

UDC 628.16.08

Kostiantyn Shumbar, postgraduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0201-2142> **e-mail:** k.w.shumbar@gmail.com

Andrii Shcherbak, postgraduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4594-6412> **e-mail:** andron.vr@gmail.com

Marina Kravchenko, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** marina-diek@ukr.net

Lesya Vasylenko, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor

e-mail: lesya.kiev@ukr.net

Juliia Berezhnytska, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7953-3974> **e-mail:** juli_mmm@ukr.net

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS ON THE PERFORMANCE AND EFFICIENCY OF REVERSE OSMOSIS MEMBRANES: MODELLING WITH THE SOLUTION-DIFFUSION MODEL

Abstract. *This work is devoted to the study of the influence of the main operating parameters (pressure, concentration, temperature) on the performance of reverse osmosis membranes and the use of the solution-diffusion transport model to predict their efficiency. The study provides a classification of reverse osmosis transport models for describing the flow of dissolved solutes and solvents through the membrane. The most common model for describing the transport of aqueous dilute solutions and salts in dense, non-porous polymers is the solution-diffusion model. This model allows for the prediction of the efficiency of solute retention depending on the applied external and osmotic pressure across the membrane, and salt transport is determined by the concentration gradient between the initial solution and the permeate. A scheme of the reverse osmosis process is presented, which includes: the profile of pressure, chemical potential and solvent activity at the solution-membrane interface in the solution-diffusion model; solvent behaviour in the membrane under pressure; division of the system into physical and chemical properties of the solvent and the solute inside the membrane. It is shown that the effect on permeability and solute retention is the result of the interaction of several factors, including the feed/operating temperature, which affects the membrane porosity, the concentration of the initial dilute aqueous solution, and the transmembrane pressure, which contributes to membrane compaction. It was found that an increase in the operating pressure leads to an increase in the driving force, which increases the water flow and the efficiency of solute retention. It was found that an increase in transmembrane pressure from 100 to 500 kPa increases salt retention from 82% to 94%, and the degree of salt retention decreases with an increase in solution temperature from 25 to 45 °C. It was found that with an increase in salt concentration from 1% to 8%, the degree of salt retention decreases from 99.5% to 97.8%. It is shown that the optimum permeation flux is observed at a temperature of 35 °C, especially 70 minutes after the start of operation, and the permeation flux decreases with time.*

Keywords: *dilute aqueous solutions, reverse osmosis, polymeric membrane, operating parameters, pressure, concentration, temperature, performance.*

К.В. Шумбар, А.І. Щербак, М.В. Кравченко, Л.О. Василенко, Ю.О. Березницька

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ВПЛИВ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗВОРотноОСМОТИЧНИХ МЕМБРАН: МОДЕЛЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛІ «РОЗЧИН-ДИФУЗІЯ»

Анотація. Ця робота присвячена дослідженню впливу основних робочих параметрів (тиску, концентрації, температури) на продуктивність зворотноосмотичних мембран і використанню транспортної моделі «розчин-дифузія» для прогнозування їх ефективності. У дослідженні наведено класифікацію моделей транспорту зворотного осмосу для опису потоків розчинених речовин і розчинників через мембрану. Найпоширенішою моделлю для опису переносу водних розбавлених розчинів і солей у щільних непористих полімерах є модель на основі механізму «розчин-дифузія». Ця модель дозволяє спрогнозувати ефективність затримання розчинених речовин залежно від прикладеного зовнішнього та осмотичного тиску через мембрану, а транспорт солей визначається градієнтом концентрації між вихідним розчином і пермеатом. Наведено схему процесу зворотного осмосу, яка включає: профіль тиску, хімічного потенціалу та активності розчинника на межі розділу розчин-мембрана в моделі «розчин-дифузія»; поведінку розчинника в мембрані під тиском; поділ системи на фізико-хімічні властивості розчинника та розчиненої речовини всередині мембрани. Показано, що вплив на проникність і затримання розчинених речовин є результатом взаємодії кількох факторів, зокрема температури подачі/експлуатації, яка впливає на пористість мембрани, концентрації вихідного розбавленого водного розчину, а також трансмембранного тиску, що сприяє ущільненню мембрани. Встановлено, що збільшення робочого тиску призводить до зростання рушійної сили, що підвищує потік води та ефективність затримання розчинених речовин. Досліджено, що підвищення трансмембранного тиску від 100 до 500 кПа збільшує затримання солі з 82% до 94%, а ступінь затримки солі зменшується зі збільшенням температури розчину з 25 до 45 °С. Виявлено, що зі збільшенням концентрації солі з 1% до 8% ступінь затримки солі зменшується з 99.5% до 97.8%. Показано, що оптимальний потік проникнення спостерігається при температурі 35 °С, особливо через 70 хвилин після початку роботи, а з часом потік проникнення зменшується.

Ключові слова: розбавлені водні розчини, зворотний осмос, полімерна мембрана, робочі параметри, тиск, концентрація, температура, продуктивність.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.53-64>

Вступ

Чиста вода є обмеженим і цінним ресурсом, оскільки лише приблизно 2,5% води на Землі придатні для безпосереднього використання та споживання людиною [1]. Нині спостерігається суттєвий дисбаланс між потребою в чистій воді та її доступністю, причому приблизно чверть світового населення відчуває економічний дефіцит водних ресурсів [2]. Прогнози показують, що до 2030 року майже половина населення Землі може опинитися в умовах дефіциту води [3]. Проблема загострюється через зростання населення, індустріалізацію, розширення сільського господарства, забруднення водних

об'єктів, неефективне управління водними ресурсами та зміну клімату [4]. Вирішення проблеми дефіциту води потребує впровадження нових підходів і вдосконалення альтернативних технологій, таких як опріснення [5]. Цей процес передбачає видалення солей і мінералів з морської чи солонуватої води для отримання води, придатної для споживання та використання в промисловості [6]. Суворі норми щодо якості питної води, встановлені різними урядами, стимулюють удосконалення установок для опріснення та підвищення їх ефективності [7].

Традиційні методи термічного опріснення, такі як багатоступеневе швидке випаровування, дистиляція з множинним ефектом та термічне стиснення пари, використовують процеси зміни фаз для виробництва прісної води [8]. Проте ці методи є енергоємними та мають високі капітальні й експлуатаційні витрати, оскільки залежать від теплової енергії, здебільшого з викопного палива [9]. Наприклад, виробництво 1000 м³/добу прісної води за допомогою термічного опріснення може споживати до 10 000 тонн викопного палива щорічно [10].

З розвитком мембранних технологій мембранні процеси стали найперспективнішими методами для опріснення води завдяки їх високій енергетичній ефективності [11]. Ці процеси також відрізняються компактністю, простотою експлуатації, відносно низькою вартістю водопідготовки та можливістю легкої автоматизації [12, 13]. Мембранні процеси, керовані тиском, використовують напівпроникні мембрани для очищення води, при цьому молекули води проходять через мембрану, а солі затримуються [14]. Мембранна технологія революціонізувала сферу розділення водних розчинів, забезпечуючи високу селективність та економічно вигідну альтернативу традиційним процесам очищення [15]. До найбільш поширених мембранних процесів належать зворотний осмос, нанофільтрація і мембранна дистиляція [16].

Зворотний осмос є технологією очищення води, яка використовує напівпроникну полімерну мембрану для видалення іонів, білків, неорганічних та органічних хімічних речовин, що зазвичай важко видалити іншими традиційними методами [17]. Продуктивність та ефективність розділення зворотноосмотичними мембранами значною мірою залежать від транспорту розчинника та розчинених речовин через мембрани [18]. Фундаментальне розуміння цих процесів є ключовим для інтерпретації експериментальних спостережень і розробки високоефективних матеріалів. Проте, незважаючи на тривалу історію використання полімерних мембран зворотного осмосу та їх широке застосування, сучасні моделі транспорту все ще знаходяться на етапі розвитку, і жодна з існуючих моделей наразі не може бути застосована для широкого спектру умов [19].

Було розроблено кілька моделей механізмів транспорту зворотного осмосу для опису потоків розчинених речовин і розчинників через мембрани. Загальна мета таких моделей масопереносу полягає у зв'язку потоків з умовами експлуатації. Фундаментальне розуміння механізму транспорту є ключовим для оцінки продуктивності мембран і розробки нових високоефективних мембранних матеріалів, що відповідають потребам різних сучасних застосувань та зростаючим вимогам до процесів розділення. Для досягнення цієї мети модель повинна бути інтегрована з певними транспортними коефіцієнтами, які часто визначаються на основі експериментальних результатів.

Моделі переносу водних розбавлених розчинів через мембрани можна розділити на три основні категорії:

1) Феноменологічні моделі транспорту, які не залежать від конкретного механізму і базуються на теорії необоротної термодинаміки, наприклад моделі Кедема–Шпіглера [20].

2) Непористі транспортні моделі, в яких мембрана являє собою непористий або гомогенний матеріал. До цієї категорії належать моделі «розчин-дифузія», розширена «розчин-дифузія» та модель «розчин-дифузія» з неідеальністю [21].

3) Пористі транспортні моделі, в яких мембрана вважається пористою. Сюди входять моделі переважного сорбційного капілярного потоку, аналіз Кімури – Суріджана, а також дрібнопористий і поверхневий потік через пори мембран [22].

Хоча такі моделі були розроблені для електролітів, вони також підходять для інших розчинених речовин. Різні дослідження показують, що зміни в мембранах можуть спричинити специфічність до розчинених речовин та нелінійність транспорту. Складніші моделі мембранного транспорту виходять за межі цього дослідження, однак було виявлено, що нелінійності можуть виникати через набухання або стискання полімерів, електростатичні взаємодії або інші нелінійності в транспорті через полімерні мембрани.

Найпоширенішою моделлю для опису переносу водних розбавлених розчинів і солей в щільних непористих полімерах є модель, запропонована Мертеном і Лонсдейлом на основі механізму «розчин-дифузія» [23]. Відповідно до цієї моделі, транспорт води залежить від прикладеного зовнішнього тиску та осмотичного тиску через мембрану. Транспорт солей через мембрану визначається градієнтом концентрації між вихідним розчином і пермеатом. Ця спрощена структура включає класичне значення коефіцієнта транспортування води і феноменологічне значення коефіцієнта транспортування солей та підтверджена численними експериментальними результатами [24]. Модель «розчин-дифузія» забезпечує основні транспортні рівняння, засновані на теоріях, розроблених для ідеальних розбавлених розчинів.

Ця модель успішно застосовувалася для опису ефективності мембран і транспорту кількох розчинених речовин [25], особливо у випадках, коли мембрани демонстрували нижчу роздільну здатність, ніж прогнозувалося на основі вимірювань розчинності та дифузії.

Однак, вона ігнорує кілька важливих аспектів через спрощені припущення, що обмежує будь-яке фундаментальне тлумачення перенесення води і солей під час зворотного осмосу [26]. Ще один недолік класичної моделі «розчин-дифузія» полягає в тому, що рушійні сили переносу солей спрощені градієнтом тиску або концентрації, а не градієнтом хімічного потенціалу, що враховується в рівнянні коефіцієнта активності, запропонованому в роботі [27].

Ефективність зворотноосмотичних систем значною мірою залежить від конструктивних особливостей та умов експлуатації, а наявність моделей зворотного осмосу є ключовим аспектом для їх проєктування. Прогнозування впливу умов експлуатації на продуктивність мембран вимагає використання однієї з транспортних моделей, наприклад моделі «розчин-дифузія», параметри якої дозволяють оцінити вплив робочих умов на процес зворотного осмосу.

Метою дослідження є аналіз впливу основних робочих параметрів (тиску, концентрації, температури) на продуктивність зворотноосмотичних мембран та використання транспортної моделі «розчин-дифузія» для прогнозування їх ефективності.

Основна частина

Схему процесу зворотного осмосу, який складається з кількох етапів, зображено на рисунку 1. На рис. 1, а показано профілі температури, хімічного потенціалу (μ) та активності (a) розчинника на межі розділу «розчин–мембрана». Відображено різницю тисків P_t та P_p між водним розбавленим розчином та пермеатом. Розчинник (вода) проходить через мембрану, рухаючись у напрямку градієнтів хімічного потенціалу та активності, які змінюються вздовж товщини мембрани, від розбавленого водного розчину до пермеату. Рисунок 1, б ілюструє процес транспорту розчинника під дією тиску P_t . Молекули води, рухаючись під прикладеним тиском, проходять через пори мембрани, відокремлюючись від розчинених речовин. Рисунок 1, в демонструє розподіл фізико-хімічних властивостей між чистим розчинником та мембраною. Показано, як тиск P_t , температура, а також інші фізико-хімічні параметри визначають поведінку розчинника та його взаємодію з мембраною.

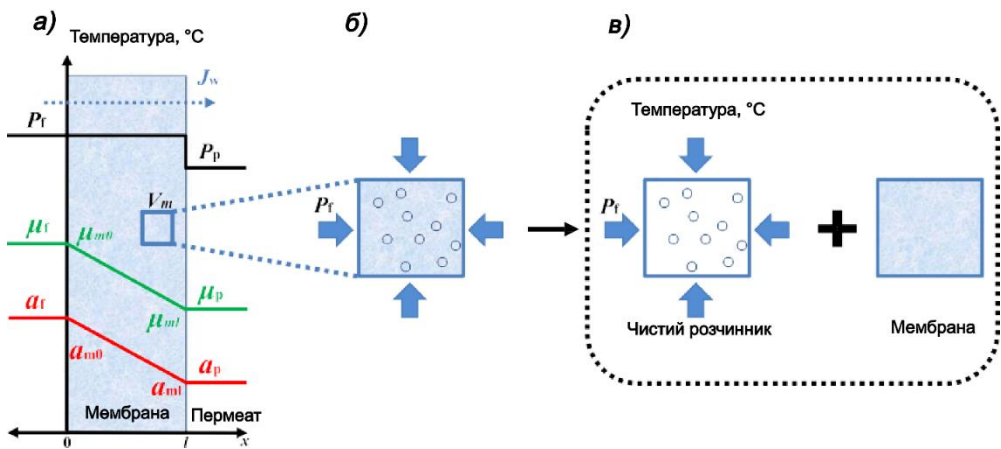


Рис. 1. Схематичне зображення процесу зворотного осмосу: а) профіль тиску, хімічного потенціалу та активності розчинника на межі розділу розчин–мембрана в моделі «розчин-дифузія»; б) поведінка розчинника в мембрані під тиском; в) поділ системи на фізико-хімічні властивості розчинника та розчиненої речовини всередині мембрани

Перенесення маси, що визначає атомний або молекулярний транспорт через межу розділу в одному напрямку, виражено в рівнянні (1):

$$J_i = -D \frac{dc_i}{dx}, \quad (1)$$

де J_i – потік компонента i ; D – коефіцієнт дифузії; $\frac{dc_i}{dx}$ – градієнт концентрації компонента i , а x – товщина мембрани.

Швидкості прямої та зворотної дифузії через межу розділу виражені в рівнянні (2):

$$J_i = -D(D_i^f C_i^f - D_i^m C_i^m), \quad (2)$$

де градієнт концентрації описано в рівнянні (4). Тут нижній індекс позначає розчинену речовину, а верхній індекс позначає фазу.

У кінетичній транспортній моделі статичний рівноважний розподіл через будь-яку межу мембрани досягається, коли активність кожної розчиненої речовини дорівнює $a_i^f = a_i^m$. Стаціонарна рівновага виникає, коли хімічний потенціал на межі розділу мембрани є рівним. Це досягається як у моделі Мертена, так і в моделі активності шляхом включення хімічного потенціалу в подальший аналіз транспортування. Активність визначається як концентрація, помножена на коефіцієнт активності ($a_i = m_i \cdot \gamma_i$), а аналітична термодинамічна залежність між активністю та хімічним потенціалом змінює активність. Це забезпечує врахування всіх ефектів завдяки включенню хімічного потенціалу в модель активності, що призводить до наступного загального рівняння мембранного потоку (рівняння 3):

$$J_i = \frac{D}{\varphi \gamma_i^m} (\gamma_i^f C_i^f - \gamma_i^p C_i^p) = B_a (\gamma_i^f C_i^f - \gamma_i^p C_i^p), \quad (3)$$

де B_a – це проникність розчиненої речовини, яка враховує як активність, так і концентрацію. Це рівняння застосовне для солей та будь-яких інших розчинених речовин або розчинників. Активність солей і розчинених речовин залежить від тиску, температури та концентрації. Перевага використання рівняння переносу (рівняння 3), полягає в тому, що коефіцієнт активності можна розділити на кілька фізичних компонентів, таких як нелінійні ефекти через стисливість пари, стисливість рідини та зміни молярного об'єму. Зв'язок між активністю та хімічним потенціалом дозволяє узгодити підхід дифузії розчину з моделлю активності. Водно-специфічне співвідношення описано рівнянням 4:

$$\mu_w = \mu_w^0 + RT \ln a_w, \quad (4)$$

де μ – хімічний потенціал; T – температура; R – універсальна газова стала.

У моделі «розчин-дифузія» загальною рушійною силою, що забезпечує транспортування компонента через щільну мембрану, є градієнт хімічного потенціалу, як описано в рівнянні (5):

$$J_i = -L_i \frac{d\mu_i}{dx}, \quad (5)$$

де J_i – потік компонента i ; L_i – коефіцієнт пропорційності між потоком і рушійною силою; μ_i – хімічний потенціал компонента i , а x – товщина мембрани.

Моделі «розчин-дифузія» передбачає, що (1) поверхневий шар мембрани є однорідним і неперистим, і (2) як розчинена речовина, так і розчинник розчиняються в цьому шарі, а потім дифундують через нього незалежно один від одного. Потоки води та розчинених речовин пропорційні градієнту їхнього

хімічного потенціалу, який виражається через різницю тиску та концентрації для розчинника, а для розчиненої речовини – через різницю концентрацій по обидві сторони мембрани:

$$f_v = A \cdot (\Delta P - \Delta \pi), \quad (6)$$

де f_v – об'ємний потік розчинника, $L/h \cdot m^2$; A – константа гідравлічної проникності, яка враховує характеристики мембрани та умови експлуатації системи; ΔP – різниця тиску через мембрану (кПа); $\Delta \pi$ – різниця осмотичного тиску через мембрану (кПа).

Якщо $A = A_D D$, де $A_D D$ – проникність розчинника без коефіцієнта дифузії (D), то з рівняння (6) отримуємо:

$$f_v = A_D D \cdot (\Delta P - \Delta \pi), \quad (7)$$

$$f_s = B \cdot \Delta C, \quad (8)$$

де f_s – потік розчиненої речовини, керований градієнтом концентрації (ΔC) через мембрану, а B – коефіцієнт проникності розчиненої речовини.

Ефективність затримання солей або розчинених речовин мембраною у водному розчині розраховується за формулою (9):

$$R = \left[1 - \frac{\rho_v \cdot B}{A \cdot (\Delta P - \Delta \pi)} \right] \cdot 100\%, \quad (9)$$

де ρ_v – густина води, $кг/м^3$; B – константа проникності солей або розчинених речовин.

Використовуючи транспортну модель «розчин-дифузія» було змодельовано вплив різних робочих умов на продуктивність мембрани. На рис. 2, а показано залежність потоку водного розчину через мембрану та ефективності затримання солей 3,5% NaCl від тиску.

Збільшення робочого тиску призводить до зростання рушійної сили, що підвищує потік води (як показано в рівнянні (6)) та ефективність затримання солей або розчинених речовин (згідно з рівнянням (9)). При тиску, рівному осмотичному, потік води наближається до нуля. Підвищення трансмембранного тиску від 100 до 500 кПа призводить до збільшення затримання солі з 82% до 94%. Оскільки зворотньоосмотичні мембрани не можуть повністю утримати всі розчинені солі у вихідному розчині, завжди присутня певна кількість солі, яка проходить через мембрану. При збільшенні тиску проникнення солі зменшується, оскільки вода проходить через мембрану швидше, що розбавляє концентрацію пермеату та збільшує відсоток відштовхування солей.

Рисунок 2, б демонструє вплив концентрації солі у вихідному розчині на ступінь затримки солі (R %). Виявлено, що зі збільшенням концентрації солі з 1% до 8% ступінь затримки солі зменшується з 99.5% до 97.8%. Автори [28] вказують на цікаву тенденцію зміни R зі зростанням концентрації: спочатку R збільшується (завдяки зниженню потоку, що зменшує явище поляризації концентрації), а потім зменшується (оскільки подальше зростання концентрації знижує рушійну силу та ефективність розділення).

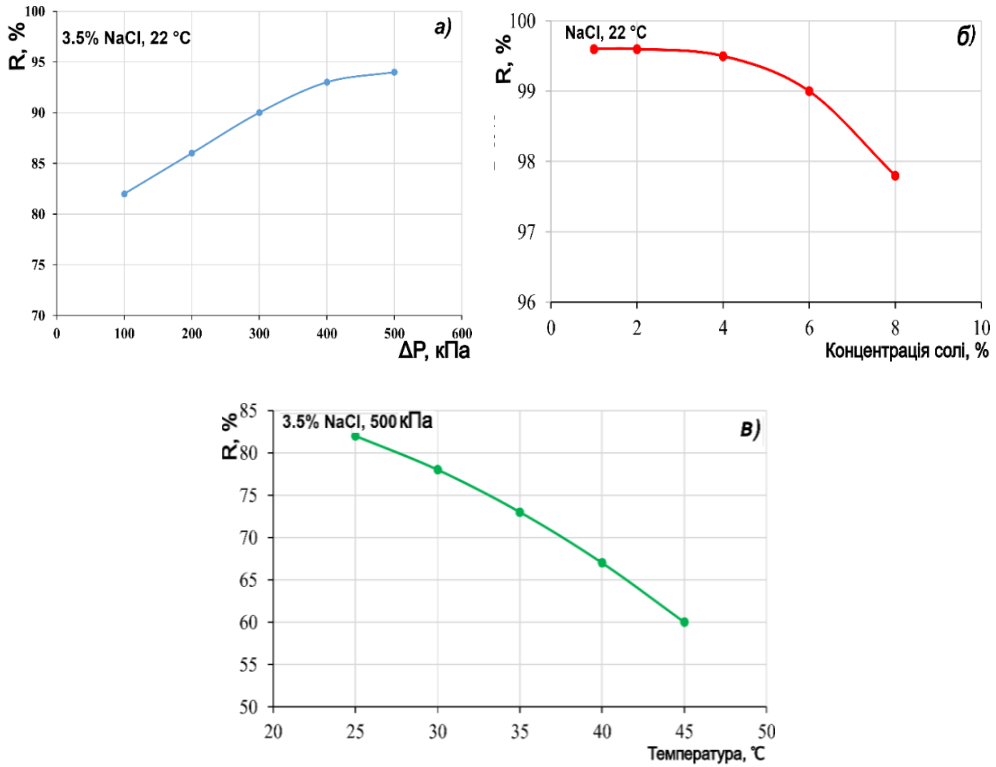


Рис. 2. Вплив тиску (а), концентрації солі NaCl при $\Delta P = 100$ кПа (б) і температури (в) на продуктивність зворотньоосмотичних мембран

Вплив температури вихідного розчину (від 25 до 45 °C) на ступінь затримки солі показано на рисунку 2, в. Ступінь затримки солі мембраною зменшується при збільшенні температури розчину з 25 до 45 °C. Цей ефект пояснюється зниженням в'язкості вихідного розчину, що в свою чергу знижує концентрацію розчину на поверхні мембрани. У кількох роботах розглядався вплив температури на осмотичні показники. Автори [29] вивчили вплив температури на продуктивність мембрани при опрісненні, і їх результати підтвердили, що потік збільшується з підвищенням температури. Іншими науковцями [30] також було досліджено потік води через мембрану при температурах 25 °C і 35 °C за різних тисків, застосовуючи 1 М розчин NaCl. В ізобаричних умовах потік води збільшувався приблизно на 4,1% з підвищенням температури на кожен градус, тоді як питома потужність зростала на 3,4% на градус при збільшенні температури від 25 °C до 35 °C. Вони пояснили температурний ефект збільшенням водопроникності та сольової проникності, при цьому відзначивши, що співвідношення між ними залишалося близьким до постійного. Вони також дійшли висновку, що саме підвищена водопроникність є ключовим фактором для покращення потоку води. Крім того, було зазначено, що збільшення дифузії при вищих температурах зменшує внутрішню концентраційну поляризацію в мембрані, що також сприяло збільшенню потоку води.

Щодо впливу робочих параметрів на об'ємний потік проникнення розчинника через мембрани, рисунок 3, а показує, що тиск має найбільший вплив порівняно з іншими параметрами, такими як температура (рис. 3, б) та концентрація (рис. 3, в). Потік проникнення через мембрани зростає зі збільшенням трансмембранного тиску. Це пояснюється тим, що підвищення трансмембранного тиску сприяє проходженню більшої частини вихідного розчину через мембрану, в результаті чого виходить очищена вода (тобто потік проникнення зростає).

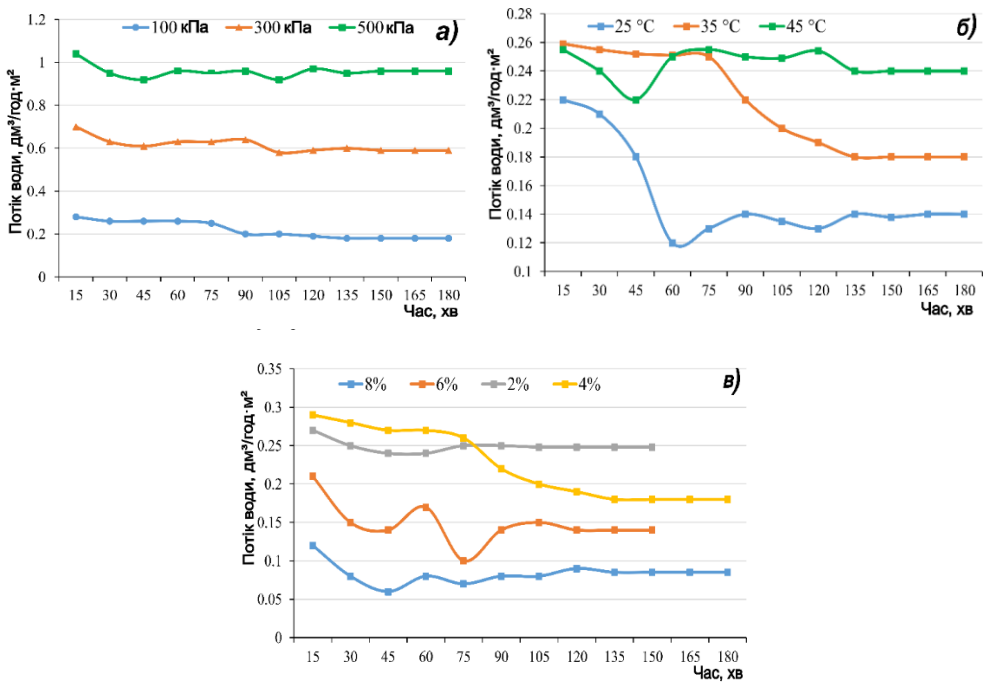


Рис. 3. Вплив тиску (а) (3.5%NaCl, 22°C); температури (б) (3.5%NaCl, 100 кПа) і концентрації солі (в) на потік проникнення (22°C, 100кПа)

Підвищення температури вихідного розчину призводить до збільшення потоку проникнення через мембрану зворотного осмосу. Це пов'язано зі зменшенням в'язкості та щільності води при підвищенні температури, що збільшує коефіцієнт проникності води, як було відзначено в роботі [31]. За результатами, представленими на рис. 3, б, можна зазначити, що оптимальний потік проникнення спостерігався при температурі 35 °C, зокрема через 70 хвилин після початку роботи, а з часом потік проникнення зменшувався. Це вказує на часові зміни в роботі мембрани при певних умовах.

Вплив концентрації солі вихідного розчину на потік проникнення показаний на рис. 3, в. Зменшення потоку проникнення спостерігається зі збільшенням концентрації солі, що пов'язано зі зростанням осмотичного тиску на мембрані. Осмотичний тиск залежить від типу і концентрації солей або органічних речовин у вихідному розчині, що в свою чергу впливає на рушійну силу процесу. Високі концентрації солі можуть сприяти утворенню забруднення на поверхні мембрани, про що також повідомлялось у [32].

Висновки

У даному дослідженні застосовано модель «розчин-дифузія» для оцінки впливу основних робочих параметрів на ефективність зворотноосмотичних мембран. Загальні результати показують, що вплив на проникність і затримання розчинених речовин є результатом взаємодії кількох факторів, зокрема температури подачі/експлуатації, яка впливає на пористість мембрани, концентрації вихідного розбавленого водного розчину, а також трансмембранного тиску, що сприяє ущільненню мембрани. Результати моделювання підтверджують, що зі збільшенням часу роботи вихідного розчину спостерігається зменшення потоку проникнення в різних умовах експлуатації. Збільшення робочого тиску призводить до зростання як потоку проникнення, так і ефективності затримки солей, досягаючи ефективності на рівні 94% при тиску 500 кПа. Температура вихідного розчину відіграє роль у зменшенні ефективності затримки солі, одночасно підвищуючи потік проникнення. Збільшення концентрації солі у вихідному розчині від 2% до 8% призводить до зменшення як ефективності затримки солі, так і потоку проникнення через мембрану.

REFERENCES

1. Abdelkareem, M.A., El Haj Assad, M., Sayed, E.T., Soudan, B. (2018). Recent Progress in the Use of Renewable Energy Sources to Power Water Desalination Plants. *Desalination*, 435, 97–113. doi:10.1016/j.desal.2017.11.018
2. Ang, W.L.; Mohammad, A.W.; Hilal, N.; Leo, C.P. (2014). A Review on the Applicability of Integrated/Hybrid Membrane Processes in Water Treatment and Desalination Plants. *Desalination*, 363, 2–18. doi:10.1016/j.desal.2014.03.008
3. Qasim, M.; Badrelzaman, M.; Darwish, N.N.; Darwish, N.A.; Hilal, N. (2019). Reverse Osmosis Desalination: A State-of-the-Art Review. *Desalination*, 459, 59–104. doi:10.1016/j.desal.2019.02.008
4. Qasim, M.; Darwish, N.A.; Sarp, S.; Hilal, N. (2015). Water Desalination by Forward (Direct) Osmosis Phenomenon: A Comprehensive Review. *Desalination*, 374, 47–69, doi:10.1016/j.desal.2015.07.016
5. Prihasto, N.; Liu, Q.-F.; Kim, S.-H. (2008). Pre-Treatment Strategies for Seawater Desalination by Reverse Osmosis System. *Desalination*, 249, 308–316. doi:10.1016/j.desal.2008.09.010
6. Shenvi, S.S.; Isloor, A.M.; Ismail, A.F. (2014). A Review on RO Membrane Technology: Developments and Challenges. *Desalination*, 368, 10–26. doi:10.1016/j.desal.2014.12.042.
7. Xia, S.; Li, X.; Zhang, Q.; Xu, B.; Li, G. (2006). Ultrafiltration of Surface Water with Coagulation Pretreatment by Streaming Current Control. *Desalination*, 204, 351–358. doi:10.1016/j.desal.2006.03.544
8. Ali, A.; Tufa, R.A.; Macedonio, F.; Curcio, E.; Drioli, E. (2017). Membrane Technology in Renewable-Energy-Driven Desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1–21. doi:10.1016/j.rser.2017.07.047
9. Youssef, P.G.; AL-Dadah, R.K.; Mahmoud, S.M. (2014). Comparative Analysis of Desalination Technologies. *Energy Procedia*, 61, 2604–2607. doi:10.1016/j.egypro.2014.12.258
10. Alkaisi, A.; Mossad, R.; Sharifian-Barforoush, A. (2017). A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy. *Energy Procedia*, 110, 268–274. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.138

11. Cay-Durgun, P.; Lind, M.L. (2018). Nanoporous Materials in Polymeric Membranes for Desalination. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 20, 19–27. doi:10.1016/j.coche.2018.01.001
12. Qasim, M.; Darwish, N.N.; Mhiyo, S.; Darwish, N.A.; Hilal, N. (2018). The Use of Ultrasound to Mitigate Membrane Fouling in Desalination and Water Treatment. *Desalination*, 443, 143–164. doi:10.1016/j.desal.2018.04.007
13. Warsinger, D.M.; Chakraborty, S.; Tow, E.W.; Plumlee, M.H.; Bellona, C.; Loutatidou, S.; Karimi, L.; Mikelonis, A.M.; Achilli, A.; Ghassemi, A.; et al. (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
14. Wang, K.; Abdalla, A.A.; Khaleel, M.A.; Hilal, N.; Khraisheh, M.K. (2016). Mechanical Properties of Water Desalination and Wastewater Treatment Membranes. *Desalination*, 401, 190–205. doi:10.1016/j.desal.2016.06.032
15. Choi, J.-S.; Kim, J.-T. (2014). Modeling of Full-Scale Reverse Osmosis Desalination System: Influence of Operational Parameters. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 261–268. doi:10.1016/j.jiec.2014.02.033
16. Altaee, A.; Zaragoza, G.; Van Tonningen, H.R. (2014). Comparison between Forward Osmosis-Reverse Osmosis and Reverse Osmosis Processes for Seawater Desalination. *Desalination*, 336, 50–57. doi:10.1016/j.desal.2014.01.002
17. Kravchenko, M.V.; Vasylenko, L.O. (2022). Investigation of the Main Properties of Reverse Osmosis Membranes and Their Influence on Changes in the Physico-Chemical Composition of Aqueous Solutions. *Environmental safety and natural resources*, 43, 43–55. doi:10.32347/2411-4049.2022.3.43-55
18. Park, H.B.; Kamcev, J.; Robeson, L.M.; Elimelech, M.; Freeman, B.D. (2017). Maximizing the Right Stuff: The Trade-off between Membrane Permeability and Selectivity. *Science*, 356, eaab0530. doi:10.1126/science.aab0530
19. Mai, Z.; Gui, S.; Fu, J.; Jiang, C.; Ortega, E.; Zhao, Y.; Tu, W.; Mickols, W.; Van Der Bruggen, B. (2019). Activity-Derived Model for Water and Salt Transport in Reverse Osmosis Membranes: A Combination of Film Theory and Electrolyte Theory. *Desalination*, 469, 114094. doi:10.1016/j.desal.2019.114094
20. Spiegler, K.S.; Kedem, O. (1966). Thermodynamics of Hyperfiltration (Reverse Osmosis): Criteria for Efficient Membranes. *Desalination*, 1, 311–326. doi:10.1016/S0011-9164(00)80018-1
21. Sarbolouki, M.N. (1977). Reverse Osmosis and Synthetic Membranes – Theory, Technology, Engineering. (S. Sourirajan, Ed.). National Research Council of Canada, Ottawa, Canada.
22. Sobana, S.; Panda, R.C. (2011). Review on Modelling and Control of Desalination System Using Reverse Osmosis. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 10, 139–150. doi:10.1007/s11157-011-9233-z
23. Merten, U. (1963). Flow Relationships in Reverse Osmosis. *Ind. Eng. Chem. Fund.* 1963, 2, 229–232. doi:10.1021/i160007a013
24. Ismail, A.F.; Matsuura, T. (2017). Progress in Transport Theory and Characterization Method of Reverse Osmosis (RO) Membrane in Past Fifty Years. *Desalination*, 434, 2–11. doi:10.1016/j.desal.2017.09.028
25. Mickols, W.; Mai, Z.; Van Der Bruggen, B. (2020). Effect of Pressure and Temperature on Solvent Transport across Nanofiltration and Reverse Osmosis Membranes: An Activity-Derived Transport Model. *Desalination*, 501, 114905. doi:10.1016/j.desal.2020.114905
26. Paul, D. (2004). Reformulation of the Solution-Diffusion Theory of Reverse Osmosis. *Journal of Membrane Science*, 241, 371–386. doi:10.1016/j.memsci.2004.05.026
27. Kravchenko, M.; Berezhnyska, Y.; Hunchenko, O.; Vasylenko, L.; Haba, K. (2021). The Theoretical Calculation of Activity Coefficients in the Use of Baromembrane Methods for Water Treatment. In Proceedings of the International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021»; European Association of Geoscientists & Engineers: Lviv, Ukraine, 2021; (pp. 1–5).

28. Costa, M.L.; Dickson, J.M. (1991). Modelling of Modules and Systems in Reverse Osmosis. Part I: Theoretical System Design Model Development. *Desalination*, 80, 251–274. doi:10.1016/0011-9164(91)85162-N
29. Zhao, S.; Zou, L. (2011). Effects of Working Temperature on Separation Performance, Membrane Scaling and Cleaning in Forward Osmosis Desalination. *Desalination*, 278, 157–164. doi:10.1016/j.desal.2011.05.018
30. She, Q.; Jin, X.; Tang, C.Y. (2012). Osmotic Power Production from Salinity Gradient Resource by Pressure Retarded Osmosis: Effects of Operating Conditions and Reverse Solute Diffusion. *Journal of Membrane Science*, 401–402, 262–273. doi:10.1016/j.memsci.2012.02.014
31. Karimanzira, D.; Rauschenbach, T. (2021). Performance Prediction of a Reverse Osmosis Desalination System Using Machine Learning. *GEP*, 09, 46–61. doi:10.4236/gep.2021.97004
32. Shamel, M.M.; Chung, O.T. (n.d.). Drinking water from desalination of seawater: optimization of reverse osmosis system operating parameters, 1.

Стаття надійшла до редакції 05.06.2024 і прийнята до друку після рецензування 13.09.2024

The article was received 05.06.2024 and was accepted after revision 13.09.2024

Шумбар Костянтин

аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0201-2142> **e-mail:** k.w.shumbar@gmail.com

Щербак Андрій

аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4594-6412> **e-mail:** andron.vr@gmail.com

Кравченко Марина Василівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** marina-diek@ukr.net

Василенко Леся Олексіївна

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

e-mail: lesya.kiev@ukr.net

Березницька Юлія Олегівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7953-3974> **e-mail:** juli_mmm@ukr.net