

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



**ГУЛІЄНКО СЕРГІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ**

УДК 66.081.63

**ПРОЦЕС РЕГЕНЕРАЦІЇ РУЛОНОВАНИХ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ**

05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор  
**Корнієнко Ярослав Микитович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри машин та апаратів хімічних і  
нафтопереробних виробництв

**Офіційні опоненти**

доктор технічних наук, професор  
**Нагурський Олег Антонович**,  
Національний університет "Львівська політехніка",  
завідувач кафедри цивільної безпеки

кандидат технічних наук, доцент  
**Змієвський Юрій Григорович**,  
Національний університет харчових технологій,  
доцент кафедри технологічного обладнання та  
комп'ютерних технологій проектування

Захист відбудеться «25» жовтня 2016 року о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, Київ, проспект перемоги 37, корпус 19, аудиторія 201/1.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, Київ, проспект Перемоги 37.

Автореферат розісланий «   » \_\_\_\_\_ 2016 року

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 26.002.05



О.І. Іваненко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### **Актуальність теми.**

В сучасних умовах при застосуванні баромембранних технологій підготовки питної та технологічної води виникають суттєві проблеми з регенерацією мембран. Утворений осад внаслідок концентраційної поляризації при робочих тисках більше 0,6 МПа має щільну структуру з мікрочастинками мінеральних речовин, на поверхні яких може утворюватися плівка з гумінових та інших органічних речовин. В цьому випадку швидкість масообміну при розчиненні осаду визначається молекулярною дифузійною перенесення речовини від твердого тіла до рідкого середовища, а також доступною поверхнею масообміну. Особливо гостро ця проблема стоїть при регенерації рулонованих мембранних модулів для зворотного осмосу та нанофільтрації, в яких робоча висота напірного каналу менша 1 мм.

На практиці застосовується очищення мембран при втраті їх продуктивності на 10–15%. Вказані конструктивні особливості мембранного модуля зумовлюють рух промивного розчину тільки в ламінарному режимі навіть при робочих тисках 0,4 МПа. Тому очищення мембран проводиться із застосуванням високоактивних хімічних розчинників протягом тривалого часу, що має негативний вплив на пористу структуру мембрани і погіршує її роздільні та фізико-механічні властивості. Окрім того, виникає проблема з утилізацією утворених промивних розчинів.

Тому розробка ефективного екологічно безпечного способу видалення осаду з рулонованих мембранних модулів без втрат функціональних та фізико-механічних властивостей є актуальною.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до плану наукової роботи кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» та ініціативної теми № IXФ-2-2010 «Теоретичні та експериментальні дослідження тепломасообмінних процесів хімічної, нафтохімічної, біохімічної та суміжної технології з метою розробки енергоресурсоощадного та екологічно безпечного обладнання» (номер Державної реєстрації 0110U007616).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є встановлення закономірностей масообміну при видаленні осаду з робочої поверхні мембран, утвореного внаслідок концентраційної поляризації, зі збереженням функціональних та фізико-механічних властивостей та розроблення ефективного процесу регенерації рулонованих мембранних модулів із застосуванням екологічно безпечних промивних розчинів.

Для досягнення поставленої мети сформульовані задачі дослідження:

- обґрунтувати фізичну модель ефективного процесу видалення осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на поверхні мембрани, при регенерації відпрацьованих рулонованих мембранних модулів із застосуванням екологічно безпечних промивних розчинів;
- скласти математичну модель процесів масообміну в стиснених умовах при видаленні осаду в рулонованих мембранних модулях;

- розробити методику експериментальних досліджень та створити експериментальні установки для реалізації процесу вилучення осаду за запропонованою моделлю;
- експериментально визначити вплив гідродинамічних режимів руху рідини, тиску та температури на ефективність процесу вилучення осаду в рулонованих мембранних модулях;
- обґрунтувати критеріальну залежність для визначення коефіцієнту перенесення при вилученні осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на робочій поверхні мембрани;
- скласти методику проведення експериментальних досліджень процесу видалення осаду із застосуванням температурної кавітації з поверхні зворотноосмотичних і нанофільтраційних рулонованих мембранних модулів та розробити промивну камеру;
- провести узагальнення результатів експериментів процесу масообміну при видаленні осаду з робочої поверхні мембран;
- визначити вплив технологічних параметрів на процес масообміну при температурній кавітації та сформулювати умови його інтенсифікації;
- розробити методику тестової оцінки ефективності процесу регенерації зворотноосмотичних та нанофільтраційних рулонованих модулів;
- визначити ефективність відновлення функціональних властивостей зворотноосмотичних і нанофільтраційних рулонованих мембранних модулів при зниженні їх продуктивності до 40%, що в 2 рази перевищує прийнятий поріг;
- запропонувати технічні пропозиції щодо модернізації конструкції корпусу мембранного апарата з метою проведення процесу регенерації рулонованих мембранних модулів без їх вилучення з технологічної схеми;
- обґрунтувати методику та алгоритм розрахунку тривалості процесу регенерації та забезпечення заданого ступеня відновлення продуктивності зворотноосмотичних та нанофільтраційних рулонованих мембранних модулів.

*Об'єкт дослідження* – процеси перенесення в системі рідина – тверде тіло.

*Предмет дослідження* – кінетика процесу видалення осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на поверхні мембрани в стиснених умовах.

**Методи дослідження.** Системні теоретико-експериментальні дослідження, фізичне та математичне моделювання процесів, фізико-хімічні аналізи, оцінка кількісних та якісних параметрів процесу.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- науково обґрунтовані підходи щодо видалення осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на робочій поверхні зворотноосмотичних та нанофільтраційних мембранних модулів, що забезпечують відновлення продуктивності без порушення їх розділювальної здатності та фізико-механічних властивостей;
- експериментально визначено, що застосування температурної кавітації сприяє підвищенню інтенсивності процесу видалення осаду з поверхні рулонованих мембранних модулів при застосуванні в якості промивних розчинів знесоленої води, розчинів лимонної кислоти (до 5 мг/дм<sup>3</sup>) та гідрокарбонату натрію (до 5 мг/дм<sup>3</sup>);

- вперше експериментально визначені параметри енергоефективного процесу масообміну при регенерації зворотноосмотичних і нанофільтраційних рулонованих мембранних модулів;
- встановлено вплив технологічних параметрів на ефективність масообміну при видаленні осаду із застосуванням температурної кавітації та обґрунтовано способи інтенсифікації процесу шляхом пульсаційного режиму зміни робочого тиску від тиску насичення до двократного збільшення значення цього параметра;
- розповсюджено рівняння кінетики процесу масообміну в системі рідина - тверде тіло при стиснених умовах проведення процесу.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

- сформульовані технологічні засади проведення процесу регенерації зворотноосмотичних та нанофільтраційних рулонованих мембранних модулів із застосуванням температурної кавітації;
- розроблені рекомендації щодо застосування запропонованої методики регенерації забруднених рулонованих мембранних модулів при робочому абсолютному тиску 0,005-0,009 МПа та температурах 45 °С;
- встановлені найбільш раціональні параметри проведення процесу регенерації за запропованою методикою, зокрема, приведений критерій Рейнольдса в межах 15-25 при використанні в якості промивної рідини знесоленої води;
- результати досліджень покладені в основу алгоритму розрахунку тривалості регенерації зворотноосмотичних та нанофільтраційних мембран, що використовуються для отримання води заданої якості;
- розроблена конструкція корпусу мембранного апарата для зворотного осмосу та нанофільтрації для проведення процесу регенерації без вилучення мембранного модуля;
- запропоновано спосіб регенерації, який дозволяє відновити продуктивність на 90-95% без втрат функціональних властивостей (патент України на корисну модель №99184 МПК (2015.01) B01D 61/00, опубл. 25.05.2015, Бюл. №10);
- результати роботи впроваджені на ТОВ ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів» (м. Чернівці), ТОВ «Лакі-Фарма» (м. Київ) та в навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

**Особистий внесок здобувача** полягає в аналізі джерел літератури щодо процесів утворення осадів на поверхні мембран та їх природи, а також методів усунення їх наслідків, та закономірностей масообміну в системі рідина–тверде тіло, та формулюванні науково-технічної проблеми; розробці математичної моделі та виборі методів її розв’язання, аналізі результатів математичного моделювання та визначенні найбільш раціональних режимів проведення процесу регенерації; обґрунтуванні критерію оцінки ефективності регенерації; розробці методики проведення експериментальних досліджень, проведенні експериментальних

досліджень та узагальненні їх результатів, визначенні коефіцієнтів в критеріальному рівнянні; обробці отриманих результатів та їх аналізі; формулюванні основних положень та висновків; розроблені рекомендацій щодо практичного застосування результатів, розробці технологічних схем.

Формулювання фізичної моделі процесу, аналіз результатів досліджень здійснено спільно з науковим керівником д.т.н., проф. Я. М. Корнієнком.

#### **Апробація результатів досліджень.**

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (Київ, Україна, 2011), II міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» (Київ, Україна, 2012), 79 міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті» (Київ, Україна, 2013), V міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» (Київ, Україна, 2013), міжнародній науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії» (Київ, Україна, 2014), II Україно-Польській науковій конференції «Мембранні та сорбційні процеси та технології» (Київ, Україна, 2015).

**Публікації.** 16 друкованих праць, з них 7 статей у фахових виданнях, з яких 1 стаття у виданні України, що входить до наукометричних баз, та 1 стаття у закордонному виданні, 1 патент України на корисну модель, 8 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел літератури і додатків. Загальний обсяг складає 214 сторінок. Обсяг основного тексту становить 138 сторінок, з яких площа 8 сторінок повністю зайнята таблицями і рисунками. Робота містить 15 таблиць і 54 рисунків, список використаних джерел літератури складається із 181 найменування.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, визначено зв'язок з науковими програмами, планами, сформульована мета та задачі досліджень, наведені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора та апробацію результатів досліджень.

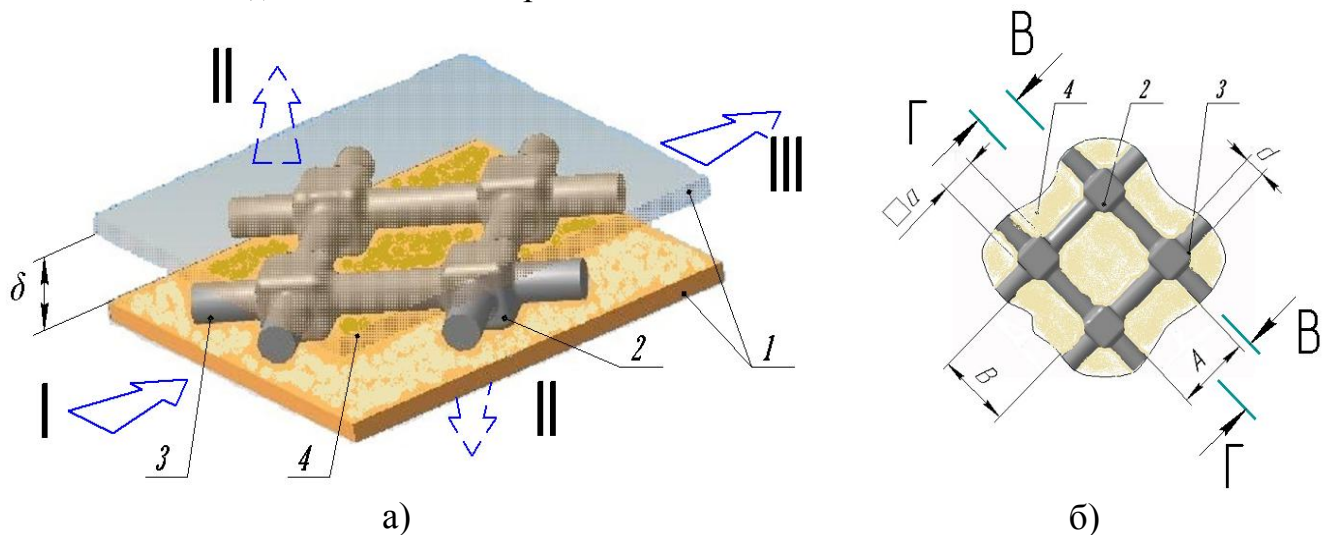
**У першому розділі** проаналізовано сучасний стан водних ресурсів та роль мембранних процесів, зокрема, зворотного осмосу та нанофільтрації у підготовці питної та технологічної води. Розглянуто проблеми розвитку мембранних процесів, зокрема поляризаційні явища та утворення осадів на поверхні мембран і, особливо, рулонованих мембранних модулів. Проведений аналіз процесу масообміну в системі рідина-тверде тіло та методи його інтенсифікації.

Дослідженням мембранних процесів, поляризаційних явищ та вилученням забруднень присвячені роботи таких відомих вчених: Mulder M, Loeb S.,

Soltanieh M., Gill W., Matsuura T., Kimura S., Van der Bruggen B., Zydney A., Vrouwenvelder J.S., Tarabara V., Первов А. Г., Гончарук В.В., Кучерук Д.Д., Вакулюк П.В., Мітченко Т.Є. та інших. Вагомий внесок у вивчення закономірностей масообміну за участі твердої фази внесли Аксельруд Г. А., Кафаров В.В., Гумницький Я.М., Вітенько Т.М., Petrescu S., Elperin T., Kannan A.

За результатами огляду джерел літератури сформульовано мету та задачі досліджень.

У другому розділі сформульована фізична модель процесу вилучення осаду як дифузійно-контрольованого процесу, в якому маса переноситься від твердої фази (шару осаду) до рідкої (ядро потоку промивного розчину). Процес відбувається в напірному каналі рулонованого мембранного модуля, який сформований двома витками рулону та сіткою-сепаратором між ними (для побутових мембран типу TFC-75  $\delta=0,35$  мм), як показано на рис. 1.



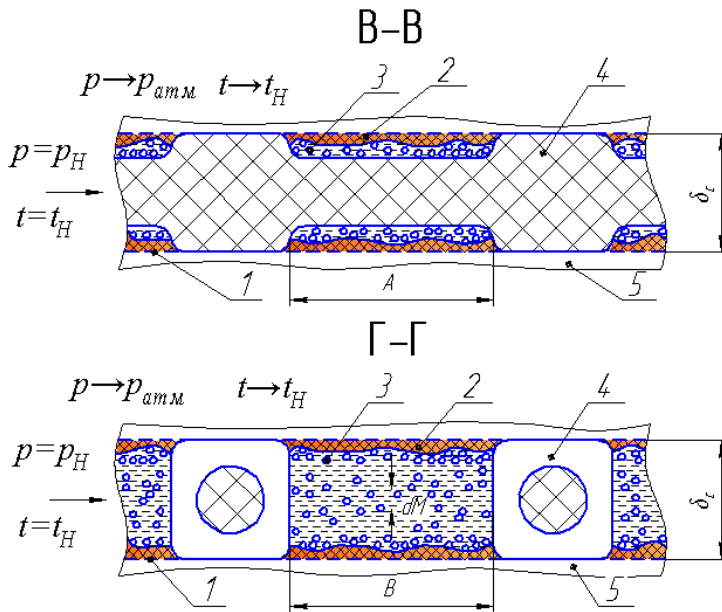
1 – мембрана; 2 – вузол сітки-сепаратора ( $\delta = 0,35$  мм);

3 – ланки сітки сепаратора ( $d = 0,2$  мм); 4 – осад, утворений на поверхні мембрани;

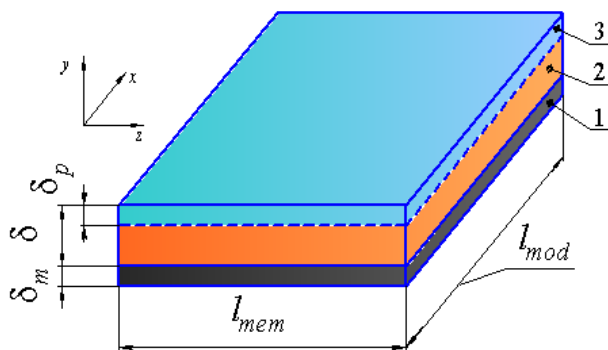
I – потік розділюваного розчину; II – потік пермеату; III – потік ретентату

Рисунок 1 – Схема робочого каналу мембранного модуля (а) та комірка сітки-сепаратора (б) ( $A = B = 0,6$  мм,  $\delta = 0,35$  мм)

На початку процесу вилучення на поверхні твердої речовини формується дифузійний підшар, в якому концентрація розчиненої речовини шару забруднень дорівнює рівноважній і зосереджений основний опір дифузійному перенесенню маси. Для зменшення опору дифузійного підшару було запропоновано знизити абсолютний тиск у системі до рівня, при якому промивний розчин починає кипіти при температурі нижче  $45$  °С. В цьому випадку в ядрі потоку і на поверхні осаду утворюються бульбашки пари, а в потоці промивного розчину буде утворюватися кавітаційний ефект, що зумовлює інтенсивне перемішування в дифузійному підшарі і ядрі потоку та спричинює колоїдне подрібнення поверхневого шару осаду.



1 – мембрана; 2 – шар осаду; 3 – бульбашки пари;  
4 – сітка-сепаратор; 5 – дренажний канал  
Рисунок 2 – Схема масообміну при температурній кавітації в крайньому (В-В) і середньому (Г-Г) перерізах комірки сітки сепаратора



1 – мембрана; 2 – залишковий шар осаду; 3 – шар осаду, що вилучається  
Рисунок 3 – Схема зміни товщини шару осаду на поверхні мембрани при видаленні осаду за умов температурної кавітації

Це забезпечить оновлення поверхні масообміну та інтенсифікацію процесу перенесення речовини за рахунок розчинення і диспергування твердої фази (рис. 2).

Враховуючи геометричні розміри сітки сепаратора, розрахунковий розмір частинок, що переносяться в промивний розчин, не перевищує 50 мкм.

В основу математичної моделі покладено припущення, що осад утворений на робочій поверхні мембран повинен бути вилучений промивною рідиною за рахунок розчинення та диспергування твердої фази внаслідок дії температурної кавітації.

При розгляді течії рідини в каналах мембранного модуля, рулонований модуль умовно розгортався в площину, що дозволяло використовувати Декартову систему координат (рис. 3).

Час повного видалення осаду масою  $M_{\Pi}$  можна визначити при умові:

$$M_{\Pi} - M = 0, \quad (1)$$

де  $M_{\Pi}$  – початкова маса осаду, кг;  $M$  – маса видаленого осаду, кг.  
Маса видаленого осаду визначається з кінетичного рівняння:

$$dM = K(C^p - C_1)Fdt, \quad (2)$$



де  $d\tau$  – тривалість процесу видалення осаду, с;  $K$  – коефіцієнт перенесення маси, який враховує перенесення як за рахунок розчинення, так і за рахунок диспергування, м/с;  $C^p$  – рівноважна концентрація видалених речовин осаду в промивному розчині, кг/м<sup>3</sup>;  $C_1$  – середня концентрація розчинених речовин осаду в розчині, кг/м<sup>3</sup>;  $F$  – площа поверхні осаду (приймається рівною площі поверхні мембрани), м<sup>2</sup>.

Відповідно до прийнятої фізичної моделі, розглядаємо шар осаду, товщиною  $\delta_c$ , який рівномірно розподілений на поверхні мембрани, товщиною  $\delta_m$  (рис. 3).

Враховуючи, що розміри мембранного полотна постійні і площа поверхні мембран у модулі також буде постійна, тому припускаємо, що площа поверхні осаду дорівнює площі поверхні мембран. Тоді зменшення маси осаду визначається зменшенням товщини шару осаду на величину  $\delta_p$  (рис. 3):

$$M = \rho \cdot F \cdot \delta_p (1 - \varepsilon_0), \quad (3)$$

де  $\varepsilon_0$  – відносний об'єм порожнин в шарі осаду.

Приймаємо, що процес протікає ізотермічно, тоді концентрація речовини в потоці промивного розчину може бути виражене:

$$C_1 = C_0 + \frac{M_{\Pi}}{V} \left( 1 - \frac{M_{\Pi} - M}{M_{\Pi}} \right). \quad (4)$$

де  $C_0$  – початкова концентрація матеріалу осаду в промивному розчині, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – об'єм промивного розчину, що циркулює в системі, м<sup>3</sup>.

Підставивши рівняння (4) в рівняння (2), знайдемо остаточний вигляд кінетичного рівняння:

$$dM = K \left( C^p - C_0 - \frac{M_{\Pi}}{V} \left( 1 - \frac{M_{\Pi} - M}{M_{\Pi}} \right) \right) F d\tau. \quad (5)$$

Початкові умови:

$$M = 0 \text{ при } \tau = 0. \quad (6)$$

Розв'язання рівняння (5) за початкових умов (6) дозволяє визначати час перенесення заданої маси осаду. При цьому необхідно експериментально визначити коефіцієнт перенесення маси  $K$ . Відповідно до прийнятої фізичної моделі з метою встановлення виду рівняння для розрахунку коефіцієнтів перенесення маси при видаленні осаду, розглянуто модель масообміну в системі рідина – тверде тіло у стиснених умовах в напірному каналі мембранного модуля. Запропонована модель включає рівняння збереження маси, систему рівнянь Нав'є–Стокса та рівняння нерозривності. Після спрощень з урахуванням припущень фізичної моделі, остаточно отримуємо:

$$\begin{aligned}
W_x \frac{\partial C}{\partial x} + W_y \frac{\partial C}{\partial y} &= D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right); \\
W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_x}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \left( \frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} \right); \\
W_x \frac{\partial W_y}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_y}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \nu \left( \frac{\partial^2 W_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_y}{\partial y^2} \right); \\
\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} &= 0.
\end{aligned} \tag{7}$$

При граничних умовах:

$$\begin{cases}
C = C_o \text{ при } x = 0; \\
-D \frac{\partial C}{\partial y} = K(C^p - C) \text{ при } y = 0 \text{ та } y = \delta_c; \\
W_x = W_y = W_0 \text{ при } x = 0; \\
W_x = W_y = 0 \text{ при } y = 0 \text{ та } y = \delta_c.
\end{cases} \tag{8}$$

Розв'язок системи (7) та граничних умов (8) із застосуванням теорії подібності знаходимо у вигляді:

$$\text{Sh} = A \text{Re}^n \text{Sc}^m \left( \frac{d_e}{L} \right)^p, \tag{9}$$

де  $d_e$  – еквівалентний діаметр напірного каналу мембранного модуля, м;  
 $L$  – довжина каналу, м.

Коефіцієнт  $A$  та показники степенів  $n$ ,  $m$  та  $p$  необхідно визначити експериментально.

В якості оцінки ефективності видалення осаду з робочої поверхні мембрани запропоновано коефіцієнт регенерації:

$$\Psi = \frac{J_{i+1} - J_i}{J_i} = \frac{J_{i+1}}{J_i} - 1, \tag{10}$$

де  $J_i$  – потік речовини через мембрану до регенерації,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $J_{i+1}$  – потік речовини через мембрану після регенерації,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Потік речовини через мембрану визначаємо на основі моделі осмотичного тиску:

$$J = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\mu(R_m + \alpha \delta)}, \tag{11}$$

де  $J$  – питомий потік речовини через мембрану,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $\Delta p$  – робочий перепад тиску, Па;  $\Delta \pi$  – різниця осмотичних тисків, Па;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;  $R_m$  – опір мембрани,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\alpha$  – питомий опір шару осаду,  $\text{м}^{-2}$ ;  $\delta$  – товщина шару осаду.

Після підстановки рівняння (11) в рівняння (10) отримуємо:

$$\psi = \frac{\alpha(\delta_i - \delta_{i+1})}{R_m + \alpha\delta_{i+1}}. \quad (12)$$

Після математичних перетворень отримуємо рівняння для розрахунку коефіцієнта регенерації:

$$\psi = \frac{\alpha K(C^p - C_1)F\tau}{R_m \rho F(1 - \varepsilon_0) + \alpha(M_{\Pi} - K(C^p - C_1)F\tau)}. \quad (13)$$

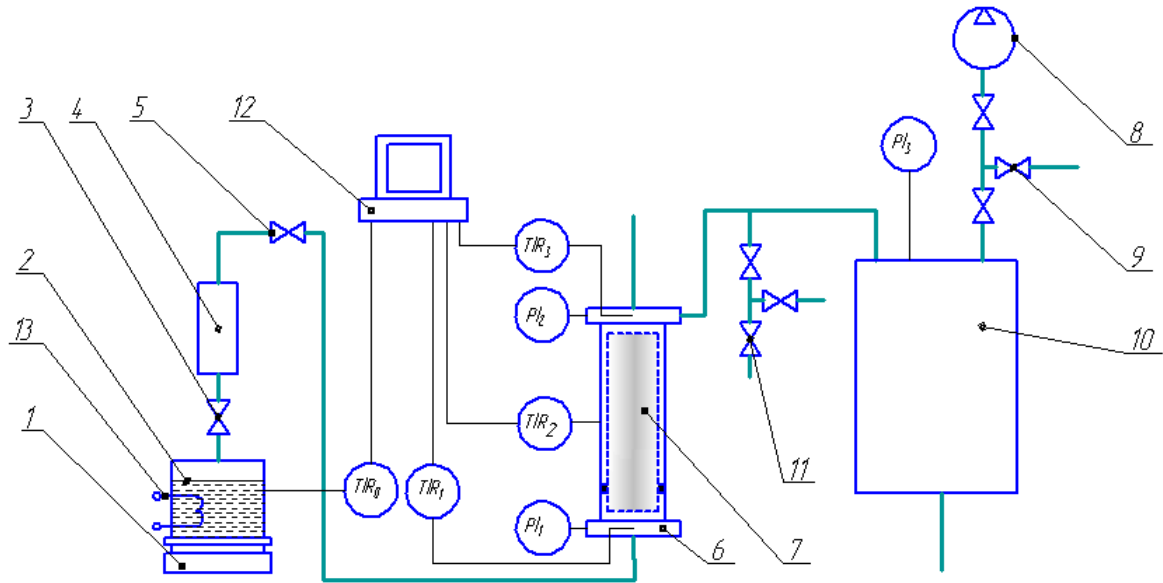
Рівняння (13) дозволяє розрахувати продуктивність мембрани після регенерації.

**Третій розділ** присвячений експериментальному дослідженню процесу масообміну в стіснених умовах при видаленні осаду з робочої поверхні рулонованих мембранних модулів при застосуванні температурної кавітації. Для дослідження використовувалися зворотноосмотичні (MICROFILTER TFC-75, FS-TFC 1812-50, CSM RE-1812-50 GPD та USTM M-1261-75G) та нанофільтраційні (Владіпор ОПМН – П) модулі, які забруднені в реальних робочих умовах при зменшенні продуктивності по пермеату до 20-50%, а також модулі, забруднені модельними осадами NaCl та FeCl<sub>3</sub>. В якості промивного розчину використовувалася знесолена вода (загальний солевміст  $10 \pm 3$  мг/дм<sup>3</sup>) та розчини лимонної кислоти (5 г/дм<sup>3</sup>). В окремих випадках використовувався розчин гідрокарбонату натрію (5 г/дм<sup>3</sup>).

Промивання проводилося при температурі 45 °С і залишковому тиску 0,007-0,009 МПа, що відповідає умовам температурної кавітації, на експериментальній установці, представлений на рис. 4.

До промивної камери 6 (рис. 4) встановлювався мембранний модуль 7, де за допомогою вакуум-насоса 8 створювався заданий тиск насичення і подавався промивний розчин із заданою температурою. Наявність режиму кавітації визначалася при тиску насичення  $p_{\text{н}} = 0,005-0,009$  МПа та стабілізації температури промивного розчину на рівні 45 °С, яка вимірювалася за допомогою термопар встановлених на вході та виході в промивну камеру 6, та інформаційно-вимірювального комплексу IndexTem з інтервалом 1 с. Розрідження в промивній камері 6 вимірювалося за допомогою вакуумметрів. Масові витрати промивного розчину вимірювалися за допомогою електронних вагів 1. Дослідження проводилися в діапазоні зміни приведенного критерію Рейнольдса в межах [0,4–60], та критерію Шмідта в межах [867–2824].

Узагальнення результатів експериментів представлено у вигляді залежностей  $Sh = f(Re)$  при різних значеннях критерію Шмідта, наведених на рис. 5, 6.



1 – ваги; 2 – ємність з промивним розчином; 3,5 – регулювальні крани;  
 4 – ресивер; 6 – промивна камера; 7 – мембранний модуль; 8 – вакуум-насос;  
 9 – кран з'єднання з атмосферою; 10 – проміжна ємність;  
 11 – відбір проб промивного розчину, 12 – персональний комп'ютер; 13 – нагрівач.  
 Рисунок 4 – Схема експериментальної установки

За результатами експериментів встановлено, що показник степеня при приведеному критерію Рейнольдса становить  $n = 0,84$  та з теоретичних міркувань прийнято значення показника степеня при критерію Шмідта  $m = 0,33$  (рис.7).

Остаточно, критеріальне рівняння (9) набуває вигляду:

$$Sh = 0,394 Re^{0,84} Sc^{0,33} \left( \frac{d_e}{L} \right) \quad (14)$$

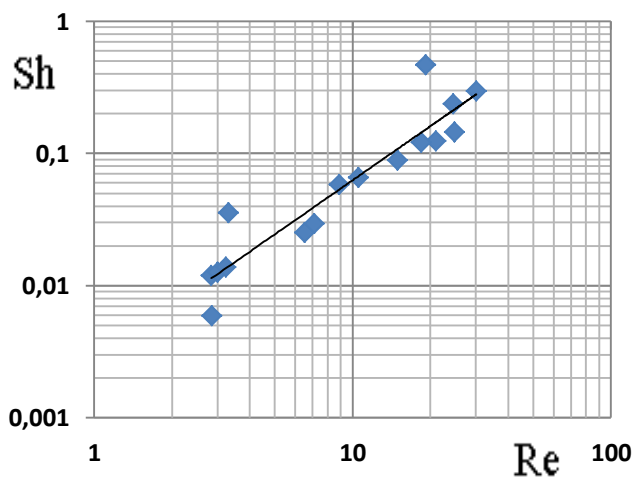


Рисунок 5 – Залежність критерію Шервуда від приведенного критерію Рейнольдса ( $Sc = 1413-1615$ ,  $p = 0,003-0,015$  МПа,  $t = 45^\circ C$ )

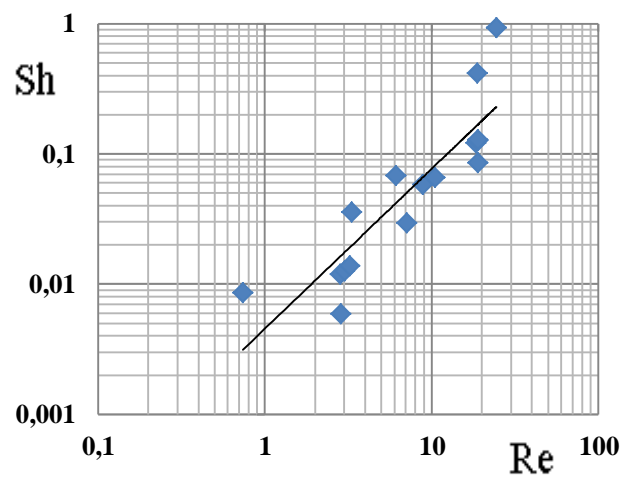


Рисунок 6 – Залежність критерію Шервуда від приведенного критерію Рейнольдса ( $Sc = 1512-1691$ ,  $p = 0,003-0,015$  МПа,  $t = 45^\circ C$ )

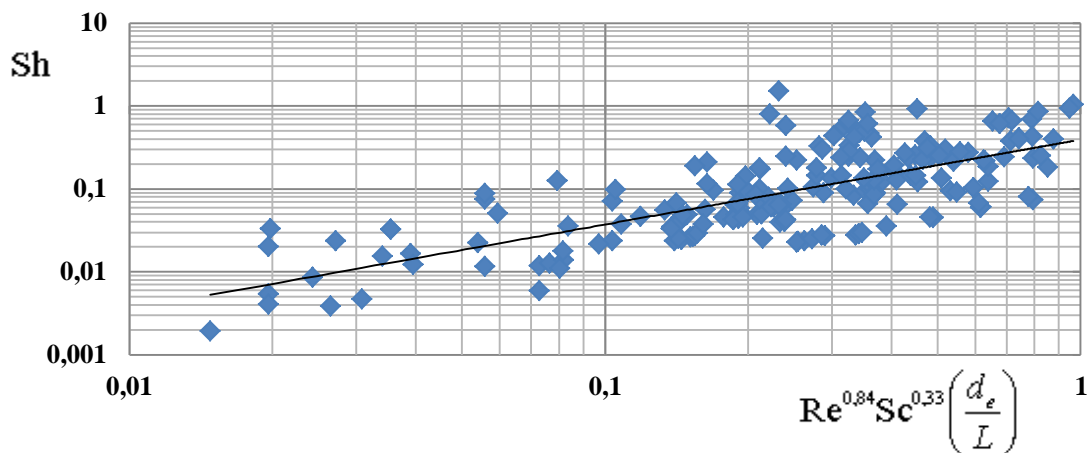


Рисунок 7 – Узагальнена критеріальна залежність ( $p = 0,003\text{--}0,015$  МПа,  $t = 45^\circ\text{C}$ )

Таким чином, рівняння (14) адекватно описує масообмін у стиснених умовах (вибірковий коефіцієнт кореляції  $r^* = 0,729$ ) при видаленні осаду, утвореного внаслідок концентраційної поляризації із застосуванням температурної кавітації ( $p_n = 0,005\text{--}0,009$  МПа;  $t_n = 45^\circ\text{C}$ ) у рулонованих мембранних модулях у діапазоні зміни приведенного числа Рейнольдса  $[0,4\text{--}60]$  для комерційно доступних рулонованих мембранних модулів (MICROFILTER TFC-75, FS-TFC 1812-50, CSM RE-1812-50 GPD та USTM M-1261-75G) для випадку монокомпонентного модельного забруднення (осад  $\text{FeCl}_3$ ) і дозволяє розрахувати час видалення осаду.

При розрахунках маса осаду приймалася рівною  $0,125$  кг, що відповідало вимірним значенням для реальних забруднених модулів, що використовуються в побутових системах очищення води.

Результати розрахунків представлені у вигляді графічних залежностей маси вилученого матеріалу шару осаду та коефіцієнта регенерації від часу (рис. 8, 9) при різних значеннях приведенного критерію Рейнольдса.

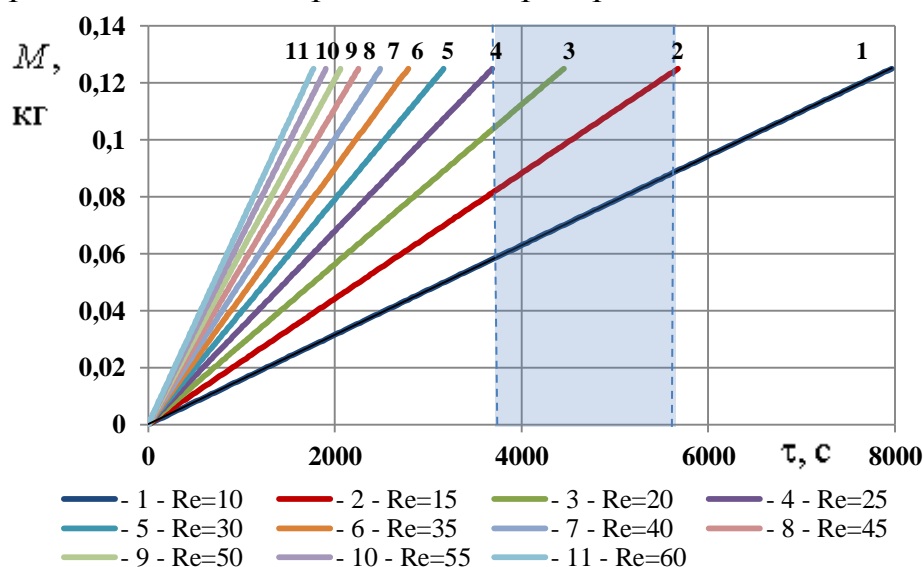


Рисунок 8 – Залежність маси розчиненого матеріалу осаду від часу при різних значеннях приведенного критерію Рейнольдса

Аналіз результатів розрахунків, наведених на рис. 8, 9, дозволяє визначити найбільш раціональний за енерговитратами режим промивання при значеннях приведенного критерію Рейнольдса  $\text{Re} = 15\text{--}25$  (лінії 2-4 на рис. 8 та 9), з розрахунковим часом регенерації  $5800$  с.

У четвертому розділі наведені результати експери-

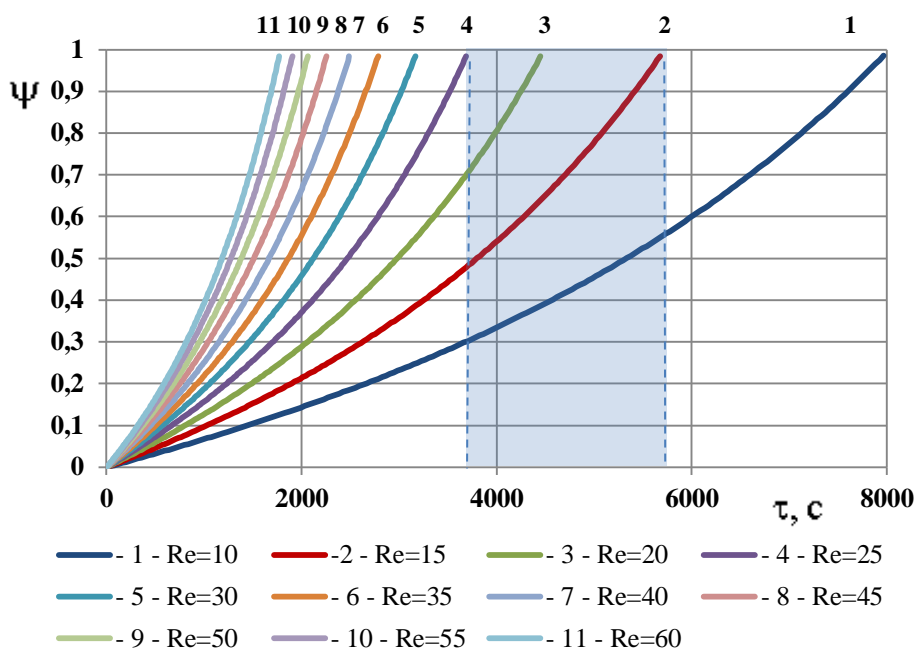


Рисунок 8 – Залежність маси розчиненого матеріалу осаду від часу при різних значеннях приведенного критерію Рейнольдса

Дослідження проводилися з використанням побутових рулонованих зворотноосмотичних (Aquafilter TFC-75, MICROFILTER TFC-75, FS-TFC 1812-50, CSM RE-1812-50 GPD та USTM M-1261-75G) та нанофільтраційних (Владіпор ОПМН – П) модулів після видалення осаду при температурній кавітації. Процес регенерації проводився з використанням в якості промивного розчину знесоленої води та розчинів лимонної кислоти ( $5 \text{ г/дм}^3$ ) та гідрокарбонату натрію (до  $5 \text{ г/дм}^3$ ). Тестування продуктивності проводилося з використанням водопровідної води (з загальним солевмістом  $200 \pm 10 \text{ мг/дм}^3$ ) та знесоленої води (знесоленої води з загальним солевмістом  $10 \pm 3 \text{ мг/дм}^3$ ).

Так, при використанні водопровідної води для тестування селективності та продуктивності мембранного модуля Aquafilter TFC-75 після трьох стадій обробки (перша – знесоленою водою (загальний солевміст  $10 \pm 3 \text{ мг/дм}^3$ ); друга – розчином лимонної кислоти ( $5 \text{ г/дм}^3$ ) та гідрокарбонату натрію; третя – розчином гідрокарбонату натрію ( $5 \text{ г/дм}^3$ )) впродовж 900 с спостерігається зростання потоку в межах 8–15% ( $\psi = 0,08-0,15$ ) без зменшення коефіцієнта розділення (рис. 11, 12). Такий характер спостерігається для як мембранних модулів, які забруднені в реальних робочих умовах, так і для штучно забруднених в лабораторних умовах.

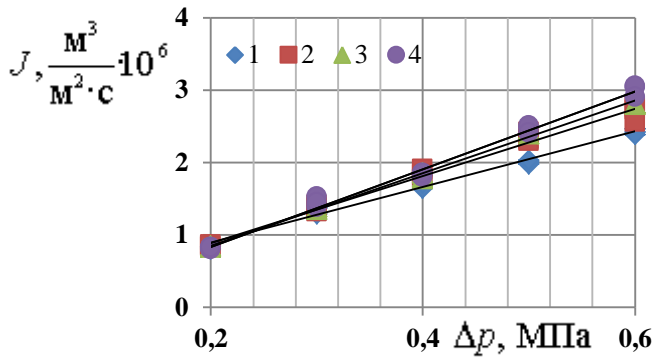
У випадку модельного забруднення було досягнуто відновлення продуктивності за пермеатом до 95% від початкового значення (рис. 13) і коефіцієнт розділення не змінювався (рис. 14), тобто внаслідок регенерації функціональні та фізико-механічні властивості мембрани практично не змінилися.

ментальних досліджень ефективності процесу регенерації.

Ефективність оцінювалася за величиною коефіцієнта регенерації  $\psi$  (рівняння 10) та коефіцієнта розділення  $R$ :

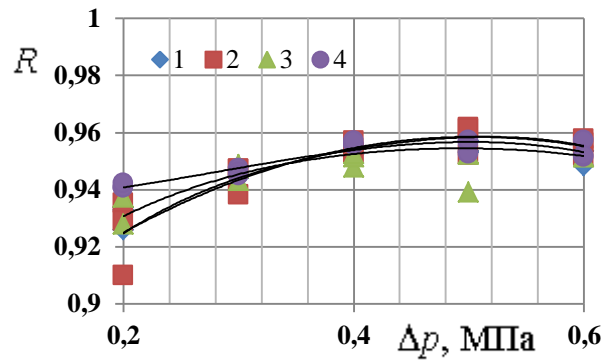
$$R=1-C_p/C_f \quad (15)$$

де  $C_p$  – концентрація розчинених речовин у пермеаті,  $\text{мг/дм}^3$ ;  $C_f$  – концентрація розчинених речовин у початковому розчині,  $\text{мг/дм}^3$ .



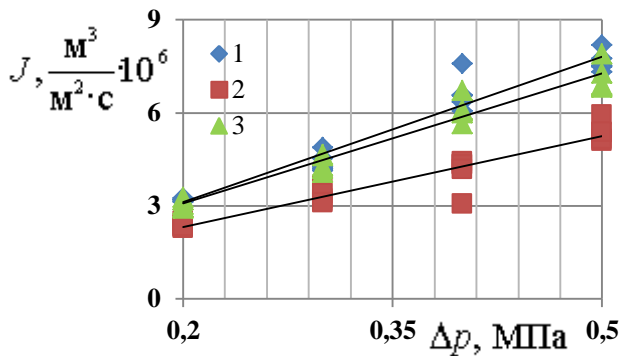
1 – потік до регенерації; 2 – потік після першої стадії обробки; 3 – потік після другої стадії обробки; 4 – потік після третьої стадії обробки

Рисунок 11 – Потік пермеату мембранного модуля Aquafilter TFC-75



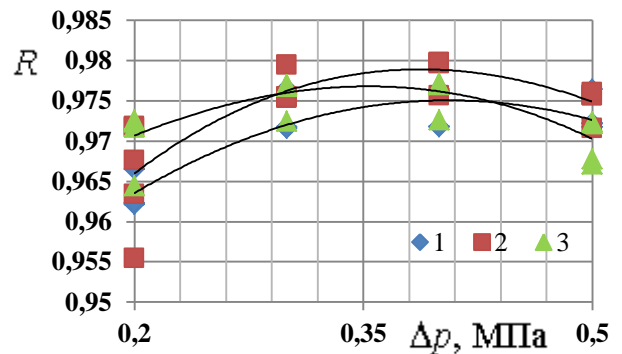
1 – селективність до регенерації; 2 – селективність першої стадії обробки; 3 – селективність після другої стадії обробки; 4 – селективність після третьої стадії обробки

Рисунок 12 – Коефіцієнт розділення (селективність) мембранного модуля Aquafilter TFC-75



1 – потік чистої мембрани; 2 – потік після забруднення; 3 – потік після регенерації

Рисунок 13 – Потік пермеату мембранного модуля Microfilter TFC TW30-1812-50



1 – селективність чистої мембрани; 2 – селективність після забруднення; 3 – селективність після регенерації

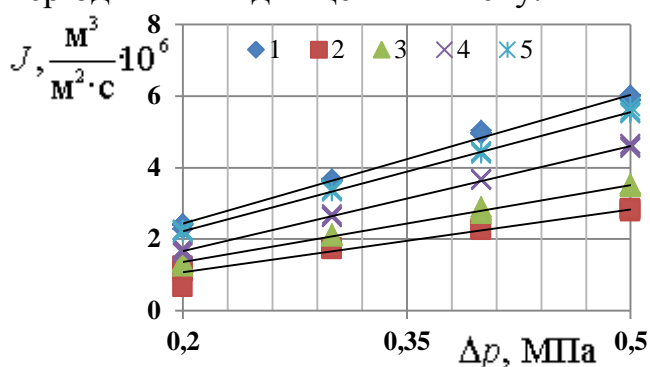
Рисунок 14 – Коефіцієнта розділення (селективність) мембранного модуля Microfilter TFC TW30-1812-50

Подальші дослідження проводилися з використанням в якості тестового розчину знесоленої води. В такому випадку осмотичний тиск розчину прямує до нуля, а отже впливом поляризаційних явищ на опір перенесенню речовини через мембрану можна знехтувати. Тоді потік пермеату визначатиметься тільки опором мембрани та опором шару осаду. Оскільки діапазонах тисків, що розглядаються, опір мембрани суттєво не змінюється, зміна величини потоку пермеату буде обумовлюватися зміною опору шару осаду. Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 15-16. Штучно забруднений осадом  $\text{FeCl}_3$  мембранний модуль USTM M-1261-75G підлягав трьом циклам регенерації з використанням в якості промивного розчину знесоленої води та розчину лимонної кислоти (концентрація  $5 \text{ г/дм}^3$ ). Тривалість регенерації становила 1800 секунд.

Результати експериментів (рис. 16) показують, що загальний опір перенесенню залишався практично постійним (відхилення від середнього значення не перевищують 15%). Це підтверджує, що зростання продуктивності після регенерації обумовлене зменшенням опору шару осаду.

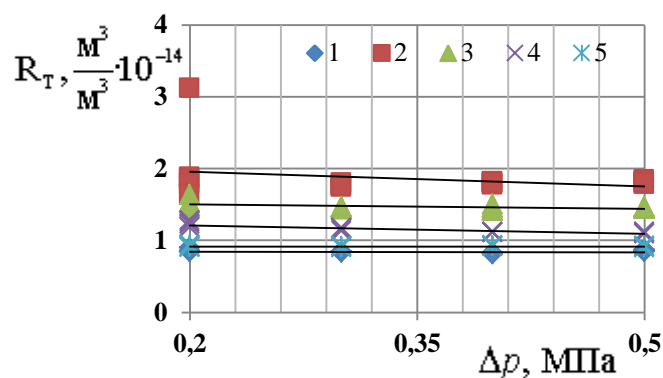
Таким чином, результати експериментальних досліджень підтверджують ефективність запропонованого методу видалення осаду утвореного внаслідок концентраційної поляризації для нанофільтраційних та зворотноосмотичних рулонованих мембранних модулів.

У випадку інтенсивного пароутворення бульбашки пари можуть блокувати поверхню твердої фази і створювати додатковий опір перенесенню маси. Для інтенсифікації процесу регенерації було запропоновано проводити процес з періодичним підвищенням тиску.



1 – потік чистої мембрани; 2 – потік після забруднення; 3 – потік після першого циклу регенерації (промивний розчин – знесолена вода); 4 – потік після другого циклу регенерації (промивний розчин – розчин лимонної кислоти, 5 г/дм<sup>3</sup>); 5 – потік після третього циклу регенерації (промивний розчин – знесолена вода)

Рисунок 15– Потік пермеату мембранного модуля USTM M-1261-75G



1 – опір чистої мембрани; 2 – опір після забруднення; 3 – опір після першого циклу регенерації (промивний розчин – знесолена вода); 4 – опір після другого циклу регенерації (промивний розчин – розчин лимонної кислоти, 5 г/дм<sup>3</sup>); 5 – опір після третього циклу регенерації (промивний розчин – знесолена вода)

Рисунок 16 – Загальний опір мембранного модуля USTM M-1261-75G

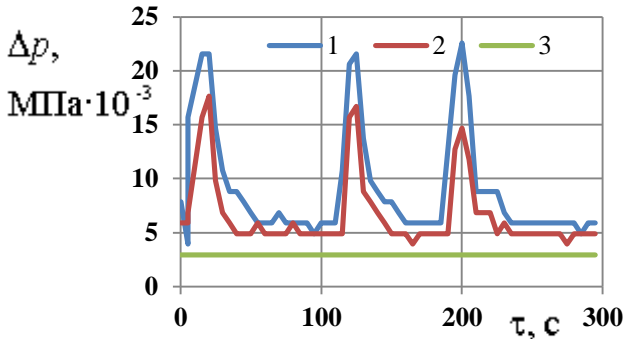
В такому випадку буде відбуватися стискання парових бульбашок і оновлення поверхні масообміну та руйнування поверхні кристалів в осаді з утворенням колоїдних систем. Для перевірки даної гіпотези були проведені експериментальні дослідження з використанням різних мембранних модулів та характеристик періодичності циклів підвищення тиску (рис. 17-18).

Відновлення мембранного модуля Владіпор ОПМН – П здійснювалася в трьох циклах з підвищенням тиску від 0,005 МПа (тиск насичення) до тиску 0,02 МПа при постійній температурі 45 °С з інтервалом між ними 90 с. Загальна тривалість регенерації становила 300 с. Перевірка ефективності регенерації проводилася з використанням в якості тестового розчину водопровідної води. В результаті цього досягнуто збільшення потоку пермеату  $J$  на 14,96% ( $\psi = 0,1496$ ), без зміни



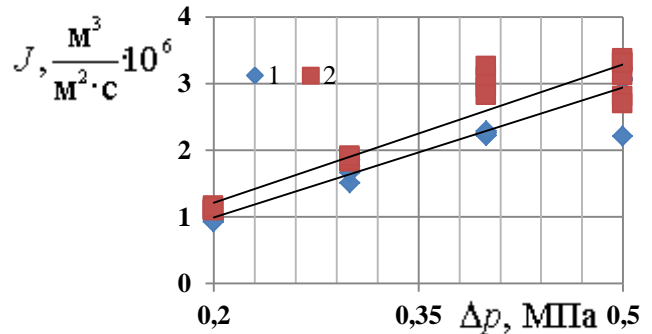
селективності мембрани, що підтверджує ефективність запропонованого способу відновлення рулонованих мембранних модулів.

Для визначення впливу технологічних параметрів на величину коефіцієнта регенерації реалізовано дрібнофакторний експеримент  $\psi = 2^{3-1}$  застосуваннями температурної кавітації та режиму пульсації робочого тиску в промивній камері.



1 – тиск на вході в мембранний модуль; 2 – тиск на виході з мембранного модуля; 3 – тиск в проміжній ємності

Рисунок 17 – Динаміка зміни тиску при регенерації мембранного модуля Владіпор ОПМН – П



1 – потік пермеату до регенерації; 2 – потік пермеату після регенерації з періодичним підвищенням тиску  
Рисунок 18 – Залежність потоку пермеату від робочого тиску мембранного модуля Владіпор ОПМН–П

В першому випадку тиск в промивній камері ( $x_1$ ) змінювався у межах 0,005–0,03 МПа, концентрація лимонної кислоти в промивному розчині ( $x_2$ ) – 0,1–0,5 мг/дм<sup>3</sup>, температура ( $x_3$ ) – 15–45 °С. Дослідження проводилися на мембранах типу Microfilter TFC TW30-1812-50 та Владіпор ОПМН – П. Отримано регресійне рівняння:

$$\psi = 6,033 + 1,333 \cdot x_1 + 1,033 \cdot x_2. \quad (16)$$

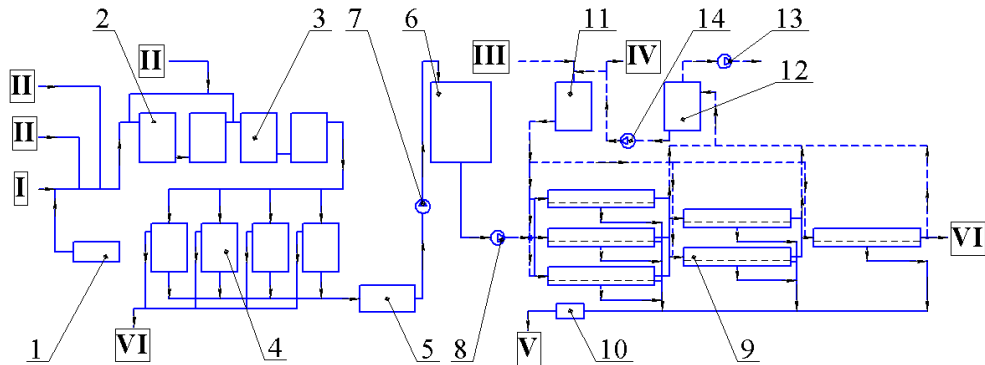
Для випадку регенерації з періодичним підвищенням тиску в межах 0,005–0,02 МПа, для числа циклів пульсацій тиску 4–7 ( $x_1$ ), температур 30–40 °С ( $x_2$ ) та концентрації лимонної кислоти ( $x_3$ ) у межах 0,5–1,0 мг/дм<sup>3</sup> рівняння регресії отримане у вигляді:

$$\psi = 9,519 + 2,423 \cdot x_2 - 3,221 \cdot x_3. \quad (17)$$

Для режиму періодичного підвищення тиску з 0,005 до 0,02 МПа (рисунок 17) спостерігається більші значення коефіцієнта регенерації, зокрема при нульовому рівні значущих параметрів у рівняннях (16) та (17) для випадку періодичного підвищення тиску величина коефіцієнта регенерації збільшилася в 1,6 разів, порівняно з режимом промивання при сталому розрідженні.

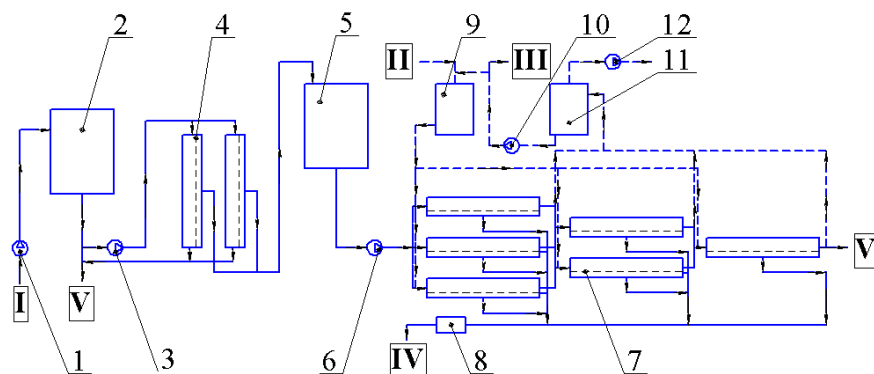
**П'ятий розділ** присвячений практичному використанню результатів досліджень. На основі отриманих результатів запропоновано доповнити існуючі технологічні лінії підготовки води заданої якості контуром регенерації відповідно до розробленої методики з використанням температурної кавітації. Контур регенерації був використаний в найбільш поширених установках, які включають традиційні

методи попередньої обробки, а саме хлорування, коагуляцію і фільтрування, а також мікрофільтраційну попередню обробку (рис. 20 та 21). Контур регенерації дозволяє проводити регенерацію безпосередньо в технологічній лінії.



1 – система хлорування; 2 – ємність дестабілізації; 3 – флокулятор; 4 – фільтр;  
 5 – проміжна ємність; 6 – накипчувальна ємність підготовленої води; 7 – насос;  
 8 – насос високого тиску; 9 – каскад мембранних апаратів; 10 – пост-фільтр;  
 11 – ємність з промивним розчином; 12 – ресивер; 13 – вакуум-насос;  
 14 – циркуляційний насос; I – подача сировини; II – дозування реагентів; III – подача промивного розчину; IV – відведення промивного розчину; V – відведення очищеної води; VI – дренаж

Рисунок 20 – Принципова схема установки зворотноосмотичної підготовки води з традиційною попередньою обробкою, що доповнена блоком регенерації



1 – насос сировини; 2 – збірник сировини; 3 – насос; 4 – мембранні апарати системи попередньої обробки; 5 – збірник підготовленої води; 6 – насос високого тиску; 7 – каскад мембранних апаратів; 8 – пост-фільтр; 9 – ємність з промивним розчином; 10 – циркуляційний насос; 11 – вакуумна ємність; 12 – вакуум-насос; I – подача сировини; II – подача промивного розчину; III – відведення промивного розчину; IV – відведення очищеної води; V – дренаж

Рисунок 21 – Принципова схема установки зворотноосмотичної підготовки води з мембранною (мікрофільтраційною) попередньою обробкою, що доповнена блоком регенерації

В обох схемах сировина після проходження стадій попередньої обробки подається до каскаду мембранних апаратів, де відбувається мембранне розділення, пермеат після проходження пост-фільтра подається на споживання, а ретентат іде на утилізацію або скидається в дренажну систему. При досягненні в окремих апаратах

критичного рівня забруднення дані апарати від'єднуються від подачі сировини, і підключається до контуру регенерації. В окремих випадках мембранний модуль вилучається з апарата і вставляється в спеціальну камеру для проведення інтенсивної регенерації із застосуванням температурної кавітації.

В лінії передбачається встановлення двох потрійних кранів для відключення подачі сировини та введення промивного розчину. Другий потрійний кран встановлюється на лінії ретентату.

За результатами досліджень розроблено методику та алгоритм розрахунку тривалості регенерації та прогнозування продуктивності за пермеатом після регенерації.

Таким чином, застосування запропонованого методу дозволяє продовжити термін служби мембранного модуля на три цикли забруднення та регенерації (тривалість робочого циклу – 18 місяців при зменшенні потоку до 50% з наступним відновленням продуктивності за пермеатом до 90%) зі збереженням функціональних та фізико-механічних властивостей із застосуванням екологічно безпечних промивних розчинів. Вартість регенерації для побутових мембранних модулів типу TFC-75 не перевищує 15% вартості нового модуля.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну задачу створення енергоефективного екологічно безпечного способу регенерації рулонованих зворотноосмотичних і нанофільтраційних мембранних модулів для підготовки питної та технологічної води шляхом застосування температурної кавітації, що зумовлює суттєве збільшення терміну їх роботи без порушення якісних характеристик води. За результатами проведених досліджень зроблено наступні висновки:

1. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано застосування температурної кавітації для регенерації зворотноосмотичних та нанофільтраційних модулів в системах водопідготовки із застосуванням екологічно безпечних промивних розчинів.

2. Експериментально встановлено, що при тиску  $P = 0,005-0,009$  МПа і температурі насичення до 45 °С відбувається ефективно видалення осаду з поверхні мембрани без порушення функціональних властивостей мембран у рулонованих модулях.

3. Узагальнення результатів експериментальних досліджень процесу вилучення осаду в стіснених умовах каналу рулонованого зворотноосмотичного модуля при температурі насичення одержано у вигляді критеріального рівняння для визначення коефіцієнтів перенесення маси.

4. Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що при застосуванні температурної кавітації досягається відновлення продуктивності зворотноосмотичних мембран до 92% від початкової продуктивності при значеннях  $Re = 15-25$  і зменшенні в 1,5 рази тривалості процесу в порівнянні з традиційними способами промивання.

5. Запропонований спосіб дозволяє відновити до 92% питомої продуктивності зворотноосмотичних мембранних модулів типу TFC при зменшенні їх продуктивності до 40%, що в 2 рази перевищує існуючий критичний поріг, при якому можливе ефективне відновлення за існуючими технологіями.

6. Розроблено технологічний блок для регенерації зворотноосмотичних та нанофільтраційних рулонованих мембранних модулів при зменшенні їх питомої продуктивності до 50%.

7. Запропонована модернізація корпусу апарату для зворотноосмотичних рулонованих мембранних модулів, яка забезпечує реалізацію процесів мембранного розділення та регенерації забруднених модулів без вилучення їх з технологічних схем.

8. Розроблена методика та алгоритм розрахунку тривалості процесу регенерації і забезпечення заданого ступеня відновлення продуктивності зворотноосмотичних та нанофільтраційних рулонованих мембранних модулів з визначенням раціональної області проведення процесу.

9. Результати роботи впроваджені на ТОВ ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів» (м. Чернівці), ТОВ «Лакі-Фарма» (м. Київ) та в навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Korniyenko Y. Mathematical model of dissolving inorganic fouling in spiral wound membrane module / Y. Korniyenko, **S. Gulienko** // The Advanced Science Journal. – 2014. — issue 4. – P. 47-50 (Іноземне видання. Входить до наукометричних баз CrossRef, CNKI Scholar, Index Copernicus International, WorldCat OCLC, EBSCO, Mendeley, Google Scholar, BASE, CiteSeerX, PTFS Europe, Japan Link Center).

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування математичної моделі, обґрунтування виду критеріальної залежності.*

2. Korniyenko Y. Mathematical simulation of fouled modules regeneration / Y. Korniyenko, **S. Gulienko**, M. Lialka // Ukrainian Food Journal. – 2015. – Volume 4 – P. 481–493 (Входить до наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus, Directory of Research Journal Indexing, Universal Impact Factor, Global Impact Factor, EBSCO, Ulrichs Web, Cabi Full Text, ERIH PLUS, Directory of Open Access Scholarly Resources, Directory of Open Access Journals).

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування математичної моделі, числовий розв'язок математичної моделі, аналіз та узагальнення результатів розрахунків за математичною моделлю.*

3. Корнієнко Я.М. Фізичне моделювання процесу зворотнього осмосу / Я.М. Корнієнко, Я.М. Заграй, **С.В. Гулієнко** // Наукові праці ОНАХТ. – 2011. – Випуск 39. – Т. 2. – С.91-95.

*Особистий внесок здобувача: формулювання робочої гіпотези розробки математичної моделі.*

4. Корнієнко Я.М. Оцінка ефективності відновлення властивостей рулонованих мембранних модулів з використанням гідродинамічної кавітації / Я.М. Корнієнко, **С.В. Гулієнко** // Наукові парці ОНАХТ. – 2012. – Випуск 41. - Т.1 - С. 142-147.

*Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів експериментів.*

5. Корнієнко Я.М. Фізична модель процесу регенерації рулонованих мембранних модулів / Я.М. Корнієнко, **С.В. Гулієнко** // Наукові парці ОНАХТ. – 2013. - Випуск 43. - Т.1 - С. 65-68.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування фізичної моделі процесу та умов її реалізації.*

6. Корнієнко Я.М. Підвищення ефективності регенерації забруднених рулонованих мембранних модулів / Я.М. Корнієнко, **С.В. Гулієнко**, О.В. Григоренко // Наукові парці ОНАХТ. – 2014. – Випуск 45. - Т.3 - С. 101-104.

*Особистий внесок здобувача: розробка плану дрібнофакторного експерименту та методики проведення експериментів, аналіз та узагальнення результатів.*

7. Корнієнко Я.М. Оцінка ефективності регенерації відпрацьованих рулонованих мембранних модулів / Я.М. Корнієнко, **С.В. Гулієнко**, М.О. Лялька // Наукові парці ОНАХТ. – 2015. - Випуск 47. - Т.1 – С.19-21.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування критерію оцінки ефективності процесу регенерації, виведення розрахункової залежності.*

8. Патент № 99184 Україна МПК(2015.01) B01D 61/00. Спосіб відновлення зворотноосмотичних мембран / Григоренко О.В., **Гулієнко С.В.**, Корнієнко Я.М.; заявл. 17.11.2014.; опубл. 25.05.2015, Бюл. №10/2015.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування технологічних параметрів процесу регенерації.*

9. Корнієнко Я.М. Фізичне моделювання переносу речовини через мембрану / Я.М. Корнієнко, **С.В. Гулієнко** // Екологія. Людина. Суспільство: XIV Міжнародна науково-практична конференція, 18-22 травня 2011 р.: збірник тез доповідей. – Київ, 2011. – С. 51–52.

*Особистий внесок здобувача: формулювання робочої гіпотези фізичної моделі процесу перенесення речовини*

10. Корнієнко Я. М. Перспективи використання гідродинамічної кавітації для відновлення відпрацьованих мембран / Я.М. Корнієнко, **С.В. Гулієнко** // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: II міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 1-4 квітня 2012 р.: збірник тез доповідей. – Київ, 2012. – С. 29-30.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування способу та параметрів процесу регенерації.*

11. **Гулієнко С.В.** Перспективи використання гідродинамічної кавітації для очищення відпрацьованих рулонованих мембранних модулів // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті: 79 міжнародна наукова конференція молодих учених, аспірантів і студентів, 15-16 квітня 2013 р.: програма і матеріали конференції, Ч.2. – Київ, 2013. – С. 106-107.

*Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень.*

12. Григоренко О.В. Перспективи методів очищення мембранних модулів з використанням локального закипання / О.В. Григоренко, С.В. Гулієнко, Я.М. Корнієнко // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: V міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, 20-23 листопада 2013 р: збірник тез доповідей. – Київ, 2013. – С. 50–52.

*Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень.*

13. Корнієнко Я. Явища осадження на поверхні мембран та їх вплив на баромембранні процеси / Я. Корнієнко, С. Гулієнко, М. Лялька // Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії: міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 25-26 листопада 2014 р: матеріали конференції. – Київ, 2014. – С. 20.

*Особистий внесок здобувача: аналіз механізму утворення осадів.*

14. Корнієнко Я. Масообмін при регенерації відпрацьованих рулонованих модулів / Я. Корнієнко, С. Гулієнко // Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії: міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 25-26 листопада 2014 р: матеріали конференції. – Київ, 2014. – С. 25.

*Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, обробка та узагальнення результатів.*

15. Корнієнко Я. Підвищення ефективності регенерації забруднених рулонованих модулів / Я. Корнієнко, С. Гулієнко, О. Григоренко // Мембранні процеси та обладнання в харчових технологіях та інженерії: міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 25-26 листопада 2014 р: матеріали конференції. – Київ, 2014. – С. 27.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування вибору критерію оцінки регенерації.*

16. **Gulienko S.V.** Regeneration process of membrane modules / **S.V. Gulienko**, Y.M. Korniyenko, M.O. Lialka // Membrane and sorption processes and technologies: II Ukrainian-Polish scientific conference, 2-4 December 2015: abstracts. – Kyiv, 2015. – P. 78-80.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування математичної моделі, числовий розв'язок математичної моделі, аналіз та узагальнення результатів розрахунків за математичною моделлю.*

## АНОТАЦІЯ

**Гулієнко С.В. Процес регенерації рулонованих мембранних модулів.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – Процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», МОН України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена дослідженням закономірностей процесу масообміну при видаленні осаду з робочої поверхні мембран, утвореного внаслідок концентраційної поляризації, та розроблення ефективного процесу регенерації рулонованих мембранних модулів

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність запропонованої методики регенерації. Доведено можливість використання рівнянь кінетики процесу видалення осаду для випадку течії розчинника в каналах рулонованого мембранного модуля. Встановлені закономірності масообміну при регенерації рулонованих модулів та отримане рівняння для розрахунку коефіцієнта перенесення маси при видаленні шару забруднень з поверхні мембрани із застосуванням температурної кавітації. Встановлені найбільш раціональні гідродинамічні режими проведення процесу регенерації. Експериментально встановлені параметри, що впливають на ефективність регенерації рулонованих модулів за запропонованою методикою. Запропоновано алгоритм розрахунку часу регенерації та продуктивності мембрани після регенерації.

**Ключові слова:** вода, мембранний модуль, осад, регенерація, масообмін.

## АННОТАЦІЯ

**Гулиенко С.В. Процесс регенерации рулонированных мембранных модулей.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», МОН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена исследованиям закономерностей процесса массообмена при удалении осадка с рабочей поверхности мембран, образованного вследствие концентрационной поляризации, и разработке эффективного процесса регенерации рулонированных мембранных модулей.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено эффективность предложенной методики регенерации. Доказана возможность использования уравнений кинетики процесса удаления осадка для случая течения растворителя в каналах рулонированного мембранного модуля. Установлены закономерности массообмена при регенерации рулонированных мембранных модулей и получено уравнение для расчета коэффициента переноса массы при удалении шара осадка с поверхности мембран с использованием температурной кавитации. Определены наиболее рациональные гидродинамические режимы проведения процесса регенерации. Экспериментально определены параметры, которые влияют на эффективность регенерации рулонированных модулей по предложенной методике. Предложен алгоритм расчета времени регенерации и производительности мембран после регенерации.

**Ключевые слова:** вода, мембранный модуль, осадок, регенерация, массообмен.

## ANNOTATION

**Gulienko S.V. The process of spiral wound membrane modules regeneration.** – Manuscript.

Thesis for degree of candidate of engineering science in specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», MES of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the objective laws investigation of mass transfer during removal of cake layer formed because of concentration polarization phenomenon from working surface of membrane and to the designing of effective process of regeneration of spiral wound membrane modules.

The theoretical principle of process of precipitate removal from membrane surface in spiral wound membrane module was substantiated. The proposed method of regeneration allows recovering membrane flux without loss of selectivity and mechanical properties. The physical and mathematical models of fouled spiral wound membrane modules regeneration using of temperature cavitation phenomenon under subatmospheric pressure were developed. The equations of mass transfer kinetics in system liquid – solid were expanded to marrow conditions in membrane channel.

The objective laws of mass transfer during cake layer removal in channel of spiral wound membrane modules were defined experimentally. The results were generalized in a form of dimensionless equation for mass transportation equations coefficient determination. The proposed equation is reliable in a range of Reynolds from 0,4 to 60.

The proposed mathematical model was solved using numerical methods. The calculations using mathematical model were carried out and influence of hydrodynamic conditions, process temperature and cleaning solutions volume is determined. The most rational flow regime is corresponding to Reynolds number values in a range from 15 to 25. The impact of process temperature and cleaning solution volume is negligible.

It was experimentally defined that using of temperature cavitation phenomenon promote of increasing of intensity of cake layer removal process from membrane surface in spiral wound module. The regeneration can be carried out using environmentally acceptable cleaning solutions such as desalinated water and solutions of citric acid and sodium hydrocarbonate.

The experimental examination of regeneration process effectiveness was carried out. The possibility of membrane flux recover for 90–95% was proved. It was shown by the experimental determination of total resistance to flux through the membrane of clean membrane module, fouled membrane module and regenerated membrane module that increase membrane flux after regeneration has occurred due to decreasing of cake layer resistance. Those results prove the principles of proposed physical model.

The influence of technological parameters on mass transfer effectiveness during cake layer removal using temperature cavitation phenomenon was determined. The methods of process intensification using periodical operating pressure increasing were substantiated.



The effectiveness of periodical operating pressure increasing as an intensification technique which allows increase regeneration coefficient in 1,5 times was proved. The factors which influence on regeneration process effectiveness were determined using experiment planning method. The regression equations were obtained.

The recommendations for using of proposed technique of fouled spiral wound membrane modules regeneration under absolute pressure of 0,005-0,009 MPa and operating temperature of 45 °C were developed.

The method of regeneration of spiral wound membrane modules regeneration and variants of technological schemes for its realization were proposed. The algorithm of regeneration time and membrane flux after regeneration was developed.

The results of investigations were implemented on LLC «Chernivtsi factory of heat-insulating products» (Chernivtsi), LLC «Lucky-pharma» (Kyiv) and also in educational process in department of Machines and apparatus of chemical and petroleum industries of National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute».

**Key words:** water, membrane module, fouling, regeneration, mass transfer.