

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЗВОРотноОСМОТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ДЛЯ ПОТРЕБ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Квітка О.О., Шахновський А.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ
kxtp@kpi.ua

Робота присвячена розробленню методології структурної оптимізації схем водопідготовки та її застосуванню для розрахунку установок зворотноосмотичної демінералізації води на теплоелектростанціях і теплоелектроцентралях. Запропоновано математичну модель схеми водопідготовки та сформульовано завдання оптимізації на основі цієї моделі. Як числовий метод для розв'язання завдання оптимізації обрано генетичні алгоритми. *Ключові слова:* тепла електростанція, демінералізація води, зворотний осмос, структурна оптимізація, математична модель, генетичні алгоритми.

Оптимальное проектирование обратноосмотической установки очистки воды для нужд теплоэнергетики. Квитка А.А., Шахновский А.М. Работа посвящена разработке методологии структурной оптимизации схем водоподготовки и ее применению для расчета установки обратноосмотической деминерализации воды на теплоэлектростанциях и теплоэлектрцентралях. Предложена математическая модель схемы водоподготовки и сформулирована задача оптимизации на основе этой модели. В качестве численного метода для решения задачи оптимизации выбраны генетические алгоритмы. *Ключевые слова:* тепловая электростанция, деминерализация воды, обратный осмос, структурная оптимизация, математическая модель, генетические алгоритмы.

Optimal design of the reverse osmosis water desalination unit for heat power engineering. Kvitka O., Shakhnovskiy A. The work is devoted to the development of the methodology of structural optimization of water desalination networks and its application for the design of the reverse osmosis desalination unit for thermal power plant. The mathematical model of the water treatment network was proposed and the optimization problem was formulated on the basis of this model. The genetic algorithms as the numerical method for solving the optimization problem were selected. *Key words:* thermal power station, water desalination, reverse osmosis, structural optimization, mathematical model, genetic algorithms.

Одним із найважливіших питань в енергетиці завжди була і є проблема підготовки води належної якості для роботи котлів, парогенераторів, інших технологічних потреб. Поза сумнівом, вода являє собою один з основних ресурсів роботи електростанцій, передусім теплових електростанцій (далі – ТЕС) і теплоелектроцентралей (далі – ТЕЦ). Якість води, яка використовуються в технологічних процесах теплоелектростанцій, має відповідати досить жорстким нормам, оскільки від якості води критично залежить як ефективність роботи електростанції, так і ресурс роботи основного обладнання – котлів і турбін. Зокрема, специфічною особливістю водно-хімічних характеристик пари й води в теплоенергетиці є високі вимоги до солемісту.

Постановка проблеми. В останні десятиріччя в установках кондиціонування природної води для ТЕС широко впроваджуються баромембранні (найчастіше – зворотноосмотичні) системи очищення води. Вказана технологія впроваджується як у разі проектування нових електростанцій, так і в разі реконструкції станцій, що були введені в експлуатацію раніше (найчастіше – у другій половині ХХ сторіччя). Завдяки впровадженню баромембранних процесів суттєво зменшуються експлуатаційні витрати, зменшується собівартість підготованої води. Крім

того, використання таких систем дає змогу впроваджувати сучасні системи автоматизації.

У роботі розглянуто питання комп'ютерного моделювання блоку демінералізації води в цеху хімічного водоочищення ТЕС (ТЕЦ), який працює за принципом зворотного осмосу.

Одностадійна установка зворотного осмосу (рис. 1) складається з кількох секцій, кожна з яких включає m паралельно з'єднаних виробів – так званих мембранотримачів. Мембранотримач є системою з n мембранних елементів ($n \leq 8$), з'єднаних послідовно по концентрату. У разі потреби використовують двостадійну установку (рис. 2), кожна стадія якої побудована за тим самим принципом, але на різних стадіях можуть застосовуватись мембранні елементи різного типу.

Мета моделювання зворотноосмотичної водопідготовчої установки полягає в розрахунку її оптимальної структури, яка забезпечує:

- задану продуктивність за пермеатом;
- мінімальні капітальні витрати;
- мінімальні експлуатаційні витрати (насамперед низьке енергоспоживання).

Математична модель установки зворотного осмосу

Процес розподілу, що відбувається на зворотноосмотичній мембрані (мембранному елементі),

описується двопараметричною дифузійною моделлю Кімури-Соуріраджана [1], яку було вдосконалено й доповнено для ролонних мембранних елементів фірмою DOW Chemical [2, 3]. Модель дає змогу розрахувати для мембранного елемента всі необхідні параметри потоку на виході.

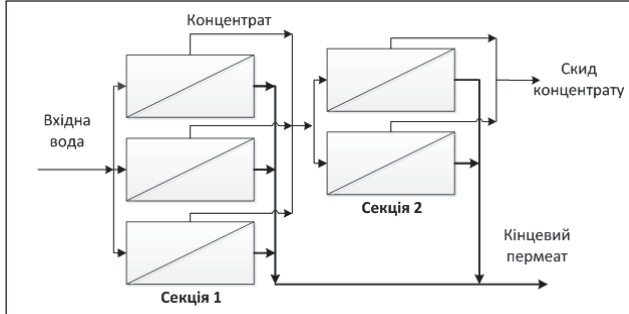


Рис. 1. Структура одностадійної зворотноосмотичної схеми демінералізації води

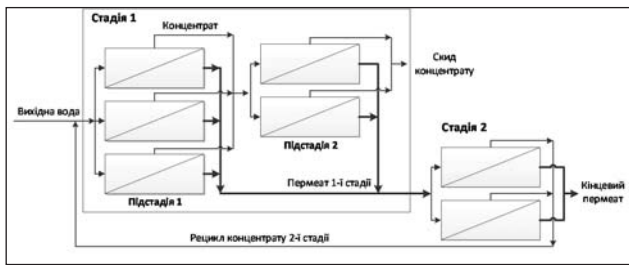


Рис. 2. Структура двостадійної зворотноосмотичної схеми демінералізації води

$$Q_p = F_e \cdot a(\pi_c) \cdot FF \left(\Delta P - \pi_f - \left[\frac{C_{fc}}{C_f} \cdot p_f - (1 - R) \right] \right) \quad (1)$$

$$Q_p = F_e \cdot a(\pi_c) \cdot FF \left(\Delta P - \pi_f - \left[\frac{C_{fc}}{C_f} \cdot p_f - (1 - R) \right] \right) \quad (2)$$

$$\Delta P = P_f - \frac{\Delta P_{fc}}{2} - P_p \quad (3)$$

$$\Delta P_{fc} = 0.04 \cdot \left(\frac{Q_f - Q_c}{2} \right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{C_{fc}}{C_f} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{1 - Y \cdot (1 - R)}{1 - Y} \right) \quad (5)$$

$$p_f = \exp(0.7 \cdot Y) \quad (6)$$

$$\pi_f = 1.12 \cdot (273 + T) \cdot \sum m_i \quad (7)$$

$$\pi_c = \pi_f \cdot \frac{C_{fc}}{C_f} \cdot p_f \quad (8)$$

$$\pi_p = \pi_f \cdot (1 - R) \quad (9)$$

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (10)$$

$$Y = 1 - (1 - Y_i)^N \quad (11)$$

$$C_p = b \cdot C_{fc} \cdot p_f \cdot \frac{N_e \cdot F_e}{Q_p} \quad (12)$$

де Q_p – витрата пермеата на виході з системи, $к\ell/год$; F_e – площа мембранного елемента, $м^2$; $a(\pi)$ – коефіцієнт проникності по воді, $м^3/Па \cdot год$; ΔP – робочий

тиск, $Па$; ΔP_{fc} – перепад тиску, $Па$; C_f – концентрація вхідного потоку, $кг$ солей на $кг$ розчинника; p_f – концентраційна поляризація; π_f – осмотичний тиск, $Па$; π_c – перепад осмотичного тиску з боку концентрату, $Па$; π_p – перепад осмотичного тиску з боку пермеату, $Па$; R – коефіцієнт солезатримки, $\%$; Y – коефіцієнт конверсії води, $\%$; C_p – концентрація вихідного потоку пермеату, $кг$ солей на $кг$ розчинника.

Для мембранотримача, що містить n_e мембранних елементів, вихід пермеату дорівнює:

$$\bar{r} = r_1 + \sum_{k=2}^{n_e} \left[r_k \cdot \prod_{l=1}^{k-1} (1 - r_l) \right] \quad (13)$$

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

Розширена модель системи зворотного осмосу має також рівняння матеріальних балансів:

$$\begin{cases} Q_f = Q_c + Q_{p1} \\ Q_{p1} = Q_{c2} + Q_p \\ Q_f \cdot C_f = Q_c \cdot C_c + Q_{p1} \cdot C_{p1} \\ Q_{p1} \cdot C_{p1} = Q_{c2} \cdot C_{c2} + Q_p \cdot C_p \\ Q_f \cdot C_f + Q_{c2} \cdot C_{c2} = (Q_f + Q_{c2}) \cdot C_{fc2} \\ \frac{Q_{c2}}{Q_{p1}} = \left(\frac{C_{c2}}{C_{p1}} \right)^{-1/R} \\ Q_p = Y \cdot Q_f \end{cases} \quad (14)$$

Така розширена модель може бути використана для моделювання як окремих стадій розподілу, так і будь-яких поєднань стадій різної продуктивності, зокрема і з використанням рециклу потоку концентрату.

Математичне формулювання завдання структурної оптимізації

Наголосимо, що під структурною оптимізацією тут розуміємо покращення параметрів функціонування певної системи шляхом структурного перерозподілу окремих її елементів без унесення змін у вказані елементи. Інакше кажучи, завдання оптимізації системи очищення шляхом заміни обладнання, режимів руху потоків тощо є поза межами цього дослідження.

Метою структурної оптимізації в цьому випадку є розрахунок на базі сформованої математичної моделі такої структури зворотноосмотичної установки, яка забезпечить задану продуктивність за пермеатом і за мінімальних енергетичних і капітальних витрат, а також максимальні якість і вихід за пермеатом. Тобто завданням оптимізації є забезпечення оптимальної вартості пермеату.

У процесі математичного формулювання завдання оптимізації в основу системи обмежень покладено математичну модель процесу зворотноосмотичного очищення води (1)-(14). У ролі цільової функції (Z) виступає сума зведених капітальних і експлуатаційних витрат з урахуванням терміну експлуатації установки. При цьому капітальні витрати визначаються вартістю й кількістю мембранних елементів і мембранотримачів у системі. А експлуатаційні витрати

складаються з витрат на електроенергію й вихідну воду та коштів на утримання мембран. Отже, постановка завдання оптимізації в остаточному вигляді може бути подана так:

$$\min Z(Q_f, n_i) = \frac{\sum_{i=1}^N (0.33 \cdot m_i(Q_f) \cdot n_i \cdot c_{ME} + 0.1 \cdot m_i(Q_f) \cdot c_{MT} + m_i(Q_f) \cdot n_i \cdot c_{OM})}{Q_p \cdot 8400} + \frac{Q_f \cdot c_{BW} + W(n_i) \cdot c_e}{Q_p} \quad (15)$$

при обмеженнях:

$$\begin{aligned} 1 \leq n_i \leq 8; \quad 1 \leq N \leq 6; \\ C_p(Q_f) \leq C_{p\max}; \quad P_f(n_i) \leq P_{f\max}; \\ Q_f \cdot Y_i(n_i)/100\% = Q_p, \quad \text{де } i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (16)$$

де m_i – кількість паралельно з'єднаних мембранотримачів у секції; n_i – кількість послідовно з'єднаних мембранних елементів у модулі i -ї секції; N – кількість секцій у стадії; Q_{pf} – масові витрати пермеату і вхідної води, відповідно, $кг/с$; C_p – концентрація пермеату, $кг$ солей на $кг$ розчинника; c_{ME} – наведена вартість мембранного елемента, $у.о./рік$; c_{MT} – наведена вартість мембранотримача, $у.о./рік$; c_{OM} – вартість обслуговування мембран, $у.о./м^2$; c_e – вартість електроенергії, $у.о./кВт$; Y_i – показник конверсії для i -ї секції, %; W – потужність насоса, $кВт$.

Як видно з постановки завдання, цільова функція є нелінійною. Оскільки параметри оптимізації можуть набувати як дискретних, так і неперервних значень, вирази (15)-(16) маємо визначити як завдання частково-цілочисельного нелінійного математичного програмування (MINLP).

Для розв'язання завдання оптимізації авторами було використано генетичні алгоритми [3]. Цей числовий метод було обрано, зокрема, з тієї причини, що при його застосуванні має місце висока ймовірність знаходження глобального оптимуму. На основі вка-

заного числового методу й описаного вище математичного апарату для оптимізації зворотноосмотичної системи демінералізації води в середовищі MS Visual Basic було створено програмний продукт. Крім обчислювальних компонентів, програмне забезпечення включає також файли баз даних (основних технічних показників мембранних елементів, експлуатаційних та економічних характеристик мембранотримачів, вартості витратних ресурсів процесу тощо) і засоби графічної візуалізації розрахованої схеми (рис. 3).

Приклад розрахунку зворотноосмотичної установки

Як приклад розглянуто оптимізацію зворотноосмотичної установки демінералізації води для працюючої ТЕЦ. Потужність установки, що має три незалежні блоки продуктивністю $50 \text{ м}^3/\text{час}$, складає – $150 \text{ м}^3/\text{год}$. Після попереднього очищення (Na-катионітові фільтри) загальний солеміст води не перевищує 150 мг/л . Загальний солеміст води на виході установки зворотного осмосу – не більш ніж 3 мг/л . У системі було використано мембранні елементи Filmtec марки LE 440i. Оскільки всі три блоки установки однакові, розрахунок було виконано для одного блоку. У результаті було отримано два варіанти структури блоку зворотного осмосу.

Варіант 1. Схема має 4 секції (рис. 4-а), які складаються з 5, 4, 3 і 2 мембранотримачів відповідно. Кожен мембранотримач має по два мембранні елементи. Основні показники схеми: витрата пермеату – $45 \text{ м}^3/\text{год}$; концентрація пермеату – 1.7 мг/л ; показник конверсії – $72,7\%$; собівартість очищеної води – $1,03 \text{ грн/м}^3$.

Варіант 2. Схема має 1 секцію (рис. 4-б), яка складається з 5 мембранотримачів, кожний з яких має по 8 мембранних елементів (рис. 4-в). Основні показники схеми: витрата пермеату – $45 \text{ м}^3/\text{год}$; концентрація пермеату – 1.7 мг/л ; показник конверсії – $72,7\%$; собівартість очищеної води – $0,94 \text{ грн/м}^3$.

Порівняння показників обох отриманих варіантів свідчить, що обидва варіанти відповідають всім поставленим технологічним вимогам, але собівартість очищеної води за другою схемою менша на $0,09 \text{ грн/м}^3$. Наведені витрати у другій схемі також менші на 36838 грн/рік . Отже, до впровадження рекомендований другий варіант схеми блоку зворотного осмосу. Зворотноосмотична установка демінералізації води ТЕЦ складається із трьох таких блоків, які працюють паралельно.

Підтвердження ефективності представлених у роботі підходів було отримано перевірочним розрахунком за допомогою програми ROSA компанії Dow Chemical для розрахунку мембранних систем.

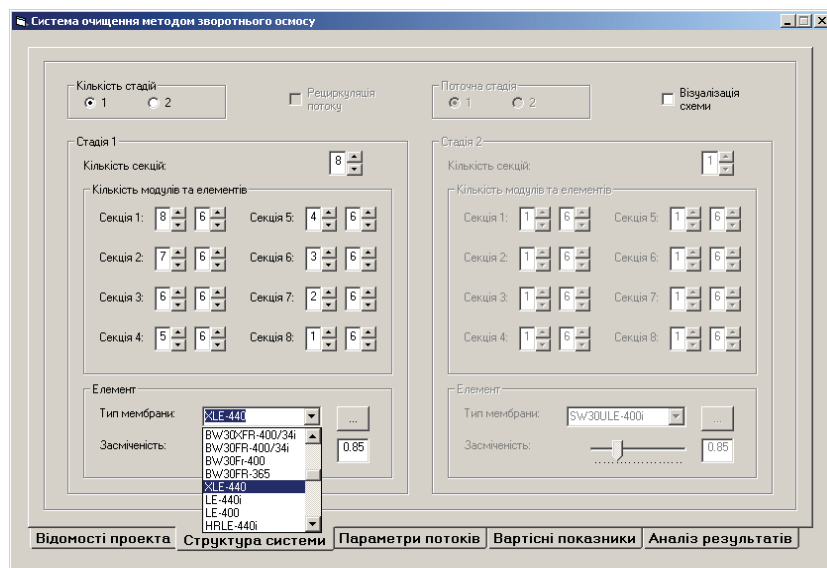


Рис. 3. Інтерфейс програмного забезпечення для оптимізації зворотноосмотичної системи демінералізації води

Співставлення отриманих результатів показало, що різниця в характеристиках розрахованої системи не перевищує 1–2%. Це свідчить про те, що описана математична модель є адекватною, а розроблене програмне забезпечення може використовуватися для комп'ютерного моделювання зворотноосмотичних систем демінералізації води.

Висновки. Представлена методологія структурної оптимізації схем водопідготовки показала свою ефективність при розрахунку установки зворотно-осмотичної демінералізації води на ТЕС і може бути рекомендована як система підтримки прийняття рішень фахівцям, що займаються проектуванням схем очищення природної води.

Перспективу подальших досліджень автори вбачають, зокрема, у «розширенні

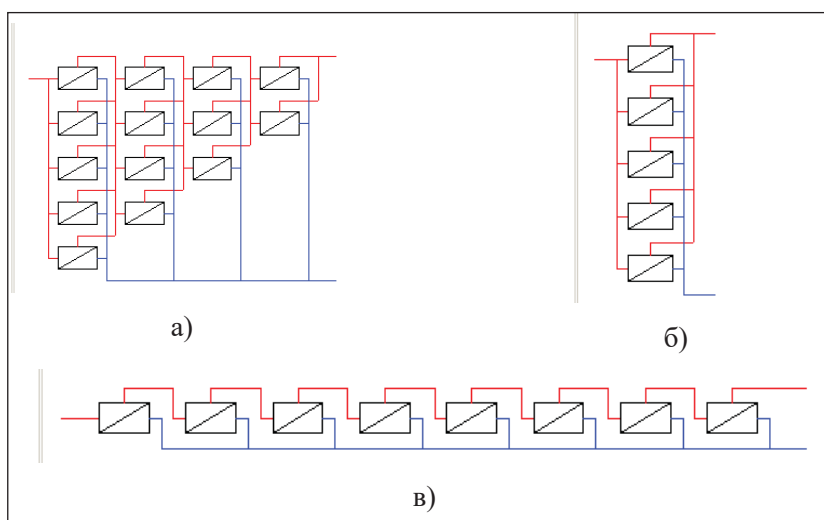


Рис. 4. Альтернативні варіанти розрахованих схем блоку зворотного осмосу – а) перший варіант, б) другий варіант, в) структура мембранотримачів у другому варіанті схеми

застосування описаних концепцій до структурної оптимізації систем очищення стічних вод тощо.

Література

1. Kimura S., Sourirajan S. Analysis of data in reverse osmosis with porous cellulose acetate membranes used. *AIChE J.* 1967. Vol. 13. P. 497–503.
2. FILMTEC Reverse osmosis membranes: Technical Manualю Dow Liquid Separations. 2010. 181 p.
3. Шоботов С.С., Квитка А.А., Фендри Ф. Математическое моделирование процесса обратно-осмотической деминерализации воды. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2009. №2/10 (44). С. 55–58.