

ОПТИМІЗАЦІЯ УСТАНОВКИ КОНТАКТНОЇ МЕМБРАННОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ

Ладієва Л.Р., Жулинський О.А

При експлуатації установки процесу КМД розглядалась задача оптимізації статичних режимів роботи плоско камерних мембранних модулів. Важливо те, що даний процес відповідно техніко - економічним оцінкам [1] може конкурувати з такими традиційними мембранними технологіями, як зворотній осмос чи ультрафільтрація. Причому його ефективність може значно зрости при оптимізації всього процесу.

Установка для процесу контактної мембранної дистиляції включає теплообмінник для підігріву розчину, насос і мембранний модуль. В якості теплоносія може використовуватись низькоенергетичне (вторинне) тепло. З метою підвищення рівня енергозбереження процесу КМД розглядається задача оптимізації роботи установки.

В процесі КМД використовували центробіжний насос з тіресторною схемою керування, що дозволило зменшити витрати електроенергії.

В якості критерію оптимальності вибрано питому собівартість процесу КМД, що включає енерговитрати на підігрів розчину, перекачування його і амортизаційну вартість мембран. Вартість процесу переробки в мембранному модулі, може бути представлена рівнянням:

$$C = a_1 Q_{II} + a_2 N_2 + C_{\text{вир}} + C'_0 \quad (1)$$

де a_1 – вартість одного джоуля тепла, що підводиться з парою, $\frac{\text{грн}}{\text{Дж}}$; Q_{II} – кількість тепла, що сприймається розчином, від грючої пари, $\frac{\text{Дж}}{\text{год}}$; a_2 – вартість однієї кіловат-години електроенергії, що витрачається на привід насоса, $\frac{\text{грн}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$; N_2 – потужність електродвигуна, що витрачається на привід насоса, кВт; $C_{\text{вир}}$ – вартість виробничих витрат (що включає амортизаційні відрахування, вартість ремонту та інше), $\frac{\text{грн}}{\text{год}}$; C'_0 – стала складова собівартості, $\frac{\text{грн}}{\text{год}}$.

Як відомо, у промисловій практиці при експлуатації теплових апаратів виробничі витрати $C_{\text{вир}}$, що включають і амортизаційні відрахування, часто умовно приймають сталою величиною. Цю величину можна представити:

$$C_{\text{вир}} = a_o Q_{M_o} \quad (2)$$

де a_o - коефіцієнт, який враховує питому вартість виробничих витрат, що віднесені до одного джоуля тепла, $\frac{\text{грн}}{\text{Дж}}$; Q_{M_o} - фіксована кількість тепла, що сприймається мембраною, $\frac{\text{Дж}}{\text{год}}$. Тоді з урахуванням (2) рівняння (1) приймає вигляд:

$$C = a_1 Q_{II} + a_2 N_2 + a_o Q_{M_o} + C'_0 \quad (3)$$

При інших рівних умовах, кількість тепла, що сприймається мембраною від розчину, залежить від інтенсивності тепловіддачі. Це може бути виражене співвідношенням:

$$\frac{Q_M}{Q_{M_o}} = \frac{\alpha}{\alpha_o}, \text{ чи } Q_{M_o} = Q_M \frac{\alpha_o}{\alpha} \quad (4)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі від розчину до мембрани при поточному значенні тепла, що підводиться $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; α_{2_0} - теж при фіксованому його значенні, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$. При підстановці (4) в рівняння (3), останнє приймає вигляд:

$$C = a_1 Q_{II} + a_2 N_2 + a_0 Q_M \frac{\alpha_0}{\alpha} + C'_0 \quad (5)$$

Припустимо, що тепло, яке отримує розчин, віддається мембрані: $Q_{II} \approx Q_M$. Розділивши праву і ліву частини рівняння на Q_{II} і віднісши a_1 до C'_0 , отримаємо функцію цілі, сформульовану як питому собівартість процесу переробки в мембранній установці:

$$R = a_2 \frac{N_2}{Q_M} + a_0 \frac{\alpha_0}{\alpha} + C_0 \quad (6)$$

Для мембран з доброю проникністю вважали, що перенос тепла через мембрану здійснюється перш за все за допомогою потоку пари:

$$Q_M \approx J_{II} S_m r \quad (7)$$

де J_{II} - питомий потік пари через мембрану, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$, S_m - поверхня мембрани, м^2 , r - прихована теплота пароутворення, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Тоді з урахуванням (7), рівняння (6) прийме вигляд:

$$R = a_2 \frac{N_2}{J_{II} S_m r} + a_0 \frac{\alpha_0}{\alpha} + C_0 \quad (8)$$

Представлене рівняння (8) виразу функції цілі, містить відносну зміну тепловіддачі $\frac{\alpha_0}{\alpha}$, потужність двигуна, що витрачається на привід насоса N_2 і потік пари через мембрану J_{II} .

Значення коефіцієнтів тепловіддачі фіксованого α_0 і поточного α можуть бути підраховані за формулою [2], представленою у вигляді:

$$\alpha = 0,023 \frac{\rho^{0,25} \cdot c_p^{0,25} \cdot \lambda^{0,75} \cdot W^{0,8}}{\bar{D}_{63} \cdot \bar{d}^{0,2} \cdot \gamma^{0,55}} \quad (9)$$

Ця формула справедлива при турбулентній течії розчину. Позначимо індексом "0" фіксовані значення технологічних і конструктивних параметрів, а без індекса – поточні її значення. Тоді:

$$\frac{\alpha_0}{\alpha} = \left(\frac{W_0}{W} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\bar{d}}{\bar{d}_0} \right)^{0,2} \quad (10)$$

Потік пари в гідрофобній мікропоруватій мембрані в процесі КМД описується виразом:

$$J_{II} = \frac{M \varepsilon \bar{D}_{вз} \cdot \bar{p} \cdot \ln \left| \frac{p_x - p_2}{p_2 - p_1} \right|}{\delta \chi RT} \quad (11)$$

У цей вираз, окрім коефіцієнтів поруватості ε і звивистості χ , входить конструктивний параметр – товщина мембрани δ .

Потужність, що споживається двигуном насоса N_2 , визначається наступним чином:

$$N_2 = \rho g W S H, \quad (12)$$

де H – напір, м, S – площа поперечного перерізу нагнітального трубопроводу насоса, m^2 , ρ – густина рідини, що перекачується, $\frac{\kappa z}{M^3}$. Враховуючи (11), (12) перший член рівняння (8) можна записати так:

$$a_2 \frac{N_2}{J_{II} S_M r} = a_2 \frac{\rho g W S H}{M \varepsilon \bar{D}_{\text{вз}} \bar{p} \ln \left| \frac{p_x - p_2}{p_2 - p_1} \right| S_M r} \quad (13)$$

Приймаючи $a_2 = 0,22 \frac{z p H}{\kappa B m \cdot z o d} = 0,6 \cdot 10^{-7} \frac{z p H}{B m \cdot c}$, $\chi = 2$, $\varepsilon = 0,8$, рівняння (13) може бути представлено так:

$$a_2 \frac{N_2}{J_{II} S_M r} = 0,6 \cdot 10^{-7} \cdot 2,78 \delta \cdot W \quad (14)$$

Представивши рівняння (8) у функцію цілі і, з урахуванням вищесказаного може бути перетворена до наступного вигляду: так при оптимізації процесу КМД за керуючим впливом, швидкістю подачі розчину, рівняння (8) з урахування (10), (14) приймає вигляд:

$$R = 1,668 \cdot 10^{-7} \delta W + a_0 \left(\frac{W_0}{W} \right)^{0,8} \left(\frac{\bar{d}}{\bar{d}_0} \right)^{0,2} + C_0 \quad (15)$$

Наявність конфліктної ситуації у функції цілі, представленої рівнянням (15), має місце, так як маємо виражену протилежну направленість складових питомої собівартості і їх не лінійність. Для того, щоб впевнитися в наявності екстремума в розглянутому рівнянні і щоб він потрібної природи, нами, проведено чисельний аналіз.

Результати чисельного аналізу роботи установки процесу КМД наведені на рис. 1.

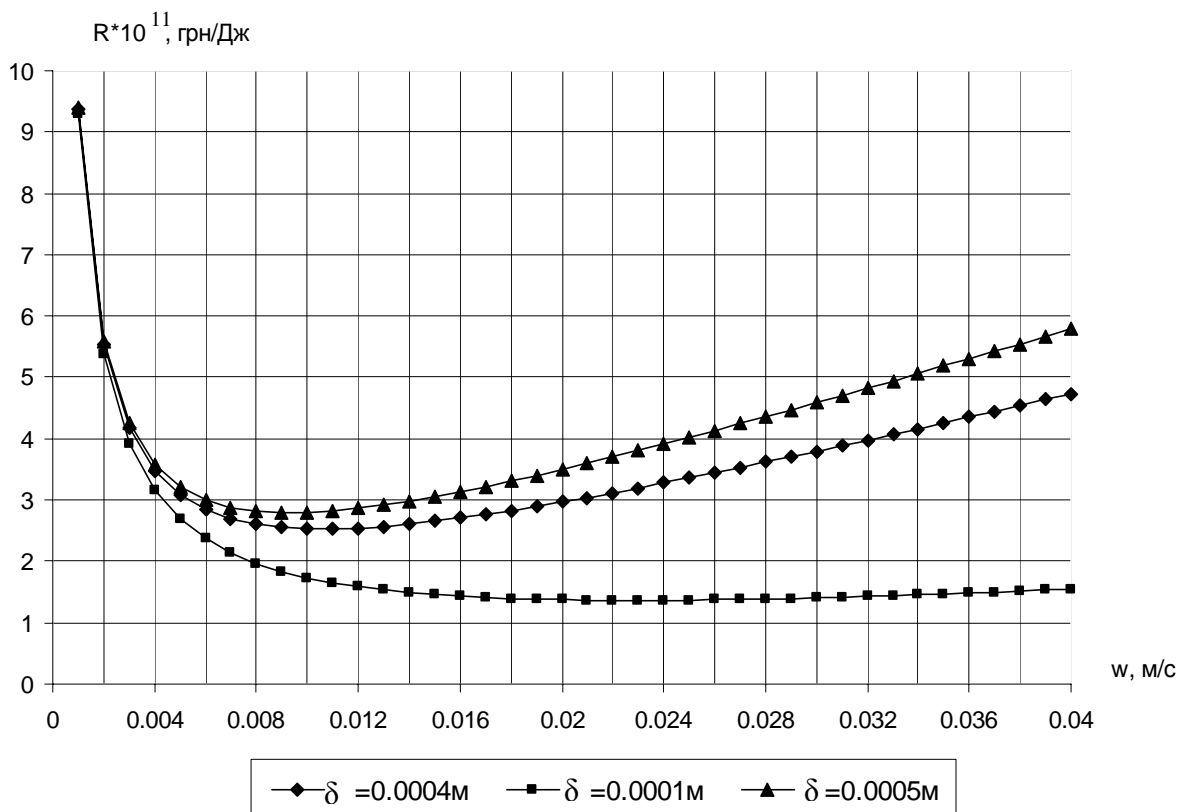


Рис. 1 Залежність функції цілі від швидкості при $\delta = \text{const}$

Як видно з графіків, криві залежності $R = f(W)$ мають виражений екстремальний характер. При цьому із збільшення товщини мембрани екстремальні точки суттєво зміщуються вліво в сторону менших швидкостей подачі розчину.

Наведення дає підстави вважати, що рівняння (15) може бути викотистано при оптимізації процесу КМД за мінімумом мінімальної собівартості. Це дає підстави перейти безпосередньо для розрахунку оптимальних значень W і основного конструктивного параметра мембрани δ . Для цього скористаємося відомим з класичного аналізу методом визначення безумовного екстемуму шляхом прирівнювання до нуля першої похідної функції цілі за цікавлячи нас параметром W . Перша частина похідна функції цілі представленої рівнянням (15) і при умові $d = \text{const}$, будучи прирівняною до нуля, має вигляд:

$$\frac{\partial R}{\partial W} = -0,106 \cdot 10^{-11} \frac{W^{0,8}}{W^{1,8}} + 6,672 \cdot 10^{-11} = 0 \quad (16)$$

Розв'язуючи це рівняння відносно швидкості подачі розчину, отримаємо:

$$W_{on} = \frac{0.000302W^{0.44}}{\delta^{0.55}} \quad (17)$$

Приймаючи $a_0 = 0,1337 \cdot 10^{-8} \frac{z_{PH}}{кДж}$ і $W_0 = 0,1 \frac{м}{с}$ і підставляючи в (17), отримаємо:

$$W_{on} = \frac{0.149 \cdot 10^{-4}}{\delta^{0.55}} \quad (18)$$

Отримані за цим рівнянням швидкості розчину W є оптимальними, так як вони відповідають мінімуму питомої собівартості процесу. Отримана залежність (18) дозволяє розрахувати W_{on} для різних технологічних і конструктивних параметрах. Для того, щоб впевнитися в наявності оптимуму, запишемо матрицю Гессе:

$$\nabla^2 R(W, \delta) = \begin{bmatrix} 0.1908 \frac{W_0^{0.8}}{W^{2.8}} & 0 \\ 0 & 1.668 \cdot 10^{-7} \end{bmatrix} \quad (19)$$

яка є додатньо визначеною. Це підтверджує наявність ізольованого локального мінімуму. Чисельний аналіз за розробленою методикою розрахунку оптимальних технологічних параметрів процесу КМД показав наявність чітко вираженого екстремуму функції цілі від швидкості подачі розчину, що дозволяє на стадії проектування провести оптимізацію за основним конструктивним параметром – товщиною мембрани.

The criterion of unconditional static optimization of installation direct contact membrane distillation which will consist in minimization of the cost price of process of processing is formulated. The design procedure of optimum technological parameters of the unit of process DCMD is developed. The numerical analysis is carried out and existence of a well defined extremum of function of the purpose from speed of submission of a solution is shown. For a design stage optimization of installation of process КМД on the basic design data - thickness of a membrane is executed.

1 Fane A. G., Schofield R. W., Fell C. F. D. The efficient use of energy in membrane distillation // Desalination, – 1990, – v. 64, – P. 231

2 Угрозов В. В. Математическое моделирование процесса контактной мембранной дистилляции в проточном модуле. – ТОХТ, – 1994, – Т. 4, – С. 375 - 380