

СТРУКТУРНА ОПТИМІЗАЦІЯ ДВОХСТАДІЙНОЇ МЕМБРАННОЇ СИСТЕМИ ДЕМІНЕРАЛІЗАЦІЇ МОРСЬКОЇ ВОДИ

С. С. Шоботов, О. О. Квітка, З. В. Малецький

Національний технічний університет України "КПІ", м. Київ

e-mail: mail@zahar.info

В статті розглядаються питання оптимізації промислових систем демінералізації морської води із застосуванням мембранних технологій. Використовуючи існуючу математичну модель мембранного розділення та сучасні методи оптимізації, виконано пошук оптимальної структури та робочих параметрів двохстадійної системи при різних умовах її функціонування. Аналіз отриманих результатів оптимізації дозволив виявити економічну доцільність застосування двохстадійної архітектури процесу мембранної демінералізації для морської води різного солемісту.

Ключові слова: мембранні технології, структурна оптимізація, приведені витрати, моделювання мембранних процесів.

Вступ

Як свідчить світова статистика, на даний час більше 1 млрд. людей знаходиться в умовах абсолютної відсутності джерел прісного водопостачання та ще біля 2,3 млрд. проживає у регіонах, малозабезпечених прісною водою [1]. Ресурси традиційних джерел прісної води, таких як, ріки та озера, поступово вичерпуються, а мінералізація підземних джерел стрімко зростає внаслідок їх перевикористання та вторинного антропогенного забруднення. Відомо, що 96,5% світових водних запасів сконцентровано в морях та океанах з характерним солемістом 30-45 г/л [2]. Таким чином, проблема одержання прісної води з морської гостро стоїть у світовому масштабі. З кожним роком її актуальність збільшується у відповідності до загальнопланетарних демографічних тенденцій. Розв'язання даної проблеми можливе за рахунок активного розвитку та впровадження технологій знесолення та повторного використання води.

На сьогоднішній день технології знесолення морської води в основному поділяються на дві групи – термічні та мембранні процеси. Перші великомасштабні заводи по опрісненню морської води були запущені в країнах Близького Сходу, де тепер розташовано біля 50% світових потужностей. Більше 80% цих заводів базуються на використанні термічних технологій демінералізації, в основному багатоступеневої дистиляції. Розвиток мембранних технологій, як економічно ефективного альтернативи дистиляційним процесам, призвів до того, що сьогодні в світі з 15000 заводів по опрісненню морської води більше половини використовують високоефективний процес мембранного розділення – зворотний осмос. В валових продуктивностях це означає, що 44% світового виробництва опрісненої води здійснюється за рахунок мембранних та 40% за рахунок дистиляційних технологій [3].

Як показала багаторічна практика, зворотноосмотичні технології демінералізації морської води не позбавлені недоліків. В основному це високі витрати електроенергії, що споживається насосами високого тиску, та збільшення мінералізації природної води в місцях скидання концентратів мембранного розділення. При порівнянні з іншими процесами опріснення, особливо з дистиляцією, перевага залишається на стороні мембранних технологій, навіть з урахуванням зазначених недоліків. Таким чином, підвищення економічної ефективності та зниження негативного впливу на оточуюче середовище є основними напрямками вдосконалення мембранних процесів опріснення морської води.

Дана робота присвячена питанням оптимізації мембранних технологій демінералізації морської води, як найбільш економічно та екологічно раціональних серед відомих технологій знесолення.

Мембранні технології демінералізації морської води

Сучасні технологічні схеми мембранної демінералізації морської води зазвичай складаються з трьох основних стадій: попередня підготовка води, що має забезпечувати стабільну та довготривалу роботу мембранної стадії, власне мембранна стадія та стадія доочищення, що за необхідності має забезпечувати особливі вимоги до якості знесоленої води. Як правило, на стадіях попередньої підготовки та доочищення води застосовуються типові технологічні рішення, в той час як основна стадія мембранної демінералізації завжди потребує спеціального проектування та оптимізації за економічними та екологічними критеріями.

Система мембранної демінералізації води складається з мембранних елементів, які встановлюються у спеціальних мембранотримачах. Кількість мембранних елементів у мембранотримачі може змінюватись від одного до восьми залежно від типу мембранотримача. Мембранотримачі з'єднуються між собою послідовно або паралельно відповідно до визначеного при проектуванні принципу (рис. 1). Паралельно згруповані мембранотримачі складають окрему стадію або підстадію системи.

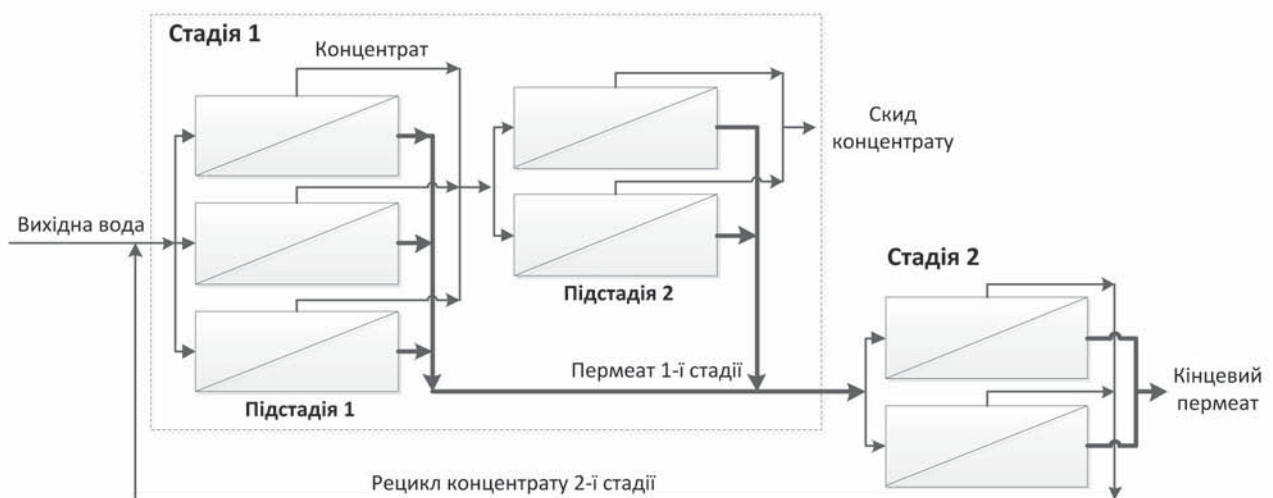


Рис. 1. Приклад системи мембранної демінералізації води.

На мембранних елементах проходить процес розділення вихідної води на демінералізовану воду (пермеат) та розчин, що містить вилучені солі – концентрат (рис. 2).

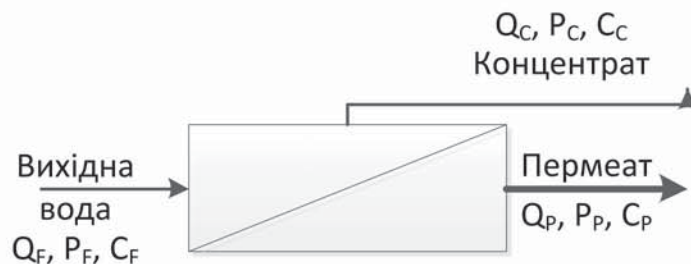


Рис. 2. Процес розділення на мембранному елементі.

У мембранотримачі мембранні елементи з'єднуються послідовно за концентратом, а пермеат з кожного елемента надходить до збирального каналу та відводиться з мембранотримача через порт пермеату (рис. 3). Таким чином, на i -й мембранний елемент у мембранотримачі ($i > 1$) надходить вода з параметрами $Q_F = Q_C (i-1)$, $P_F = P_C (i-1)$, $C_F = C_C (i-1)$, причому: $Q_F < Q_C (i-1)$, $P_F < P_C (i-1)$, $C_F > C_C (i-1)$.

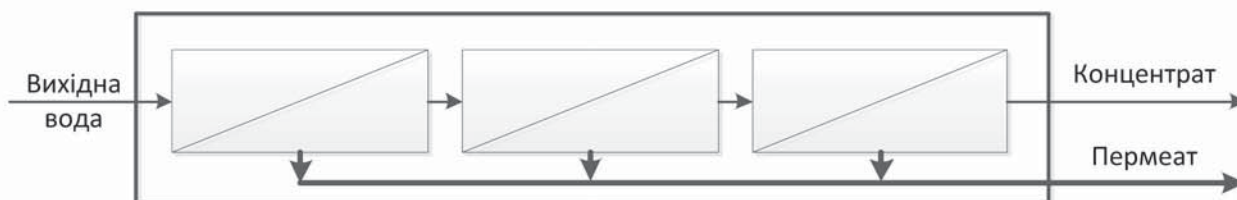


Рис. 3. З'єднання мембранних елементів у мембранотримачі.

Залежно від фізико-хімічних властивостей мембрани, що використовується у певному типі мембранних елементів, останні будуть характеризуватися певним набором технологічних параметрів:

- вихід за пермеатом – співвідношення між витратами пермеату та вихідної води (Q_P/Q_F);
- перепад тиску – співвідношення між тисками концентрату та вихідної води (P_C/P_F);
- солевилучення – кількісна характеристика здатності мембрани вилучати певний компонент з води, що піддається мембранному розділенню, або знижувати її загальний солевміст ($1 - C_P/C_F$).

Мембранні елементи можна класифікувати залежно від загального солевмісту води, для знесолення якої вони призначені, що за змістом еквівалентно порівнянню їх за щільністю мембран, які застосовуються у тому чи іншому типі елементів. У даній роботі розглядаються мембранні елементи Filmtec виробництва компанії Dow Chemical, що вважаються одними з найбільш надійних та економічних з усіх комерційно доступних мембранних елементів. Класифікацію мембранних елементів Filmtec наведено на рисунку 4.

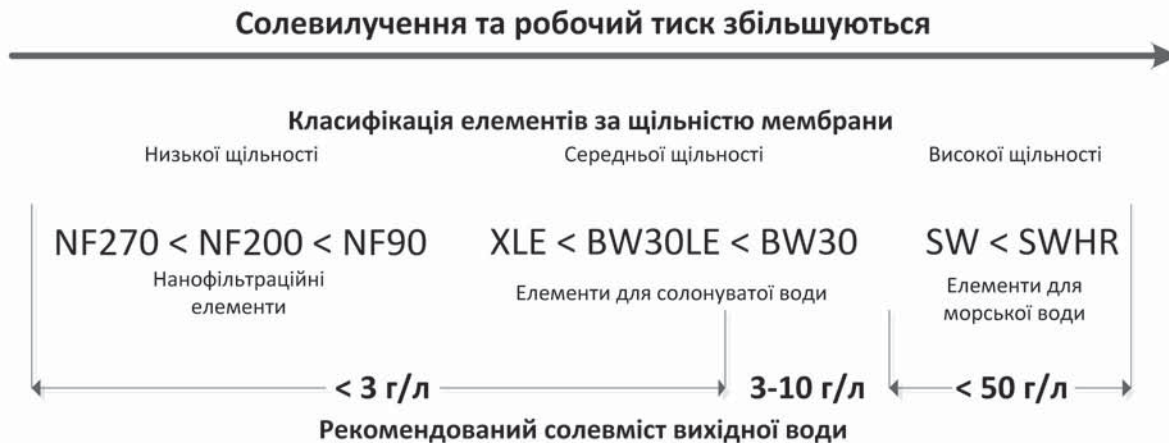


Рис. 4. Класифікація мембранних елементів Filmtec.

На даний час проектування систем мембранної демінералізації морської води здійснюється ґрунтуючись на двох підходах.

Перший підхід передбачає компонування багатостадійної схеми із застосуванням на першій стадії мембранних елементів високої щільності (SW, SWHR) та елементів середньої щільності (XLE, BW30LE, BW30) на другій стадії (рис. 5). Таким чином, на першій стадії, що функціонує за високих тисків, проходить зниження загального солевмісту морської води на 80-90%. Після чого на другій стадії проходить процес демінералізації солонуватої води за середнього або низького тиску.

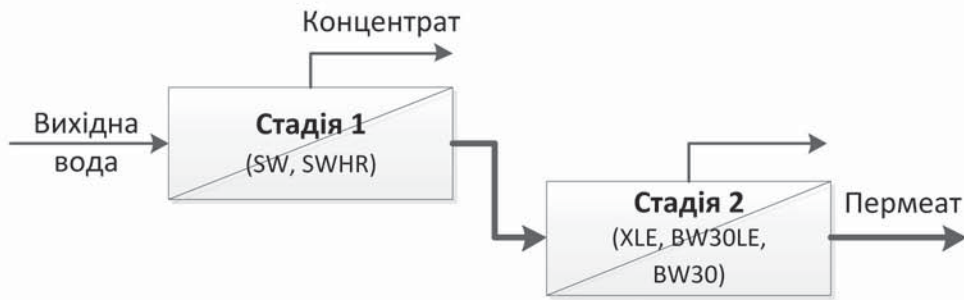


Рис. 5. Компонування багатостадійної схеми демінералізації морської води із застосуванням елементів високої щільності послідовно за пермеатом.

Перша стадія технологічної схеми, що наведена на рисунку 5, зазвичай працює при виході за пермеатом 35-45%. На другій стадії за рахунок низького солемісту живлячої води можливе досягнення більших значень виходу за пермеатом – до 90%. Оскільки концентрат другої стадії у більшості випадків характеризується солемістом, нижчим за солеміст вихідної води системи, його частина або весь концентрат може бути спрямований у рецикл. Таким чином, сумарний вихід за пермеатом для всієї системи у більшості схем досягає значень 40-45%.

Другий підхід передбачає компонування багатостадійної схеми з комплексною першою стадією. У даному випадку перша стадія містить дві підстадії, сполучені послідовно за концентратом. Обидві підстадії містять елементи високої щільності. Пермеат першої підстадії спрямовується до каналу знесоленої воли, а пермеат другої підстадії, для якого характерний більш високий солеміст, поступає на другу стадію системи. На другій стадії системи, як правило, застосовуються елементи середньої щільності.

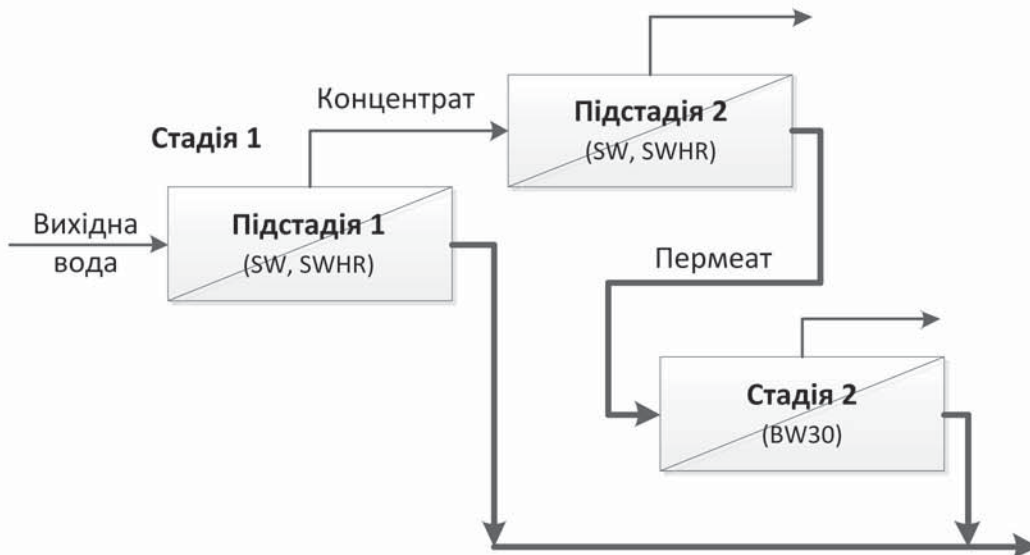


Рис. 6. Компонування багатостадійної схеми демінералізації морської води із застосуванням елементів високої щільності з комплексною першою стадією.

Схема, що представлена на рисунку 6, характеризується низьким енергоспоживанням, у порівнянні зі схемою, представленою на рисунку 5. Це пов'язано з тим, що лише частину, а не весь пермеат, необхідно перекачувати на другу стадію. Однак при цьому суттєво знижується ефективність розділення на другій підстадії першої стадії.

Як показали дослідження [4], позитивний економічний ефект може бути досягнутий за рахунок застосування двостадійної схеми (рис. 7) з використанням мембранних елементів

лише низької і середньої щільності, причому, на відміну від традиційного підходу, елементи з мембраною меншої щільності застосовуються на першій стадії. Таким чином, діапазон елементів, що можуть застосовуватися для опріснення морської води, суттєво розширюється за рахунок елементів з мембранами низької щільності, а можливість вилучення стадії високого тиску дозволяє суттєво знизити енерговитрати.

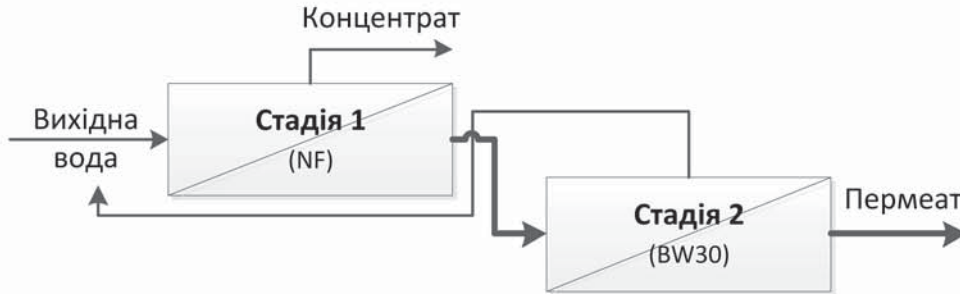


Рис. 7. Компонування багатостадійної схеми демінералізації морської води із застосуванням елементів низької і середньої щільності.

З урахуванням вищевикладених принципів, актуальною є задача оптимального проектування двостадійної системи мембранної демінералізації морської води, що зводиться до розробки схеми компонування мембранотримачів, що містять розраховану кількість мембранних елементів з визначеного діапазону типів, та забезпечує задану продуктивність по пермеату з мінімальними енергетичними та капітальними витратами та максимальними якістю та виходом за пермеатом.

Математична модель системи

Основою математичної моделі двостадійної системи мембранної демінералізації морської води є модель елементарної одиниці системи – мембранного елемента. В якості математичної моделі останнього було використано двопараметричну модель процесу розділення Кімури-Соуріраджана, вдосконалену і доповнену фірмою DOW Chemical для рулонних мембранних елементів [5, 6]:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \frac{C_c}{C_f} &= \frac{1 - Y(1 - R)}{1 - Y} \\
 C_{fc} &= \frac{1 + \frac{C_c}{C_f}}{2} \\
 Q_p &= Q_f \cdot Y \\
 C_p &= \frac{C_{fc} \cdot B \cdot pf \cdot S_e \cdot \rho}{Q_p} \\
 \pi_f &= 1.12 \cdot (t + 273) \cdot \sum m_i \\
 \bar{\pi} &= \pi_f \cdot \frac{C_c}{C_f} \cdot pf \\
 A &= A_{ref} (\Delta\pi) \cdot FF \cdot TCF \\
 \Delta P_{fc} &= \lambda \left(\frac{Q_f + Q_c}{2 \cdot \rho} \right)^\alpha \\
 P_{eff} &= \frac{Q_p \cdot \rho}{A \cdot S_e \cdot FF}
 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

де C_f, C_p, C_c, C_{fc} – концентрації розчинених речовин у вхідній воді, пермеаті, концентраті та у приповерхневому шарі мембрани, відповідно, $мг/дм^3$; Q_f, Q_p, Q_c – витрати вхідної води, пермеату та концентрату, відповідно, $м^3/год$; S_e – ефективна площа поверхні мембрани, $м^2$; A – проникність розчинника через мембрану, $кг/м^2 \cdot с \cdot Па$; $A_{ref}(\Delta\pi)$ – розрахована проникність для чистої води при $T = 298 K$, $кг/м^2 \cdot с \cdot Па$; B – проникність розчинених речовин через мембрану, $кг/м^2 \cdot с$; TCF – температурний поправочний коефіцієнт (дорівнює 1 при $T = 25^\circ C$); FF – коефіцієнт забруднення мембрани; π – осмотичний тиск, $Па$; pf – коефіцієнт концентраційної поляризації; m_i – мольна концентрація i -го іона, $моль/г$; Y – показник конверсії води; R – показник солевилучення мембрани; ΔP – трансмембранний тиск, $Па$; P_{eff} – ефективний тиск $Па$; α та λ – коефіцієнти, запропоновані в [5].

Система рівнянь (1) дозволяє розрахувати концентрації пермеату та концентрату на виході із мембранного елемента, об'ємну витрату пермеату, осмотичний тиск вхідного потоку і потоку концентрату, а також перепад тиску на елементі та величину ефективного тиску, необхідну для проведення процесу розділення із заданими характеристиками елемента та вхідного потоку. Характеристики мембранного елемента, що необхідні для розрахунку:

- ефективна площа поверхні мембрани (паспортна характеристика), S_e ;
- проникність мембрани для чистої води, $A_{ref}(\Delta\pi)$;
- проникність розчинених речовин через мембрану, B .

Два останні параметри були розраховані на основі експериментальних даних (таблиця 1) за методикою, запропонованою в [6], для кожного виду мембран, що були використані.

Модель стадії розділення сформульовано за наступних припущень:

1. В кожному мембранотримачі елементи з'єднуються послідовно по концентрату;
2. Мембранотримачі у стадії з'єднуються паралельно;
3. Всі мембранотримачі однієї стадії містять елементи одного типу в однаковій кількості (не більше 8).

Таблиця 1. Розраховані показники проникності для різних типів мембран *Filmtec*

Тип елемента	Проникність розчинника через мембрану (A), $\frac{кг}{м^2 \cdot с \cdot Па}$	Проникність розчинених речовин через мембрану (B), $\frac{кг}{м^2 \cdot с}$
Зворотньоосмотичний елемент наднизького тиску XLE-2540	$3,1 \cdot 10^{-8}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$
Нанофільтраційний елемент NF270-2540	$5,45 \cdot 10^{-8}$	$2,62 \cdot 10^{-3}$
Високопродуктивний елемент для знесолення солонуватої води BW30LE-440	$2,27 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$

Витрата пермеату на виході з мембранотримача, що містить n_e мембранних елементів, є сумою витрат пермеату на виході всіх елементів. Таким чином, вихід за пермеатом для модуля може бути розрахований:

$$\bar{r} = r_1 + \sum_{k=2}^{n_e} \left[r_k \cdot \prod_{l=1}^{k-1} (1 - r_l) \right] \quad (2)$$

де r_k – показник конверсії k -го мембранного елемента, $k = 1, \dots, n_e$.

Мембранотримач розраховується як n_e послідовно сполучених елементів, де кожен елемент в свою чергу розраховується з використанням отриманої системи (1). Це приводить до системи рівнянь із $6 \cdot n_e$ ступенями вільності. З урахуванням припущення, що мембранотримач включає лише мембрани одного типу та що всі вони мають однаковий коефіцієнт забруднення, можна зменшити кількість ступенів вільності на $3 \cdot n_e - 3$.

Для k -го мембранного елементу питома витрата пермеату J_w^k , $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$, концентрація розчинених речовин у вхідному розчині C_f^k , мг/дм^3 та тиск P_f^k , Па, відповідно, визначаються наступними залежностями:

$$J_w^k = \frac{J_w^{k-1} \cdot (1 - r_{k-1})}{r_{k-1}} \quad (3)$$

$$C_f^k = C_c^{k-1} \quad (4)$$

$$P_f^k = P_c^{k-1} \quad (5)$$

де $k = 2, \dots, n_e$.

Рівняння (2 – 5) описують зв'язок елементів в мембранотримачі та стадії, що складають загальну структуру всієї системи. Використання рівнянь зв'язку (2 – 5) дозволяє розширити модель (1) і, використовувати її для моделювання сполучень мембранних елементів у мембранотримачі та стадії з урахуванням зроблених припущень.

Задача структурної оптимізації

У загальному вигляді, задачу оптимізації стосовно системи мембранного розділення можна сформулювати наступним чином: для заданих характеристик вхідного потоку та характеристик мембранних елементів, що використовуються на кожній стадії процесу демінералізації води необхідно знайти таку структуру системи, а саме кількість мембранних елементів, мембранотримачів та підстадій, і їх взаємне розміщення, щоб характеристики кінцевого потоку пермеату відповідали висунутим вимогам, а застосування отриманої структури на практиці дозволило скоротити витрати виробництва до мінімуму.

Цільова функція може бути визначена як сума капітальних та поточних (експлуатаційних) витрат, при чому капітальні витрати визначаються вартістю та кількістю мембранних елементів в системі, а поточні витрати визначаються витратами на утримання мембран та витратами на електроенергію. Отже, постановка задачі оптимізації має вигляд:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N (n_i(Q_f) \cdot m_s \cdot c_{\text{ае}} + E_i(Q_f) \cdot c_e + n_i(Q_f) \cdot m_i \cdot S_e \cdot c_{\text{іа}}) \quad (6)$$

При обмеженнях:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \leq m_i \leq 8 \\ \frac{C_{f_c} \cdot B \cdot p_f \cdot S_e \cdot \rho}{Q} \leq C_{p\text{max}} \\ Q_p \cdot \frac{Y_i(m_i)}{100\%} = Q \\ i = 1, \dots, N \end{array} \right. \quad (7)$$

де n_i – кількість паралельно з'єднаних мембранотримачів у стадії; c_{el} – приведена вартість мембранного елемента, $\$/\text{рік}$; c_e – вартість електроенергії, $\$/\text{кВт}$; c_{oe} – вартість обслуговування мембран, $\$/\text{м}^2$; Y_i – показник конверсії для i -ої підстадії, %; $E_i(Q_f)$ – кількість електроенергії, що витрачається на одиницю об'єму кінцевого продукту, $\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$; S_e – ефективна площа мембранного елемента, м^2 ; B – проникність солей через мембрану, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; ρ – густина розчинника, $\text{кг}/\text{м}^3$.

З постановки задачі видно, що цільова функція є нелінійною, параметри оптимізації можуть приймати дискретні значення (кількість елементів – цілочислові параметри) та неперервні (витрата вхідного потоку та відсоток концентрату, що надходить на рецикл –

раціональні параметри), що дозволяє класифікувати поставлену задачу як задачу частково-цілочислового нелінійного математичного програмування (MINLP).

Метод оптимізації

В якості методу розв'язку задачі оптимізації було використано модифікацію генетичного алгоритму, яка передбачає поєднання переваг стохастичних методів глобального пошуку та швидкості локального пошуку градієнтних методів.

Генетичні алгоритми є одним із найбільш відомих відгалужень методів еволюційного розрахунку. В багатьох випадках генетичні алгоритми досягають збіжності швидше, ніж інші методи розв'язання задач MINLP. Вони довели свою ефективність при розв'язанні задач досить різних за характером та за об'єктами. Це пояснюється тим, що дані методи практично не залежить від форми та типу розв'язуваної задачі. Їх використання дозволяє розглядати сам процес як «чорний ящик», що суттєво спрощує роботу з ними при зміні розмірності та типу задачі, дає свободу у представленні математичної моделі.

Генетичні алгоритми відрізняються від інших чисельних методів оптимізації тим, що вони запозичили із біології:

- понятійний апарат;
- ідею колективного пошуку екстремуму за допомогою популяції особин;
- способи подання генетичної інформації;
- способи передачі генетичної інформації в ряду поколінь (генетичні оператори);
- ідею про переважне розмноження найбільш пристосованих особин (мова йде не про те, чи дасть дана особина нащадків, а про те, скільки буде в неї нащадків).

Загальний порядок роботи генетичного алгоритму такий (рис. 8):

1. На першому етапі випадковим шляхом генерується вихідна популяція бінарних хромосом. Декодується значення змінних із двійкового до дійсного виду.
2. За допомогою математичної моделі визначається індекс пристосованості кожного рішення і залежно від його величини впорядковується популяція. Обчислюється середня по популяції пристосованість. Опіраючись на неї, призначається імовірність, з якою кожна особина, що володіє пристосованістю вище за середній рівень, може стати батьком. При цьому для кожного батька є дві можливості – або просто бути скопійованим у наступне покоління, або піддатися впливу генетичних операторів у процесі генерування хромосоми нащадка.

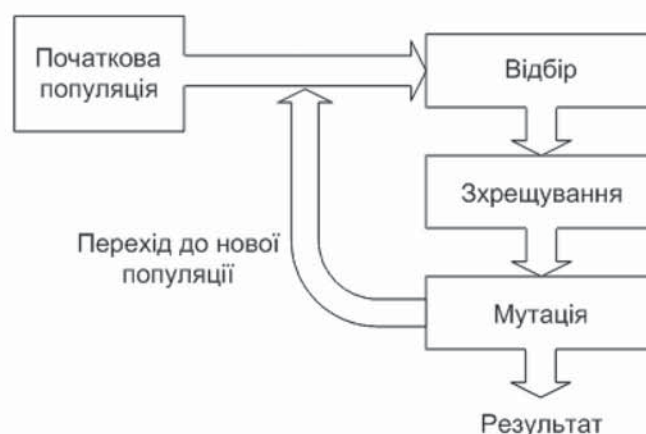


Рис. 8. Алгоритм роботи класичного генетичного алгоритму.

3. Далі оцінюється пристосованість нащадка, і, діючи аналогічним чином, поступово заповнюється популяція наступного покоління. Через M кроків нове покоління виявляється сформованим. Оскільки воно отримано від кращих батьків, то його пристосованість повинна бути також високою. Не викликає сумнівів, що, блокуючи

слабко пристосованим особинам можливість стати батьком і дати потомство, збільшується або, принаймні, не зменшується середня по популяції пристосованість.

4. Робота алгоритму припиняється при досягненні популяцією стану адаптації, що ідентифікується по стягуванню ядра популяції спочатку в щільне нагромадження, а потім – у точку. Схрещування, як механізм мінливості, губить у таких умовах свою силу – при схрещуванні ідентичних батьків нащадок нічим не буде відрізнятися від жодного з них. Мутація та інверсія будуть як і раніше модифікувати потомство, тестуючи всі нові і нові крапки пошукового простору, але безуспішно – краще знайденого рішення немає, і нащадки не зможуть навіть втиснутися у вироджене ядро.

Параметри настроювання генетичного алгоритму було використано такі:

- розмір популяції – 100 особин;
- максимальна кількість поколінь – 300;
- максимальна кількість поколінь із сталим набором популяції – 50;
- мінімальний приріст цільової функції – 10^{-6} .

На жаль, майже ніколи (за винятком аналітично сконструйованих тестових задач) не можливо із упевненістю стверджувати, що знайдене рішення являє собою глобальний екстремум. Фенотипне та генотипне виродження популяції є необхідною, але не достатньою ознакою успішності пошуку. Воно тільки свідчить, що якийсь екстремум знайдено, але нічого не говорить про те, який його характер. Проте, не залишається нічого іншого, як задовольнитися досягнутим результатом. У протилежному випадку краще повторно запустити задачу в очікуванні на більш сприятливий розвиток подій, ніж очікувати правильності результату від виснаженої популяції. Еволюція неповторна і при новому сполученні випадкових факторів рішення може виявитися більш привабливим. Тому для впевненості у правильності розв'язання задачі алгоритм необхідно запускати декілька разів, що дозволяє відкинути випадкове потрапляння у локальний оптимум.

Модифікований алгоритм, застосований в даній роботі, передбачає уточнення оптимуму, знайденого за допомогою генетичного алгоритму, методом градієнтного пошуку. Запропонований алгоритм оптимізації на базі моделі двохстадійної мембранної системи демінералізації води було реалізовано у вигляді програмного продукту в середовищі MATLAB, який дозволяє виконувати розрахунки оптимальної системи демінералізації води.

Оптимізація двохстадійної системи

Було виконано оптимізацію двохстадійної системи демінералізації морської води із загальним солемістом 15, 25 та 36 г/дм³ продуктивністю 200 м³/год. Розглянуто варіанти системи (табл. 2), які включають три типи мембранних елементів. Деякі результати оптимізації наведені в таблицях 3 – 5.

Таблиця 2. Мембранні елементи *Filmtec*, застосовані у двохстадійній системі демінералізації морської води

Стадія	Варіант А	Варіант Б	Варіант В
1	BW30LE	NF270	NF270
2	XLE	XLE	BW30LE

Для води з солемістом 15 г/дм³ (табл. 3) найбільш економічною є схема (рис. 9), де на першій стадії використовуються мембранні елементи типу NF270, а на другій мембранні елементи XLE. Але система, наведена на рисунку 10, що побудована з мембран тих же типів дає на виході воду майже вдвічі меншого солемісту при збільшенні вартості на 45%. Система, в якій на 1-й стадії використовується мембрани типу BW30LE (варіант А), дозволяє отримувати воду з суттєво нижчим солемістом ($C_p = 0,008$ г/дм³), але витрати при цьому зростають у 12,5 разів. Схема, побудована по варіанту В (рис. 11), теж дає на виході воду з солемістом в 5 разів нижче ($C_p = 0,0177$ г/дм³), але собівартість при цьому в 4,2 рази більше, ніж для схеми на рисунку 9.

Таблиця 3. Результати оптимізації системи демінералізації морської води із солевмістом 15 г/дм³ продуктивністю 200 м³/год

Варіант системи	Стадія 1					Стадія 2				
	Витрата вхідної води, Q_f , м ³ /год	Витрата концентрату, Q_c , м ³ /год	ЗСВ концентрату, C_c , г/дм ³	Витрата пермеату, Q_p , м ³ /год	ЗСВ пермеату, C_p , г/дм ³	Витрата концентрату, Q_c , м ³ /год	ЗСВ пермеату, C_p , мг/дм ³	ЗСВ концентрату, C_c , г/дм ³	Вихід за пермеатом, %	Приведені витрати, \$/м ³
А	580,3	217,8	39,40	362,5	0,34	162,5	8,05	0,76	34,47	\$ 0,268
Б	1094,6	545,2	23,96	549,4	6,11	349,4	88,67	9,55	18,27	\$ 0,021
Б	1640,2	1186,0	19,67	454,2	2,82	254,2	48,29	4,99	12,19	\$ 0,031
В	1019,4	648,3	20,95	371,1	4,61	151,4	93,10	11,17	21,55	\$ 0,043
В	5137,4	4528,9	16,83	608,5	1,40	340,6	17,66	2,49	5,22	\$ 0,091

Для води солевмістом 25 г/дм³ (табл. 4), як і в попередньому випадку, найбільш дешеву воду дає схема, побудована по варіанту Б, наведена на рисунку 12. Але схема, побудована по варіанту В, дає воду вдвічі меншого солевмісту ($C_p = 0,0177$ г/дм³) при збільшенні вартості на 24%.

На відміну від двох попередніх варіантів, для води з солевмістом 36 г/дм³ (табл. 5) найбільш економічною є схема (рис. 13), де на першій стадії використовується мембранні елементи NF270, а на другій – елементи BW30LE (варіант В). У порівнянні з цією схемою, інша схема (рис. 14), побудована по тому ж варіанту дає воду в 17,4 рази меншого солевмісту при збільшенні вартості на 74%.

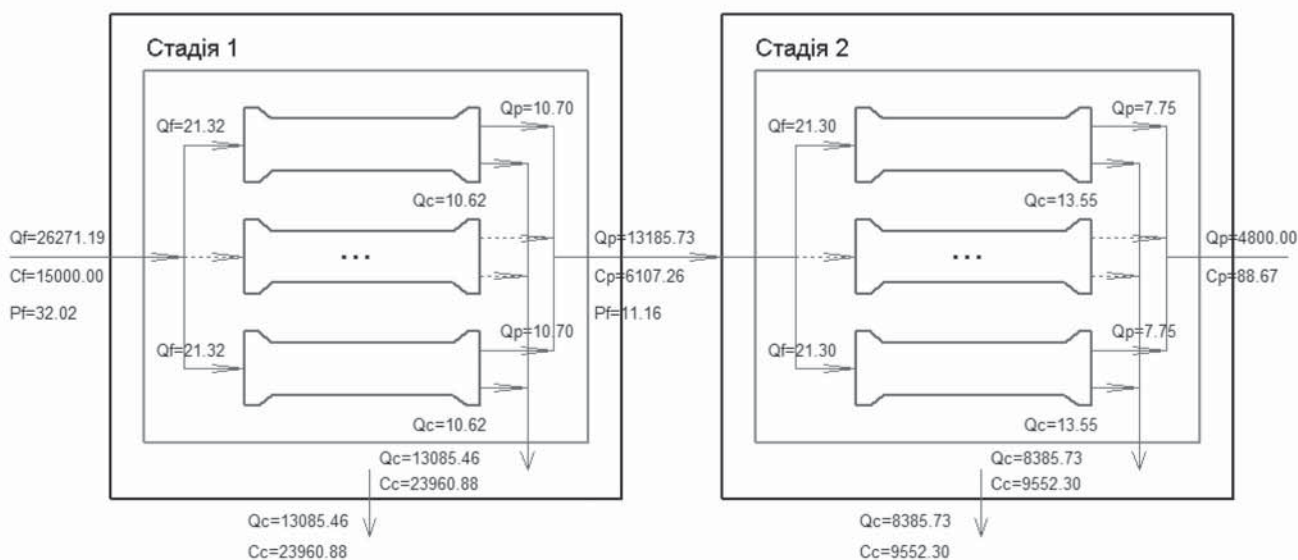


Рис. 9. Оптимальна структура двохстадійної системи продуктивністю 200 м³/год при концентраціях вхідного потоку 15 г/дм³ та пермеату 0,0887 г/дм³.*

* На цьому та наступних рисунках значення витрат надані в м³/добу, а значення концентрацій – в мг/дм³.

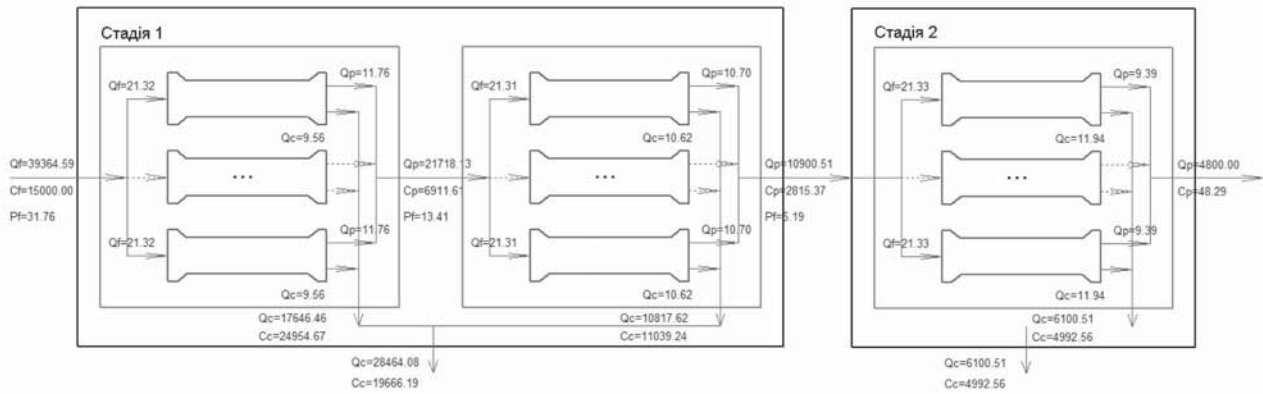


Рис. 10. Оптимальна структура двохстадійної системи продуктивністю 200 м³/год при концентраціях вхідного потоку 15 г/дм³ та пермеату 0,0483 г/дм³.

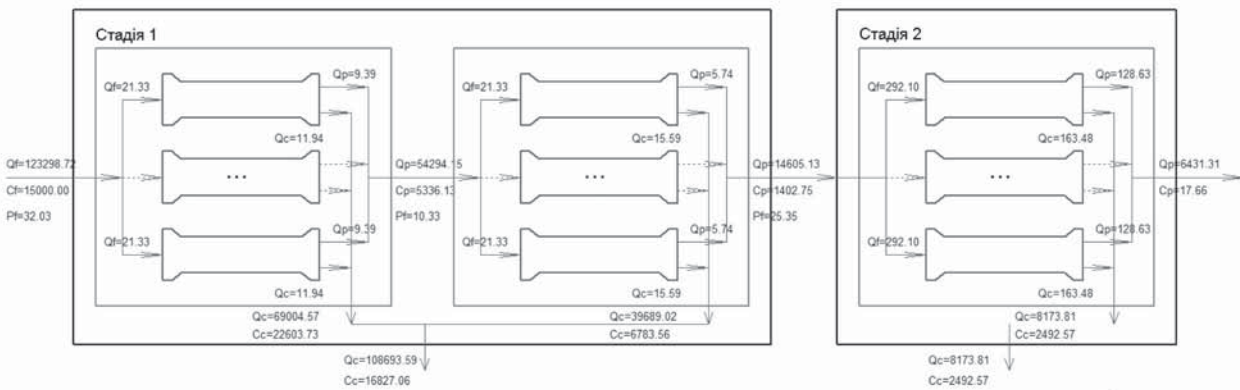


Рис. 11. Оптимальна структура двохстадійної системи продуктивністю 200 м³/год при концентраціях вхідного потоку 15 г/дм³ та пермеату 0,0177 г/дм³.

Таблиця 4. Результати оптимізації системи демінералізації морської води із солемістом 25 г/дм³ продуктивністю 200 м³/год

Варіант системи	Стадія 1					Стадія 2				
	Витрата вхідної води, Q_f , м ³ /год	Витрата концентрату, Q_c , м ³ /год	ЗСВ концентрату, C_c , г/дм ³	Витрата пермеату, Q_p , м ³ /год	ЗСВ пермеату, C_p , г/дм ³	Витрата концентрату, Q_c , м ³ /год	ЗСВ пермеату, C_p , мг/дм ³	ЗСВ концентрату, C_c , г/дм ³	Вихід за пермеатом, %	Приведені витрати, \$/м ³
A	513,3	192,7	65,65	320,7	0,58	120,4	17,96	1,51	39,02	\$ 0,548
Б	2042,4	1298,9	34,91	743,5	7,69	543,5	93,45	10,48	9,79	\$ 0,092
Б	3712,9	3211,6	28,48	501,3	2,68	6733,2	45,89	4,74	5,95	\$ 0,131
В	2685,0	2322,4	28,48	362,5	2,68	162,5	46,34	5,91	7,45	\$ 0,114

Таблиця 5. Результати оптимізації системи демінералізації морської води із солемістом 36 г/дм³ продуктивністю 200 м³/год

Варіант системи	Стадія 1					Стадія 2				
	Витрата вхідної води, Q_f , м ³ /год	Витрата концентрату, Q_c , м ³ /год	ЗСВ концентрату, C_c , г/дм ³	Витрата пермеату, Q_p , м ³ /год	ЗСВ пермеату, C_p , г/дм ³	Витрата концентрату, Q_c , м ³ /год	ЗСВ пермеату, C_p , мг/дм ³	ЗСВ концентрату, C_c , г/дм ³	Вихід за пермеатом, %	Приведені витрати, \$/м ³
A	540,7	202,9	94,54	337,8	0,83	137,8	22,47	2,00	36,99	\$ 1,082
Б	3449,8	74687	39,59	337,8	2,91	137,8	78,83	7,02	5,8	\$ 0,255
Б	5043,6	4549,7	39,59	493,9	2,91	276,4	49,95	5,16	4,31	\$ 0,342
B	2751,1	2379,7	41,02	371,4	3,85	139,4	89,02	10,12	8,43	\$ 0,160
B	3364,0	2909,8	41,02	454,2	3,85	254,2	49,37	6,84	5,95	\$ 0,236
B	1908,3	1395,0	45,77	513,3	9,46	313,0	5,11	15,51	10,5	\$ 0,278

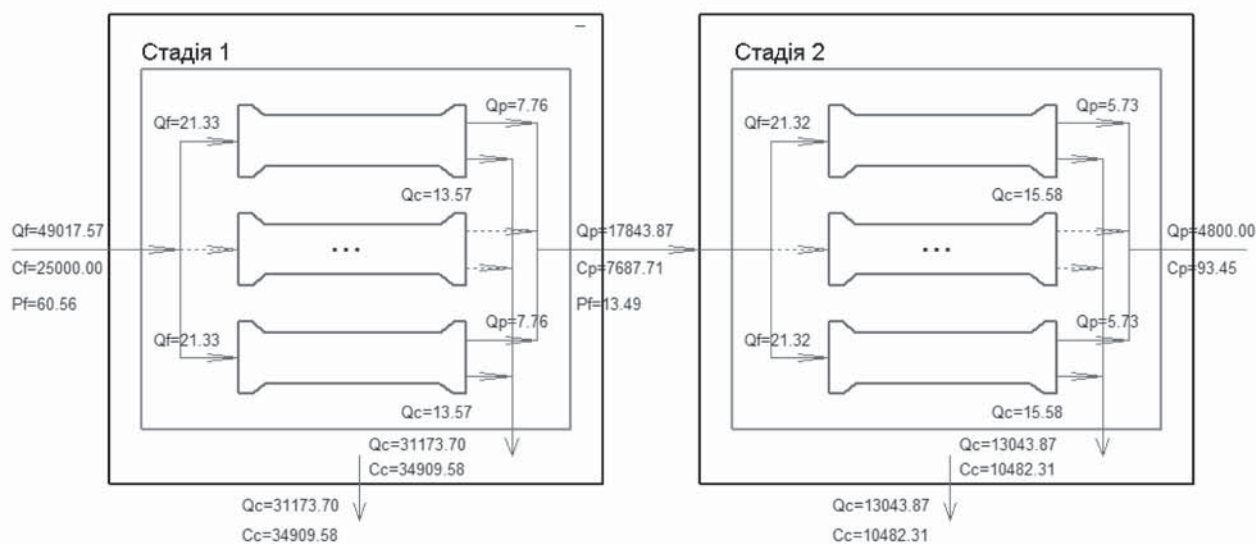


Рис. 12. Оптимальна структура двохстадійної системи продуктивністю 200 м³/год при концентраціях вхідного потоку 25 г/дм³ та пермеату 0,0934 г/дм³.

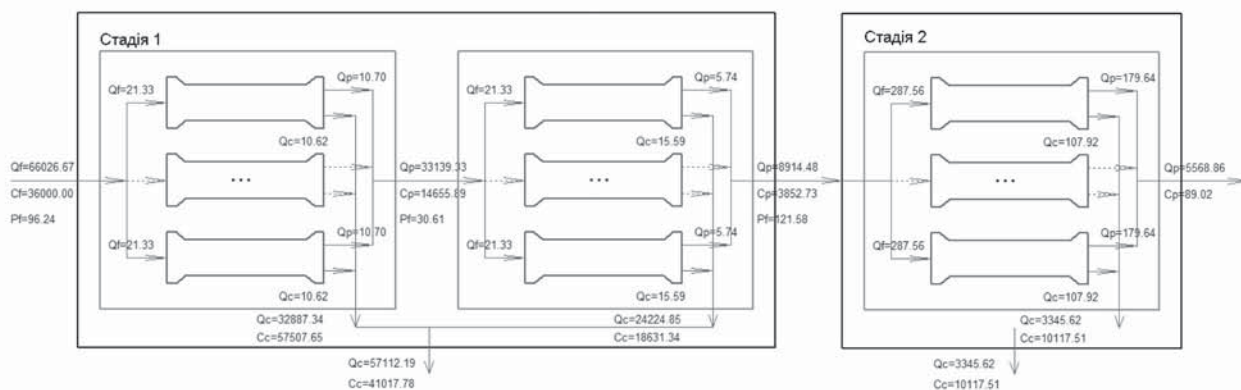


Рис. 13. Оптимальна структура двохстадійної системи продуктивністю 200 м³/год при концентраціях вхідного потоку 36 г/дм³ та пермеату 0,089 г/дм³.

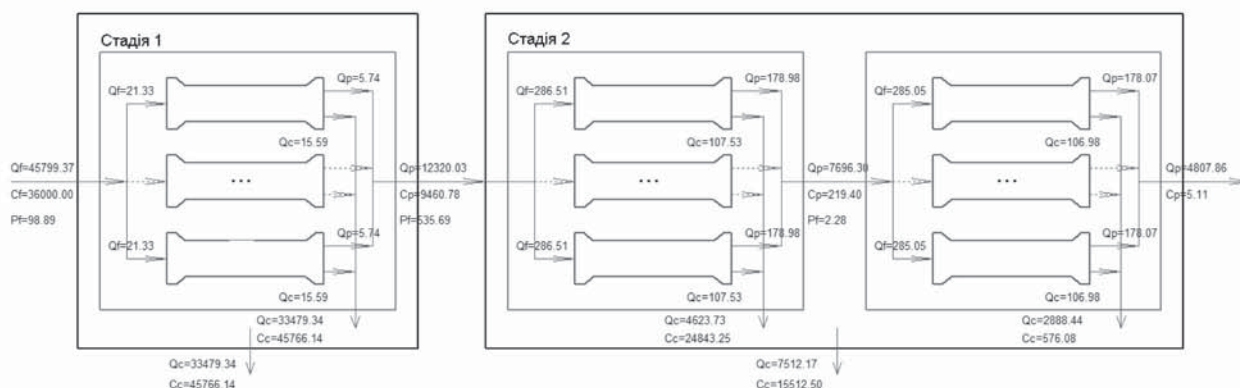


Рис. 14. Оптимальна структура двохстадійної системи продуктивністю $200 \text{ м}^3/\text{год}$ при концентраціях вхідного потоку $36 \text{ г}/\text{дм}^3$ та пермеату $0,0051 \text{ г}/\text{дм}^3$.

Таким чином, для кожного значення солемісту вихідної води може бути знайдена оптимальна конфігурація схеми:

- для $15 \text{ г}/\text{дм}^3$ та $25 \text{ г}/\text{дм}^3$ – двохстадійна схема із застосуванням елементів NF270 та XLE відповідно;
- для $36 \text{ г}/\text{дм}^3$ – двохстадійна схема із застосуванням елементів NF270 та BW30LE.

Одержані результати демонструють доцільність застосування нанофільтраційних мембранних елементів з метою часткового знесоленні води на першій стадії для води будь-якого солемісту. В той же час, для досягнення високої якості кінцевого пермеату на другій стадії необхідне застосування елементів більш високої щільності. Запропонований підхід може розглядатися як альтернатива традиційним технологіям, що застосовують мембранні елементи високої щільності і, відповідно, потребують більш високого тиску та енерговитрат.

Висновки

В роботі розглянуто питання моделювання та оптимізації двохстадійної системи мембранної демінералізації морської води. Для структурної оптимізації системи запропоновано модифікацію генетичного алгоритму, який передбачає уточнення оптимуму методом градієнтного пошуку. Розраховано оптимальні двохстадійні схеми демінералізації морської води із різним загальним солемістом (15 , 25 та $36 \text{ г}/\text{дм}^3$) на базі трьох типів мембранних елементів *Filmtec*.

Аналіз отриманих результатів оптимізації дозволив виявити економічну доцільність застосування двохстадійної архітектури процесу розділення. Показано, що у більшості випадків найбільш дешевими є схеми, де на 1-й стадії використовуються мембрани типу NF270, а на 2-й – типу XLE. В той же час, схеми побудовані на мембранах типів NF270 та BW30LE (відповідно, на 1-й та 2-й стадіях), дозволяють отримати на виході воду нижчого солемісту (з концентраціями $0,005$ – $0,045 \text{ г}/\text{дм}^3$) при збільшенні собівартості на 24 – 74% .

У подальшому планується за рахунок створення бази властивостей більшої кількості мембранних елементів та вдосконалення системи обмежень у постановці задачі оптимізації розробити алгоритм, який дозволить розраховувати оптимальну структуру системи з автоматичним вибором найбільш прийнятних типів мембранних елементів.

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУСТАДИЙНОЙ МЕМБРАННОЙ СИСТЕМЫ ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ

С. С. Шоботов, А. А. Квитка, З. В. Малецкий

Национальный технический университет Украины “КПИ”, г. Киев

e-mail: mail@zahar.info

В статье рассматриваются вопросы оптимизации промышленных систем деминерализации морской воды с применением мембранных технологий. С использованием существующей математической модели мембранного разделения и современных методов оптимизации, выполнен поиск оптимальной структуры и рабочих параметров двухстадийной системы при разных условиях функционирования. Анализ полученных результатов оптимизации позволил выявить экономическую целесообразность применения двухстадийной архитектуры процесса мембранной деминерализации морской воды разного соледержания.

Ключевые слова: мембранные технологии, структурная оптимизация, приведенные затраты, моделирование мембранных процессов.

OPTIMIZATION OF THE DOUBLE-STAGED SEAWATER MEMBRANE DESALINATION SYSTEM STRUCTURE

S. Shobotov, O. Kvitka, Z. Maletskyi

National technical university of Ukraine "KPI", Kiev

e-mail: mail@zahar.info

Optimization of industrial membrane seawater demineralization process is discussed in the paper. Applying mathematical model of membrane separation and modern optimization methods optimal structure and working parameters of the double-staged membrane system have been found. Analysis of the optimization results allowed revealing economical appropriateness of the double-stage architecture application for membrane demineralization of seawater with different total dissolved solids level.

Keywords: membrane technologies, structure optimization, related costs, modeling membrane processes.

Список літератури:

1. Service R. F. Desalination freshens up / R. F. Service // Science. – 2006. – Vol. 313. – P. 1088 – 1090.
2. Gleick P. H. Water Resources in Encyclopedia of Climate and Weater. Vol. 2, University Press, New York, 1996, p. 817-823.
3. Lauren F. Greenlee et al. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges / F. Lauren // Water Research. – 2009. – Vol. 43. – P. 2317 – 2348.
4. Фендри Ф., Митченко Т. Е., Малецький З. В. Снижение энергоемкости мембранных технологий деминерализации морской воды / тези доповідей Міжнар. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми нано-, енерго- та ресурсозберігаючих і екологічно орієнтованих технологій» (27-28 травня 2010 р.). – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – С. 232 – 234.
5. FILMTEC Reverse osmosis membranes // Technical Manual / Dow Liquid Separations. – USA, 2004. – 179 с. – С. 91-95.
6. Шоботов С. С. Математическое моделирование процесса обратно-осмотической деминерализации воды. / С. С. Шоботов, А. А. Квитка, Фредж Фендри // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – К., 2010 – 2/10 (44). – С. 55–58.