

ЕКОЛОГІЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 628.166:628.162

ГОМЕЛЯ М. Д., КАРПЕНКО Р. О.*
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПОМ'ЯКШЕННЯ ВОДОПРОВІДНОЇ ВОДИ НА ЗВОРОТНЬООСМОТИЧНИХ МЕМБРАНАХ НИЗЬКОГО ТИСКУ

Робота присвячена визначенню ефективності застосування зворотньоосмотичних мембран низького тиску на прикладі комерційних мембран Filmtec TW30-1812-75 для пом'якшення прісних вод, а також оцінці впливу жорсткості води на осадкоутворення на мембрані в залежності від об'ємів фільтратів та ступеню відбору перміату. В ході роботи експериментально досліджено процеси пом'якшення водопровідної води.

Було вивчено процеси очищення води при заданих значеннях ступеню відбору перміату та визначено зміну характеристик води від об'єму відібраного перміату при стабільному робочому тиску 6,1 атмосфери та при продуктивності мембрани 0,0289 м/год. Процеси досліджували у широкому діапазоні ступеню відбору перміату 40, 50, 65, 75 та 90%. При проведенні досліджень контролювали зміну жорсткості води, концентрації іонів кальцію та магнію, лужності, провідності води та рН перміату і концентрату.

За результатами аналізу показано, що при фільтруванні води характеристики перміату мало змінювалися при збільшенні ступеню відбору перміату. В більшій мірі при цьому змінювались характеристики концентрату. Окремо було визначено залежність селективності мембрани Filmtec TW30-1812-75 по іонах жорсткості та гідрокарбонат-аніонах. Встановлено, що мембрана є більш селективною по іонах жорсткості в порівнянні з гідрокарбонатами, що обумовлюють лужність води.

Водночас виявлено, що за даних умов значно відрізнялись значення вимірних параметрів жорсткості і лужності від розрахованих теоретично за матеріальним балансом. Це свідчить про часткове вилучення із концентратів іонів жорсткості та карбонатів у вигляді твердих осадів на поверхні мембрани.

Ключові слова: мінералізація, жорсткість, пом'якшення, знесолення, зворотний осмос, іонний обмін, мембрана

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2025.348832

* Corresponding author: r.karpenko@kpi.ua

Received 04 September 2025; Accepted 09 October 2025

Постановка проблеми. Забезпечення населення Землі якісною питною водою є глобальною екологічною проблемою. Обумовлена вона нерівномірним розподілом наявних водних ресурсів на поверхні планети та значним антропогенним впливом на якість води в заселених регіонах. В приморських регіонах підземні та ґрунтові води характеризуються підвищеною мінералізацією та жорсткістю. При цьому прісні води мають жорсткість на рівні 8-30 мг/екв-дм³, що перевищує допустимі значення для питної води [1; 2].

Часто для кондиціонування природних вод та доочищення водопровідної води використовують баромембранні процеси. Частіше за все використовують зворотньоосмотичні мембрани низького тиску. Відомо, що при попередній підготовці води необхідно знизити каламутність води до 0,1 мг/дм³ а кольоровість до 10 град. ПКШ. Проте немає даних про необхідний рівень жорсткості води. Вважається що прісну освітлену воду можна направляти на зворотньоосмотичний фільтр. Власне, в більшості випадків реалізується така схема – фільтр з мікрофільтраційною мембраною (інколи з ультрафільтраційною мембраною) а далі зворотньоосмотичний фільтр. Але жорсткість при цьому не коригується. Як залежить інтенсивність осадовідкладень на мембрану від жорсткості води – невідомо.

Аналіз попередніх досліджень. Пом'якшення води досить широко використовується в процесах водопідготовки. Особливо часто такі процеси застосовуються у промисловості та енергетиці, де від ефективності пом'якшення води залежить ефективність використання та надійність теплообмінного обладнання.

Частіше за все для пом'якшення води у промисловості використовують реагентний метод [4]. Перевагою даної технології є виділення іонів жорсткості у вигляді нерозчинних осадів, які легко утилізувати та переробляти.

Для підвищення ефективності реагентного пом'якшення води застосовують гідроксоалюмінат натрію та інші алюмінієві коагулянти [5]. Проте даний метод ефективний при підвищенні рН до 9,0–10,5. Для технічної води це допустимо, а питна вода повинна мати $6,5 \leq \text{pH} \leq 8,5$. Тому даний метод для пом'якшення питної води не використовують.

Більш перспективним є використання іонного обміну для пом'якшення води [6; 7]. Проте необхідність регенерації іонітів суттєво звужує перспективи використання даного методу. На сьогодні рідко переробляють відпрацьовані регенераційні розчини, а їх скидання в каналізацію неможливе через високий рівень засолення води. Є роботи, де описані процеси переробки регенераційних розчинів [8], але їх рідко застосовують.

Більш поширеними методами очищення та доочищення при підготовці питної води є мембранні методи [9]. Частіше за все мембранні методи використовують для демінералізації води [10]. При невисокій мінералізації часто використовують нанофільтрування [11]. Нанофільтрування забезпечує високу продуктивність при невисоких значеннях робочого тиску [12]. Процес є меш енергоємним у порівнянні із зворотнім осмосом [13]. Проте наявність карбонатів та іонів жорсткості у воді створює проблеми при зворотньоосмотичному очищенні води через значні відкладення осадів на мембранах [14]. Тому при широкому застосуванні зворотнього осмосу для знесолення води [15] часто застосовують попередню стабілізаційну обробку води на іонітах [16]. Такі підходи доцільно використовувати на промислових установках опріснення води. Складніше проблему осадковідкладень вирішувати при використанні осмотичних фільтрів у побуті.

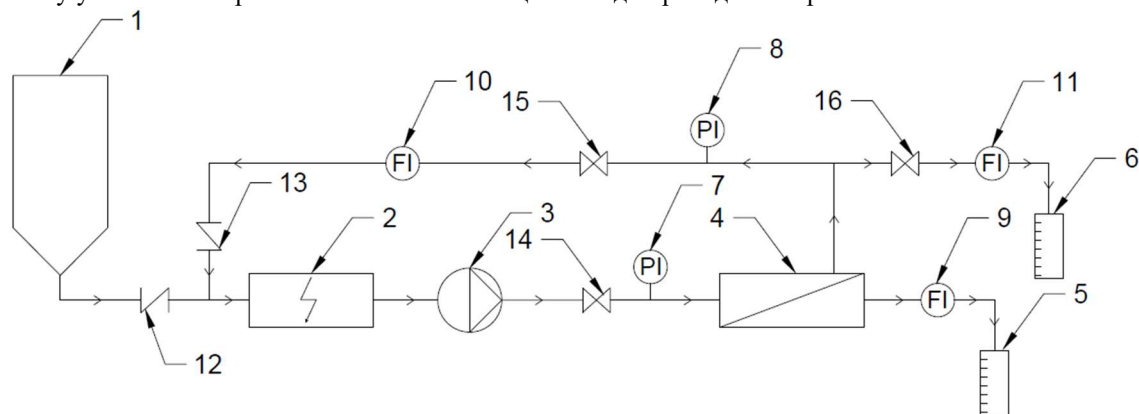
Метою даної роботи було визначення ефективності застосування зворотньоосмотичних мембран низького тиску на прикладі мембран Filmtec TW30-1812-75 для пом'якшення прісних вод, оцінки впливу жорсткості води на осадкоутворення на мембрані в залежності від об'ємів фільтратів та ступеню відбору перміату.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. Визначити селективність мембрани при фільтруванні водопровідної води, встановити залежність ефективності очищення води, характеристик перміату та концентрату від об'єму відфільтрованої води.
2. Встановити залежність параметрів процесу зворотньоосмотичного очищення води від ступеню відбору перміату, визначити залежність кількості відкладених на мембрані осадів від об'єму фільтратів та ступеню відбору перміату.

Методика роботи. Мембранні процеси пом'якшення води проводили при використанні касет із зворотньоосмотичною мембраною низького тиску Filmtec TW30-1812-75. Як середовище використовували водопровідну воду з характеристиками: Ж = 4,0–4,8 мг-екв/дм³; Са = 3,2–4,0 мг-екв/дм³; Mg = 0,60–1,32 мг-екв/дм³; Л = 3,8–4,2 мг-екв/дм³; рН = 7,60–7,90, $\chi = 416\text{--}456$ мкС/см. Площа мембрани 0,38 м². Дослідження проводили при тиску 6,1 атм, продуктивності мембрани 0,0289 м/год. Ступінь відбору перміату 40; 50; 65; 75 та 90 %.

Схему установки зворотньоосмотичного очищення води приведено на рис. 1.



1 - ємність з водою; 2 - проточний нагрівач; 3 - насос; 4- зворотньоосмотичний фільтр; 5; 6 - циліндри для відбору перміату і концентрату; 7; 8 - манометри; 9; 10; 11 - ротаметри; 12; 13 - зворотні клапани; 14; 15; 16 - регулювальні клапани.

Рис. 1 – Схему установки зворотньоосмотичного пом'якшення та очищення води

Воду (6 дм³) поміщали у ємність 1 і за допомогою насоса 3 подавали на зворотньоосмотичний фільтр 4. За допомогою ротаметрів 9 і 11 та регулюючих клапанів 14, 15, 16 встановлювали витрати перміату та концентрату. Витрату перміату регулювали клапанами 15 та 16. Клапанами 14, 15 та 16 встановлювали робочий тиск – 6,1 атм. Проточним нагрівачем 2 підтримували температуру води на рівні 25 °С. Зворотні клапани 12 та 13 забезпечували постійну подачу води з ємності 1 та циркуляційної води на фільтр 4.

Проби фільтрату (перміату) з кожного дм³ відбирали на аналіз із циліндра 5. Проби концентрату на аналіз із циліндра 6 відбирались одночасно з відбором проб перміату. У пробах перміату і концентрату визначали РН, провідність, жорсткість, концентрацію кальцію та магнію і лужність. Лужність, жорсткість визначали за стандартними методиками [17], провідність визначали кондуктометром.

Установку після кожного фільтроциклу промивали 0,1 % соляною кислотою.

Селективність мембрани (R, %) розраховували за формулою:

$$R = [(C_0 - C_n)/C_0] \cdot 100, \% \quad (1)$$

де R - селективність мембрани, %; C_0 та C_{ni} - концентрація компоненту, відповідно, у вихідному розчині та перміаті.

Вміст компонентів – Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- ; у i-тій пробі концентрату (C_{ki} , мг-екв/дм³) розраховували за формулою:

$$C_{ki} = (V_0 C_0 - \sum_{i=0}^n C_{ni} V_{ni}) / (V_0 - \sum_{i=0}^n V_{ni}), \text{мг-екв/дм}^3 \quad (2)$$

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

Продуктивність мембрани (швидкість трансмембранного потоку) (j, м/год) розраховували за формулою:

$$j = \frac{V_n}{S} \cdot \Delta t, \text{м/год} \quad (3)$$

де j – продуктивність мембрани, м/год, V_n – об'єм пробі перміату, S – площа мембрани 0,38 м²; Δt – час відбору пробі перміату, год.

Виклад основного матеріалу. Відомо, що зворотньоосмотичні фільтри низького тиску використовують для доочищення водопровідної води та для кондиціонування природних ґрунтових та артезіанських вод. Особливо ефективно їх використання для доочищення води з підвищеним рівнем жорсткості та мінералізації. Ефективно дані мембрани працюють при застосуванні попереднього пом'якшення води іонним обміном [18]. Проте у побуті застосування таких багатоступеневих локальних установок є досить незручним. Крім того, існує думка, що при жорсткості води до 7 мг-екв/дм³ відкладення осадів на мембранах незначне.

У даній роботі досліджували процес доочищення водопровідної води на зворотньоосмотичних мембранах низького тиску без попереднього пом'якшення води іонним обміном.

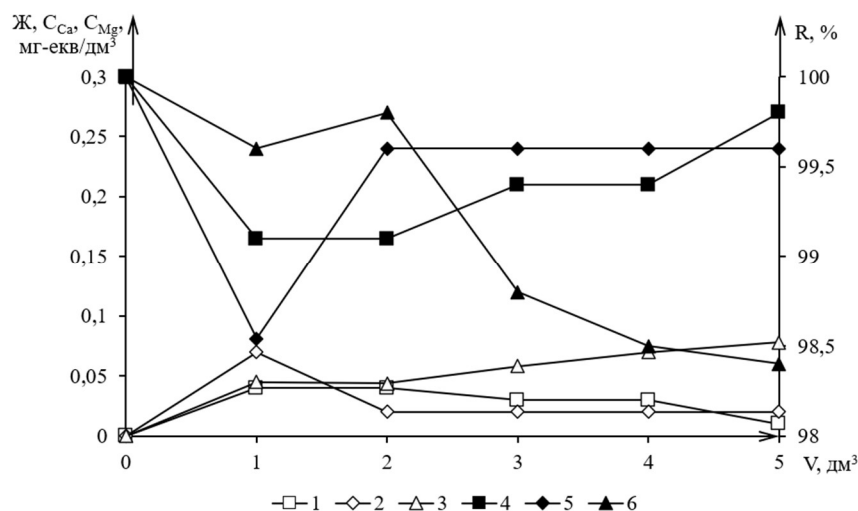


Рис. 2 – Залежність жорсткості (1; 2; 3) перміату при фільтруванні водопровідної води через зворотньоосмотичну мембрану низького тиску TW30-1812-75, селективності мембрани по іонах жорсткості (4; 5; 6) від об'єму перміату при тиску 6,1 атм, продуктивності мембрани 0,0289 м/год та при ступені відбору перміату, %: 40 (1; 2), 65 (2; 5), 90 (3; 6)

Як видно з рис. 2. вода досить ефективно пом'якшується при фільтруванні через дану мембрану при ступенях відбору перміату від 40 до 90 %. Селективність мембрани дещо знижується при підвищенні ступеню відбору перміату (A , %). За низького ступеню відбору перміату 40–65 % із збільшенням об'єму фільтрату селективність дещо підвищується, а при $A=90\%$ селективність по іонах жорсткості до певної міри знижується із збільшенням об'єму перміату.

Подібні залежності відмічено і при оцінці селективності мембрани по лужності (рис. 3). Проте в цілому селективність мембрани вища по іонах жорсткості, в порівнянні з гідрокарбонатами. Це пов'язано з тим, що двозарядні іони затримуються на мембранах краще за однозарядні.

Якщо оцінити зміну селективності мембрани по іонах жорсткості та лужності із підвищенням ступеню відбору перміату (рис. 4), то можна сказати, що в обох випадках відмічено зниження ефективності очищення при зростанні ступеню відбору перміату. Це обумовлено значним зростанням концентрації іонів жорсткості і гідрокарбонатів у концентратах. Хоча жорсткість перміату зросла лише з 0,03 мг-екв/дм³ при $A=40\%$ до 0,06 мг-екв/дм³ при $A=90\%$. Для лужності перміату відмічено зростання з 0,25 мг-екв/дм³ при $A=40\%$ до 0,38 при $A=90\%$.

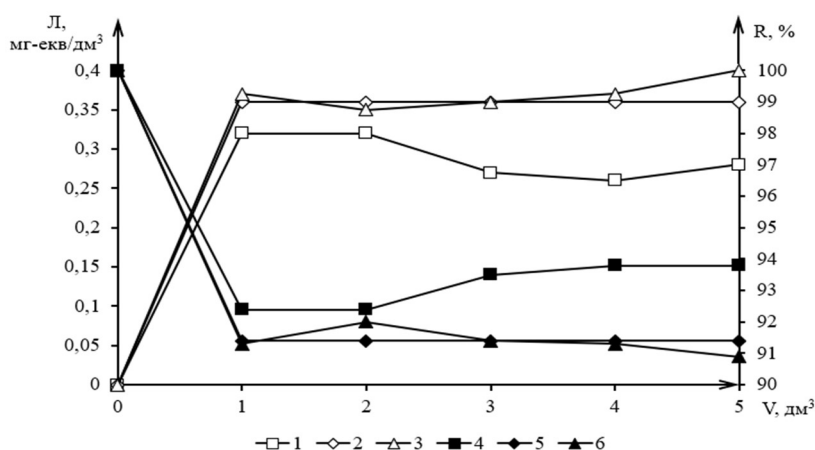


Рис. 3 – Зміна лужності (1; 2; 3) перміату при фільтруванні водопровідної води через зворотньоосмотичну мембрану низького тиску TW30-1812-75, селективності мембрани по гідрокарбонат іонах (4; 5; 6) із об'ємом відібраного перміату при тиску 6,1 атм, продуктивності мембрани 0,0289 м/год при ступені відбору перміату, %: 40 (1; 2), 65 (2; 5), 90 (3; 6)

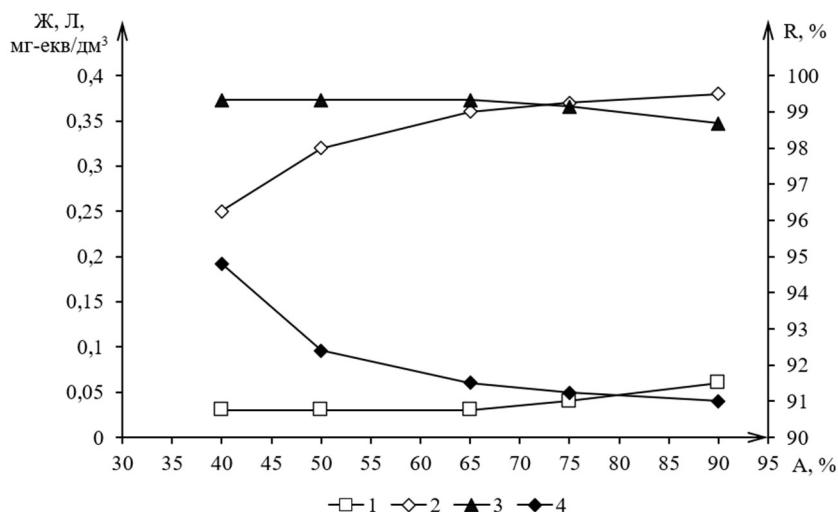


Рис. 4 – Залежність жорсткості (1), і лужності (2) перміату отриманого при фільтруванні водопровідної води через мембрану TW30-1812-75, селективності мембрани по жорсткості (3), та гідрокарбонатах (4) від ступеню відбору перміату при тиску (Р) 6,1 атм, продуктивності мембрани по перміату 0,0289 м/год

В цілому дані результати добре погоджуються із відомими даними [19] про пом'якшення води на зворотньоосмотичних мембранах низького тиску. Більш цікавими є результати отримані при вивченні динаміки збільшення жорсткості та лужності концентратів, що утворюються при очищенні водопровідної води на зворотньоосмотичній мембрані низького тиску. Дані результати приведені на рис. 5.

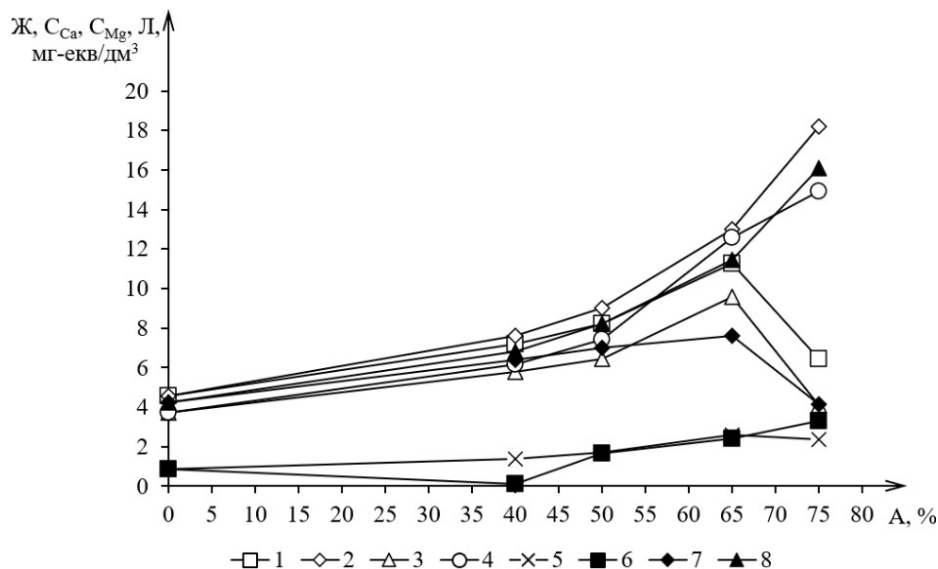


Рис. 5 – Залежність значень жорсткості (1; 2), концентрації кальцію (3; 4), магнію (5; 6), лужності (7; 8) концентрату виміряних (1; 3; 5; 7) та розрахованих (2; 4; 6; 8) отриманих при фільтруванні водопровідної води ($J=4,56$ мг-екв/дм³; $L=4,2$ мг-екв/дм³; $C_{Ca}=3,72$ мг-екв/дм³; $C_{Mg}=0,82$ мг-екв/дм³; $pH=7,9$; провідність 456 мкС/см) через мембрану TW30-1812-75 від ступеню відбору перміату при тиску (Р) 6,1 атм, продуктивності мембрани по перміату 0,0289 м/год

Як видно з рис. 5, в концентратах відмічено як зростання жорсткості, так і лужності при збільшенні ступеню відбору перміату. Проте ці значення були нижчими, за значення розраховані теоретично виходячи із початкових концентрацій іонів жорсткості та гідрокарбонат-аніонів. Ця різниця у значеннях зростала із збільшенням ступеню відбору перміату.

При $A=40\%$ різниця між виміряним та розрахованим значення жорсткості складала 0,40 мг-екв/дм³ і по лужності 0,42 мг-екв/дм³. При $A=90\%$ дана різниця зросла до 26,42 мг-екв/дм³ по жорсткості і до 22,37 мг-екв/дм³ по лужності. Це свідчить про значні кількості відкладеного карбонату кальцію на мембрані в процесі осмотичного очищення. Слід відмітити, що якщо при $A=65\%$ різниця між розрахованою і виміряною жорсткістю сягала лише 1,75 мг-екв/дм³, та лужністю 3,1 мг-екв/дм³, то при $A=75\%$ ці різниці були відповідно 11,78 та 11,97 мг-екв/дм³. Це свідчить про значне зростання осадковідкладень при ступені відбору перміату 75 %.

В основному в осад переходить карбонат кальцію. Це видно по рис. 5 (криві 3, 4). Різниця в концентраціях розрахованої і виміряної концентрації кальцію значно більша, в порівнянні із різницями в концентрації іонів магнію (криві 5, 6).

Підтвердженням цьому є рис. 6, на якому показано, що навіть при ступені відбору перміату 40 % спостерігається зниження виміряної концентрації кальцію в порівнянні з розрахованою на 0,7 мг-екв/дм³, тоді як для магнію різниці в концентраціях немає. Це свідчить про те, що в осад переходять катіони кальцію, а іони магнію знаходяться в розчині.

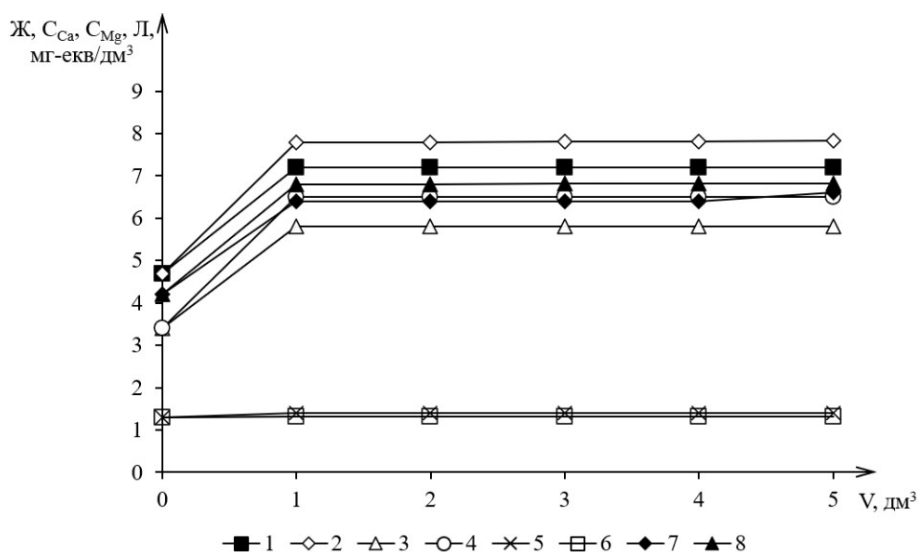


Рис 6 – Залежність жорсткості (1; 2), концентрації кальцію (3; 4), магнію (5; 6) та лужності (7; 8) визначених (1; 3; 5; 7) та розрахованих (2; 4; 6; 8) у концентраті отриманому при фільтруванні водопровідної води через мембрану TW30-1812-75 від об'єму отриманого перміату при тиску 6,1 атм, продуктивності мембрани по перміату 0,0289 м/год та ступеню відбору перміату 40 %

До певної міри осадковідкладення обумовлені зростанням концентрації іонів жорсткості та гідрокарбонатів. Проте гідрокарбонати кальцію і магнію добре розчинні у воді. Тому в значній мірі осадковідкладення збільшуються при підвищенні рН середовища у воді. Як видно з рис. 7, при проходженні води через мембрану відбувається підкислення перміату і підлужнення концентрату. Реакція середовища перміату знижується з 7,65–7,80 до 5,94–6,28 в залежності від ступеню відбору перміату. У концентраті рН середовища зростає з 7,65–7,86 до 7,92–8,20. Обумовлено це тим, що вільна вуглекислота краще проходить через мембрану, ніж гідрокарбонат аніон, тому що вода менш гідратована. Гідрокарбонат іони краще проходять через мембрану, ніж двозарядні аніони CO_3^{2-} . У воді похідні карбонової кислоти знаходяться у рівновазі:

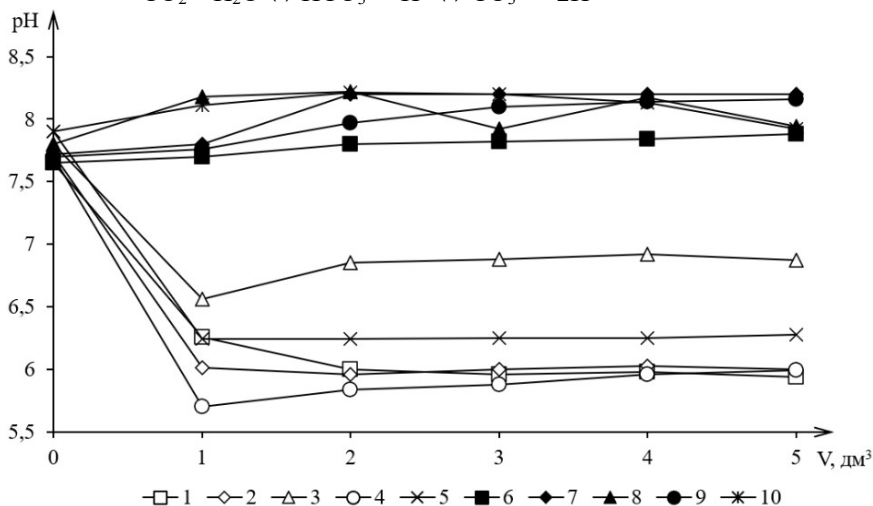
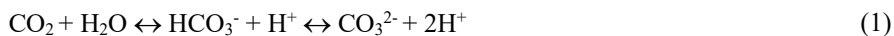


Рис. 7 – Залежність реакції середовища (рН) перміату (1; 2; 3; 4; 5) та концентрату (6; 7; 8; 9; 10) від об'єму перміату при фільтруванні водопровідної води через мембрану TW30-1812-75 при тиску 6,1 атм, за ступеню відбору перміату A, %: 40 (1; 6), 50 (2; 7), 65 (3; 8); 75 (4; 9); 90 (5; 10) при продуктивності мембрани 0,0289 м/год

При фільтруванні води протони проходять через мембрану краще, ніж карбонат аніони. Карбонат аніони з кальцієм утворюють нерозчинні карбонати. При зв'язуванні карбонатів відбувається часткове підкислення води. Тому при значному відкладенні осадів рН середовища у концентраті зростає найменше – крива 10 рис. 7. Тут рН у концентраті зростає із 7,90 до 8,11. Потім зростає до 8,20. По мірі зв'язування CO_3^{2-} рН падає до 8,13 і далі до 7,92.

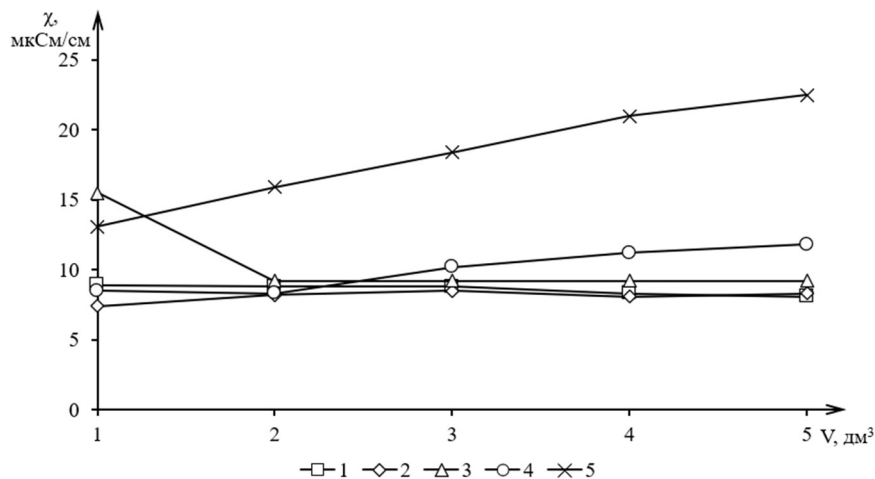


Рис. 8 – Зміна електропровідності перміату (1; 2; 3; 4; 5) зворотньоосмотичного знесолення водопровідної води із об'ємом відібраного перміату при ступені його відбору, А %: 40 (1); 50 (2); 65 (3); 75 (4); 90 (5) при тиску 6,1 атм, продуктивності мембрани TW30-1812-75 0,0289 м/год

Характер електропровідності перміату не викликає питань. Електропровідність перміату невисока і дещо зростає по мірі збільшення ступеню відбору перміату, що пов'язано із зниженням селективності знесолення води (рис. 8). Електропровідність концентратів зростає з підвищення об'єму відібраного перміату та ступеню відбору перміату (рис. 9).

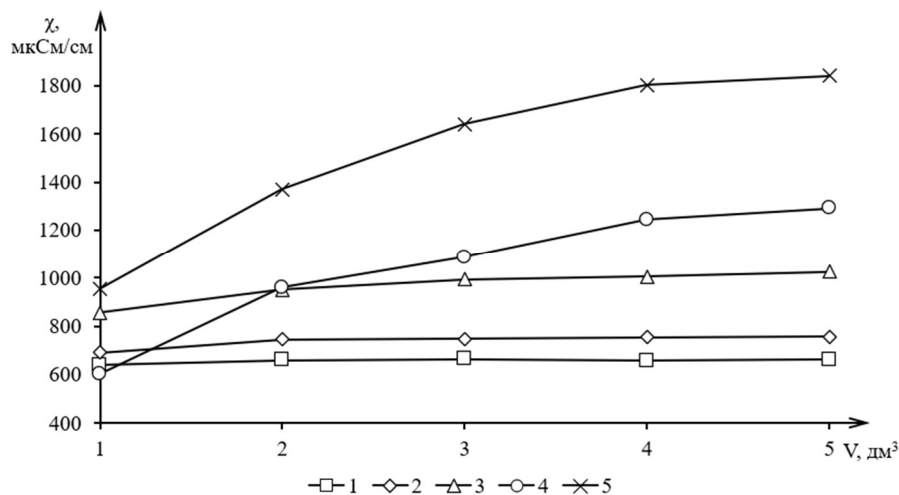


Рис. 9 – Зміна електропровідності концентратів (1; 2; 3; 4; 5) зворотньоосмотичного знесолення водопровідної води із об'ємом відібраного перміату при ступені його відбору, А %: 40 (1); 50 (2); 65 (3); 75 (4); 90 (5) при тиску 6,1 атм, продуктивності мембрани TW30-1812-75 0,0289 м/год

Висновки. 1. Визначено залежність селективності мембрани Filmtex TW30-1812-75 по іонах жорсткості та гідрокарбонат аніонах при заданій продуктивності та тиску від об'єму перміату та ступеню відбору перміату. Встановлено, що мембрана є більш селективною по іонах жорсткості в порівнянні з гідрокарбонатами, що обумовлюють лужність води. Селективність мембрани по іонах жорсткості сягає

98–99 % і знижується при збільшенні ступеню відбору перміату. Такий же характер зміни селективності мембрани по гідрокарбонат аніонах. Селективність по лужності знижується з 94,8 % при ступені відбору перміату 40 % до 91 % при зростанні ступеню відбору перміату до 90 %.

2. Показано, що із зростанням об'єму відібраного перміату та ступеню відбору перміату зростає різниця між вимірними та розрахованими концентраціями іонів жорсткості та лужності. В усіх випадках реальні значення жорсткості та лужності менші за розраховані. Ця різниця зростає із підвищенням об'ємів перміату та ступенем відбору перміату. Це обумовлено відкладеннями карбонату кальцію на мембрані. Суттєво кількості відкладень зростають при ступенях відбору перміату вищих 75 %.

Перспектива подальших досліджень. В перспективі доцільно вивчити вплив мінеральних кислот та антискалантів на процеси осадковідкладень на мембрані. Цікаво, які межі застосування даних мембран для знесолення води. Важливо визначити вплив мінеральних солей на осадковідкладення на мембрані.

Список використаної літератури

1. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною»: наказ Міністерства охорони здоров'я України від 12.05.2010 р. № 400. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 05.11.2025).
2. Директива Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року про якість води, призначеної для споживання людиною. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_963#Text (дата звернення: 05.11.2025).
3. Гомеля М. Д., Трус І. М., Грабітченко В. М. Нанofільтраційне опріснення слабomінералізованих стічних вод. *Питання хімії та хімічної технології*. 2014. № 1. С. 98–102.
4. Пилипенко А. Т., Вахник І. Г., Максін В. І., Самченко З. А. Методи попередження накипоутворення при опрісненні солоних вод. *Хімія і технологія води*. 1991. Т. 13, № 11. С. 996–1013.
5. Макаренко І. М. Маловідходні технології опріснення води. *Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2014. № 2. С. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.20535/2306-1626.2.2014.52154>
6. Любавіна О.О., Михайленко В.Г., Парикін В.С. Використання слабoкислотного катіоніту для кондиціонування води. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2007. № 1(27). С. 239–241.
7. Шаблій Т. О., Гомеля М. Д., Панов Є. М. Електрохімічна переробка відпрацьованих розчинів, що утворюються при регенерації катіонітів. *Екологія та промисловість*. 2010. № 2. С. 33–38.
8. Носачова Ю. В., Овсяник А. В. Маловідходна технологія регенерації сильноокислотних катіонітів Na-катіонного пом'якшення води. *Екотехнологія та ресурсозбереження*. 2008. № 2. С. 44–47.
9. Гончарук В. В., Кавицька А. А., Осильська М. Д. Ультрафільтрація та нанofільтрація – пріоритетні напрямки в технології підготовки питної води з поверхневих джерел. *Хімія і технологія води*. 2009. Т. 31, № 2. С. 198–266.
10. Naidu L., Saravanan S., Chidambaram M., Goel M., Das A., Sarat J., Babu C. Nanofiltration in transforming surface water into healthy water: comparison with reverse osmosis. *Journal of Chemistry*. 2015. Vol. 2015, DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/326869>.
11. Гомеля М. Д., Трус І. М., Грабітченко В. М. Нанofільтраційне опріснення слабomінералізованих вод. *Питання хімії та хімічної технології*. 2014. Т. 1, № 1. С. 98–102. URL: <http://vhht.dp.ua/wp-content/uploads/pdf/2014/1/23.pdf> (дата звернення: 05.11.2025).
12. Goncharuk V., Kavitskaya A., Skil'skaya M. Nanofiltration in drinking water supply. *Water Treatment and Demineralization Technology*. 2011. Vol. 33. С. 37–54. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063455X11010073>.
13. Prodanović J., Vasić V. Application of membrane processes for distillery wastewater purification: a review. *Desalination and Water Treatment*. 2013. Vol. 51, № 16–18. P. 3325–3334. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.749178>.
14. Curcio E., Ji X., Quazi A. M. Hybrid nanofiltration–membrane crystallization system for the treatment of sulfate wastes. *Journal of Membrane Science*. 2010. Vol. 360, № 1–2. P. 493–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.05.053>.
15. Brika B., Omran A., Greesh N., Abutartour A. Reuse of reverse osmosis membranes – case study: Tajoura reverse osmosis desalination plant. *Iranian Journal of Energy and Environment*. 2019. Vol. 10, № 4. P. 269–300. DOI: <https://doi.org/10.5829/ijee.2019.10.04.11>.

16. Гомеля М. Д., Трус І. М., Радовенчик Я. В. Вплив стабілізаційної обробки води на слабокислотному катіоніті в кислій формі на якість нанофільтраційного опріснення шахтної води. *Науковий вісник Національного Чернігівського університету*. 2014. № 5. С. 100–105.
 17. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Інженерна екологія». Донецьк: ДонНТУ, 2008.
 18. Макаренко І. М., Глушко О. В., Рисухін В. В., Терещенко О. М. Застосування катіонітів для кондиціонування води в процесах її баромембранного знесолення. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2013. № 3/6 (63). С. 48–52.
 19. Vakulenko A., Gomelya M., Shabliy T., Radovenchuk Y. Application of Low-Pressure Reverse Osmosis Membranes for Drinking Water Softening. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24, № 5. P. 154–162. DOI: <https://doi.org/10.12912/27197050/165897>
-

Mykola Gomelya, Rostyslav Karpenko

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF TAP WATER SOFTENING USING LOW-PRESSURE REVERSE OSMOSIS MEMBRANES

The study investigates the processes of tap water softening using a reverse osmosis system equipped with a low-pressure membrane Filmtec TW30-1812-75. The aim of the research was to determine the efficiency of low-pressure reverse osmosis membranes for freshwater softening and to assess the influence of water hardness on scale formation on the membrane surface depending on filtrate volume and permeate recovery rate.

During the experiments, tap water with an initial hardness of 4.0–4.8 mg-eq/dm³ was treated under a working pressure of 6.1 atm and a membrane productivity of 0.0289 m³/h. The study was conducted at permeate recovery rates of 40 %, 50 %, 65 %, 75 %, and 90 %. To evaluate the process, pH, electrical conductivity, total hardness, alkalinity, and concentrations of calcium and magnesium ions were measured in both the permeate and concentrate. Experimental data were compared with theoretically calculated concentrations in the concentrate.

The results showed that the Filmtec TW30-1812-75 membrane exhibited high selectivity toward hardness ions (98–99 %) compared with bicarbonate anions responsible for water alkalinity. As the permeate recovery increased, the selectivity for bicarbonates gradually decreased—from 94.8 % at 40 % recovery to 91 % at 90 %. It was also found that with an increase in the volume of permeate collected, the difference between calculated and measured concentrations of hardness and alkalinity grew, with actual values being lower than theoretical ones. This indicates the deposition of calcium ions in the form of calcium carbonate (CaCO₃) on the membrane surface. The most intensive scaling was observed at recovery rates above 75 %. At lower recovery degrees, permeate quality remained stable, and concentration variations corresponded to expected values.

The Filmtec TW30-1812-75 membrane provides effective reduction of water hardness and alkalinity while maintaining stable purification performance within the studied operating range. At recovery rates exceeding 75 %, the risk of scale formation increases, which should be considered when predicting and optimizing the operation of reverse osmosis systems.

Keywords: mineralization, hardness, softening, desalination, reverse osmosis, ion exchange, membrane

References

1. Ministerstvo okhorony zdorov'ia Ukrainy (2010) Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoi dlia spozhyvannia liudynoi [Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption]: Order No. 400 of 12 May 2010. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10> (Accessed: 5 November 2025).
2. Council of the European Union (1998) Council Directive 98/83/EC on the quality of water intended for human consumption. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_963 (Accessed: 5 November 2025).
3. Homelia, M. D., Trus, I. M. and Hrabitchenko, V. M. (2014) Nanofil'tratsiine oprisnennia slabomineralizovanykh stichnykh vod [Nanofiltration desalination of low-mineralized wastewater]. *Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnologii*, no. 1, pp. 98–102.

4. Pylypenko, A. T., Vakhnyk, I. H., Maksyn, V. I. and Samchenko, Z. A. (1991) Metody poperedzhennia nakypoutvorennia pry oprisnenni solonykh vod [Methods of preventing scale formation during desalination of saline water]. *Khimiia i tekhnolohiia vody*, vol. 13, no. 11, pp. 996–1013.
5. Makarenko, I.M. (2014) Malovidkhodni tekhnolohii oprisnennia vody [Low-waste technologies of water desalination]. *Visnyk NTUU «KPI». Serii: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia*, no. 2, pp. 84–89. doi: <https://doi.org/10.20535/2306-1626.2.2014.52154>.
6. Liubavina, O. O., Mykhailenko, V. H. and Parykin, V. S. (2007) Use of weak-acid cationite for water conditioning [Vykorystannia slabokyslotnoho kationitu dlia kondytsiuvannia vody]. *Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu*, no. 1(27), pp. 239–241.
7. Shablii, T. O., Homelia, M. D. and Panov, E. M. (2010) Elektrokhimichna pererobka vidpratsovanykh rozchyniv, shcho utvoriuiutsia pry reheneratsii kationitiv [Electrochemical treatment of spent solutions generated during cationite regeneration]. *Ekolohiia ta promyslovist*, (2), pp. 33–38.
8. Nosachova, Y. V. and Ovsianyk, A. V. (2008) Malovidkhodna tekhnolohiia reheneratsii synokyslotnykh kationitiv Na-kationnoho pom'iakshennia vody [Low-waste regeneration technology of strong-acid cationites used in Na-cation softening of water]. *Ekotekhnolohiia ta resursozberezhennia*, (2), pp. 44–47.
9. Honcharuk, V. V., Kavyt'ska, A. A. and Osyl'ska, M. D. (2009) Ultrafiltratsiia ta nanofiltratsiia – priorytetni napriamky v tekhnolohii pidhotovky pytnoi vody z poverkhnevyykh dzherel [Ultrafiltration and nanofiltration as priority directions in water treatment technologies for potable water obtained from surface sources]. *Khimiia i tekhnolohiia vody*, 31(2), pp. 198–266.
10. Naidu, L. et al. (2015) Nanofiltration in transforming surface water into healthy water: comparison with reverse osmosis. *Journal of Chemistry*, 2015. doi: <https://doi.org/10.1155/2015/326869>
11. Homelia, M. D., Trus, I. M. and Hrabitchenko, V. M. (2014) Nanofiltratsiine oprisnennia slabomineralizovanykh vod [Nanofiltration desalination of low-mineralised waters]. *Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnolohii*, 1(1), pp. 98–102. Available at: <http://vhht.dp.ua/wp-content/uploads/pdf/2014/1/23.pdf> [Accessed: 5 November 2025].
12. Goncharuk, V., Kavitskaya, A. and Skil'skaya, M. (2011) Nanofiltration in drinking water supply. *Water Treatment and Demineralization Technology*, 33, pp. 37–54. doi: <https://doi.org/10.3103/S1063455X11010073>.
13. Prodanović, J. and Vasić, V. (2013) Application of membrane processes for distillery wastewater purification: a review. *Desalination and Water Treatment*, 51(16–18), pp. 3325–3334. doi: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.749178>
14. Curcio, E., Ji, X. and Quazi, A. M. (2010) Hybrid nanofiltration–membrane crystallization system for the treatment of sulfate wastes. *Journal of Membrane Science*, 360(1–2), pp. 493–498. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.05.053>.
15. Brika, B., Omran, A., Greesh, N. and Abutartour, A. (2019) Reuse of reverse osmosis membranes – case study: Tajoura reverse osmosis desalination plant. *Iranian Journal of Energy and Environment*, 10(4), pp. 269–300. doi: <https://doi.org/10.5829/ijee.2019.10.04.11>
16. Homelia, M. D., Trus, I. M. and Radovenchyk, Ya.V. (2014) Vplyv stabilizatsiinoi obrobky vody na slabokyslotnomu kationiti v kyslii formi na yakist nanofiltratsiinoho oprisnennia shakhtnoi vody [Effect of stabilization treatment on nanofiltration of mine water]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Chernihivskoho universytetu*, (5), pp. 100–105.
17. Donetsk National Technical University (2008) Metodychni vkazivky do vykonannia laboratornykh robit z kursu “Inzhenerna Ekolohiia” [Guidelines for laboratory works in Engineering Ecology]. Donetsk: DonNTU.
18. Makarenko, I. M., Hlushko, O. V., Rysukhin, V. V. and Tereshchenko, O. M. (2013) Zastosuvannia kationitiv dlia kondytsiuvannia vody v protsesakh yii baromembrannoho znesolennia [Use of cationites in baromembrane desalination]. *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 3/6(63), pp. 48–52.
19. Vakulenko, A., Gomelya, M., Shablii, T. and Radovenchyk, Y. (2023) Application of low-pressure reverse osmosis membranes for drinking water softening. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(5), pp. 154–162. doi: <https://doi.org/10.12912/27197050/165897>.