

5. Dubovoi V. M., Yukhymchuk M. S. Research of the synchronous waven coordination model of production processes. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2020. Vol. 12. Issue 1. С. 41–47.
6. Дубовой В. М., Юхимчук М. С. Модель децентралізованого координаційного керування неперервними розподіленими об'єктами. *Control of technical, technological and biotechnical objects*. С. 91–92.
7. Cloud Ping Test (Latency) for different providers like AWS, Azure, GCP [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://cloudpingtest.com/>.
8. Pandey P. K., Chhabra S., Sharma A. An Observable Network Route Support on Interpretation of Cloud Computing. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2020. Vol. 9, Issue 8. С. 2–3.

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВАКУУМНОЇ МЕМБРАННОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ

Ладієва Л. Р., Істомін А. П.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВАКУУМНОЙ МЕМБРАННОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ

Ладиева Л. Р., Истомин А. П.

OPTIMAL CONTROL OF THE VACUUM MEMBRANE DISTILLATION PROCESS

Ladieva L. R., Istomin A. P.

КПІ ім. Ігоря Сікорського
Київ, Україна
istomin.andreyl@gmail.com

В статті виконано дослідження процесу вакуумної мембранної дистиляції; розглянуто та обґрунтовано найкращі методи реалізації процесу; прийняті припущення; визначено оптимальне програмне керування процесом.

Ключові слова: вакуумна мембранна дистиляція, пермеат, мембрана, математична модель, сировина, дифузія

В статье выполнено исследование процесса вакуумной мембранной дистилляции; рассмотрены и обоснованно лучшие методы реализации процесса; принятые допущения; определено оптимальное программное управление процессом.

Ключевые слова: вакуумная мембранная дистилляция, пермеат, мембрана, математическая модель, сырье, диффузия.

The article studies the process of vacuum membrane distillation; the best methods of process realization are considered and substantiated; accepted assumptions; the optimal software process control is determined.

Key words: *vacuum membrane distillation, permeate, membrane, mathematical model, raw materials, diffusion.*

В світі спостерігається тенденція до суттєвого збільшення об'ємів виробництва етанолу для вирішення енергетичних проблем, тобто використання його як біопалива. Мембранна дистиляція (МД) призначена для відновлення спиртів, – це технологія, що використовує пористі мембрани для розділення рідкої суміші, де рушійною силою процесу є градієнт тиску на мембрані. Основна перевага полягає у можливості постійно видаляти етанол на етапі виробництва пального спирту.

Мембранна дистиляція – це відокремлення двох або більше летких сполук від рідкої суміші, в якій пориста мембрана використовується як фізичний бар'єр. Розділення відбувається через падіння тиску з обох боків мембрани (відділення для розчину та пермеату) [2].

Для керування процесом можна використовувати різні конфігурації мембранного апарату. Різниця між цими конфігураціями полягає в способі конденсації пари на стороні пермеату.

При вакуумній мембранній дистиляції (ВМД), показаній на (рис.1), рушійна сила підтримується шляхом подачі вакууму на сторону пермеата. Застосований вакуумний тиск нижче рівноважного тиску пари. Тому конденсація відбувається поза мембранним модулем.

Збільшення потоку пермеату та/або швидкості перемішування зменшує ефект поляризації температури. Отже, температура на межі розділу газ-рідина наближається до об'ємної температури на стороні пермеату. Зазвичай це збільшує рушійну силу мембрани [4].

Однією з переваг цього методу є те, що нерозчинені інертні гази, що блокують пори мембрани, відсмоктуються вакуумом, залишаючи активною велику ефективну поверхню мембрани. Крім того, нижчі температури кипіння призводять до збільшення кількості продукту при нижчих загальних температурах і менших перепадах температур на мембрані.

Вибір мембрани є найважливішим фактором ефективності розділення процесу дистиляції. Мембрана, яка використовується для мембранного дистиляційного процесу, повинна бути гідрофобною та пористою. Існують різні типи мембран, які відповідають цим вимогам, але ефективність мембранної дистиляції багато в чому залежить від таких додаткових факторів, як стійкість до масообміну, теплостійкість, теплопровідність, явища змочування та характеристики модуля.

Під час дистиляції леткі речовини повинні змінити фазу, щоб пройти через мембрану. Головною перевагою цього методу є здатність безперервно видаляти етанол на етапі виробництва, що дозволяє уникнути гальмування ферментації продуктом і тим самим збільшити виробництво.

На відміну від продуктів нафтопереробки, етиловий спирт, отриманий в результаті вакуумної дистиляції мембрани, є абсолютно екологічно чистим продуктом, і коли етанол використовується як паливо для автомобілів, кількість вихлопних газів значно зменшується [1].

Основні дослідження процесу вакуумної мембранної дистиляції були направлені на техніку експериментальних досліджень розділення етанолу. Аналіз

публікацій показав, що була розроблена математична модель статички для опису переносу маси і енергії у процесі розділення етанолу з використанням вакуумної мембранної дистиляції [1]. Але цю модель неможливо використати для створення системи керування. Більше досліджень приділено процесу контактної мембранної дистиляції (КМД). Створені математичні моделі процесу КМД, які враховують зміну температури і швидкості в каналах мембранного модуля, а також в порах мембрани.

Створена математична модель процесу ВМД, яка враховує дифузію пари через пори мембрани і теплопередачу через решітку мембрани. Представлена математична модель процесу вакуумної мембранної дистиляції враховує розподіл температури $\Theta(x)$ по довжині каналів, але не враховує зміну температури по висоті каналу.

Під час створення математичної моделі були прийняті наступні припущення:

- мембрана ідеальна, тобто гідрофобна з однаковим радіусом пор та непошкодженим селективним прошарком;
- не враховано вплив поляризації температури та концентрації;
- не врахована розподіленість параметрів по висоті каналів мембранного модуля;
- ємністю мембрани нехтували, через її незначну товщину порівняно з висотою каналів сировини та пермеату.

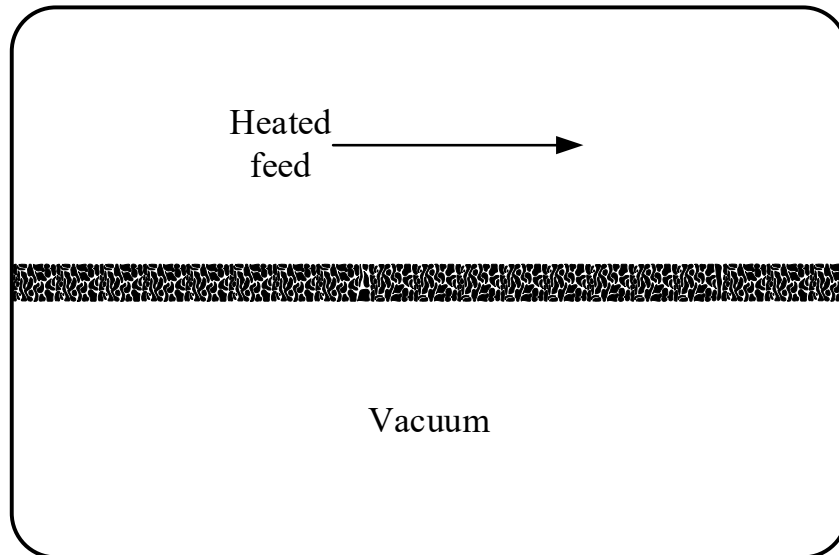


Рис.1. Схематичне зображення ВМД

Диференціальні рівняння теплового балансу представлені у вигляді:

$$\begin{aligned}
 -W_{F,x} S \rho_F c_F \frac{\partial \theta_F(x,t)}{\partial x} - \alpha d (\theta_F(t) - \theta_P(t)) - K(x,t) d(\Delta P) r &= S \rho_F c_F \frac{\partial \theta_F(x,t)}{\partial t}; \\
 -W_{P,x} S \rho_P c_P \frac{\partial \theta_P(x,t)}{\partial x} + \alpha d (\theta_F(t) - \theta_P(t)) + K(x,t) d(\Delta P) r &= S \rho_P c_P \frac{\partial \theta_P(x,t)}{\partial t};
 \end{aligned}$$

За початкових і граничних умов:

$$\begin{aligned} \theta_F(x,t)|_{t=0} &= \theta_{F_0}(x), & \theta_P(x,t)|_{t=0} &= \theta_{P_0}(x), \\ \theta_F(x,t)|_{x=0} &= \theta_F(t), & \theta_P(x,t)|_{x=0} &= \theta_P^0(t), \end{aligned}$$

де $W_{F,x}, W_{P,x}$ – швидкість розчину і пермеату в поздовжньому напрямку каналу; S, d – площа і ширина каналу; $c_{F,x}, c_{P,x}$ – теплоємність розчину і пермеату відповідно; ρ_F, ρ_P – густина розчину та пермеату відповідно; $\Delta P = (p_F - p_P)$ – різниця парціальних тисків на різних сторонах мембрани; K – коефіцієнт масо передачі; α – коефіцієнт тепловіддачі.

Математична модель процесу ВМД представлена у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_F}{\partial t} &= -W_{F,x} \frac{\partial \theta_F}{\partial x} - K \frac{1}{\rho_F c_F l_y} (p_F - p_P) \cdot r(\theta) - \alpha \frac{1}{\rho_F c_F l_y} (\theta_F - \theta_P); \\ \frac{\partial \theta_P}{\partial t} &= -W_{P,x} \frac{\partial \theta_P}{\partial x} + \alpha \frac{1}{\rho_P c_P l_y} (\theta_F - \theta_P) + K \frac{1}{\rho_P c_P l_y} (p_F - p_P) \cdot r(\theta); \\ \Delta p &= p_F - p_P = \xi_1 \theta_F - \xi_2 \theta_P; \end{aligned}$$

В залежності від ряду факторів переніс речовини через мембрану, як вже відмічалось, здійснюється перш за все наступними механізмами переносу: вільномолекулярною (кнудсенівська дифузія), молекулярною (нормальна дифузія) і в'язкою (масовою) течією. В залежності від зміни діаметру пор, характеристик мікроструктури, товщини мембрани змінюється і вклад кожного механізму. В результаті забруднення поверхні мембрани в процесі роботи змінюється термічний опір. Поверхня мембрани гідрофобна і при тривалому контакті з водним розчином, змінюється гідрофільно-гідрофобний баланс поверхневого шару і зокрема пористість мембрани. Ці фактори суттєво впливають на якість ведення процесу [3].

Тому в якості критерію оптимальності вибрано ентропію, що представляє сумарне приведено тепло, яке поглинається системою. В якості керуючого впливу вибрано зміну вакууму в каналі пермеату.

Критерій оптимальності системи полягає в мінімізації інтегрального функціоналу, представленого у вигляді:

$$I = \int_0^{t_f} \int_0^{l_x} \frac{I_n}{\theta_F - \theta_P} dx dt \rightarrow \min$$

де I_n – потік пари через мембрану:

$$I_n = \frac{MD_{F,P}}{\delta R \theta_M p_\alpha (1 + K_n)} (p_F - p_P).$$

Розв'яжемо сформульовану задачу за допомогою принципу максимуму:

$$H(\theta_F, \theta_p, \lambda_1, \lambda_2, t) = \frac{I_n}{\theta_F - \theta_p} + \lambda_1(x, t) - (W_{F_x} \frac{\partial \theta_F}{\partial x} - K \frac{1}{\rho_F c_F l_y} (\xi_1 \theta_F - p_p) r - \alpha \frac{1}{\rho_F c_F l_y} \cdot (\theta_F - \theta_p) + \lambda_2(x, t) - (-W_{p_x} \frac{\partial \theta_p}{\partial x} + \alpha \frac{1}{\rho_p c_p l_y} (\theta_F - \theta_p) + K \frac{1}{\rho_p c_p l_y} (\xi_1 \theta_F - p_p) r);$$

де $H(\theta_F, \theta_p, \lambda_1, \lambda_2, t)$ – гамільтоніан задачі безумовної оптимізації;
 $\lambda_1(x, t)$, $\lambda_2(x, t)$ – спряжені функції.

При цьому необхідні умови оптимальності мають вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda_1}{\partial t} &= - \frac{MD_{\beta\pi p}}{\delta R \theta_M p_\alpha (1 + K_n)} \left(\frac{\xi_1}{\theta_F - \theta_p} - \frac{(\xi_1 \theta_F - p_p)}{(\theta_F - \theta_p)^2} \right) - W_{F_x} \frac{\partial \lambda_1}{\partial x} + \\ &+ \alpha \left(\frac{1}{\rho_F c_F l_y} \lambda_1 - \frac{1}{\rho_p c_p l_y} \lambda_2 \right) + K \left(\frac{1}{\rho_F c_F l_y} \xi_1 \lambda_1 - \frac{1}{\rho_p c_p l_y} \xi_1 \lambda_2 \right) r \\ \frac{\partial \lambda_2}{\partial t} &= - \frac{MD_{\beta\pi p}}{\delta R \theta_M p_\alpha (1 + K_n)} \cdot \frac{(\xi_1 \theta_F - p_p)}{(\theta_F - \theta_p)^2} - W_{p_x} \frac{\partial \lambda_2}{\partial x} - \alpha \left(\frac{1}{\rho_F c_F l_y} \lambda_1 - \frac{1}{\rho_p c_p l_y} \lambda_2 \right). \end{aligned}$$

З граничними і кінцевими умовами:

$$\begin{aligned} \lambda_1(L_x, t) &= 0, \quad \lambda_1(x, t_f) = 0; \\ \lambda_2(L_x, t) &= 0, \quad \lambda_2(x, t_f) = 0; \end{aligned}$$

Алгоритм розв'язку задачі визначення оптимального програмного керування процесом ВМД такий:

- Керуючому впливу призначається початкове значення p^0 , для якого розв'язується математична модель процесу вакуумної мембранної дистиляції у прямому часі;
- Для отриманих розподілів температур розчину і пермеату розв'язується спряжена систему рівнянь з граничними умовами;
- Нова функція керуючого впливу визначається так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H}{\partial p_p} &= - \frac{MD_{\beta\pi p}}{\delta R \theta_M p_\alpha (1 + K_n) (\theta_F - \theta_p)} + K \left(\frac{1}{\rho_F c_F l_y} \lambda_1 - \frac{1}{\rho_p c_p l_y} \lambda_2 \right) r; \\ p_p^{i+1}(t) &= p_p^i(t) - \tau \int_0^{L_x} \frac{\partial H}{\partial p_p} dx \end{aligned}$$

де τ – крок градієнтної процедури.

- Перевіряється умова $|I(p_p^{s+1}) - I(p_p^s)| / I(p_p^s) \leq \varepsilon$, де ε – задана похибка мінімізації критерія. Якщо дана умова виконується, то розрахованим параметрам поля температур беруться значення Θ_F^{s+1} і Θ_p^{s+1} та процедура закінчується, в іншому випадку повертаємось до пункту 2.

ЛІТЕРАТУРА

1. Benavides-Prada O., Guevara-Lastre C., Barón-Núñez F., Barajas-Ferreira C., Ortiz-Basurto R., Torrestiana-Sánchez B. & Muvdi-Nova C. Vacuum membrane distillation: Modeling and analysis for recovery of ethanol from ethanol/water solutions. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*. 2013. Vol. 5. No. 2. P. 47–60.
2. Ладієва Л. Р., Жулинський О. А. Математична модель процесу контактної мембранної дистиляції. *Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси і системи*. 2004. №2. С. 46–51.
3. Ладієва Л. Р., Жулинський О. А. Математична модель процесу контактної мембранної дистиляції. *Автоматизація виробничих процесів*. 2005. №1. С. 19–21.
4. Ладієва Л. Р., Оніщенко В. О., Дубік Р. М. Математичне моделювання розподілу температур у мембранному модулі в процесі мембранної дистиляції. *Наукові технології*. 2015. № 1. С. 5–8.

SIMULATION OF THE THERMOKINETICS OF REACTIVE SINTERING OF NICKEL WITH ALUMINUM IN THE INTERVAL OF EUTECTIC DECOMPOSITION OF INTERMETALLIDE

Solntsev V. P.¹, Shakhnovsky A. M.², Kvitka O. O.², Petrash K. M.¹,
Solntseva T. A.¹, Terekh T. Yu.²

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОКІНЕТИКИ РЕАКЦІЙНОГО СПІКАННЯ НІКЕЛЮ З АЛЮМІНІЄМ В ІНТЕРВАЛІ КОНЦЕНТРАЦІЙ ЕВТЕКТИЧНОГО РОЗПАДУ ІНТЕРМЕТАЛІДУ

Солнцев В. П.¹, Шахновський А. М.², Квітка О. О.², Петраш К. М.¹,
Солнцева Т. А.¹, Терех Т. Ю.²

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОКИНЕТИКИ РЕАКЦИОННОГО СПЕКАНИЯ НИКЕЛЯ С АЛЮМИНИЕМ В ИНТЕРВАЛЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО РАСПАДА ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ

Солнцев В. П.¹, Шахновский А. М.², Квитка А. А.², Петраш К. Н.¹,
Солнцева Т. А.¹, Терех Т. Ю.²

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України
Київ, Україна
solntcevvp@gmail.com

²Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
amshakhn@xtf.kpi.ua