

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГЕНЕРАЦІЇ ВІДПРАЦЬОВАНИХ РУЛОНОВАНИХ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ

Корнієнко Я.М., д-р техн. наук, проф., Гулієнко С.В., Лялька М.О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ

Наведені результати теоретичного аналізу залежностей продуктивності мембранних апаратів та процесів, що протікають при регенерації забруднених модулів. Отримана теоретична залежність для прогнозування питомої продуктивності модулів після регенерації.

The results of theoretical analysis of correspondences for membrane modules productivity and for processes which take place in regeneration of fouled modules are represented. Theoretical correspondence for prediction module specific productivity after regeneration is received.

Ключові слова: мембранний модуль, забруднення, регенерація, питома продуктивність, ступінь відношення.

Явища концентраційної поляризації та забруднення поверхні мембран є основними перешкодами в експлуатації мембранних установок, в першу чергу зворотного осмосу і нанофільтрації. Забруднення поверхні мембрани (найчастіше у вигляді шару кеку) збільшує опір перенесенню речовини через мембрану, внаслідок чого відбувається падіння продуктивності мембранного апарата. Необхідність частої заміни відпрацьованих мембранних модулів значно погіршує економічні показники мембранної установки в цілому, тому необхідно вживати заходів для зменшення негативного впливу цих явищ, в тому числі регенерацію відпрацьованих мембранних модулів [1-3].

В попередніх роботах [4-5], було представлено метод регенерації мембран, ефективність якого підтверджується лабораторним випробовуванням. Для якісного використання даного методу, окрім визначення показників продуктивності, експериментальним способом, є потреба у створенні теоретично обґрунтованої математичної залежності. Ця залежність повинна прогнозувати рівень регенерування, або визначати продуктивність мембранного модуля який пройшов процес відновлення за вище зазначеною методикою.

Мета дослідження: отримати аналітичну залежність для передбачення продуктивності мембрани після регенерації.

Методи дослідження: теоретичний аналіз існуючих залежностей для продуктивності мембранних апаратів та процесів масообміну при розчиненні.

Результати та обговорення.

Потік речовини J (кг/(м²·с)) через мембрану відповідно до моделі осмотичного тиску може бути представлений у вигляді [2, 3]:

$$J = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\mu R_{tot}} \quad (1)$$

де Δp – перепад тиску через мембрану, Па;

$\Delta \pi$ – різниця осмотичних тисків, Па;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості розчинника, Па·с;

R_{tot} – сумарний опір перенесенню речовини через мембрану, м²/кг.

В ідеальному випадку опір перенесенню визначається опором самої мембрани. Наявність шару забруднень збільшує опір перенесенню і сумарний опір може бути представлений у вигляді [3]:

$$R_{tot} = R_m + \alpha \delta \quad (2)$$

де

R_m – опір мембрани, м²/кг;

α – питомий опір шару забруднень, м²/(кг·м);

δ – товщина шару забруднень, м.

Тоді рівняння (1) можна представити у вигляді:

$$J = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\mu(R_m + \alpha \delta)} \quad (3)$$

Для оцінки ефективності регенерації відпрацьованих мембран в попередніх роботах використовувався поточний коефіцієнт зростання витрат [5]:

$$y = \frac{J_{i+1} - J_i}{J_i} \quad (4)$$

де J_i – потік речовини через мембрану до регенерації, кг/(м²·с);

J_{i+1} – потік речовини через мембрану після регенерації, кг/(м²·с).

Рівняння (4) можна переписати у вигляді:

$$y = \frac{J_{i+1}}{J_i} - 1 \quad (5)$$

Припустимо, що при регенерації питомий опір шару забруднень залишається незмінним, а зростання продуктивності визначається зменшенням товщини шару забруднень. Тоді шляхом підстановки рівняння (3) в рівняння (5) можна отримати:

$$y = \frac{\Delta p_{i+1} + \Delta \pi_{i+1}}{\mu_{i+1}(R_m + \alpha \delta_{i+1})} \Big/ \frac{\Delta p_i + \Delta \pi_i}{\mu_i(R_m + \alpha \delta_i)} - 1 = \frac{\Delta p_{i+1} + \Delta \pi_{i+1}}{\mu_{i+1}(R_m + \alpha \delta_{i+1})} \cdot \frac{\mu_i(R_m + \alpha \delta_i)}{\Delta p_i + \Delta \pi_i} - 1 \quad (6)$$

Якщо процес мембранного розділення протікає за однакових умов (проводиться розділення одного й того ж розчину за однакових температур, тисків тощо) динамічна в'язкість та рушійна сила процесу може бути скорочена. Тоді рівняння (6) можна записати у вигляді:

$$y = \frac{R_m + \alpha \delta_i}{R_m + \alpha \delta_{i+1}} - 1 = \frac{R_m + \alpha \delta_i - R_m - \alpha \delta_{i+1}}{R_m + \alpha \delta_{i+1}} = \frac{\alpha(\delta_i - \delta_{i+1})}{R_m + \alpha \delta_{i+1}} \quad (7)$$

Остаточно:

$$y = \frac{\alpha(\delta_i - \delta_{i+1})}{R_m + \alpha \delta_{i+1}} \quad (8)$$

Для прогнозування продуктивності мембран необхідно знати опір мембрани, питомий опір шару забруднень, та товщину шару забруднень до і після регенерації.

Розглянемо δ_{i+1} та δ_i . Припустимо, що шар забруднень рівномірно розподілений по поверхні мембрани. Тоді об'єм забруднень можна представити у вигляді:

$$V_i = F \delta_i \quad (9)$$

де F – площа поверхні мембран, м².

Маса шару забруднень:

$$m_i = \rho F \delta_i \quad (10)$$

де ρ – густина шару забруднення, кг/м³.

Маса шару забруднень після регенерації:

$$m_{i+1} = m_i - \Delta m \quad (11)$$

де Δm – маса вилучених з поверхні мембран речовин в результаті регенерації, кг.

Оскільки в процесі регенерації за розглядуваною методикою відбувалося розчинення шару забрудників, маса вилучених речовин може описуватися основним рівнянням масовіддачі [6]:

$$\Delta m = \beta(C^p - C_c)F\tau \quad (12)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі, м/с;

C^p – рівноважна концентрація речовин, що розчиняються, кг/м³;

C_c – середня концентрація речовин, що розчиняються, в промивній рідині, кг/м³;

τ – тривалість регенерації, с.

Підставивши рівняння (12) в рівняння (11) отримаємо:

$$m_{i+1} = m_i - \beta(C^p - C_c)F\tau \quad (13)$$

Виразимо товщину шару забруднень до і після регенерації:

$$\delta_i = \frac{m_i}{\rho F} \quad (14)$$

$$\delta_{i+1} = \frac{m_{i+1}}{\rho F} = \frac{m_i - \beta(C^p - C_c)F\tau}{\rho F} \quad (15)$$

Підставимо рівняння (14) та (15) в рівняння (8):

$$y = \frac{\alpha \left(\frac{m_i}{\rho F} - \frac{m_i - \beta(C^p - C_c)F\tau}{\rho F} \right)}{R_m + \alpha \left(\frac{m_i - \beta(C^p - C_c)F\tau}{\rho F} \right)} = \frac{\frac{\alpha}{\rho F} \beta(C^p - C_c)F\tau}{R_m + \frac{\alpha}{\rho F} (m_i - \beta(C^p - C_c)F\tau)} =$$

$$= \frac{\frac{\alpha}{\rho F} \beta(C^p - C_c)F}{\frac{1}{\rho F} (R_m \rho F + \alpha(m_i - \beta(C^p - C_c)F\tau))} = \frac{\alpha \beta(C^p - C_c)F}{R_m \rho F + \alpha(m_i - \beta(C^p - C_c)F\tau)} = \frac{\alpha \beta(C^p - C_c)}{R_m \rho + \alpha(m_i - \beta(C^p - C_c)\tau)}$$

Остаточно отримуємо:

$$y = \frac{\alpha \beta(C^p - C_c)}{R_m \rho + \alpha(m_i - \beta(C^p - C_c)\tau)} \quad (16)$$

Отримане рівняння дозволяє прогнозувати питому продуктивність мембрани (потік) за заданий проміжок часу, а також вирішувати обернену задачу, яка полягає у прогнозуванні часу регенерації, необхідного для досягнення необхідного ступеня регенерації. Для цього необхідно знати методи визначення речовин. Що входять у вказане рівняння. Маса осаду може бути визначена шляхом порівняння маси чистого і забрудненого модуля, опір мембрани експериментами проникнення чистого розчинника через незабруднену мембрану. Концентрація розчинених речовин в промивному вибирається при його складу та кратності циркуляції і може бути визначена методами аналітичної хімії або непрямими методами (за зміною електропровідності, оптичних властивостей розчину тощо). Фізичні властивості осаду (густина, концентрація насичення) визначаються за хімічним складом осаду з використанням довідкових даних [7]. Коефіцієнт масовіддачі залежить від гідродинамічних умов і, враховуючи специфіку геометрії каналів рулонуваних модулів потребує отримання і верифікації залежності для визначення цієї величини. Також необхідна розробка методів визначення питомого осаду шару осаду. Ці фактори визначають напрямки подальших досліджень в цій галузі.

Висновки

За результатами теоретичного аналізу існуючих залежностей, що описують продуктивність мембранних апаратів та процес масообміну при розчиненні, отримана аналітична залежність, яка дозволяє прогнозувати продуктивність мембрани після процесу регенерації.

Література

1. Vrouwenvelder H. Biofouling of spiral wound membrane systems. PhD thesis Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2009.
2. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. М.: Мир, 1999. 513.
3. Shirazi S., Lin C.-J., Chen D. Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes – A critical review // Desalination 250 (2010). p. 236-248.
4. Корнієнко Я.М. Оцінка ефективності відновлення властивостей рулонуваних мембранних модулів з використанням гідродинамічної кавітації / Корнієнко Я.М., Гулієнко С.В. // Наукові праці ОНАХТ. Випуск 41. Т. 1. с. 142-147.
5. Корнієнко Я.М. Підвищення ефективності регенерації забруднених рулонуваних мембранних модулів / Корнієнко Я.М., Гулієнко С.В., Григоренко О.В. // Наукові праці ОНАХТ. Випуск 45. Т. 3. с. 101-104.
6. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Изд. 2-е в 2-х кн.. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. 368 с.: ил.
7. Справочник химика. Том 3. Химическое равновесие и кинетика, свойства растворов, электродные процессы / Под ред. Б.П. Никольского — М.-Л.: Химия, 1965 — 1005 с.