is reduced by 90–94%, iron content is almost 100%. At the stage of purification, nitrogen, nitrates and nitrites are removed from the water through activated carbon, the iron content and the hydrogen index are reduced.

Reverse osmosis technology is extremely effective, because it removes up to 99% of all possible water pollutants, but from the point of view of safety for the environment, it has a number of disadvantages: a significant amount of water that is not used in everyday life, but is discharged into sewage networks (permeate/concentrate: 70/30); non-separable carbon cartridges, mineralizers and UV sterilizers that enrich and disinfect water after membrane purification; mechanical polypropylene cartridges (subject to regeneration); membrane blocks (partially subject to regeneration); concentrate, saturated with pollutants that were formed as a result of water purification. Therefore, the issue of regeneration of replaceable blocks (filters, cartridges and membranes) is important. This will reduce the burden on the environment, reduce the number of discarded membranes, and reduce the cost of maintaining reverse osmosis units and purchasing new components.

In the course of research, it was determined that the best cleaner for the membranes of reverse osmosis installations is an aqueous acidic environment (that is, which has a pH of 2 to 3.5). An increase in acidity, i.e. an approach of pH to 2, ensures the dissolution of water-insoluble calcium salts, silica, iron compounds and organic pollutants. It is clear that it is impossible to achieve such a pH with solutions of malic and acetic acids, so the membrane cleaning will be partial. The most efficient cleaning of contaminated membranes was achieved when iron was removed from the membrane in the amount of 1.6 g/l. using a solution of malic acid.

Keywords: reverse osmosis, membranes, regeneration, permeate, concentrate, acetic acid, malic acid.

Вступ

Зворотний осмос (ЗО) є найбільш використовуваною технологією опріснення води. Забруднення мембрани є однією з головних проблем у мембранній технології, оскільки вони збільшують пов'язані з цим витрати на очищення води, зменшують ефективність роботи установки і призводять до збоїв у роботі системи. Термін служби мембрани в основному залежить від якості води та експлуатаційних умов. Термін служби мембрани становить від 2 до 5 років. Були досягнуті значні успіхи покращення опріснення за допомогою зворотного осмосу шляхом інтеграції процесів попередньої обробки та очищення. Були прикладені значні дослідницькі зусилля в пошуку технології нових антиобрастаючих мембран, розробки різноманітних антискалантів, пошуку оптимальних умов промивки та відновлення мембран.

Проте використання установок зворотного осмосу має ряд недоліків.

Негативний вплив установок зворотного осмосу на довкілля виявляється у сукупності наступних факторів:

- Значна кількість води, яка не використовується в побуті, а скидається у каналізаційні мережі (пермеат/концентрат: 70/30);
- Нерозбірні вугільні картриджі, мінералізатори та УФ-знезаражувачі, які збагачують та знезаражують воду після мембранної очистки;
- Механічні поліпропіленові картриджі (піддаються регенерації);
- Мембранні блоки (частково піддаються регенерації);
- Концентрат, насичений забруднюючими речовинами, які утворились внаслідок очищення води.

Проте в літературі було виявлено небагато досліджень щодо управління мембранами після закінчення терміну служби [1-4]. Ця робота підсумовує найбільш репрезентативні дослідження, проведені для запобігання забрудненню мембран. Також вона висвітлює альтернативні шляхи очищення мембрани за допомогою різноманітних кислот, показує результати проведення дослідів у реальних умовах, підсумовує альтернативні шляхи утилізації використаних мембран з метою запобігання неконтрольованій утилізації цих мембран на звалищах.

Мембрани, що використовуються в процесах розділення під тиском (мікрофільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос і ультрафільтрація), часто використовують синтетичні органічні полімери. Деякі виробники для виготовлення мембран використовують ацетат целюлози, політетрафторетилен, поліпропілен та поліетилен [5]. Рідше використовують кераміку, метал, цеоліт та кремнезем. Досліджена мінералізація поверхні шляхом нанесення $BaSO_4$ на поверхню поліамідної мембрани. Мембрани з таким покриттям показали кращу ефективність захисту від обростання. Мембрана легко очищається зворотною промивкою без видалення з установки. Така модифікація продовжує терміне експлуатації мембрани.

Поверхня мембран, зазвичай, неоднорідна і складається з кількох шарів з різною топологією та складом. У цих мембранах більш товстий, більш проникний шар підтримує тонкий, вибіркоковий шар. При використанні в методах ЗО такий тип матеріалу показав вищу ефективність. Процеси, які перебігають на анізотропній мембрані, з врахуванням дії механізму вибіркової сорбції та капілярного потоку через шари мембрани ЗО показані на рис. 1. [6].

Мембрана зворотного осмосу сприяє демінералізації питної води завдяки своїм структурним особливостям. Молекули води проходять крізь пори мембрани під тиском, при цьому молекули, більші за діаметр пор, відділяються і разом з концентратом скидаються в каналізаційну мережу. Відомо, що

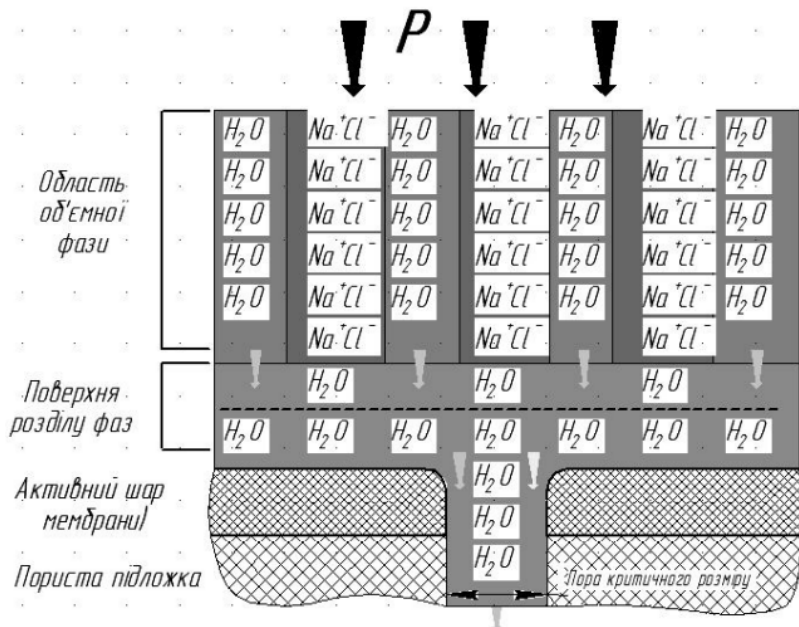


Рис. 1. Принцип дії мембрани зворотного осмосу щодо забрудників, які містяться у воді
Джерело: [6].

основними речовинами природних вод, що осаджуються на мембрані є: гідроокиси металів, силікати, алюмосилікати, гумінові речовини, поверхнево – активні речовини (ПАР), метакремнієва кислота (H_2SiO_2), натрій хлор ($NaCl$), карбонат кальцію, хлорид кальцію ($CaCl_2$), гідроксид магнію $Mg(OH)_2$, мікроорганізми [7]. Ступінь осадження залежить від таких факторів як: концентрації та розмір речовини, адсорбція поверхні мембран (гідрофобність, гідрофільність), заряд забруднюючих компонентів та поверхні мембрани, температури, рН [8].

Як свідчать наведені в таблиці 1.1. дані, в результаті доочищення водопровідної води методом зворотного осмосу з використанням мембрани американської фірми Filmtec типу TW30-1812-50, при робочому тискові 18 атм повністю зникає запах, присмак, колірність та каламутність, загальна жорсткість знижується на 90–94%, вміст заліза – практично на 100%. На етапі очищення через активоване вугілля з води видаляються азот, нітрати та нітроти, зменшується вміст заліза та водневий показник [9].

Таблиця 1

Зміна показників водопровідної води з часом після зворотного осмосу на мембрані Filmtec типу TW30-1812-50

Показники	Вихідна вода (водопровідна вода, профільтована через активоване вугілля типу АГ)	Вода після зворотного осмосу P = 18 атм, мембрана Filmtec	ДСанПіН 2.2.4-171-10 [10]
1	2	3	4
Каламутність, мг/дм ³	0,5	Відс.	≤ 1,0
Колірність, град	13,0	Відс.	≤ 20
Водневий показник рН	7,62	5,53	6,5–8,5
Лужність (HCO_3^-), мг/дм ³	161,0	48,8	
Сульфати (SO_4^{2-}), мг/дм ³	110,4	83,2	≤ 250
Хлориди (Cl^-), мг/дм ³	32,0	14,2	≤ 250
Жорсткість загальна, мг-екв/дм ³	4,32	0,43	≤ 7,0
Магній (Mg^{2+}), мг/дм ³	12,64	4,0	≤ 50
Кальцій (Ca^{2+}), мг/дм ³	65,7	4,0	≤ 100
Залізо (Fe^{3+}), мг/дм ³	0,15	0,002	≤ 0,2
Нітрати (NO_3^-), мг/дм ³	Відс.	Відс.	≤ 50,0
Нітроти (NO_2^-), мг/дм ³	Відс.	Відс.	≤ 0,5
Азот амонійний (NH_4^+), мг/дм ³	Відс.	Відс.	≤ 0,5
Окислюваність ($KMnO_4$), мг/дм ³	1,36	2,24	≤ 5,0
Мінералізація, мг/дм ³	301,2	129,8	≤ 1000

Збільшення загальної мінералізації вхідної води збільшить накопичення солі на поверхні мембрани, що уповільнює проникнення води через пори мембрани.

Також в процесі очищення мембрани потрібно постійно контролювати рН і температуру. При замочуванні мембрани в очистних розчинах температура знижується, тому важливо проводити постійну рециркуляцію для підтримки стабільної температури. Зрозуміло, що забруднення мембрани комплексним, тому і очищення має бути комплексним та дієвим щодо кожного виду забрудника [11].

Визначено, що залізо є чи не єдиним показником якості води, по якому спостерігаються значні перевищення нормативів у Київській області [12]. Аналізуючи методи об'ємного знезалізнення, які передбачають витримку води в проміжних ємкостях для формування пластівців $Fe(OH)$ та фільтрування для відділення твердої фази, робимо висновок про природу перебігу процесів очищення мембран від сполук заліза. Оскільки утворені агрегати мають пухку, нестійку структуру, то для їх відділення використовують фільтри, аналогічні швидким фільтрам, описаним раніше. При фільтруванні частки гідроксидів затримуються в шарі 5 - 15 см і спричиняють швидке зростання втрат напору. Недоліком об'ємного знезалізнення є необхідність влаштування проміжних ємкостей для відстоювання обробленої води з метою формування агрегатів гідроксидів заліза (ШП). Оскільки процеси окислення іонів Fe^{3+} та формування пластівців гідроксидів досить тривалі, то об'єм таких ємкостей необхідно передбачати відносно великим [13].

Для запобігання біобростання мембрани використовують такі методи дезінфекції: $NaClO$, NH_2Cl , ClO_2 , K_2FeO_4 , ультрафіолет, озонування, і проточну електродну систему. Встановлено, що аденозинтрифосфат є важливим індикатором для прогнозування потенціалу біобростання мембрани. Товщина та щільність біоплівки найбільш тісно пов'язані з різним ступенем забруднення мембран. Крім того, виявлено, що відносна кількість бактерій з вищим рівнем секреції позаклітинної полімерної речовини, таких як *Pseudomonas* та *Sphingomonas*, прямо зі ступенем біобростання 30 мембран [14, 15].

Хлорвмісні дезінфікуючі засоби, руйнують клітинну структуру бактерій і впливають на їх ферментні системи [16]. Разом з активною промивкою ці сполуки здатні розчепити біоплівку з поверхні забрудненої мембрани та регенерувати очисні властивості мембрани.

Проте мікроорганізми, які містяться у водопровідній воді, можуть переростати в біоплівку на

мембрані та живити розпірну поверхню і викликають біонарощення. Біозабруднення є основною загрозою для роботи системи. Для санітарної обробки біологічно забруднених зворотньоосмотичних систем виробники радять використовувати перекис водню або суміш перекису водню та оцтової кислоти [17, 18].

Отож, важливо розуміти, що забруднення мембран, як правило, складається з комбінації забрудників, наприклад суміші органічних забруднень, колоїдних забруднень та біооброщень. Тому дуже важливо, щоб перший крок очищення був обраний розумно. Для очищення усіх типів мембран баромембранних установок першим етапом рекомендується лужну чистка. Кислотна чистка повинна застосовуватися як перший етап очищення, якщо відомо, що на мембрані присутній лише карбонат кальцію або оксид/гідроксид заліза. Сильні кислотні очищувачі зазвичай реагують з діоксидом кремнію, органічними речовинами (наприклад, гуміновими кислотами) та біоплівкою, що знаходиться на мембранній поверхні, що може спричинити подальше зниження ефективності мембрани. Тому важливим завданням є пошук екологічно безпечної технології регенерації мембран з можливістю проводити цю процедуру в домашніх умовах, що дозволить зменшити загальну кількість викинутих мембран у довкілля.

Матеріали та методи

Для виконання поставленої задачі з оцінки можливості регенерації використаних мембран установок зворотного осмосу був використаний метод аналізу в лабораторних умовах, для оцінки зміни водневого показника та концентрацій забруднюючих речовин використано метод хімічного аналізу. Метод функціонального аналізу використаний для спостереження за процесами осадження, що дало змогу визначити оптимальні показники седиментації суспензії. Для визначення вмісту заліза як основного забрудника механічних фільтрів було використано сульфатсаліциловий метод згідно ДСТУ 7262:2012 Хімічні реактиви. Методи визначення домішок заліза.

Досліди проводились на базі лабораторії кафедри Е та ТРП інженерно-хімічного факультету НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського. Було проведено цикл дослідів з очищення використаних мембран зворотного осмосу (FilmTeck від Dupont, США). Основними показниками, по яких контролювали ефективність очищення, були водневий показник, час, концентрація забрудника.

Заміри концентрацій та водневого показника робилися кожну годину. Використували різні дози сульфатної кислоти та контролювали за допомогою рН-метра водневий показник при поступовому введенні кислоти в очищувальний розчин. Також вимірювали на фотоколориметрі по сульфатсаліциловому методу оптичну густину і визначали вміст заліза в розчині.

Для визначення найоптимальнішого водневого показника, при якому найефективніше протікатиме очищення мембрани від забрудників, проведено ряд дослідів на модельних розчинах. Для цього $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (5,38 г., 10,76 г. та 16,14 г.) розчинили у дистильованій воді, довели до 100 мл., визначили початковий рН та $C_{\text{FeCl}_3^{3+}}$. За допомогою NaOH проводилось поетапне збільшення рН до 5 зі збільшенням кроку на 0,5. При цьому контролювали концентрацію іонів заліза у розчині за допомогою визначення оптичної густини профільрованої проби на фотоколориметрі.

Наступним етапом було вивчення ефективності очищення використаних мембран за допомогою яблучної та оцтової кислот. Мембрани Filmtec були вилучені у Дніпровському районі м. Києва, тобто вхідні параметри води були однаковими. Зі слів користувачів побутових установок зворотного осмосу мембрани використовувалися згідно правил експлуатації впродовж 36 місяців. Використані мембрани поміщали в спеціальні колби об'ємом 2,1 л. та замочували в розчинах харчової оцтової та яблучної кислот об'ємом до повного покриття мембранного блоку. Кожну годину контролювали рН та концентрацію іонів заліза у розчині за допомогою визначення оптичної густини на фотоколориметрі. Чим вища концентрація розчиненого заліза, тим ефективнішим буде очищення. Також оцінювали сумарний вміст (масу) нерозчинених забруднюючих речовин в розчині за допомогою фільтрування та доведення фільтрату до постійної маси у сушильній камері. Зважування проводили на вагах аналітичних електронних DHAUS PA 214C. Відповідні розрахунки та побудова графіків проводились у програмі Excel.

Результати та обговорення

Результати вимірювань інтенсивності осадження та фільтрування суспензії, отриманої в процесі очищення механічних фільтрів за допомогою розчину сульфатної кислоти різних концентрацій (вплив концентрації відмічається на водневому показнику для $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) показані у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вимірювань оптичної густини та концентрації іонів Fe^{3+} у розчинах з кислотами $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ та $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$

Часовий інтервал, год	Оптична густина (у розчині оцтової кислоти)	Концентрація Fe_{3+} у розчині оцтової кислоти, г/л	Оптична густина (у розчині яблучної кислоти)	Концентрація Fe^{3+} у розчині яблучної кислоти, г/л
1	∞	≈ 0	∞	≈ 0
2	0,05	0,01	0,18	1,6
3	0,17	1,55	0,38	4,6
4	0,32	3,8	0,45	5,8

Об'єм розчину, який утворився в результаті очищення забрудненої мембрани установки зворотного розчину становить 1,9 л, його рН=2.95. Цей розчин фільтрують та висушують фільтрат до постійної маси. Яку відомо, серед забрудників водопровідної води немає надзвичайно агресивних забрудників, тому фільтрат, висушений до постійної маси у сушильній шафі, може використовуватись як добавка до цементу чи іншої будівельної суміші. Мембрану можна промити від залишків харчової кислоти та використовувати повторно ще впродовж 3-6-ти місяців.

Даний спосіб регенерації (за допомогою розчину харчової оцтової та яблучної кислот) може використовуватися для умов водопровідної води м. Києва, де переважаючими забрудниками є залізо загальне та сезонне підвищення мікробіологічних показників.

Шляхом візуального огляду використаних мембран було визначено, що залізо є найбільш проблемним і основним забрудником, при тому навіть при незначному його вмісті після кількох етапів очищення кислотним розчином дуже складно позбутись рудого кольору. На рисунку 1 зображено забруднену (а) та очищену оцтовою кислотою (б) мембрани марки Filmtec.



а) б)
Рис. 1. Вигляд забрудненої (а) та очищеної (б) мембрани Filmtec
Джерело: фото автора.

Отож, в ході досліджень визначено, що найкращим очисником мембран установок зворотного осмосу є водне кислотне середовище (тобто яке має рН від 2 до 3,5). Збільшення кислотності, тобто наближення рН до 2, забезпечує розчинення нерозчинних у воді солей кальцію, кремнезему, сполук заліза та органічних забрудників (рис. 2). Зрозуміло, що розчинами яблучної та оцтової кислот такого показника рН досягти неможливо, тому очищення мембрани буде частковим.

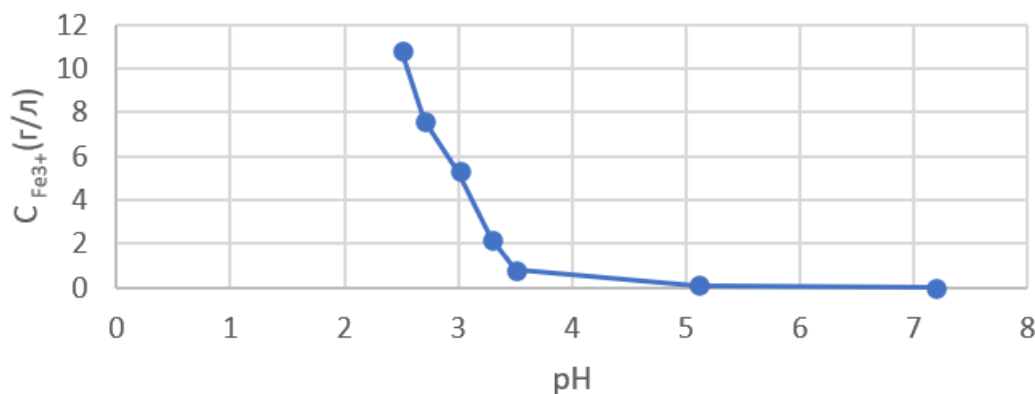


Рисунок 2. Вплив водневого показника очищуючого розчину на відторгнення солей
Джерело: розроблено автором

Як бачимо з результатів вимірювань, при зменшенні рН сполуки заліза починають активно розчинятися при рН=3,3 і максимальна ефективність очищення фільтрів від сполук заліза досягається при рН=2. Замочування забруднених мембран у харчових розчинах яблучної та оцтової кислот дозволяють досягти рН близько 3,1. Тобто очищення буде частковим (25-30% ефективності).

Ці результати були підтверджені і при повторних лабораторних експериментах з реальними забрудненими мембранами, знятими у користувачів побутових системах зворотного осмосу у м. Києві.

Висновки

Зворотній осмос як правило, здійснюється в тангенціальному режимі, в якому відбувається безперервний поділ потоку живильної води на забруднений потік, концентрат та потік очищеної води

(пермеат). Головною характеристикою такого режиму є частка відбору - відношення витрати пермеату до витрати вхідної води. У системах зворотного осмосу зазвичай використовують композитні тонкоплівкові мембрани. У процесі зворотного осмосу зростання концентрації розчиненої речовини біля поверхні мембрани обумовлене об'ємним потоком пермеату. Мембрани є найдорожчими і основними елементами установки. Вони очищують воду від 99% всіх існуючих забрудників. Частина затриманих забрудників видаляється разом з концентратом, проте частина затримується на поверхні та в товщі мембрани, зменшуючи її селективність та змінюючи параметри усєї системи. Тому періодична заміна мембран є обов'язковою умовою правильного функціонування установок зворотного осмосу. Нажаль, використані мембрани зазвичай викидаються у довкілля. Тому нами були досліджені способи регенерації мембран з можливістю її подальшого повернення в робочу систему зворотного осмосу і подальшої експлуатації.

В ході досліджень було встановлено, що найкращим очисником мембран установок зворотного осмосу є водне кислотне середовище (тобто яке має рН від 2 до 3,5). Збільшення кислотності, тобто наближення рН до 2, забезпечує розчинення нерозчинних у воді солей кальцію, кремнезему, сполук заліза та органічних забрудників.

Отож, очищення використаних мембран побутових установок зворотного осмосу за допомогою розчинів харчових кислот дозволяє повторно експлуатувати мембрани впродовж 3-6-ти місяців. Це незначний термін порівняно із загальним терміном експлуатації (36 місяців). При цьому рішення є локальним, підходящим для умов використання водопровідної води м. Києва з фіксованими показниками якостями. Така технологія очищення мембрани не підходить для води нецентралізованого водопостачання, води з перевищеннями мікробіологічних показників та високим солемістом. Приміром, оцтова та яблучна кислота якісно очищує воду від сполук заліза та біообростання (характерні для Київського регіону), але накопичення кремнезему, радіонукліди, важкі метали таким чином з мембрани не можливо. Потрібне використання більш сильних кислот, які здатні створити середовище активного очищення з $\text{pH} \leq 1$.

Література

1. Beyer, F., Laurinonyte, J., Zwijnenburg, A., Stams, A.J.M., & Plugge, C.M. (2017). Membrane fouling and chemical cleaning in three full-scale reverse osmosis plants producing demineralized water. *Journal of Engineering*, 2017, article number 6356751. [doi: 10.1155/2017/6356751](https://doi.org/10.1155/2017/6356751).
2. Warsinger, D.M., Chakraborty, S., Tow, E.W., Plumlee, M.H., Bellona, Ch., Loutatidou, S., Karimi, L., Mikelonis, A.M., Achilli, A., Ghassemi, A., Padhye, L.P., Snyder, Sh.A., Curcio, S., Vecitis, Ch.D., Arafat, H.A., & Lienhard, J.H. (2018). A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse. *Progress in Polymer Science*, 81, 209-237. [doi: 10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004).
3. Faisal, I.M. (2020). Performance analysis and treatment technologies of reverse osmosis plant – a case study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, article number 100007. [doi: 10.1016/j.cscee.2020.100007](https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100007).
4. Jafari, M., Zlopasa, J., D'haese, A., Cornelissen, E.R., Vrouwenvelder, J.S., Verbeken, K., Verliefdde, A., van Loosdrecht, M.C.M., & Picioreanu, C. (2020). A comparison between chemical cleaning efficiency in lab-scale and full-scale reverse osmosis membranes: Role of extracellular polymeric substances (EPS). *Journal of Membrane Science*, 609, article number 118189. [doi: 10.1016/j.memsci.2020.118189](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118189).
5. Skuse, C., Gallego-Schmid, A., Azapagic, A., & Gorgojo, P. (2021). Can emerging membrane-based desalination technologies replace reverse osmosis?, *Desalination*, 500, article number 114844. [doi: 10.1016/j.desal.2020.114844](https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114844).
6. Cartridge polypropylene PP 10" 1 μm . Retrieved from: <https://www.aqua-ua.com/ua/product/kartridzh-polipropilenvyy-pp-10-1-mkm/>.
7. composition of aqueous solutions. *Environmental Safety and Natural Resources*, 43(3), 43-55. [doi: 10.32347/2411-4049.2022.3.43-55](https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.43-55).
8. Set of cartridges for Bio+ Systems "Osmosis" cleaning systems (PP, STO, RR). Retrieved from https://mixer.km.ua/p1496888186-komplekt-kartridzhej-dlya.html?source=merchant_center&gad=1&gclid=Cj0KCQjw9fqBhDSARIsAHlcQYSgW97ZcVFILFxPj4hR0or_mwejFR24ypBUhnc2-bHj4QjbWt441sg4aAqrtEALw_wcB.
9. Kravchenko M. V., Voloshkina, O. S., & Vasylenko, L. O. (2021). Застосування методу зворотного осмосу для доочистки питної води. Екологічна безпека та природокористування, 40(4), 32–45. <http://es-journal.in.ua/article/view/251812>
10. Про затвердження Державних санітарних норм та правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
11. Моделювання процесів мембранного розділення: навчальний посібник для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв» / КПП ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.В. Гулієнко. – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 166 с. <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/22235/1/modeliuvannia.pdf>
12. Корнієнко Я. М. Фізичне моделювання процесу зворотного осмосу / Я. М. Корнієнко, Я. М.

- Заграй, С. В. Гулієнко // [Наукові праці \[Одеської національної академії харчових технологій\]](#). - 2011. - Вип. 39(2). - С. 91-95. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2011_39%282%29_21
13. Радовенчик Я. В., Гомеля М. Д. Фізико-хімічні методи доочищення води: підручник. Київ : Кондор-Видавництво, 2016. 264 с.
14. Гулієнко С. В. Забруднення мембран та методи їх регенерації: критичний огляд / С. В. Гулієнко, І. В. Симан // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука" . - 2018. - № 5. - С. 51-56. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2018_5_13
15. Дейниченко Г. В. Застосування мембранних технологій для виробничої підготовки водних ресурсів / Г. В. Дейниченко, В. В. Гузенко, Н. Г. Перекрест, О. К. Кізілов // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. - 2019. - Вип. 19, т. 1. - С. 41 -47. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptdau_2019_19_1_7
16. Орестов, Є. О.; Мітченко, Т. Є. Фізико-хімічні основи дії інгібіторів флуїлінгу мембран зворотного осмосу та шляхи їхнього оптимального використання. Water and water purification technologies. scientific and technical news, 2013, 12.2: 3 -17. <http://wpt.kpi.ua/article/view/138220>
17. Gerrald Bargeman. Maximum allowable retention for low-salt-rejection reverse osmosis membranes and its effect on concentrating undersaturated NaCl solutions to saturation, Separation and Purification Technology, Volume 317, 2023, P. 16. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586623007621>
18. Zhang, X., & Liu, Y. (2021). Reverse osmosis concentrate: An essential link for closing loop of municipal wastewater reclamation towards urban sustainability. *Chemical Engineering Journal*, 421(2), article number 127773. [doi: 10.1016/j.cej.2020.127773](https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127773).

References

1. Beyer, F., LaurinonYTE, J., Zwijnenburg, A., Stams, A.J.M., & Plugge, C.M. (2017). Membrane fouling and chemical cleaning in three full-scale reverse osmosis plants producing demineralized water. *Journal of Engineering*, 2017, article number 6356751. doi: 10.1155/2017/6356751.
2. Warsinger, D.M., Chakraborty, S., Tow, E.W., Plumlee, M.H., Bellona, Ch., Loutatidou, S., Karimi, L., Mikelonis, A.M., Achilli, A., Ghassemi, A., Padhye, L.P., Snyder, Sh.A., Curcio, S., Vecitis, Ch.D., Arafat, H.A., & Lienhard, J.H. (2018). A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse. *Progress in Polymer Science*, 81, 209-237. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004.
3. Faisal, I.M. (2020). Performance analysis and treatment technologies of reverse osmosis plant – a case study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, article number 100007. doi: 10.1016/j.csee.2020.100007.
4. Jafari, M., Zlopasa, J., Dhaese, A., Cornelissen, E.R., Vrouwenvelder, J.S., Verbeke, K., Verliefe, A., van Loosdrecht, M.C.M., & Picioreanu, C. (2020). A comparison between chemical cleaning efficiency in lab-scale and full-scale reverse osmosis membranes: Role of extracellular polymeric substances (EPS). *Journal of Membrane Science*, 609, article number 118189. doi: 10.1016/j.memsci.2020.118189.
5. Skuse, C., Gallego-Schmid, A., Azapagic, A., & Gorgojo, P. (2021). Can emerging membrane-based desalination technologies replace reverse osmosis?. *Desalination*, 500, article number 114844. doi: 10.1016/j.desal.2020.114844.
6. Cartridge polypropylene PP 10" 1 µm. Retrieved from: <https://www.aqua-ua.com/ua/product/kartridzh-polipropilenvy-pp-10-1-mkm/>.
7. composition of aqueous solutions. *Environmental Safety and Natural Resources*, 43(3), 43-55. doi: 10.32347/2411-4049.2022.3.43-55.
8. Set of cartridges for Bio+ Systems "Osmosis" cleaning systems (PP, STO, RR). Retrieved from https://mixer.km.ua/p1496888186-komplekt-kartridzhej-dlya.html?source=merchant_center&gad=1&gclid=Cj0KCQjw9fqBhDSARIsAHLcQYSgW97ZeVFILFxpj4hR0ormweJFR24ypBUhhc2-bHj4QjbWt441sg4aAqrtEALw_wcB
9. Kravchenko M. V., Voloshkina, O. S., & Vasylenko, L. O. (2021). Zastosuvannya metodu zворотnoho osmosu dlia doochystky pytnoi vody. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya*, 40(4), 32–45. <http://es-journal.in.ua/article/view/251812>
10. Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl "Hihiienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoj dlia spozhyvannia liudynoiu" (DSanPiN 2.2.4-171-10) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
11. Modeliuvannia protsesiv membrannoho rozdilennia: navchalnyi posibnyk dlia stud. spetsialnosti 133 «Haluzeve mashynobuduvannia», spetsializatsii «Inzhynirynh, kompiuterne modeliuvannia ta proektuvannia obladnannia khimichnykh i naftopererobnykh vyrobnytstv» / KPI im. Ihoria Sikorskoho ; ukklad.: S.V. Hulienko. –Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2017. – 166 s.
12. <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/22235/1/modeliuvannia.pdf>
13. Korniienko Ya. M. Fizychno modeliuvannia protsesu zворотnoho osmosu / Ya. M. Korniienko, Ya. M. Zahrai, S. V. Hulienko // Naukovi pratsi [Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii]. - 2011. - Vyp. 39(2). - S. 91-95. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Np_2011_39%282%29_21
14. Radovenchik Ya. V., Homelia M. D. Fizyko-khimichni metody doochyshchennia vody: pidruchnyk. Kyiv : Kondor-Vydavnytstvo, 2016. 264 s.
15. Hulienko S. V. Zabrudnennia membran ta metody yikh regeneratsii: krytychnyi ohliad / S. V. Hulienko, I. V. Syman // Mizhnarodnyi naukovi zhurnal "Internauka" . - 2018. - № 5. - S. 51-56. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2018_5_13
16. Deinychenko H. V. Zastosuvannia membrannykh tekhnolohii dlia vyrobnychoi pidhotovky vodnykh resursiv / H. V. Deinychenko, V. V. Huzenko, N. H. Perekrest, O. K. Kizilov // Pratsi Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. Tekhnichni nauky. - 2019. - Vyp. 19, t. 1. - S. 41 -47. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptdau_2019_19_1_7
17. Orestov, Ye. O.; Mitchenko, T. Ye. Fizyko-khimichni osnovy dii inhibitoriv foulingu membran zворотnoho osmosu ta shliakhy yikhnoho optymalnoho vykorystannia. Water and water purification technologies. scientific and technical news, 2013, 12.2: 3 -17. <http://wpt.kpi.ua/article/view/138220>
18. Gerrald Bargeman. Maximum allowable retention for low-salt-rejection reverse osmosis membranes and its effect on concentrating undersaturated NaCl solutions to saturation, Separation and Purification Technology, Volume 317, 2023, R. 16. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586623007621>
19. Zhang, X., & Liu, Y. (2021). Reverse osmosis concentrate: An essential link for closing loop of municipal wastewater reclamation towards urban sustainability. *Chemical Engineering Journal*, 421(2), article number 127773. doi: 10.1016/j.cej.2020.127773.