

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕГЕНЕРАЦІЇ ЗАБРУДНЕНИХ РУЛОВАНИХ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ

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

*Наведено результати експериментальних дослідження впливу різних факторів на ефективність відновлення відпрацьованих рулонованих мембранних модулів. До досліджуваних факторів відносяться робочий тиск, температура промивного розчину та число циклів пульсації. Встановлені регресійні залежності та значимі фактори впливу.*

*The results of experimental investigations of influence of different parameters on regeneration fouled spiral wound membrane modules effectiveness are represented. The factors under investigation include operation pressure, temperature of cleaning solution and number of pulsations cycles. The equations of regression and meaning factors are defined.*

Ключові слова: мембранний модуль, забруднення, регенерація, планування експерименту, рівняння регресії

Забруднення поверхні мембран є найбільшою проблемою при експлуатації мембранних установок, особливо в процесах зворотного осмосу та нанофільтрації. Внаслідок цього явища погіршується продуктивність мембрани та інші енергетичні та економічні показники установок, тому для підвищення ефективності баромембранних процесів доцільно періодично проводити очищення забруднених поверхонь. Особливо актуальним питання регенерації для рулонованих модулів, які завдяки високій площі питомій поверхні мембран є найбільш поширеними, оскільки їх конструкція унеможливає механічне вилучення забруднень. Для мембранних модулів такої конструкції видалення забруднень можливе лише з потоком промивної рідини [1,2].

В попередній роботі нашої роботи [3] було показано, що потенційно ефективним методом регенерації є використання явища гідродинамічної кавітації, а також поєднання цього явища з хімічною реакцією. Метою даної роботи є визначення умов інтенсифікації процесу регенерації забруднених мембранних модулів. Для досягнення цієї мети використовувався метод планування експерименту [4].

### Матеріали та методи

Визначення факторів впливу проводилося шляхом проведення двох дрібнофакторних експериментів  $2^{3-1}$ . В першому випадку досліди проводилися за умов сталої течії, а в якості факторів впливу обрана температура, розрідження в апараті та концентрацію лимонної кислоти в промивній рідині. В другому випадку процес протікав в пульсаційному режимі, а факторами впливу були число циклів пульсацій, температура та концентрація лимонної кислоти в промивній рідині. Дослідження для двох режимів проводилося в різних інтервалах концентрації лимонної кислоти в промивному розчині.

Експериментальні дослідження відновлення відпрацьованих мембранних модулів проводилися на установці, що представлена на рисунку 1. В установці передбачено можливість вимірювання витрат ваговим методом, за допомогою електронних вагів 1, вимірювання розрідження на вході та виході в робочий блок 6, а також в проміжній ємності 10, та вимірювання температури початкового розчину, та на виході з робочого Регулювання робочими параметрами забезпечувалося клапанами 3 та 6.

Ефективність відновлення мембран оцінювалася експериментальним шляхом, за допомогою установки, наведеної на рисунку 2. Установка передбачає вимірювання робочого тиску, витрати пермеату та ретантанту, а також концентрацію розчинених речовин в початковому розчині, пермеаті та ретанті за допомогою портативного приладу TDS EZ5.

Продуктивність мембрани кількісно оцінювалася питомою продуктивністю за пермеатом  $\text{м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2\cdot\text{МПа})$ :

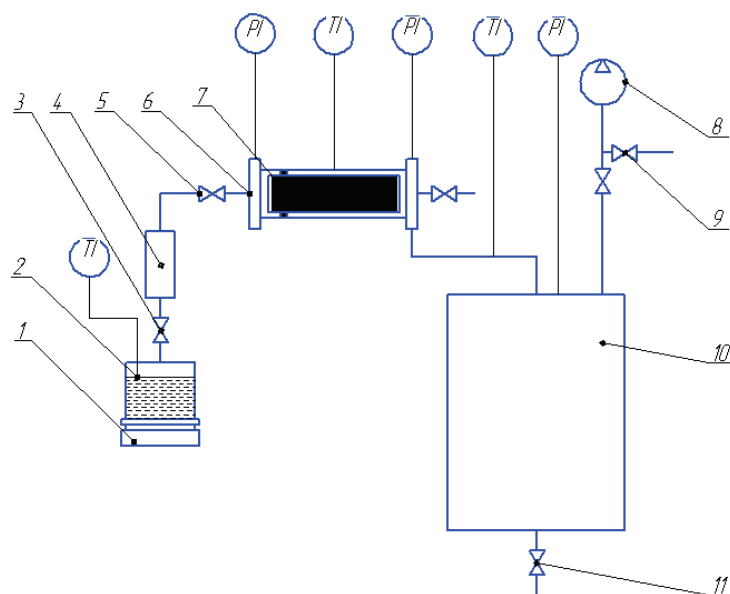
$$J = \frac{V}{\tau \cdot F \cdot \Delta p} \quad (1)$$

де  $V$  - об'єм пермеату,  $\text{м}^3$ ;

$\tau$  - час заповнення мірної ємності з пермеатом, с;

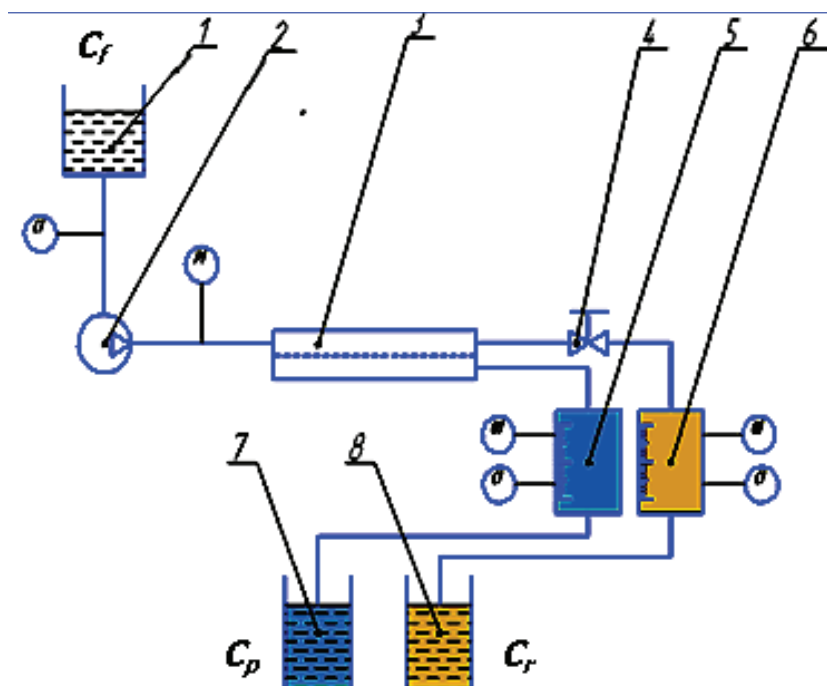
$F$  - площа поверхні мембрани,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta p$  - робочий перепад тиску, МПа.



1 – ваги; 2 – ємність з промивним розчином; 3,5 – регулювальний клапан; 4 – буферна ємність; 6 – робочий блок; 7 – мембранний модуль; 8 – вакуум-насос; 9 – відсічний клапан; 10 – проміжна ємність; 11 – кран для відбору проб.

Рис. 1 – Схема установки для дослідження відновлення відпрацьованих мембранних модулів



1 – ємність початкового розчину; 2 – насос; 3 – мембранний модуль; 4 – регулювальний клапан; 5 – мірний циліндр пермеату; 6 – мірний циліндр ретанту; 7 – збірник пермеату; 8 – збірник ретанту.

Рис. 2 – Схема установки для дослідження відновлення відпрацьованих мембранних модулів

Для кількісної оцінки ефективності відновлення відпрацьованих мембранних модулів вибрано величину поточного коефіцієнта підвищення продуктивності:

$$y = \frac{J_i - J_{i-1}}{J_{i-1}} \cdot 100\% \quad (2)$$

де  $J_i$  - питома продуктивність модуля за пермеатом після  $i$ -тої стадії регенерації,  $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{МПа})$ ;

$J_{i-1}$  - питома продуктивність модуля за пермеатом до  $i$ -тої стадії регенерації,  $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{МПа})$ .

Додатковою умовою ефективності відновлення поверхні мембрани було відсутність падіння селективності мембрани.

#### Результати

При регенерації рулонованих модулів шляхом промивання під розрідженням робочі параметри змінювалися відповідно до плану дрібно факторного експерименту, представленого в таблиці 1.

**Таблиця 1 – План дрібнофакторного експерименту  $2^{3-1}$  для режиму промивання під розрідженням**

Незалежні змінні	Позначення	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		верхній	основний	нижній	
$P$ , розрідження в експериментальній ємності, $\text{Па} \cdot 10^{-5}$	$x_1$	0,7	0,82	0,95	0,11
$c$ , концентрація лимонної кислоти в промивному розчині, $\text{мг/л}$	$x_2$	0,5	0,3	0,1	0,2
$T$ , температура, $^{\circ}\text{C}$	$x_3$	40	27,5	15	12,5

Досліди проводилися згідно матриці планування, представленої в таблиці 2. Кожен дослід паралельно проводився тричі.

**Таблиця 2 – Матриця планування та результати дрібнофакторного експерименту  $2^{3-1}$  для режиму промивання під розрідженням**

№	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_c$
1	+1	+1	+1	8,4	10,4	5,8	8,2
2	-1	-1	+1	4,8	1,4	4,2	3,466
3	-1	+1	-1	5,2	5,4	7,2	5,933
4	+1	-1	-1	7	7,9	4,7	6,533

Обробка результатів проводилася згідно методики наведеною в [4]. Було визначено рівняння регресії та перевірені коефіцієнти рівняння на значущість. В остаточному вигляді рівняння регресії зі ступенем достовірності 0,95 має вигляд, %:

$$y = 6,033 + 1,333x_1 + 1,033x_2 \quad (3)$$

$$\text{де } x_1 = \frac{p - 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}}{0,1 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}}, \quad x_2 = \frac{c - 0,3 \text{ мг/л}}{0,2 \text{ мг/л}}$$

Аналогічні дослідження проведені для регенерації в пульсаційному режимі. План експерименту представлений в таблиці 3.

Таблиця 3 – План дрібнофакторного експерименту  $2^{3-1}$  для пульсаційного режиму

Незалежні змінні	Позначення	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		верхній	основний	нижній	
Число циклів тиску	x1	3	5	7	2
T, температура, °C	x2	40	35	30	5
c, концентрація лимонної кислоти в промивному розчині, мг/л	x3	1,0	0,75	0,5	0,25

Матриця планування експерименту для пульсаційного режиму представлена в таблиці 4.

Таблиця 4 – Матриця планування та результати дрібнофакторного експерименту  $2^{3-1}$  для пульсаційного режиму

№	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>c</sub>
1	+1	+1	+1	+1	11,33	10,77	7,092	9,73
2	+1	-1	-1	+1	6,001	1,016	1,58	2,865
3	+1	-1	+1	-1	15,23	20,13	7,096	14,152
4	+1	+1	-1	-1	11,72	8,483	13,775	11,33

Отримане рівняння регресії зі ступенем достовірності 0,9 має вигляд, %:

$$y = 9,519 + 2,423x_2 - 3,221x_3 \quad (4)$$

$$\text{де } x_2 = \frac{t - 35^\circ\text{C}}{5^\circ\text{C}}, \quad x_3 = \frac{c - 0,75\text{мг/л}}{0,25\text{мг/л}}$$

Встановленні регресійні залежності, які описують вплив на ефективність регенерації забруднених рулонованих модулів.

#### Висновки

Для пульсаційного режиму спостерігається більші значення поточного коефіцієнту підвищення продуктивності, зокрема при нульовому рівні значущих параметрів в рівняннях (3) та (4) для пульсаційного режиму величина даного коефіцієнта більша в 1,578 рази більший, порівняно з режимом промивання під розрідженням. Отже пульсаційний режим дозволяє інтенсифікувати процес регенерації мембранних модулів. При промиванні під розрідженням незначним параметром виявилася температура, а при пульсаційному режимі – число циклів пульсацій, тому ці параметри доцільно обирати з врахуванням специфіки забруднення конкретного модуля. Максимальна ефективність в обох випадках досягалася при концентрації 0,5 мг/л. Одержані результати дозволяють висунути припущення про наявність екстремумів в залежності поточного коефіцієнта підвищення продуктивності від концентрації лимонної кислоти в промивному розчині, яке потребує додаткової експериментальної перевірки.

#### Література

1. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. — М.: Мир, 1999. — 513 с.
2. Vrouwenvelder H. Biofouling of spiral wound membrane systems. PhD thesis Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2009.
3. Корнієнко Я.М. Оцінка ефективності відновлення властивостей рулонованих мембранних модулів з використанням гідродинамічної кавітації / Корнієнко Я.М., Гулієнко С.В // Наукові парці ОНАХТ. Випуск 41. Т.1 с. 142-147
4. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. М., Высшая школа, 1978. 319 с.