

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-2(32)-261-268
УДК 628.3

Микола Гомеля¹, Інна Трус², Олена Глушко³, Ірина Макаренко⁴

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: m.gomelya@kpi.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1165-7545>

ResearcherID: [J-4345-2017](https://orcid.org/0000-0003-1165-7545), Scopus Author ID: [6507653734](https://orcid.org/0000-0003-1165-7545)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: inna.trus.m@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6368-6933>

ResearcherID: [I-3204-2017](https://orcid.org/0000-0001-6368-6933), Scopus Author ID: [56152219600](https://orcid.org/0000-0001-6368-6933)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: alyona_glushko@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8243-5707>

ResearcherID: [J-5495-2017](https://orcid.org/0000-0002-8243-5707), Scopus Author ID: [57200946561](https://orcid.org/0000-0002-8243-5707)

⁴кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: Irina.makarenko@chemicals.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7895-2664>

Scopus Author ID: [41761940300](https://orcid.org/0000-0002-7895-2664)

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЛУЧЕННЯ СУЛЬФАТІВ НА ЗВОРотноОСМОТИЧНІЙ МЕМБРАНІ НИЗЬКОГО ТИСКУ

Досліджено вплив вихідних концентрацій натрій сульфату в діапазоні 10–650 мг/дм³ та ступеня відбору перміату в межах 10-90 % на продуктивність зворотноосмотичної мембрани марки Filmtec TW30-1812-50 при застосуванні тиску 4 атм. Показано, що вміст сульфатів у перміаті зростає при підвищенні їх вихідної концентрації в розчині та збільшенні ступеня відбору перміату. Встановлено, що збільшення ступеню відбору перміату призводить до зниження продуктивності мембрани та підвищення концентрації солей у передмембранному просторі. Для визначення стабільності концентрацій порівнювали відповідність експериментальних та розрахункових значень солей у розчині.

Ключові слова: знесолення; зворотний осмос; низьконапірна мембрана; сульфати; перміат; концентрат.

Рис.: 6. Бібл.: 5.

Актуальність теми дослідження. Питання водопідготовки є надзвичайно актуальними й нагальними в реаліях сьогодення. Йдеться не лише про підготовку води питного призначення, а й про підготовку води промислового призначення. Підвищена мінералізація води є одним із аспектів, який потребує певної уваги при організації процесів водопідготовки. Південні та південно-східні регіони України мають значні проблеми з якісним водозабезпеченням. Навіть водопровідні води характеризуються значним рівнем солевмісту, зокрема і твердості води. Слід зазначити, що в умовах збройної агресії сусідньої держави відбувається забруднення поверхневих водойм і ґрунтових вод унаслідок бойових дій, ракетних обстрілів та, як наслідок, руйнування об'єктів критичної інфраструктури. Це, відповідно, зумовлює пошук методів та засобів, технологічних рішень для отримання зокрема якісної води питного призначення в сучасних реаліях. Локальні системи водопостачання набувають певного значення, проте існуючі технології, часто не забезпечують необхідного рівня демінералізації води. Проблема підвищеного солевмісту при централізованому водопостачанні ефективно вирішується широким впровадженням у побуті мембранних установок доочищення води. Ефективність використання таких установок в значній мірі обумовлена фізико-хімічними характеристиками води та обраним типом обладнання. Тому актуальним є визначення ефективності та доцільності використання в побуті локальних мембранних установок і визначення впливу характеристик водопровідної чи артезіанської води, яка потребує доочищення, на процес водопідготовки.

Постановка проблеми. Одним із показників якості води як питного, так і промислового призначення, є її мінералізація. Найвні технології підготовки води, що були спроектовані переважно наприкінці ХХ століття, не забезпечують регламентовані норми, оскільки спостерігається значне стале погіршення якості води в поверхневих водоймах. Використання артезіанських та ґрунтових вод певною мірою дозволяє вирішувати ці питання. Проте процеси демінералізації води залишаються актуальними й у цьому випадку. Методи та технологічні рішення зменшення карбонатної твердості води досить широко розглянуті в літературі. Проте важливим є питання зменшення некарбонатної жорсткості у процесі водопідготовки, зокрема вилучення сульфатів і хлоридів з води. З погляду промислового водопостачання вилучення сульфатів є актуальним питанням, оскільки підвищений вміст їх впливає на технологічні процеси та призводить до посилення корозії трубопроводів та обладнання. Високий вміст сульфатів у водопровідній воді впливає на її смакові якості та підвищує її електропровідність, що своєю чергою посилює процеси корозії трубопроводів і, відповідно, призводить до вторинного забруднення води [1]. Основними методами вилучення сульфатів є іонний обмін та баромембранні методи, зокрема зворотний осмос [2].

У цьому контексті важливою є оцінка ефективності використання в процесах доочищення води зворотньоосмотичних мембран низького тиску, вибір оптимального тиску та визначення впливу якості вихідної води на продуктивність та селективність мембран.

Представлені дослідження певним чином дають відповідь на зазначені питання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [3–5] представлені дослідження щодо визначення селективності і продуктивності зворотньоосмотичних мембран низького тиску в процесах демінералізації води з невисоким вмістом солей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проте питання ефективності використання зворотньоосмотичних мембран при високих рівнях мінералізації води залишається відкритим.

Метою роботи є вивчення залежності ефективності зворотньоосмотичного вилучення сульфатів із води залежно від концентрації сульфатів та ступеня відбору перміату.

Виклад основного матеріалу.

Дослідження процесів зворотньоосмотичного очищення води від сульфатів.

Вилучення сульфатів з води проводили з використанням касети із зворотньоосмотичною низьконапірною мембраною марки Filmtec TW30-1812-50.

Робочими розчинами були розчини сульфату натрію (приготовані на дистильованій воді) з концентрацією по сульфат-аніонам: $C(\text{SO}_4^{2-}) = 10,0 \text{ мг/дм}^3$; $40,0 \text{ мг/дм}^3$; $70,0 \text{ мг/дм}^3$; $650,0 \text{ мг/дм}^3$.

Процес проводили на зворотньоосмотичній установці, принципова схема якої представлена на рис. 1.

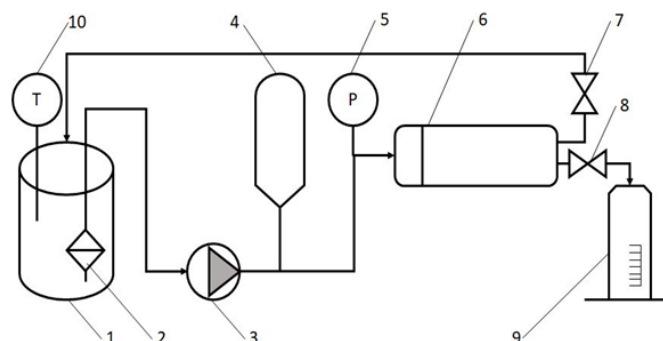


Рис. 1. Схема установки зворотньоосмотичного знесолення води:

1 – резервуар вихідного розчину; 2 – водозабірний пристрій; 3 – плунжерний насос – дозатор; 4 – гідроаккумулятор; 5 – манометр; 6 – зворотньоосмотичний модуль із картриджем із мембраною Filmtec TW30-1812-50; 7, 8 – крани для регулювання, відповідно, витрати концентрату та перміату; 9 – приймач перміату; 10 – термометр

Тиск у системі підтримували на рівні 4 атм, регулюючи подачу води насосом та витрату концентрату краном. Об'єм проби перміату становив 1,0 дм³, вихідні об'єми розчинів – 10,0 дм³. Отриманий концентрат повертали у робочий розчин. У кожній пробі перміату та концентрату визначали концентрацію сульфатів. Проводили також теоретичний розрахунок даних показників для концентрату.

Вміст сульфатів визначали турбідиметрично [6] з іонами барію. Дослідження проводили на фотоколориметрі КФК-2-УХЛ42.

Розрахунок селективності мембрани (R , %) проводили за формулою:

$$R = \frac{C_0 - C_n}{C_0} 100, \% , \quad (1)$$

де R – селективність мембрани, %; C_0 та C_n – концентрація сульфатів у вихідному розчині та перміаті відповідно.

Концентрацію сульфатів у i -й пробі концентрату (C_{ki} , мг/дм³) визначали за формулою:

$$C_{ki} = \frac{V_0 \cdot C_0 - \sum_{i=1}^n (C_{ni} \cdot V_{ni})}{V_0 - \sum_{i=1}^n V_{ni}}, \frac{\text{мг}}{\text{дм}^3}, \quad (2)$$

де C_{ki} – концентрація сульфатів у концентраті після відбору i -ї проби перміату, мг/дм³; C_0 та V_0 – концентрація сульфатів у вихідному розчині (мг/дм³) та об'єм вихідного розчину (дм³), відповідно; V_{ni} – об'єм проби перміату, 1 дм³; C_{ni} – концентрація сульфатів в i -й пробі перміату, мг/дм³; i – число проб перміату, $n=1-9$.

Продуктивність мембрани (швидкості трансмембранного потоку) (j , дм³/(м²·год)) розраховували за формулою:

$$j = \frac{V_n}{S \cdot \Delta\tau}, \frac{\text{дм}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{год}}, \quad (3)$$

де j – продуктивність мембрани, дм³/(м²·год); V_n – об'єм проби перміату, 1 дм³; S – площа мембрани, м²; $\Delta\tau$ – час відбору проби, год.

Оцінка впливу вихідних концентрацій солей на селективність та продуктивність мембрани.

Відомо, що рушійною силою зворотного осмосу є різниця прикладеного (робочого) тиску води і різниці осмотичних тисків вихідної води і перміату. Продуктивність і селективність, що є основними характеристиками мембран, залежать не тільки від марки мембрани, але й від параметрів процесу розподілу – зокрема тиску, температури та початкового вмісту солей у воді.

Збільшення робочого тиску призводить до росту питомої продуктивності мембрани. Водночас зростає й селективність, оскільки дифузійне перенесення іонів від тиску не залежить, а через мембрану проходить більше розчинника. У випадку збільшення концентрації солей у вихідній воді спостерігається зростання осмотичного тиску вихідного розчину і значно меншою мірою – осмотичного тиску перміату, що призводить до зменшення питомої продуктивності мембрани.

Також знижується селективність мембрани через зростання дифузійного потоку пропорційно вихідній концентрації. Підвищення конверсії призводить до збільшення середньої концентрації розчинених речовин, підсилює виразність концентраційної поляризації, через що особливо підвищується концентрація солей над поверхнею мембрани. Усе це призводить до падіння як селективності, так і питомої продуктивності.

Збільшення конверсії можливо лише до певної межі, поки значення осмотичного тиску концентрату через збільшення його солевмісту не наблизиться до тиску живильної

води. Тоді процес перенесення розчинника припиняється. Крім того, можливе досягнення концентрацій малорозчинних солей межі розчинення, що призведе до масового забруднення мембран відкладеннями.

Збільшення ступеню відбору перміату при підвищеному солевмісті призводить до зростання осмотичного тиску у воді, що значно впливає на параметри процесу очищення води.

Вибір сульфату натрію як модельний розчин продиктовано тим, що найчастіше підвищення солевмісту пов'язують саме з наявністю сульфатів.

При проведенні досліджень визначали ступінь знесолення води за залишковими концентраціями сульфатів у перміаті, визначали селективність мембрани при збільшенні ступеня відбору перміату.

Як свідчать результати досліджень, що представлені на рис. 2 і 3, вилучення сульфатів із води на мембрані Filmtec TW30-1812-50 є достатньо ефективним.

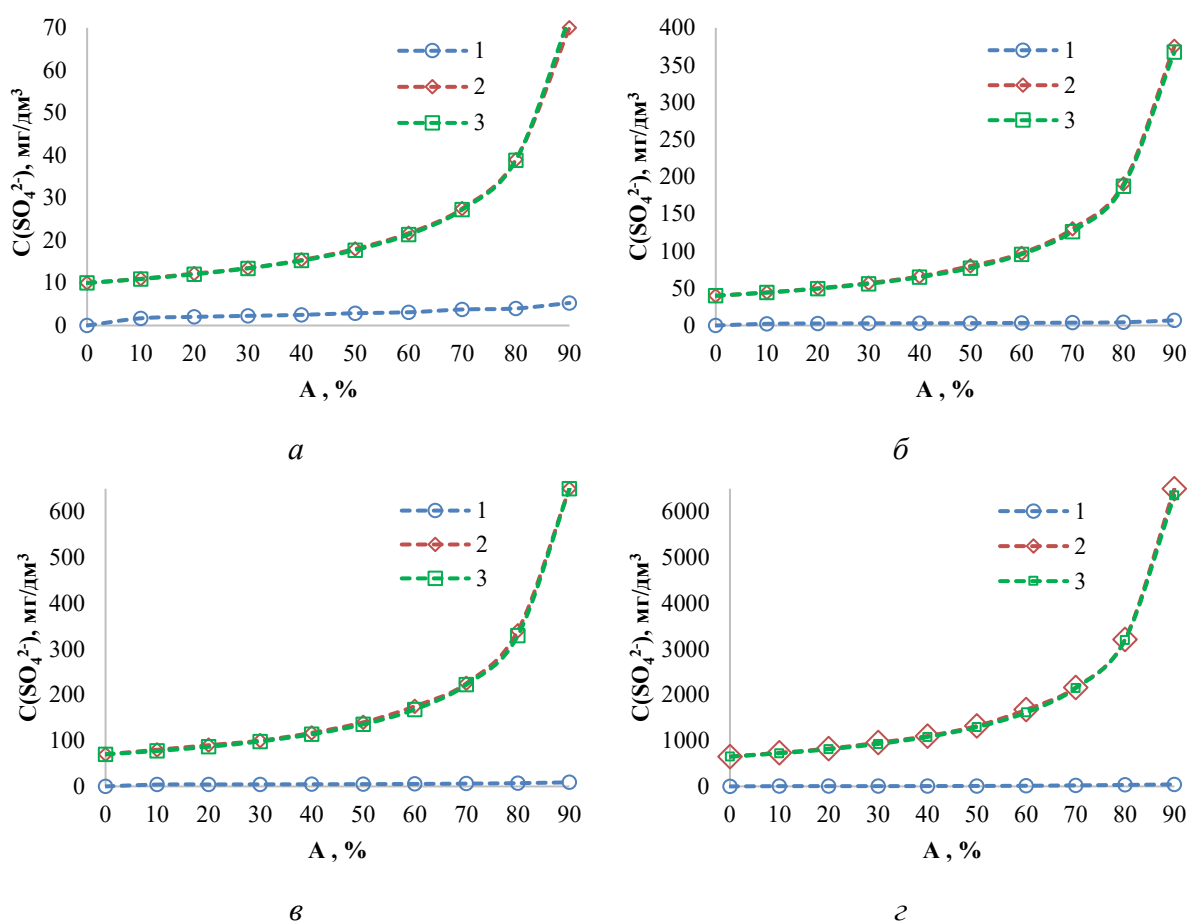


Рис. 2. Залежність концентрації сульфатів у перміаті (1), концентраті (2; 3) (реальна (2) і розрахована (3)) від ступеню відбору перміату (A , %) при робочому тиску 4,0 атм. при фільтруванні розчину Na_2SO_4 з різною початковою концентрацією:

$$a - C_{\text{вих}}(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 10,0 \text{ мг}/\text{дм}^3; \text{ б} - C_{\text{вих}}(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 40,0 \text{ мг}/\text{дм}^3;$$

$$\text{в} - C_{\text{вих}}(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 70,0 \text{ мг}/\text{дм}^3; \text{ г} - C_{\text{вих}}(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 650,0 \text{ мг}/\text{дм}^3$$

Моделювання процесу на основі ПФЕ дозволяє визначити концентрації сульфатів у перміаті та концентраті при будь-яких вихідних концентраціях сульфатів у визначеному діапазоні даних (рис. 3, рис. 4).

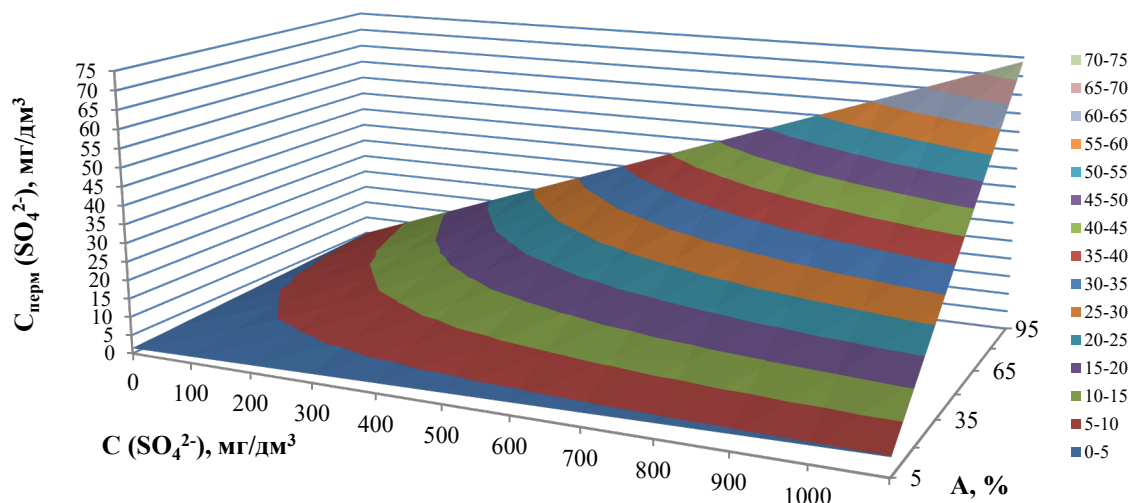


Рис. 3. Залежність концентрації сульфатів у перміаті від вихідної концентрації Na_2SO_4 та ступеня відбору перміату при робочому тиску 4,0 атм.

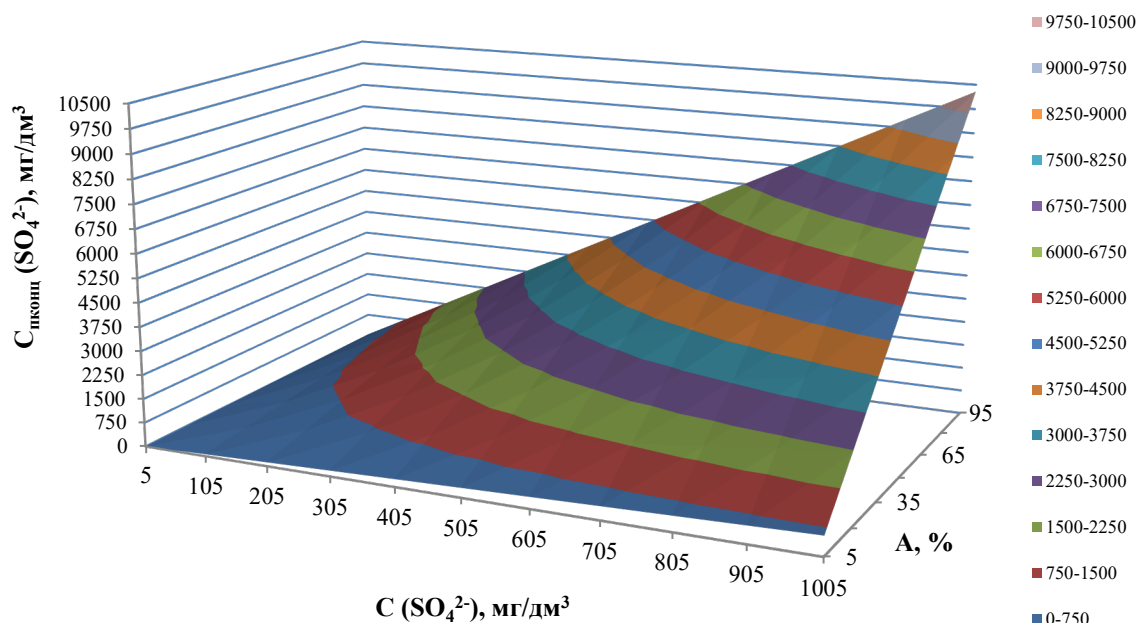


Рис. 4. Залежність концентрації сульфатів у концентраті від вихідної концентрації Na_2SO_4 та ступеня відбору перміату при робочому тиску 4,0 атм.

Селективність мембрани по сульфатах становить 94,9–99,3 %. Слід відмітити, що більші значення селективності відповідають більш високим вихідним концентраціям розчинів. Кардинальна зміна селективності мембрани по сульфат-аніонам при збільшенні ступеню відбору перміату відзначена для малих (до 40,0 мг/дм³) початкових концентрацій сульфатів у розчині.

Представлені дані на рис. 5, свідчать про те, що вилучення сульфатів із води на мембрані Filmtec TW30-1812-50 відбувається досить ефективно – селективність мембрани перевищувала 80 %, а із зростанням концентрацій у вихідних розчинах вона збільшувалась до 95–99 %. При цьому підвищення ступеню відбору перміату призводило до зростання селективності для розчинів з низькими вихідними концентраціями сульфатів.

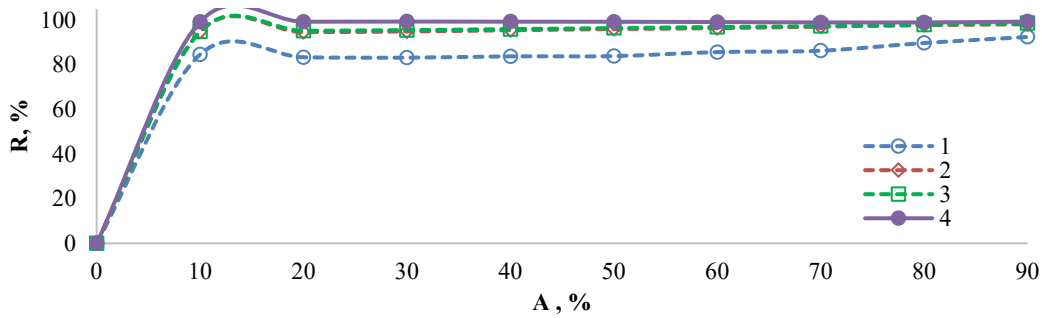


Рис. 5. Залежність селективності при робочому тиску 4,0 атм. від ступеню відбору перміату при фільтруванні через зворотноосмотичну мембрану низького тиску *Filmtec TW30-1812-50* розчинів Na_2SO_4 при вихідних концентраціях розчинів по сульфатах (mg/dm^3): 10,0 (1), 40,0 (2), 70,0 (3), 650,0 (4)

Слід зазначити, що концентрація сульфатів у перміаті не лише не знижувалась, а до певної міри зростала. При вихідній концентрації сульфатів $650 mg/dm^3$ зі збільшенням ступеню відбору перміату з 10 % до 90 % концентрація сульфатів у перміаті зростала із $5,8 mg/dm^3$ до $43,1 mg/dm^3$ при зниженні селективності з 99,34 до 98,90 %. Це при тому, що в концентраті вміст сульфатів зріс приблизно до $6500 mg/dm^3$.

Особливістю мембранного знесолення води при використанні зворотноосмотичних мембран є те, що при селективності 80–99 % при збільшенні ступеню відбору перміату до 80–90 % істотно зростає вміст солей у концентратах. Це призводить до збільшення осмотичного тиску розчинів та зниження робочого тиску (рис. 6).

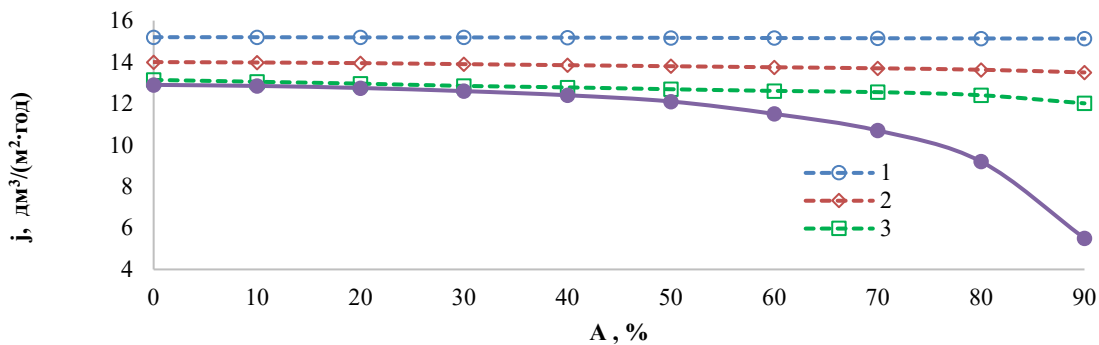


Рис. 6. Залежність продуктивності при робочому тиску 4,0 атм. від ступеню відбору перміату при фільтруванні через зворотноосмотичну мембрану низького тиску *Filmtec TW30-1812-50* розчинів Na_2SO_4 при вихідних концентраціях розчинів по сульфатах (mg/dm^3): 10,0 (1), 40,0 (2), 70,0 (3), 650,0 (4)

Контроль за стабільністю розчинів концентратів проводили порівнянням вмісту солей, експериментально визначеним у кожній відібраній пробі перміату, та розрахованим теоретично. Невідповідність експериментальних та розрахованих значень свідчить про проходження процесів утворення осадів у концентратах. Крім того, виходячи з рівня мінералізації концентрату, можна визначити його осмотичний та робочий тиск при заданому тиску в системі. Слід зазначити, що зазвичай у роботах зі зворотноосмотичному очищенню води такий підхід не використовують.

Як видно з рис. 1, розчини концентратів є стабільними в усьому діапазоні використаних концентрацій при підвищенні ступеню відбору перміату від 10 до 90 %, оскільки в усіх розчинах вміст сульфатів, визначений експериментально та розрахований теоретично, дуже близький.

Отже, на основі результатів досліджень запропоновано спосіб визначення продуктивності установки, виходячи із концентрації солі.

Подальші дослідження будуть направлені на визначення коефіцієнтів фільтрування та дослідження впливу наявних у воді катіонів та аніонів на процес зворотн осмотичного знесолення води. Це дозволить визначити продуктивність мембрани та робочі тиски в системі для отримання води задовільної якості та уточнити певні аспекти технології мембранного очищення води.

Висновки. Досліджено вплив вихідних концентрацій сульфату натрію та ступеню відбору перміату на селективність та продуктивність зворотньоосмотичної низьконапірної мембрани марки Filmtec TW30-1812-50. Визначено, що при підвищенні початкових концентрацій і ступеню відбору перміату селективність мембрани по сульфат-аніонам зростає, а продуктивності мембрани падає. Показано, що в процесі фільтрування концентрації сульфатів постійно зростають у концентратах і в меншій мірі зростають у перміаті при вихідних концентраціях нижчих 650 мг/дм^3 . Підвищення концентрації сульфатів у воді вище 650 мг/дм^3 призводить до збільшення їх концентрації у перміаті до $5,8\text{-}43,1 \text{ мг/дм}^3$. Збільшення солевмісту вихідної води призводить до зростання осмотичного тиску вихідного розчину і в значно меншій мірі – осмотичного тиску перміату, що в свою чергу обумовлює зниження питомої продуктивності мембрани.

Список використаних джерел

1. Purification of Mine Waters Using Lime and Aluminum Hydroxochloride / I. Trus, M. Gomelya, M. Tverdokhlib, V. Halysh, I. Radovenchyk, D. Benatov // *Ecol. Eng. Environ. Technol.* – 2022. – № 5. – Pp. 169-176.
2. Innovative Approach in Creation of Integrated Technology of Desalination of Mineralized Water / I. Trus, I. Radovenchyk, V. Halysh, M. Skiba, I. Vasylenko, V. Vorobyova, O. Hlushko, L. Sirenko // *Journal of Ecological Engineering.* – 2019. – № 20 (8). – Pp. 107-113.
3. Кравченко, М. Дослідження основних властивостей зворотньоосмотичних мембран та їх вплив на зміну фізико-хімічного складу водних розчинів / М. Кравченко, Л. Василенко // *Екологічна безпека та природокористування.* – 2022. – № 43(3). – Pp. 43-55.
4. Kravchenko M. V. Application of reverse osmosis method for post-treatment of drinking water / M. V. Kravchenko, L. O. Vasylenko, O. S. Voloshkina // *Ecological safety and nature management : collection of scientific works.* – 2021. – № 4(40). – Pp. 32-45.
5. Brick, M. T. Drinking water and membrane technologies (review) / M. T. Brick, R. R. Nihatullin, A. L. Alpatova // *Scientific notes of NaUKMA. Special issue.* – 1999. – № 9. – Pp. 409-411.
6. Аналіз об'єктів навколишнього середовища : навч. метод. посіб. для студ. ВНЗ / уклад. В. О. Мінаєва, Т. С. Нінова. – Черкаси : Вид. від. Чабаненко Ю. А., 2020. – 266 с.

References

1. Trus, I., Gomelya, M., Tverdokhlib, M., Halysh, V., Radovenchyk, I., & Benatov, D. (2022). Purification of Mine Waters Using Lime and Aluminum Hydroxochloride. *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, 5, 169–176.
2. Trus, I., Radovenchyk, I., Halysh, V., Skiba, M., Vasylenko, I., Vorobyova, V., Hlushko, O., & Sirenko, L. (2019). Innovative Approach in Creation of Integrated Technology of Desalination of Mineralized Water. *Journal of Ecological Engineering*, 20(8), 107–113.
3. Kravchenko, M., & Vasylenko, L. (2022). Doslidzhennia osnovnykh vlastyvostei zvorotnoosmotychnykh membran ta yikh vplyv na zminu fizyko-khimichnoho skladu vodnykh rozchyniv [Research of the main properties of reverse osmosis membranes and their influence on changes in the physical and chemical composition of aqueous solutions]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia – Ecological safety and nature management*, 43(3), 43–55.
4. Kravchenko, M.V., Vasylenko, L.O., & Voloshkina, O.S. (2021). Application of reverse osmosis method for post-treatment of drinking water. *Ecological safety and nature management: collection of scientific works*, 4(40), 32-45
5. Brick, M.T., Nihatullin, R.R., & Alpatova, A.L. (1999). Drinking water and membrane technologies (review). *Scientific notes of NaUKMA. Special issue*, 9, 409-411.
6. Minaieva, V.O., Ninova, T.S. (2020). *Analiz ob'ektiv navkolyshnoho seredovyshcha [Analysis of environmental objects]*. Vyd. vid. Chabanenko Yu. A.

Отримано 21.06.23

Mukola Gomelya¹, Inna Trus², Olena Hlushko³, Iryna Makarenko⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: m.gomelya@kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1165-7545>

ResearcherID: [J-4345-2017](https://orcid.org/0000-0003-1165-7545). Scopus Author ID: [6507653734](https://orcid.org/0000-0003-1165-7545)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: inna.trus.m@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6368-6933>

ResearcherID: [I-3204-2017](https://orcid.org/0000-0001-6368-6933). Scopus Author ID: [56152219600](https://orcid.org/0000-0001-6368-6933)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: alyona_glushko@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8243-5707>

ResearcherID: [J-5495-2017](https://orcid.org/0000-0002-8243-5707). Scopus Author ID: [57200946561](https://orcid.org/0000-0002-8243-5707)

⁴PhD in Technical Sciences, Senior Research of Department of ecology and technology of plant polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: irina.makarenko@chemicals.org.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7895-2664>

Scopus Author ID: [41761940300](https://orcid.org/0000-0002-7895-2664)

**DETERMINATION OF THE EFFICIENCY OF SULFATE REMOVAL
ON A LOW-PRESSURE REVERSE OSMOSIS MEMBRANE**

The dependence of the efficiency of the low-pressure reverse osmosis membrane Filmtec TW30-1812-50 on the initial concentrations of sodium sulfate in the range of 10-650 mg/dm³ at permeate recovery rates of 1-90 % using a pressure of 4 atm was determined. The effect of increasing the permeate recovery rate on selectivity, membrane performance, and the increase in the sulfate content of concentrates was determined. It is shown that the concentration of sulfates in permeate depends on their initial concentration in solutions and increases both with an increase in the initial concentration and with an increase in the degree of permeate extraction. The latter factor is quite significant at initial sulfate concentrations of 650 mg/dm³. The membrane performance increases with decreasing salt content in water and decreases with increasing permeate removal rate, which leads to an increase in salt concentration in the pre-membrane space. The selectivity of the membrane for sulfates is 94.9-99.3 % and increases with increasing concentration of sodium sulfate solutions in solutions, despite a certain increase in salt concentrations in permeates. It is shown that as the degree of permeate selection increases, the selectivity for solutions with low initial sulfate concentrations increases. A FFP-based process modeling was performed to determine the sulfate concentration in the permeate and concentrate at any initial sulfate concentration in a certain range. It was found that the concentrate solutions are stable in the entire range of concentrations used with an increase in the degree of permeate recovery from 10 to 90 %. Based on the research results, a method for determining the capacity of the plant and the osmotic and operating pressures based on the salt concentration and the set pressure in the system was proposed. From the data obtained, it can be concluded that the permissible level of mineralization at which the use of low-pressure reverse osmosis membranes is advisable.

Keywords: reverse osmosis; low pressure membranes; sulfates; permeate; concentrate.

Fig.: 6. References: 5.