

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

«На правах рукопису»

УДК 66.081.63

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри МАХНВ

_____ Андрій СТЕПАНЮК
(підпис)

“ ____ ” _____ 2023 р.

Магістерська дисертація

на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр»

з спеціальності: 133 Галузеве машинобудування

освітня програма (спеціалізація): інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання

на тему: **Закономірності концентраційної поляризації при зворотному осмосі**

Виконав студент 6-го курсу, групи ЛН -11мн

Вірич Святослав Ігорович

(підпис)

Керівник дисертації канд. техн. наук, доц. Сергій ГУЛІЄНКО

Консультанти:

охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

канд. техн. наук., доц. Андрій КОВТУН

(підпис)

розробка стартап-проєкту

канд. економ. наук, доц. Наталія ЮДІНА

(підпис)

Рецензент

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____ Святослав ВІРИЧ
(підпис)

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Спеціалізація / освітньо наукова програма – Інжиніринг та комп’ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри МАХНВ,

к.т.н., доцент

_____ Андрій СТЕПАНЮК
(підпис)

“ ___ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Віричу Святославу Ігоровичу

1. Тема дисертації: Закономірності концентраційної поляризації при зворотному осмосі.

науковий керівник Гулієнко С.В., кандидат технічних наук, доцент

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. №_____.

2. Термін подання студентом проєкту: 22 травня 2023 р.

3. Об’єкт дослідження: процес концентраційної поляризації .

4. Предмет дослідження: продуктивність та селективність мембрани, опір концентраційної поляризації.

5. Перелік питань, які необхідно розробити:

- обґрунтувати ефективність каскадної схеми екструзії;
- розробити фізико-математичні моделі баромембранних процесів;
- розробити методикау експериментальних досліджень та вдосконалити експериментальну установку;

- провести експериментальні дослідження;
- узагальнити результати експериментів;
- надати рекомендації щодо встановлення залежності для визначення опору концентраційної поляризації як функції від робочих параметрів мембранних процесів.

6. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація магістерської дисертації.

7. Перелік публікацій: основний зміст магістерської дисертації представлено в 5-ти опублікованих працях, а саме: одній статті у науковому виданні України, чотирьох публікаціях тез доповідей на міжнародних конференціях.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Посада, прізвище та ініціали	Підпис, дата	
		завдання видав(ла)	завдання прийняв(ла)
Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	канд. техн. наук, доцент Андрій КОВТУН		
Розроблення стартат-проєкту	канд. економ. наук, доцент Наталія ЮДІНА		

9. Дата видачі завдання: 01 вересня 2021 р.

Завдання прийняв до виконання

_____ Святослав ВІРИЧ
(підпис)

Науковий керівник

_____ Сергій ГУЛІЄНКО
(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів виконання дисертації	Строк виконання етапів дисертації	Примітка
1	2	3	4
1	Аналіз літературних і патентних джерел по дослідженню зворотного осмосу та модуля концентраційної поляризації. Формулювання задач теоретичних та експериментальних досліджень.	01.10.2021 – 27.12.2021	
2	Теоретичне дослідження процесу утворення концентраційної поляризації при зворотному осмосі. Математична модель.	05.01.2022 – 30.04.2022	
3	Формулювання процесу проведення дослідів. Удосконалення методики проведення експериментів.	13.08.2022 – 30.09.2022	
4	Підготовка тез доповідей на конференцію. Підготовка статей до публікації.	20.10.2021– 13.03.2023	
6	Оформлення пояснювальної записки. Перевірка відповідності проєкту діючим нормам за змістом і оформлення. Підготовка до захисту. Складання плану викладення доповіді, окремих питань.	31.03.2023- 14.05.2023	
7	Попередній захист	15.05.2023	
8	Корегування проєкту за результатами попереднього захисту. Отримання рецензії, відгуку. Підготовка до захисту.	15.05.2023- 22.05.2023	

Студент

Науковий керівник

_____ Святослав ВІРИЧ
(підпис)

_____ Сергій ГУЛІЄНКО
(підпис)

РЕФЕРАТ

УДК 66.081.63

Магістерська дисертація на тему: «Закономірності концентраційної поляризації при зворотному осмосі» / КШ ім. Ігоря Сікорського; Керівник Сергій ГУЛІЄНКО. – К., 2023. – с. Виконавець – Святослав ВІРИЧ

Об'єкт дослідження: процеси перенесення речовини через зворотносомтичні мембрани в умовах концентраційної поляризації.

Предмет дослідження: технологічні параметри процесу зворотного осмосу та явища концентраційної поляризації.

Метою дослідження є визначення закономірностей концентраційної поляризації та встановлення залежності для опору шару концентраційної поляризації як функції від робочих параметрів мембранних процесів.

Складено математичну модель вилучення осаду та математичну модель процесу масообміну.

Обґрунтовано застосування критеріального рівняння, параметри якого визначаються експериментально.

Описана експериментальна установка, що використовувалася в експериментах.

Проведено експериментальні дослідження, в результаті яких було отримано уточнене критеріальне рівняння для визначення коефіцієнтів масовіддачі.

Проведено розрахунки за математичною моделлю, які показали вплив модуля концентраційної поляризації.

Були проаналізовані рекомендації для усунення небезпечних факторів, які можуть виникати при експлуатації експериментального устаткування.

Запропонана модифікована схема багатоступеневої конструкції процесу переробки ретантату та пермеату процесу зворотного осмосу.

МЕМБРАННЕ РОЗДІЛЕННЯ, КОНЦЕНТРАЦІЙНА ПОЛЯРИЗАЦІЯ, ОПР, ЗВОРОТНИЙ ОСМОС.

THE ABSTRACT

UDC 66.081.63

Master's dissertation on the topic: "Patterns of concentration polarisation in reverse osmosis" / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; Supervisor - Serhii Hulienko - K., 2023.

Object of research: processes of substance transfer through reverse osmosis membranes under conditions of concentration polarisation.

Subject of research: technological parameters of the reverse osmosis process and the phenomena of concentration polarisation.

The aim of the study is to determine the regularities of concentration polarisation and to establish the dependence of the resistance of the concentration polarisation layer as a function of the operating parameters of membrane processes.

A mathematical model of sediment extraction and a mathematical model of the mass transfer process were developed.

The use of the criterion equation, the parameters of which are determined experimentally, is substantiated.

The experimental setup used in the experiments is described.

Experimental studies have been carried out, as a result of which a refined criterion equation for determining the mass transfer coefficients has been obtained.

The mathematical model was used to calculate the effect of the concentration polarisation module.

Recommendations for eliminating harmful and dangerous factors that may arise during the modelling, testing and operation of experimental equipment were identified, analysed and prescribed.

A modified scheme of the multi-stage design of the process of processing the retentate and permeate of the reverse osmosis process is proposed.

MEMBRANE SEPARATION, CONCENTRATION POLARISATION, RESISTANCE, REVERSE OSMOSIS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП	11
1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	15
1.1 Застосування мембранних процесів.....	15
1.2 Зворотний осмос.....	16
1.3 Явище концентраційної поляризації.....	19
1.4 Актуальні експериментальні дослідження концентраційної поляризації	21
1.5 Актуальні теоретичні дослідження концентарційної поляризації.....	24
1.6 Узагальнення результатів досліджень	28
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	32
2.1 Модель послідовних опорів	32
2.2 Неорганічне забруднення	39
2.3 Модель концентраційної поляризації	40
2.4 Плівкова модель	43
2.5 Висновки	44
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ	46
3.1 Ідея експериментальних досліджень	46
3.2 Визначення модуля концентраційної поляризації.....	47
3.3 Опис експериментальної установки.....	50
3.4 Результати.....	53
3.5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	57
3.5.1 Повітря робочої зони	58

3.5.2	Небезпека ураження електричним струмом	60
3.5.3	Пожежна безпека та надзвичайні ситуації	61
3.6	Висновки	63
4.	РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ	65
4.1	Практичне застосування.....	65
4.2	Опис ідеї проекту	70
4.3	Технологічний аудит ідеї продукту	72
4.4	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	74
4.5	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	80
4.6	Розроблення ринкової стратегії ринку.....	84
4.7	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	87
4.8	Висновки	92
	ВИСНОВКИ.....	93
	CONCLUSIONS.....	94
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	95
	ДОДАТОК А. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ.....	103
	ДОДАТОК Б. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОЛІДЖЕНЬ МАСООБМІНУ В КАНАЛАХ РУЛОННОГО МЕМБРАННОГО МОДУ	111
	ДОДАТОК В. КОПІЇ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ	114

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

J – потік речовини через мембрану, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

J_0 – потік речовини через мембрану чистого модуля, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

J_f – потік речовини через мембрану забрудненого модуля, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

J_p – потік речовини через мембрану модуля, після регенерації $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; K – коефіцієнт перенесення маси, $\text{м}/\text{с}$;

p – тиск, МПа

R – коефіцієнт розділення;

R_c – опір шару забруднень, м^{-1} ;

R_{cp} – опір шару зконцентраційної поляризації, м^{-1}

R_m – опір мембрани, м^{-1} ;

R_T – загальний опір перенесенню речовини через мембрану, м^{-1} ;

S – площа поперечного перерізу каналу рулонованого мембранного модуля, м^2 ;

t – температура, $^{\circ}\text{C}$;

V – об'єм промивного розчину, м^3 ;

V_C – об'ємна витрата промивного розчину, $\text{м}^3/\text{с}$;

W – швидкість руху рідини в каналах мембранного модуля, $\text{м}/\text{с}$;

Грецькі символи:

α – питомий опір шару забруднень, м^{-2} ;

δ – товщина шару забруднень, м ;

Δ – перепад, різниця;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$;

π – осмотичний тиск, МПа;

τ – тривалість регенерації, с ;

ψ – коефіцієнт регенерації.

Критерії (числа) подібності:

E_u – критерій Ейлера;

P_e – критерій Пекле;

Re – критерій Рейнольдса;

Sc – критерій Шмідта;

Sh – критерій Шервуда.кафедра

МАХНВ – кафедра машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв;

НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського» – Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

ВСТУП

Актуальність теми. Зворотний осмос є одним з найбільш перспективних технологічних процесів для очищення води та інших рідин. Проте, на жаль, процес зворотного осмосу відомий своєю складністю та дефіцитом високоефективних методів для підвищення продуктивності. Однією з найважливіших причин обмеженої продуктивності зворотного осмосу є концентраційна поляризація. Цей явище виникає, коли висока концентрація солей на поверхні мембрани призводить до зменшення проникності та зниження продуктивності процесу.

Зворотний осмос є одним із найпоширеніших методів очищення води в промислових і побутових умовах. Цей процес ґрунтується на проникненні розчину через полімерну мембрану під високим тиском, що дозволяє видалити забруднення, солі та інші речовини з води. Однак, з метою досягнення високої ефективності зворотного осмосу необхідно розуміти та контролювати процеси, які можуть знизити його продуктивність, зокрема, концентраційну поляризацію.

Концентраційна поляризація відноситься до явища, що виникає в процесі зворотного осмосу, коли забруднення та інші речовини накопичуються біля мембрани та утворюють шар, який перешкоджає проникненню води. Це призводить до зниження продуктивності зворотного осмосу та збільшення енерговитрат.

Одним з можливих рішень проблеми концентраційної поляризації є використання тонких плівкових нанокомпозитних мембран. Однак, ефективність таких мембран ще не повністю зрозуміла та вимагає подальшої дослідження.

У зв'язку з цим, актуальністю дослідження є підвищення ефективності процесу зворотного осмосу шляхом вивчення та контролювання процесів, що спричиняють концентраційну поляризацію. Дослідження в цій області може привести до розробки нових методів та технологій, що дозволять покращити продуктивність зворотного осмосу та знизити енерговитрати.

Таким чином, актуальність теми полягає у необхідності розвитку та вдосконалення процесу зворотного осмосу з метою забезпечення більш ефективного та стійкого очищення рідин. У даному дипломному проекті буде розглянуто можливості підвищення продуктивності зворотного осмосу шляхом використання тонких плівкових нанокомпозитних мембран, а також будуть розглянуті інші методи та технології для зменшення ефекту концентраційної поляризації.

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

Дисертаційна робота виконана відповідно до наукового плану роботи кафедри Машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є визначення закономірностей концентраційної поляризації та встановлення залежності для опору шару концентраційної поляризації як функції від робочих параметрів мембранних процесів.

Для досягнення поставленої мети сформульовані задачі дослідження:

1. Обґрунтувати застосування фізичної та математичної моделі зворотного осмосу та концентраційної поляризації
2. Обґрунтувати методику експериментальних досліджень визначення опору шару концентраційної поляризації та модернізації експериментальної установки
3. Провести експериментальні дослідження та визначити вплив робочих параметрів на опір концентраційної поляризації.
4. Надати рекомендації щодо практичного застосування результатів застосування результатів досліджень

Об'єкт дослідження – процеси перенесення речовини через зворотносомтичні мембрани в умовах концентраційної поляризації.

Предмет дослідження – технологічні параметри процесу зворотного осмосу та явища концентраційної поляризації.

Наукова новизна одержаних результатів:

- Отримали подальший розвиток уявлення про концентраційну поляризацію та опір перенесення речовину через мембрану;
- Удосконалено метод експериментального визначення опору шару концентраційної поляризації
- Вперше отримані залежності опору шару концентраційної поляризації від модуля концентраційної поляризації.

Практичне значення одержаних результатів:

- Визначені раціональні режими проведення процесу зворотного осмосу в умовах концентраційної поляризації
- Розроблена методика визначення ступеня впливу опору шару концентраційної поляризації та опору шару забруднень на продуктивність мембрані
- Розроблено стартап-проект

Особистий внесок здобувача.

Основні результати роботи отримані безпосередньо автором. Зокрема зроблено огляд джерел літератури, удосконалення фізичної та математичної моделі, проведено експериментальні дослідження, обробка результатів експериментів, ; формулюванні основних положень та висновків; розроблені рекомендацій щодо практичного застосування результатів, розробці технологічних схем.

Формулювання ідеї роботи, розроблення робочої гіпотези, розробка удосконаленої експериментальної установки проведено спільно науковим керівником, к.т.н., доц. С.В. Гулієнком,

Апробація результатів досліджень

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на XXII Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, XXIII Міжнародній науково- практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених

“Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, XIV Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, LXXVIII Znanstvena misel journal of Slovenia.

Публікації. 4 друкованих праці, з яких 1 стаття у зарубіжному науковому журналі та 3 тези доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел літератури і додатків. Загальний обсяг складає 125 сторінки. Обсяг основного тексту становить 96 сторінок. Робота містить 29 таблиць і 19 рисунків, список використаних джерел літератури складається із 72 найменування.

1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Застосування мембранних процесів

Застосування баромембранних процесів у сучасній промисловості дуже широке і охоплює багато галузей. Баромембранні процеси включають у себе різні методи обробки рідин, такі як зворотний осмос, нанофільтрація, ультрафільтрація та мікрофільтрація [1].

Зворотний осмос є одним з найбільш використовуваних баромембранних процесів у промисловості. Цей процес використовується для очищення води від різних домішок, таких як солі, бактерії та віруси. Очищена вода може бути використана в різних галузях, таких як фармацевтика, харчова промисловість та електрогенерування [2].

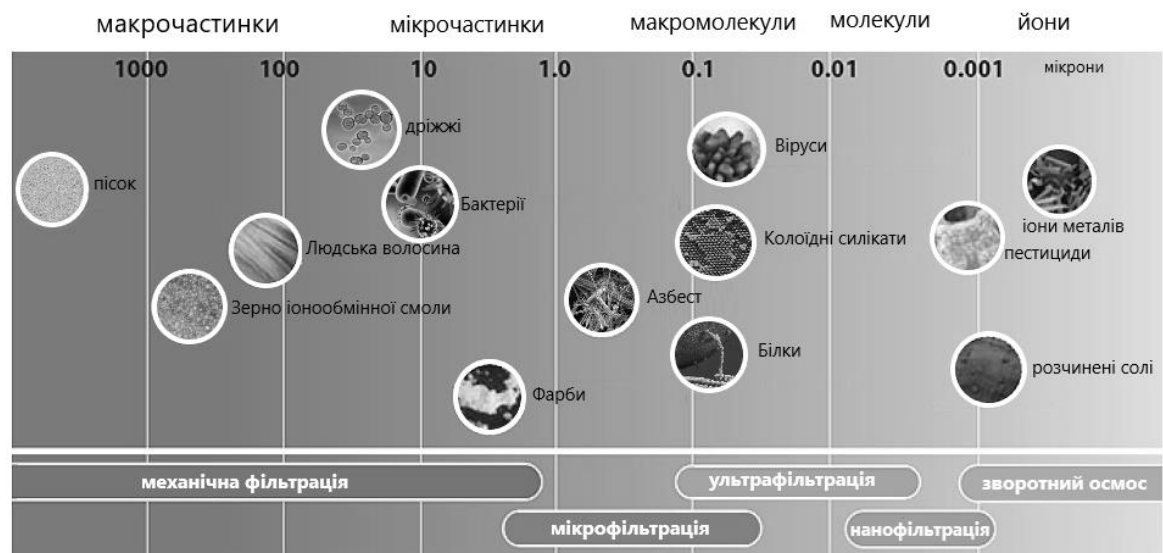


Рисунок 1.1 Порівняння зворотного осмосу з іншими методами фільтрації

Нанофільтрація, ультрафільтрація та мікрофільтрація також є важливими баромембранними процесами у промисловості. Ці методи зазвичай використовуються для очищення рідин від більш крупних домішок, таких як

бактерії, глини та органічні сполуки. Очищені рідини можуть бути використані у виробництві напоїв, хімічних речовин та інших продуктів [3].

1.2 Зворотний осмос

Зворотний осмос - це процес, за допомогою якого можна очистити воду від різних домішок та солей шляхом пропускання її через мембрану певної пористості. Вперше про зворотний осмос було згадано в 1748 році. Але лише в другій половині ХХ століття цей процес став широко використовуватися в промисловості, наукових та медичних дослідженнях [4].

Важливість зворотного осмосу полягає в тому, що він дозволяє очистити воду від більшості домішок та забруднень, включаючи солі та мінерали, що є небажаними для питної води. Процес зворотного осмосу може бути використаний для очищення води з будь-якого джерела, включаючи морську воду та воду з високим вмістом мінеральних солей [5].

Баромембранні процеси, такі як зворотний осмос, найчастіше використовуються для очищення води та забезпечення доступу до чистої питної води у місцях з обмеженими ресурсами. Ці процеси стали необхідними у водопостачанні та водоочистці, щоб забезпечити людство водою в якості джерела життя [6].

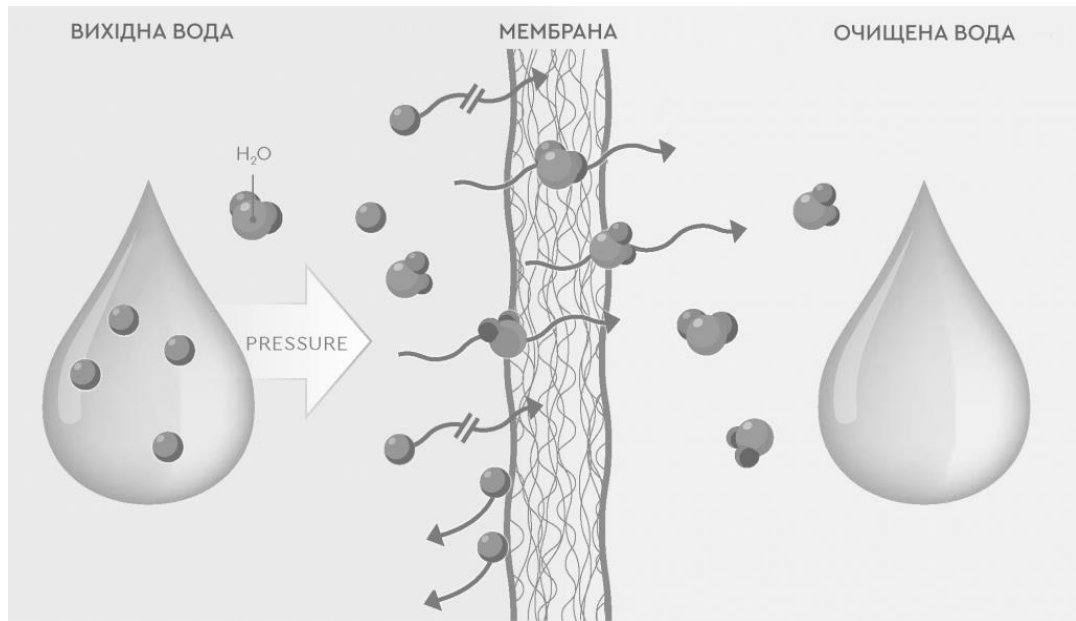


Рисунок 1.2 Технологія зворотного осмосу

На сьогоднішній день існує багато способів використання зворотного осмосу для очищення води від різних домішок та солей. Баромембранні процеси можуть бути використані у багатьох галузях, таких як хімічна промисловість, фармацевтична та харчова промисловість, електроенергетика, а також для очищення стічних вод [7].

Одним з методів підвищення ефективності процесу зворотного осмосу є використання баромембранних процесів. У цих процесах замість звичайної мембрани використовують баромембрану, яка дозволяє пропускати воду при високому тиску, а розчин - ні. Це забезпечує вищу продуктивність та зниження витрат енергії порівняно з традиційними методами зворотного осмосу [8].

До переваг баромембрани можна віднести її високу механічну міцність та стійкість до біологічного та хімічного впливів. Баромембрани також дозволяють обробляти розчини з високою концентрацією солей, що робить їх ефективними в процесах десалінації води та очищенні водопровідних систем [9].

Застосування баромембрани в промисловості стає все більш поширеним, зокрема в галузях нафтогазової, хімічної та фармацевтичної промисловості.

Високі технологічні властивості баромембран дозволяють вирішувати важливі завдання з очищення води та розчинів в промислових процесах [10].

Для процесу зворотного осмосу використовуються мембрани трьох типів: рулонні, половолоконні та пласкі. Рулонні мембрани складаються з корпусу та фільтрувального елемента. В середині рулону знаходиться перфорована трубка, на яку намотане напівпроникне поліамідне мембранне полотно. У процесі фільтрування вода потрапляє в товщину полотна та збирається в трубці. Рулонні мембрани мають найвищу продуктивність, мінімальну матеріалоємність і займають найменше місця, тому є найбільш поширеним типом мембран на промисловому ринку. Пласкі мембрани та апарати на базі полих волокон займають менше 5% промислового ринку [11].

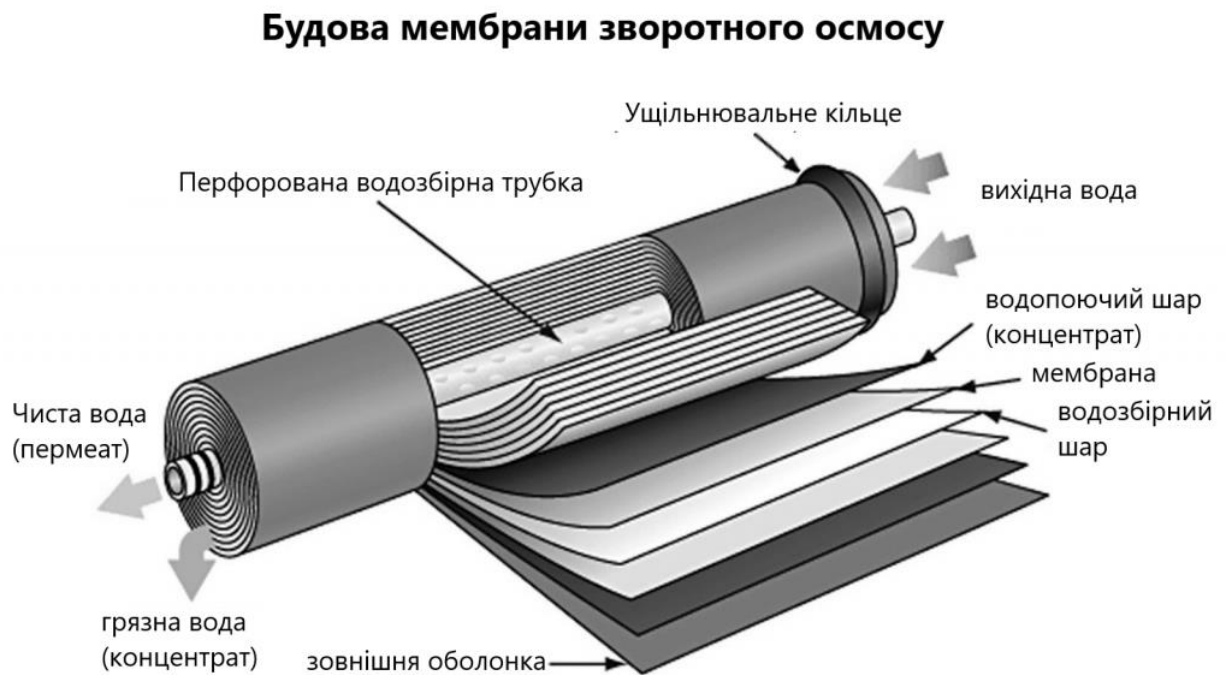


Рисунок 1.3 Будова мембрани зворотного осмосу

У зворотному осмосі основну роль грає концентраційна поляризація - ефект, що виникає на поверхні мембрани, коли іони відкидаються від її поверхні, утворюючи концентрований шар розчину. Це призводить до зменшення

швидкості проходження розчину через мембрану і зниження її ефективності [12].

1.3 Явище концентраційної поляризації

Концентраційна поляризація - це явище, що виникає при проходженні рідини через мембрану під час зворотного осмосу. При цьому створюється градієнт концентрації солей вздовж мембрани [13].

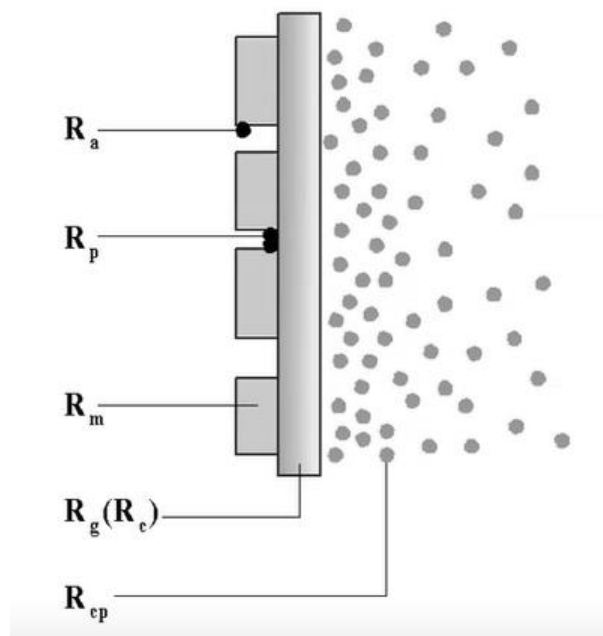


Рисунок 1.4 Опори перенесенню маси через мембрану

Завдяки мембрані зворотного осмосу, вода проникає через нього, залишаючи за собою розчинені солі та інші речовини. Однак, при довготривалому використанні мембрани зворотного осмосу може виникнути проблема - концентраційна поляризація [14].

Концентраційна поляризація [15] виникає в результаті того, що у воді, яка залишається на мембрані, відбувається накопичення розчинених солей. Це призводить до того, що вільні іони відштовхуються один від одного і не можуть

пройти через мембрану. Таким чином, процес зворотного осмосу уповільнюється, а продуктивність мембрани зменшується.

Для того, щоб запобігти концентраційній поляризації, застосовуються різні методи. Один із них - це розподіл води на мембрані рівномірно за допомогою турбулентного потоку. Це дозволяє уникнути накопичення солей на мембрані та підтримувати стійкий рівень продуктивності [16].

Інший метод полягає в тому, щоб змінити структуру мембрани, збільшивши її поверхню та зменшивши товщину. Це дозволяє збільшити швидкість проходження рідини через мембрану та зменшити час контакту між водою та мембраною, що зменшує накопичення солей [17].

Крім того, концентраційна поляризація може впливати на ефективність зворотного осмосу, зменшуючи проникність мембрани і знижуючи виробництво очищеної води. Це може стати на шляху досягнення поставлених [18] цілей щодо підвищення ефективності процесу зворотного осмосу.

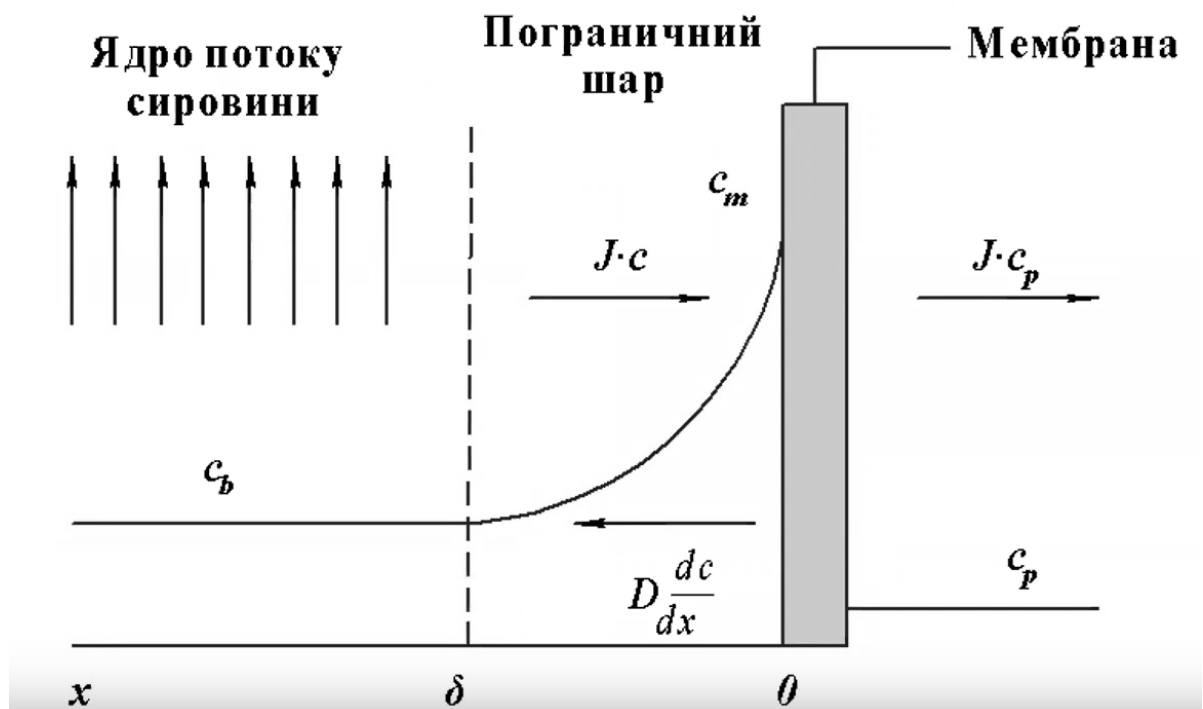


Рисунок 1.5 Концентраційна поляризація

Для зменшення впливу концентраційної поляризації на ефективність зворотного осмосу і підвищення продуктивності мембрани застосовують різноманітні методи, такі як збільшення тиску в системі, зміна складу хімічних розчинів та зменшення швидкості фільтрування. Також можуть застосовуватись спеціальні засоби для очищення поверхні мембран від накипу і забруднень [19].

Зворотний осмос та баромембранні процеси знаходять широке застосування в багатьох галузях, включаючи очищення води для питного водопостачання, очищення води в промислових процесах та виробництві продуктів харчування та напоїв. Розуміння ролі концентраційної поляризації та її впливу на процес зворотного осмосу є важливим для підвищення ефективності цих процесів та забезпечення стабільної якості очищеної води [20].

1.4 Актуальні експериментальні дослідження концентраційної поляризації

Дослідження показали, що існує кілька факторів, які можуть впливати на рівень концентраційної поляризації в мембрани: розмір пор, підбір матеріалу мембрани, хімічний склад розчину, тиск та температура. Наприклад, відомо, що використання наноструктурованих мембран може допомогти зменшити концентраційну поляризацію в зворотно-осмотичних процесах [21].

В дослідженні [22] показало, що використання наноструктурованих мембран з макромолекулярними покриттями зменшує концентраційну поляризацію у порівнянні з традиційними мембранами.

З іншого боку, дослідження [23] показали, що при використанні наноструктурованих мембран з гідрогелевими покриттями спостерігається збільшення концентраційної поляризації у порівнянні з традиційними мембранами. Ця стаття присвячена дослідженню осадження забруднень на обертаючихся мембранах зворотного осмосу, яке призводить до зменшення продуктивності процесу очищення. Автори розглядають методи моніторингу та

характеризації осадження забруднень на мембранах, а також стратегії попередження та мінімізації осадження для збереження ефективності процесу очищення.

Дослідження [24] показали, що використання мембран зі спеціальним покриттям на основі іонних рідин може зменшити концентраційну поляризацію у зворотно-осмотичних процесах. У статті йдеться про використання мембранного процесу для очищення води з одиниць відновлення сірки від сульфідів та інших забруднень. Автори використовували тонкоплівкову нанокompозитну мембрану для зниження вмісту сульфідів до менше 10 мг/л. У статті наведені результати експериментальних досліджень, а також детальний опис методології та устаткування, використовуваного для виконання досліджень.

Також, дослідження [25] показали, що використання наноструктурованих мембран з модифікованими поверхнями може зменшити ефект концентраційної поляризації, тоді як дослідження [26] вказують на те, що концентраційна поляризація може бути зменшена за допомогою використання мембран з покриттям на основі вуглецевих нанотрубок. Стаття [27] досліджує проблему концентраційної поляризації при використанні оберненої осмосу з мембранами зі спеціальними поверхневими характеристиками. Автори провели експериментальні дослідження, показали ефективність використання нових мембран і надали висновки щодо їхнього використання.

Відомо, що на ефективність роботи мембрани впливають фактори, такі як температура та склад поданого розчину. Результати досліджень [28] підтверджують, що зміна температури поданого розчину може вплинути на процес концентраційної поляризації, що може знизити продуктивність мембрани. У цій статті досліджується вплив зміни температури подачі води на процес зворотного осмосу в реверсних осмосних мембранах. Дослідження проводилися експериментальним шляхом на основі аналізу впливу температури подачі на концентраційну поляризацію. Автори дійшли висновку, що збільшення

температури веде до зменшення концентраційної поляризації, що дозволяє підвищити ефективність процесу зворотного осмосу.

Також, деякі дослідження, такі як стаття [29] та дослід [30], демонструють, що використання наноструктурованих мембран може зменшити концентраційну поляризацію, що призводить до більш ефективної роботи мембрани. Стаття [31] досліджує проблему концентраційної поляризації при використанні оберненої осмосу з мембранами зі спеціальними поверхневими характеристиками. Автори провели експериментальні дослідження, показали ефективність використання нових мембран і надали висновки щодо їхнього використання. У другій статті автори описують методику визначення концентраційної поляризації в процесі нанофільтрації на плоских мембранах з використанням Раман-мікроспектроскопії. Автори провели експериментальні дослідження, де вони зіставляли отримані результати з результатами моделювання. Висновок статті полягає в тому, що розроблена методика може бути використана для вивчення та оптимізації процесів нанофільтрації з метою зниження концентраційної поляризації.

Дослідження [32] вказують на те, що некерована розробка технології мембранної очистки води може привести до некоректної роботи мембран, що знижує їхню продуктивність. Ця стаття присвячена дослідженню впливу ефекту концентраційної поляризації та термодинамічної некоректності на процес перенесення солей через мембрани зворотного осмосу. Автори провели експериментальні дослідження, використовуючи різні методики та математичні моделі, та прийшли до висновку, що як концентраційна поляризація, так і термодинамічна некоректність значно впливають на ефективність процесу перенесення солей через мембрани зворотного осмосу.

Звідси видно, що концентраційна поляризація є важливою проблемою у водоочисних процесах, таких як зворотній осмос та нанофільтрація. Різні дослідження показують, що концентраційна поляризація може бути зменшена шляхом застосування різних технік, таких як зміна температури вхідної води,

розробка мембран зі спеціальними поверхневими властивостями та зменшення відкладень на мембранах. Дослідники також звертають увагу на те, що недоліки концентраційної поляризації можуть призвести до зменшення продуктивності та скорочення терміну служби мембран. Таким чином, подальші дослідження у цій галузі є важливими для покращення ефективності водоочистки та забезпечення сталої роботи мембран.

1.5 Актуальні теоретичні дослідження концентраційної поляризації

Основна мета теоретичних досліджень, які були проаналізовані, полягає в аналізі та моделюванні явища концентраційної поляризації в процесі зворотного осмосу та ультрафільтрації/нанофільтрації.

У статті [33] автори також використовують чисельні методи для прогнозування ефекту концентраційної поляризації та поведінки потоку в процесі зворотного осмосу. Вони досліджували вплив параметрів, таких як швидкість потоку, концентрація солі та висота мембрани на ефективність процесу. Ця стаття присвячена числовому аналізу, який допомагає передбачити поведінку концентраційної поляризації та потоку в зворотній осмотичній системі. Дослідження проводяться методом чисельного моделювання, що дозволяє прогнозувати, як буде залежати ефективність процесу зворотної осмосу від різних факторів, таких як довжина модуля, діаметр трубки та тиск на вході в систему.

У статті [34] автори використовували експериментальний підхід для визначення впливу концентраційної поляризації на ефективність процесу зворотного осмосу. Вони також розглядали різні методи зменшення цього ефекту, такі як використання змінних потоків та оптимізація геометрії мембрани. Ця стаття є теоретичним дослідженням, що описує методи кількісної оцінки та зменшення концентраційної поляризації в системах зворотного осмосу. В статті

автори представляють математичні моделі та аналізують ефективність різних методів зменшення концентраційної поляризації.

У статті [35] автори досліджують вплив концентраційної поляризації на процес відновлення поліфенолів з виноробних стоків методом ультрафільтрації / нанофільтрації. Результати показують, що концентраційна поляризація має значний вплив на відновлення поліфенолів, знижуючи продуктивність мембрани та збільшуючи час проходження стоку через систему фільтрації. Автори досліджували вплив різних факторів, таких як рівень температури та витрата фільтрувального потоку, на ефективність процесу відновлення поліфенолів та знаходять оптимальні параметри. Ця стаття є дослідженням впливу концентраційної поляризації на відновлення поліфенолів з відходів виноробної промисловості за допомогою ультрафільтрації/нанофільтрації. Автори проводили експериментальні дослідження та моделювання процесу для оцінки впливу параметрів, таких як швидкість перепускання, тиску та розміру порів, на концентраційну поляризацію.

У статті [36] автори використовують комп'ютерну гідродинамічну модель для аналізу концентраційної поляризації в мембранах зворотного осмосу. Вони досліджують різні фактори, які впливають на ефективність фільтрування, такі як товщина мембрани, геометрія фільтрувального елемента та властивості рідини, що фільтрується. Результати дослідження показують, що зменшення товщини мембрани та збільшення витрати фільтрувального потоку може підвищити продуктивність мембрани та зменшити ефект концентраційної поляризації. У цій статті дослідники використовували методи обчислювальної гідродинаміки, щоб проаналізувати концентраційну поляризацію в повномасштабних спіральновитих обернених осмосу мембранах. Вони досліджували, як ефективність оберненого осмосу залежить від різних параметрів, таких як швидкість потоку, концентрація солі та геометрія мембрани. У своїх висновках вони підтвердили, що точне моделювання гідродинаміки є важливим для розуміння концентраційної поляризації та покращення ефективності оберненого осмосу

У статті [37] автори використовують числові методи для прогнозування концентраційної поляризації та ефекту фільтрування в системах зворотного осмосу. Вони досліджують вплив різних факторів, таких як температура, розмір та геометрія мембрани, витрата фільтрувального розчину тощо, на характеристики процесу фільтрування. Результати дослідження показують, що збільшення температури може зменшити концентраційну поляризацію та збільшити витрату фільтрувального розчину, що може позитивно вплинути на продуктивність системи зворотного осмосу. Ця стаття присвячена числовому аналізу, який допомагає передбачити поведінку концентраційної поляризації та потоку в зворотній осмотичній системі. Дослідження проводяться методом чисельного моделювання, що дозволяє прогнозувати, як буде залежати ефективність процесу зворотної осмосу від різних факторів, таких як довжина модуля, діаметр трубки та тиск на вході в систему.

У статті [38] дослідники використовують метод комп'ютерної гідродинаміки для аналізу концентраційної поляризації в повнорозмірних спіральних мембранах зворотного осмосу. Вони досліджують різні параметри, такі як товщина та пористість мембрани, витрата фільтрувального розчину, тиск і температура, та встановлюють залежність між цими параметрами та ступенем концентраційної поляризації. Результати дослідження дозволяють покращити проектування систем зворотного осмосу та зменшити вплив концентраційної поляризації на продуктивність системи. Ця стаття присвячена дослідженню концентраційної поляризації в оберненій осмотичній мембрані типу "спіральна трубка" повного розміру за допомогою методу обчислювальної гідродинаміки. В статті автори описують використані методи та техніки для вирішення задачі концентраційної поляризації, а також отримані результати, які можуть бути корисними для подальшого вдосконалення технологій обробки води та очищення стічних вод.

У статті [39] автори розглядають математичні моделі для опису процесу концентраційної поляризації в системах зворотного осмосу. Вони досліджують

вплив різних факторів, таких як властивості фільтрувального розчину, температура, тиск і розмір мембрани, на характеристики процесу фільтрування. Результати дослідження дозволяють зрозуміти механізми розвитку концентраційної поляризації та знайти способи для її зменшення. Автори використовують математичні моделі для аналізу процесів проникнення води та солей через мембрани зворотного осмосу з метою оцінки рівня концентраційної поляризації.

Загальні висновки, які можна зробити з цих теоретичних досліджень щодо явища контраційної поляризації в процесах зворотного осмосу та ультрафільтрації/нанофільтрації, такі:

1. Контраційна поляризація може суттєво зменшити ефективність фільтрування, зменшуючи продуктивність системи та збільшуючи енергетичні витрати.

2. Числові методи, такі як комп'ютерна гідродинамічна моделювання, можуть допомогти в прогнозуванні та оптимізації процесу фільтрування шляхом аналізу впливу різних факторів, таких як геометрія мембрани, витрата фільтрувального середовища, тиск та температура.

3. Оптимальна геометрія та властивості мембрани можуть знизити ризик контраційної поляризації та збільшити ефективність фільтрування.

4. Застосування технологій, які дозволяють знижувати вплив контраційної поляризації, такі як змінний тиск, відсутність вільного простору в каналах мембрани, може покращити продуктивність системи та зменшити енергетичні витрати.

Загалом, ці дослідження допомагають розуміти фізичні принципи, які лежать в основі явища контраційної поляризації, та виявляти фактори, які можуть впливати на ефективність фільтрування. Це може допомогти покращити процеси фільтрування та знизити енергетичні витрати, що є важливими факторами в багатьох індустріальних процесах.

1.6 Узагальнення результатів досліджень

У статті [40] автори обговорюють методи моніторингу та характеристики флуїдів в системах зворотного осмосу, а також пропонують стратегії для його запобігання. Зокрема, вони рекомендують використовувати різні методи контролю за флуїдом, такі як аналіз води, моніторинг параметрів процесу фільтрації та використання антифлуїдних речовин. Також автори вказують на необхідність дослідження нових матеріалів мембран, які б мали вищу стійкість до флуїдів. Ця стаття присвячена дослідженню осадження забруднень на обертаючихся мембранах зворотного осмосу, яке призводить до зменшення продуктивності процесу очищення. Автори розглядають методи моніторингу та характеристики осадження забруднень на мембранах, а також стратегії попередження та мінімізації осадження для збереження ефективності процесу очищення.

У статті [41] автори детально розглядають явища концентраційної поляризації та флуїдів, встановлюючи причинно-наслідкові зв'язки між цими процесами. Вони вказують на те, що концентраційна поляризація сприяє розвитку флуїдів, що може призвести до падіння продуктивності системи зворотного осмосу. Автори також надають рекомендації щодо запобігання флуїдів, такі як очищення мембран та збільшення швидкості фільтрації. Ця стаття розглядає взаємозв'язок між концентраційною поляризацією та забрудненням в процесах зворотного осмосу. Автори досліджують, як забруднення впливає на концентраційну поляризацію, та описують різні методи боротьби з цими проблемами, такі як зміна технології очищення води, використання додаткових обробних стадій, а також оптимізація процесу зворотного осмосу з використанням математичних моделей.

У статті [42] автори проводять аналіз існуючих методів моделювання концентраційної поляризації та її впливу на продуктивність систем зворотного осмосу та ультрафільтрації. Вони зазначають, що концентраційна поляризація

може бути значною труднощів у досягненні високої продуктивності та якості фільтрації в системах зворотного осмосу та ультрафільтрації. Оглядові статті звертають увагу на важливість моніторингу та характеристики осадження та забруднення на мембранах, а також на розробку стратегій запобігання та зменшення фулінгу мембран. Ця стаття є оглядовим дослідженням теми концентраційної поляризації в процесах ультрафільтрації та зворотного осмосу. Автори досліджують і розглядають основні питання, пов'язані з концентраційною поляризацією, такі як її механізм, фактори, що впливають на неї, і методи її контролю та зменшення. В статті також описуються різні підходи до моделювання процесів концентраційної поляризації в ультрафільтрації та зворотному осмосі, що дозволяє зрозуміти причини виникнення цього явища та розробляти ефективні методи його контролю.

З огляду на розглянуті оглядові статті можна зробити наступні висновки:

1. Фактори, що впливають на розвиток концентраційної поляризації, включають в себе розмір та геометрію мембрани, витрата фільтрувального розчину, склад розчину та температуру.
2. Концентраційна поляризація може призводити до значного зниження продуктивності систем зворотного осмосу та ультрафільтрації/нанофільтрації, а також до погіршення якості фільтрувального продукту.
3. Оглядові статті пропонують різні стратегії для зменшення впливу концентраційної поляризації, такі як оптимізація геометрії мембрани, збільшення витрати фільтрувального розчину та застосування хімічних агентів для попередження утворення осаду на поверхні мембрани.
4. Для покращення моніторингу та прогнозування концентраційної поляризації використовуються різні методи, включаючи числове моделювання та аналіз спектрів поглинання.
5. Дослідження в галузі концентраційної поляризації є важливими для подальшого розвитку технологій зворотного осмосу та

ультрафільтрації/нанофільтрації, оскільки вони дозволяють зменшити витрати та підвищити продуктивність систем фільтрування

1.7 Висновки:

Загальний висновок з усіх цих статей полягає в тому, що концентраційна поляризація є складним явищем, яке може виникати в системах зворотного осмосу, ультрафільтрації та нанофільтрації, та яке може значно знижувати ефективність фільтрації. Експериментальні та теоретичні дослідження допомагають зрозуміти механізм концентраційної поляризації та розробити стратегії для її уникнення або зменшення. Оглядові статті надають загальний огляд різних підходів та методів, що застосовуються для моніторингу, характеристики та мінімізації концентраційної поляризації та фулінгу. Загалом, дослідження в цій області дозволяють покращити ефективність систем зворотного осмосу, ультрафільтрації та нанофільтрації та знизити їх вплив на навколишнє середовище.

Дослідження зосередження поляризації є важливим напрямком, оскільки цей ефект може значно знизити ефективність обробки води за допомогою мембран. Застосування нових матеріалів для мембран може також бути перспективним напрямком досліджень, оскільки вони можуть забезпечити кращі результати в обробці води. Крім того, розробка нових технологій, які зменшують вплив поляризації зосередження на ефективність мембрани, можуть також стати важливими для покращення процесів переробки води.

Проте, наукові дослідження в цій області є складними і часто вимагають значних витрат на дослідження та розробку.

1.8 Мета і задачі дослідження

Метою роботи є встановлення залежності для визначення опору концентраційної поляризації як функції від робочих параметрів мембранних процесів.

Також в цій роботі були сформовані конкретні задачі:

1. Дослідити вплив робочих параметрів на опір концентраційної поляризації. Встановити залежність між цими параметрами та опором.
2. Провести експерименти з різними речовинами, щоб визначити їх вплив їх на опір концентраційної поляризації. Побудувати моделі, які зв'язують ці властивості мембрани з опором.
3. Провести порівняльний аналіз різних методів зменшення опору концентраційної поляризації.
4. Розробити математичні моделі для прогнозування опору концентраційної поляризації на основі введених робочих параметрів та властивостей мембрани.

2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Модель послідовних опорів

Модель послідовних опорів - це емпірична модель, яка допомагає описати опір, що виникає при проходженні розчину через мембрану. Загалом, модель складається з декількох послідовних опорів, кожний з яких відображає опір, який виникає при проходженні розчину через різні шари зони концентраційної поляризації на поверхні мембрани[43].

$$J = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\mu \times R_T} \quad (2.1)$$

де, ΔP - прикладений тиск фільтрації, $\Delta \pi$ - осмотичний тиск різниця, R_T - загальний опір, μ - в'язкість розчину. Осмотичний тиск неорганічного розчинника можна розрахувати як:

$$\Delta \pi = \sum j_i \frac{n_i}{V_i} RT \quad (2.2)$$

де j_i - коефіцієнт збільшення моля внаслідок дисоціації для розчиненої речовини i , n_i - кількість молей, V_i - об'єм ідеального розчину, R стала ідеального газу і T - абсолютна температура. Очевидно, що ця модель не може бути застосована до пористих мембран, таких як мікрофільтрації, ультрафільтрації та нанофільтрації з вільним кінцем оскільки осмотичний тиск є незначним [43].

Модель послідовного опору стверджує, що загальний опір мембрани мембрани складається з двох частин, а саме опору чистої мембрани та опору шарів забруднення. У той час як опір мембрани мембрани є постійним, опір шарів забруднення зростає з часом.

Інші фактори, такі як ущільнення мембрани, CP і абсорбція, також можуть впливати на потік або опір також впливати на потік або опір мембранної системи. Однак ці явища зазвичай відбуваються за набагато коротший проміжок часу, ніж

забруднення мембрани. Вплив цих факторів на продуктивність процесу можна врахувати, визначивши опір мембрани після певного періоду експлуатації. Ця модель може бути застосована як до пористих і непористих мембран. Основним недоліком цієї моделі є те, що існуюча модель може передбачити лише поведінку забруднення індуковане живильною водою, що містить відносно прості забруднення, такі як монодисперсні колоїди, сульфат кальцію або фосфат кальцію [44].

Сонг і Елімелех [45] розробили теорію КП на основі гідродинаміки та термодинаміки суспензій частинок. У своїй моделі вони показали, що на додаток до балансу мас (який використовується в моделі шару гелю для визначення швидкості пермеату), для повного опису КП в поперечному потоці необхідне ще одне фундаментальне співвідношення (енергетичний баланс). Для повного опису КП при фільтрації в перехресному потоці. Величина КП і поведінка потоку фільтрату потоку пермеату можна охарактеризувати за допомогою безрозмірного фільтраційного числом (N_F):

$$N_F = \frac{4\pi a_p^3 (\Delta P_p)}{3kT} \quad (2.3)$$

де a_p - радіус частинки, ΔP_p - перепад тиску через накопичений шар частинок, k - стала Больцмана, T - абсолютна температура абсолютна температура. Існує критичне значення числа фільтрації для даної суспензії та умов експлуатації. Сонг і Елімелех [45] продемонстрували, що між шаром КП і поверхнею мембрани утворюється шар і поверхнею мембрани, коли N_F перевищує критичне значення. КП існує, коли N_F менший за критичне значення. Ця модель може бути застосована як до пористих, так і до непористих мембран. Типові значення N_F для пористих і непористих мембран при різних робочих умовах та при перехресній фільтрації наведені в таблиці 2.1. Хоча середня швидкість проникнення однорідних невзаємодіючих сферичних частинок можна визначити за допомогою цієї моделі, вона не може бути

використана для багатокомпонентних багатокомпонентної системи, де органічні та/або неорганічні речовини взаємодіють між собою

Таблиця 2.1 – Типові значення числа фільтрації (NF) при різних робочих параметрах

Система фільтрації	Тиск (КПа)	Розмір частинок (м)	Число фільтрації
Зворотній осмос	$10^3 - 4 \times 10^3$	3.6×10^{-10}	0.049–0.20
Ультрафільтрація	$10^2 - 10^3$	$10^{-9} - 10^{-7}$	0.10– 10^6
Мікрофільтрація	< 30	$5 \times 10^{-8} - 10^{-5}$	$5 \times 10^3 - 5 \times 10^{10}$

Ноек та Elimelech [46] провели концептуальний аналіз явищ переносу розчиненої речовини транспорту розчиненої речовини та явищ КП при перехресній мембранній фільтрації. Вони показали, що якщо шар КП є товстим по відношенню до висоти поперечного каналу висоті поперечного каналу, масоперенос може бути порушений як через утруднену дифузію іонів солі, так і через дифузії іонів солей, так і через зміну тангенціального зсуву внаслідок гідродинамічного опору, спричиненого нерухомими частинками в рідині. Під час поперечної фільтрації об'ємна тангенціальна швидкість потоку визначає швидкість зсуву стінки швидкість зсуву стінки, яка в поєднанні з коефіцієнтом дифузії солі визначає визначає масоперенос в шарі сольового фільтруючого матеріалу. Тангенціальна течія і зворотна дифузія іонів солі зворотна дифузія іонів солі гальмуються в шарі колоїдного осаду, що призводить до збільшуючи концентрацію солі на поверхні мембрани та трансмембранний осмотичний тиск.

$$k' = \left[\delta_c \left(\frac{1}{D'} - \frac{1}{D} \right) + \frac{1}{k} \right]^{-1} \quad (2.4)$$

де D - коефіцієнт дифузії солі в об'ємі, а D' - коефіцієнт коефіцієнт дифузії солі в шарі з перешкодами. Коефіцієнт дифузії в утрудненому шарі коефіцієнт дифузії може бути виражений як

$$D' = D\varepsilon\tau^{-1} \quad (2.5)$$

$$\tau = 1 - \ln(\varepsilon^2) \quad (2.6)$$

де ε і τ - пористість і звивистість шару, відповідно. Використовуючи рівняння, Хук і Елімелех [46] дійшли висновку, що коефіцієнт масового меншується зі збільшенням товщини (або маси) пласта і зменшенням пористості пласта. маси) і зменшенням пористості шару. Ця модель застосовується для опису як втрат флюсу, так і відторгнення солі, що супроводжує колоїдне забруднення на поверхні мембран зворотного осмосу та зворотньоосмотичної фільтрації.

Для визначення потоку пермеату через шар КП необхідно визначити коефіцієнт масовіддачі необхідно визначити коефіцієнт масовіддачі. Для цього розроблено ряд формул для цього розроблено ряд формул. Найбільш поширені методи розглядаються нижче. Узагальнений вираз для коефіцієнта масовіддачі в повністю розвинутому потоці має вигляд [47].

$$Sh = \frac{kd_h}{D} = a \left(\frac{d_h V}{\nu} \right)^{\alpha'} \left(\frac{\nu}{B} \right)^{\beta'} = a Re^{\alpha'} Sc^{\beta'} \quad (2.7)$$

де Sh - число Шервуда, Re - число Рейнольдса, Sc число Шмідта, d_h - гідравлічний діаметр каналу подачі, V - швидкість поперечного потоку, ν - кінематична в'язкість, D - дифузія розчиненої речовини у воді, a - числова константа, що характеризує геометрію потоку геометрія каналу, α' і β' - експоненти у співвідношенні масопереносу кореляції масопереносу. Значення a , α' і β' для турбулентної течії можна отримати з кореляції Дейслера:

$$Sh = 0,023 Re^{0,875} Sc^{0,25} \quad (2.8)$$

Коефіцієнт масопередачі (k) для різних режимів течії:

$$k = 1,86 \left[\frac{VD^2}{d_h L} \right]^{0,33} \text{ для ламінарного режиму} \quad (2.9)$$

$$k = 0,0023 \left[\frac{V^{0,8} D^{0,67}}{d_h^0 v^{0,47}} \right] \text{ для турбулентного режиму} \quad (2.10)$$

де, L - довжина каналу, а V - швидкість поперечного потоку може бути обчислена як

$$V = \frac{Q_f}{A_c} \quad (2.11)$$

де, Q_f - швидкість потоку подачі, а A_c - площа поперечного перерізу мембранної комірки мембранної комірки.

Sutzkover та ін. [48] розробили модель для оцінки коефіцієнта масопереносу на основі зменшення потоку пермеату, спричиненого додаванням розчину солі до сольового розчину до початкового безсольового водного потоку. Оскільки чистий тиск на рушійну силу впливає рівень осмотичного тиску що переважає на поверхні мембрани, величина спаду потоку дозволяє оцінити концентрацію на поверхні мембрани C_m і, отже, визначити коефіцієнт масопередачі визначення коефіцієнта масопередачі (k):

$$k = \frac{(Jv)_{\text{сіль}}}{\ln \left\{ \frac{\Delta P}{\pi_b - \pi_p} \left[1 - \frac{(Jv)_{\text{сіль}}}{(Jv)_{\text{вода}}} \right] \right\}} \quad (2.12)$$

де $(Jv)_{\text{сіль}}$ і $(Jv)_{\text{вода}}$ - потік пермеату, що виходить із солоної та безсольової води відповідно. π_b і π_p - осмотичний тиск вихідної води та пермеату, відповідно.

Sutzkover та ін. [37] отримали наступну кореляцію масопереносу шляхом проведення експериментів в трубчастій системі зворотного осмосу в умовах турбулентного потоку (в діапазоні чисел Рейнольдса від 2 600 до 10 000):

$$S_h = \frac{k d_h}{D} = 0,020 Re^{0,91} Sc^{0,25} \quad (2.13)$$

Цей вираз практично збігається з теоретично передбаченою кореляцією Дейслера. Однак, якщо подача є перенасиченим або близьким до насиченого розчином, потік може зменшуватися як через КП, так і через утворення накипу.

утворення накипу. Утворення накипу може початися миттєво після завершення КП. У такому випадку практично неможливо правильно визначити (J_v) сіль, щоб визначити значення k .

За останні кілька десятиліть було розроблено кілька методів моніторингу *in-situ* були розроблені для кращого розуміння фізико-хімічних процесів, що регулюють розвиток поляризованого шару розчинених речовин поблизу поверхні мембрани. Такі методи дають змогу перевіряти теоретичні моделі теоретичні моделі та надають механістичну інформацію про розвитку КП. Більшість досліджень *in-situ* моніторингу КП були проведені на пористих мембранах під час фільтрації колоїдів оскільки колоїди легше контролювати і виявляти, ніж розчинні солі.

Однією з важливих оптичних властивостей розчину є те, що його показник заломлення показник заломлення змінюється зі зміною концентрації. Таким чином, зміна відхилення при коли світло проходить через розчин, надає інформацію про градієнт концентрації вздовж шляху проходження світла. Одним з найпоширеніших методів, який методів, які використовують відхилення світла шаром КП, є тіньова графоаналітика. Цей метод базується на принципі, що світло що світло відхиляється при проходженні через середовище з безперервно змінним показником заломлення, причому характер відхилення визначається градієнтом показника заломлення. Вілкер та ін. [49] використовували оптичний метод тіньового метод для вимірювання концентрації розчиненої речовини (бичачого сироваткового альбуміну, БСА) в поляризаційному шарі, що прилягає до ультрафільтраційної мембрани під час тупикової фільтрації. Під час фільтрації індукований шар КП створював одновимірний градієнт показника заломлення над мембраною. Лінійна кореляція між показником заломлення лінійна кореляція між показником заломлення та концентрацією BSA була виявлена до 580 г/л, що встановило межу для максимальної вимірюваної концентрації. Існують, однак, певні недоліки методу тіньового графоаналізу. Цей

метод не враховує не враховує профіль поляризаційного шару за наявності гелеутворення.

Крім того, цей метод може вимірювати концентраційні профілі лише за межами 200 мкм над поверхнею мембрани, через відхилення світла біля мембрани, де товщина примежового шару для більшості неорганічних забруднень становить близько 10 мкм.

Макромолекули, мічені радіоізопами, були вперше використані для вивчення КП

McDonogh та ін. [50]. Накопичення радіоактивно мічених макромолекул на поверхні мембрани внаслідок КП було виявлено як збільшення напруги сцинтиляційним детектором (прилад для вимірювання кількості та енергії гамма-квантів). Виявлений сигнал перетворюється на відповідну масу макромолекули над мембраною, таким чином що дозволяє відстежувати розвиток КП. Однак, метод радіоізотопного мічення, описаний ізотопного мічення, описана McDonogh та ін. [50], не забезпечує кількісне вимірювання товщини поляризаційного шару або концентраційного профілю в ньому.

McDonogh та ін. [50] представили метод спостереження КП при ультра- та мікрофільтрації розчинів BSA та декстранового синього з використанням EDAM. А колімоване, ближнє інфрачервоне світло, паралельне поверхні мембрани, але перпендикулярно до напрямку потоку, спрямовувалося через фільтрувальну комірку на фотоприймач. фільтраційну комірку на фотоприймач за допомогою мікроскопічних лінз. Завдяки поглинання падаючого світла, градієнт концентрації в поляризаційному шарі призводив до появи на детекторі картини інтенсивності, яка відстежували за допомогою осцилографа. Метод EDAM дозволяє вимірювати шар КП на відстані до 20 мкм від поверхні мембрани. Таким чином, цей метод перевершує тіньовий з точки зору вимірюваного діапазону, оскільки останній метод може вимірювати лише 200 мкм від поверхні мембрани.

2.2 Неорганічне забруднення

Забруднення мембрани - це накопичення матеріалів на поверхні або в порах мембрани, що зменшує потік пермеату через мембрани [51]. Процес забруднення сприймається як багатоступеневий процес, важливим етапом якого є адгезія забруднювачів до поверхні мембрани до поверхні мембрани є важливим етапом [52]. Згідно з визначенням мембранного забруднення мембрани, КП не розглядається як забруднення, хоча він також відповідає за зниження потоку.

Оскільки, як тільки процес фільтрації зупиняється, явище КП зникає. явище КП зникає.

Термін "мінеральний накип" використовується для того, щоб відрізнити засмічення, спричинене неорганічними відкладеннями солей від органічного забруднення та біообростання. Наявна висока концентрація неорганічних солей у вихідній воді в основному відповідає за утворення неорганічних відкладень. У системах зворотного осмосу та зворотного знесолення розчинені солі зазвичай концентруються в 4-10 разів, що призводить до високих концентрацій, які перевищують розчинність на поверхні мембрани [53]. CaSO_4 , CaCO_3 , SiO_2 і BaSO_4 є одними з найпоширеніших неорганічних солей відповідальних за утворення накипу на поверхні мембрани. Солі випадає в осад, коли добуток розчинності складових іонів досягається або перевищується.

Зменшення потоку, спричинене забрудненням мембрани, можна загалом класифікувати як оборотне або незворотне, залежно від ефективності контролю за забрудненням і технології очищення. Для пористих мембран оборотне забруднення можна описати як частину, яка може бути відновлена зворотним промиванням/промиванням. Однак, зворотне промивання або зворотна промивка зазвичай недоступна для непористих мембран. Зменшення потоку, спричинене незворотнім забрудненням, не може бути відновлене без заміни або очищення мембрани. мембрану не замінити або не очистити

хімічними реагентами [54-56]. На відміну від оборотного забруднення мембран, незворотне зазвичай спричинене міцно прилиплими плівками або матеріалами, що потрапили в пастку в пористій субструктурі мембрани. Існує декілька методів для кількісного визначення опору фільтрації, спричиненого забрудненням мембрани.

2.3 Модель концентраційної поляризації

Опір шару концентраційної поляризації залежить від ряду безрозмірних параметрів, таких як модуль концентраційної поляризації. Цей параметр визначається як відношення величини концентраційної поляризації до зміщення потенціалу на поверхні мембрани.

Іншими словами, модуль концентраційної поляризації визначає, наскільки сильно зменшується концентрація розчину на поверхні мембрани внаслідок проходження розчину через мембрану. За допомогою цього параметра можна визначити опір шару концентраційної поляризації як функцію від інших безрозмірних параметрів, таких як швидкість проходження розчину через мембрану, властивості мембрани і склад розчину.

Забруднення збільшує опір, що, в свою чергу, зменшує потік пермеату. Опори, які відповідають за зменшення потоку, включають в себе: опір мембрани (R_m), опір ЦП (R_{cp}), опір кеку (R_c) та опір блокування пор (R_b). Таким чином, загальний опір під час мембранної фільтрації можна виразити як

$$R_T = R_m + R_{cp} + R_c + R_b \quad (2.14)$$

Тип мембран (тобто пористі та непористі) відіграє важливу роль у визначенні опору для зниження потоку, викликаного неорганічними забрудненнями. Наприклад, всі чотири типи опору (R_m , R_{cp} , R_c і R_b) можуть бути

відповідальними за зниження потоку для пористих мембран, в той час як опір, що блокує пори (R_b), не може бути застосований для непористих мембран.

Мембранний опір зумовлений самою мембраною. В ідеалі, за відсутності відсутності забруднення і КП, тільки опір мембрани задіяний під час фільтрації і може бути розрахований як:

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu J_0} \quad (2.15)$$

де μ - в'язкість розчину, ΔP і J_0 – прикладені тиск фільтрації та потік пермеату через чисту мембрану, відповідно. Мембранний опір є загальним як для пористих, так і для непористих мембран. Величина опору залежить від товщини мембрани і різних морфологічних особливостей, таких як звивистість, пористість і розподіл пор за розмірами. Для мембрани з пори вважаються циліндричними капілярами однакового радіуса перпендикулярних до поверхні мембрани, опір може бути за допомогою рівняння Хагена-Пуазейля:

$$R_m = \frac{8\delta_m}{n_p \pi r_p^4} \quad (2.16)$$

де n_p - кількість пор на одиницю площі мембрани, δ_m – товщина товщина мембрани, r_p - радіус пор мембрани. Це рівняння показує, що опір мембрани зростає зі збільшенням товщини мембрани і зменшується зі збільшенням розміру пор розміру та густини пор.

Опір відкладення існує як для пористих, так і для непористих мембран. Різні частинки утворюють різні типи шарів, наприклад, частинки гідроксидів металів (наприклад, гідроксид заліза, гідроксид купруму, гідроксид алюмінію) утворюють шари, які легко деформуються або переставляються під тиском. Кристали карбонатів кальцію і натрію утворюють шари, які не піддаються деформації або перегрупуванню під тиском (нестисливі шари). не піддаються деформації або перегрупуванню під тиском[57]. Опір нестисливих шарів часто оцінюють за допомогою рівняння Кармана Козени:

$$R_c = \frac{K'(1-\varepsilon_c)^2 S_s^2 \delta_c}{\varepsilon_c^3} \quad (2.17)$$

де K' - константа, δ_c - товщина шару, ε_c - частка пустот у шарі, а S_s - площа поверхні твердої фази на одиницю об'єму твердої фази. Для жорстких сферичних частинок радіусом r питома поверхня $S_s = 3/r$, частка пустот ε_c у випадково упакованому кеку становить приблизно 0.4, а константа K' дорівнює

Зауважимо, що опір шару пропорційний до його товщини, а питомий опір шару на одиницю товщини питомий опір шару на одиницю товщини ($\hat{\alpha}$) визначається як:

$$\hat{\alpha} = \frac{R_c}{\delta_c} \quad (2.18)$$

Стисливі шари демонструють зменшення об'єму пустот і збільшення питомого опору збільшення питомого опору при збільшенні тиску стиснення збільшенням тиску стиснення. Для стисливих шарів питомий опір шару (α) залежить від діаметра частинок (d_p), пористості кеку (ε) і густини частинок (ρ). щільності (ρ). Добре встановленою емпіричною залежністю для α є Рівняння Кармана:

$$\alpha = \frac{180(1-\varepsilon)}{\rho d_p^2 \varepsilon^3} \quad (2.19)$$

Згідно з рівнянням, чим менший розмір часток, тим більший опір шару тим більший опір шару. Типовий діапазон питомого опору шару змінюється від 0,27 до $2,7 \times 10^3$ м/кг [58].

Концентраційна поляризація утворює висококонцентрований шар біля поверхні мембрани, який чинить опір масопереносу, тобто опір КП.

Внаслідок КП накопичені концентрації розчиненої речовини та частинок стають настільки високими, що біля поверхні мембрани може утворитися шар накипу або осад, який чинить опір масопередачі. поверхні мембрани, що спричиняє накипний опір. Опір, спричинений КП призводить до утворення накипу на поверхні мембрани. Важливо розрізняти між КП і стійкістю до

обростання, хоча обидва ці фактори не є повністю не повністю незалежними один від одного. КП частинок є спільним для обох типів мембран пористих, так і непористих мембран. Однак, КП розчинних іонів застосовується лише для непористих мембран.

2.4 Плівкова модель

Утримуваний мембраною розчинений компонент накопичується біля поверхні мембрани, де його концентрація поступово зростає. Підвищена концентрація поблизу поверхні викликає дифузійний потік від поверхні в об'єм розчину. Через деякий час у системі встановиться стаціонарний стан. Конвективний потік розчиненого компонента до поверхні мембрани врівноважуватиметься сумою потоків розчиненої речовини через мембрану і від поверхні мембрани в об'єм розчину (нагадаємо, що тут ми обмежуємося тільки концентраційною поляризацією, не враховуючи відкладень на мембранах).

Припустимо, що умови потоку на вході в мембрану такі, що на відстані d від поверхні мембрани спостерігається повне змішання розчиненого компонента і розчинника і концентрація дорівнює c_b . Поблизу поверхні мембрани утворюється прикордонний шар, у якому концентрація збільшується в міру наближення до мембрани, досягаючи максимального значення біля її поверхні c_m . Конвективний потік до поверхні мембрани позначимо J_c . За умови, що розчинений компонент неповністю утримується мембраною, його потік через мембрану дорівнює J_p . Накопичення розчиненої речовини на поверхні мембрани породжує зворотний дифузійний потік речовини в об'єм розчину. Умови стаціонарності досягаються, коли конвективний транспорт розчиненої речовини дорівнює сумі потоків: пермеаційного і зворотнодифузійного транспорту компонента, тобто

$$J \times c + D \frac{dc}{dx} = J \times c_p \quad (2.20)$$

Запишемо граничні умови як $x=0 \rightarrow c = c_m$ та $x = \delta \rightarrow c = c_b$. Тоді інтегрування рівняння призводить до виразу:

$$\ln \frac{c_m - c_p}{c_b - c_p} = \frac{J \times \delta}{D} \quad (2.21)$$

або

$$\frac{c_m - c_p}{c_b - c_p} = \exp\left(\frac{J \times \delta}{D}\right) \quad (2.22)$$

Відношення коефіцієнта дифузії D до товщини граничного шару δ називається коефіцієнтом масопереносу k :

$$k = \frac{D}{\delta} \quad (2.23)$$

Введемо рівняння характеристичного змісту:

$$R_{int} = 1 - \frac{c_p}{c_m} \quad (2.24)$$

То тоді рівняння приймає вигляд:

$$\frac{c_m}{c_b} = \frac{\exp\left(\frac{J}{k}\right)}{R_{int} + (1 - R_{int}) \exp\left(\frac{J}{k}\right)} \quad (2.25)$$

Відношення c_m/c_b називається модулем концентраційної поляризації. Це відношення збільшується, що означає збільшення концентрації біля поверхні мембрани c_m зі збільшенням величин потоку J , затримки R_{int} , а також зі зменшенням коефіцієнту масопереносу k .

Тому шукаємо опір мембрани, як функцію від цієї величини.

2.5 Висновки

Ці дослідження виявилися важливими для розуміння процесів, що відбуваються в системі мембранної фільтрації. Результати та загальні висновки розділу можуть бути наступними:

Водний розчин може проникати через полімерні мембрани, використовуючи різні процеси, такі як дифузія, осмос і тиснений фільтраційний потік.

Величина потоку пермеату залежить від різних факторів, таких як розмір пор, хімічна природа розчину, тиск і температура.

Полімерні мембрани використовуються в різних галузях, таких як фільтрація води, зворотний осмос, фармацевтична технологія тощо.

Концентраційний поляризаційний шар (КП) формується на поверхні мембрани під час проходження розчину через неї.

КП може впливати на потік пермеату, зменшуючи його швидкість і збільшуючи опір масопередачі.

Існують різні фактори, які впливають на розвиток КП, такі як тип мембрани, властивості розчину, режим фільтрації, температура і т.д.

Для визначення потоку пермеату через мембрану необхідно визначити коефіцієнт масовіддачі, який характеризує ефективність масопередачі через мембрану.

Оптичні методи, такі як метод тіньової графоаналітики і метод EDAM, дозволяють виміряти концентраційні профілі і відстежувати розвиток КП на поверхні мембрани.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ

3.1 Ідея експериментальних досліджень

За основу для фізичної та математичної моделі приймається модель осмотичного тиску. Потік речовини через мембрану, згідно цієї моделі, можна виразити феноменологічним рівнянням[43]:

$$J = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\mu \times R_T} \quad (3.1)$$

де Δp – робочий перепад тиску, Па;

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

μ – коефіцієнт динамічної в'язкоті, Па·с;

R_T – загальний опір перенесенню, m^{-1} .

Загальний опір перенесенню, m^{-1} :

$$J = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\mu(R_m + R_{cp} + R_c + R_b)} \quad (3.2)$$

де R_m – опір мембрани, m^{-1} ;

R_{cp} – опір шару концентраційної поляризації, m^{-1} ;

R_c – опір шару забруднень, m^{-1} ;

R_b – опір заблокованих пор, m^{-1} .

В ідеальних умовах опір мембрани є єдиним фактором, що впливає на загальний опір, але у реальних умовах існують інші фактори, такі як опір шару осаду. Також важливо зазначити, що мембрани для зворотного осмосу та нанофільтрації не мають проблем з блокуванням пор, тому що їхні розміри занадто малі [60-62].

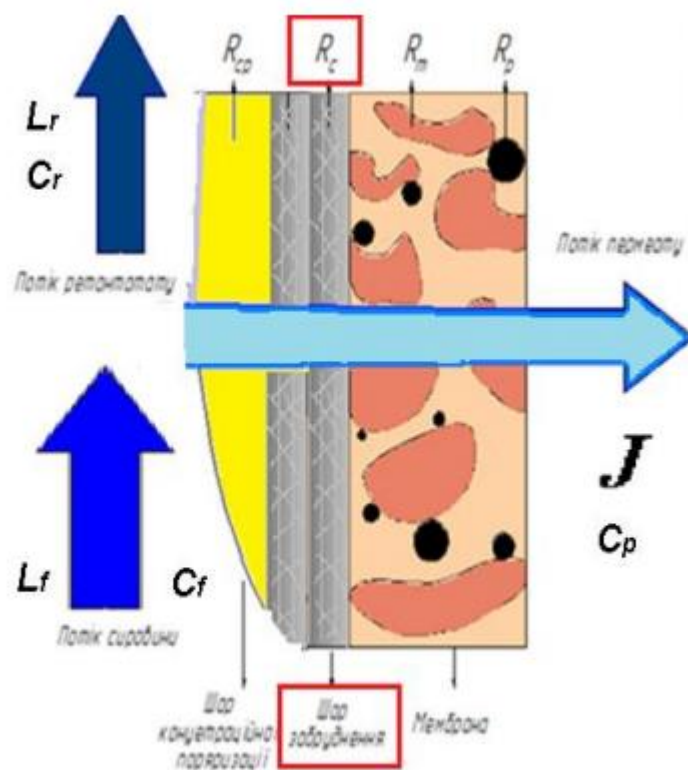


Рисунок 3.1 – Схема опорів перенесенню речовини через мембрану

Опір шару концентраційної поляризації можна виміряти, враховуючи різницю між сумарним опором системи та опором мембрани.

3.2 Визначення модуля концентраційної поляризації

Модуль концентраційної поляризації може бути визначений як ефект зниження швидкості фільтрації в результаті утворення висококонцентрованого розчину на поверхні мембрани, що розподіляє різницю концентрацій між розчином на вхідному боці та висококонцентрованим розчином на виході.

Цей ефект зазвичай пояснюється тим, що частки, які не пройшли крізь мембрану, збільшуються у розмірі і концентрації на поверхні мембрани, що призводить до зменшення пропускної здатності мембрани. Це може призвести до підвищення тиску на вхідній стороні мембрани, збільшення витрат енергії та скорочення терміну служби мембрани.

Прямим методом модуль концентраційної поляризації виміряти не можна. Але скориставшись плівковою теорією можемо визначити окремо параметри.

Сталість температури неперервних процесах мембранного розділення – цілком виправдане допущення. Процеси зворотного осмосу та ультрафільтрації проводяться при температурі оточуючого середовища і зміна температури може бути пов'язана лише з температурою концентрування, яка на практиці не перевищує частки градуса. Сталість тиску – менш виправдане допущення, оскільки по довжині апарату тиск завжди знижується через гідравлічний опір. Тому розрахунки треба вести, виходячи з середнього перепаду тисків. В мембранних апаратах розділюваний розчин проходить в довгих каналах, з малим еквівалентним діаметром. Це зводить до мінімуму зворотне перемішування, що наближає структуру потоку до моделі ідеального витіснення по довжині напірного каналу. Основна відмінність реальної структури потоку пов'язана з концентраційною поляризацією по поперечному перерізі каналу. Через це формули, отримані для розрахунку потоків, їх концентрацій та робочої площі поверхні мембран, можуть бути застосовані для реальних апаратів, що характеризується індексом концентраційної поляризації J . При цьому розрахунки слід проводити методом послідовних наближень.

Під індексом концентраційної поляризації слід розуміти відношення концентрації в пограничному шарі біля поверхні мембрани і в об'ємі потоку в напірному каналі:

$$J = \frac{c_m}{c_b} \quad (3.3)$$

Також цю величину можна визначити з залежності:

$$J = \frac{c_m}{c_b} = \frac{\exp\left(\frac{J}{k}\right)}{R_{int} + (1 - R_{int})\exp\left(\frac{J}{k}\right)} \quad (3.4)$$

де k – коефіцієнт масопереносу;

J – величина потоку;

c_b – концентрація вихідного розчину;

$\frac{c_m}{c_b}$ – модуль концентраційної поляризації;

R_{int} – коефіцієнт розділення, m^{-1} .

Для концентраційної поляризації важливу роль відіграють величини потоку J і коефіцієнта масопереносу k . Потік чистої води визначається параметрами використаної мембрани і є постійним для цієї мембрани. Водночас коефіцієнт масопереносу k сильно залежить від гідродинаміки системи, що дає можливість його оптимізації. Коефіцієнт масопереносу k пов'язаний із числом Шервуда (Sh).

$$Sh = \frac{k \times d_h}{D} = a \times Re^b \times Sc^c \quad (3.5)$$

де Re - число Рейнольдса, Sc - число Шмідта, a , b і c - константи;

число Рейнольдса:

$$Re = \frac{d_h \times v}{\nu} = \frac{\rho v d_h}{\eta} \quad (3.6)$$

і число Шмідта:

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (3.7)$$

де ν - кінематична в'язкість, d_h - гідродинамічний діаметр, ρ - динамічна в'язкість, v - швидкість потоку і D - коефіцієнт дифузії. Для циліндричної геометрії, тобто порожнистих волокон, капілярних і трубчастих мембран, гідродинамічний діаметр визначається виразом $d_h = 4A/S = 4(\pi/4) \times d^2 / \pi \times d = d$.

Для прямокутної труби (чому відповідає конструкція плоскорамного модуля) висотою H і шириною W гідродинамічний діаметр дорівнює $d_h = 4WH/2(W + H) = 2WH/(W + H)$.

З рівняння можна бачити, що коефіцієнт масопереносу k залежить головним чином від швидкості потоку на вході в мембрану (v), коефіцієнта дифузії розчиненої речовини (D), в'язкості та густини, а також від розмірів і форми модуля. Серед цих параметрів найбільш важливими є швидкість потоку і коефіцієнт дифузії:

$$k = f(v, D) \quad (3.8)$$

Деякі напівемпіричні співвідношення для коефіцієнтів масопереносу в трубках і каналах наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Таблиця коефіцієнтів експериментальних досліджень

Конфігурація	Ламінарний режим	Турбулентний режим
Трубка	$Sh = k \times d_h / D$ $= 1,62(Re \times Sc \times d_h / L)^{0,33}$	Sh $= 0,04Re^{0,75}Sc^{0,33}$
Канал	$Sh = 1,85(Re \times Sc \times d_h / L)^{0,33}$	Sh $= 0,04Re^{0,75}Sc^{0,33}$

Коефіцієнти дифузії макромолекул або суспендованих частинок, що затримуються в процесах мікрофільтрації або ультрафільтрації, малі порівняно з коефіцієнтами дифузії, якими володіють компоненти, що затримуються, у процесі зворотного осмосу, газорозділення і первапорації. Крім того, потоки під час мікрофільтрації та ультрафільтрації відносно великі порівняно з потоками, що мають місце під час газорозділення і первапорації. Таким чином, концентраційна поляризація в процесах ультрафільтрації та мікрофільтрації вельми сильно ускладнює ситуацію, знижуючи потоки через мембрану.

3.3 Опис експериментальної установки

У попередніх роботах [63, 64] була розроблена методика експериментального визначення опору шару концентраційної поляризації під час розділення мінеральних солей за допомогою зворотного осмосу, а також була розроблена експериментальна установка, загальний вигляд якої показано на Рис. 1. Методика передбачала вимірювання проникності та відтримуваної

продуктивності, а також концентрацій у розділяній розчині, проникнутому та відтриманому.

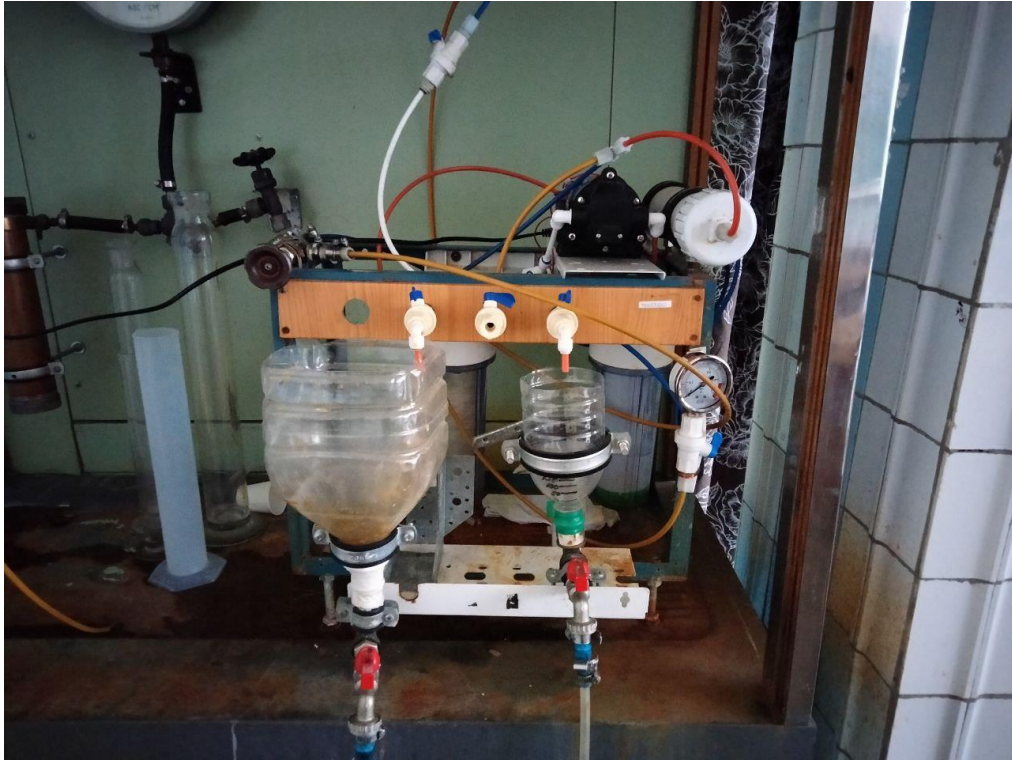


Рисунок 3.3 – Існуюча експериментальна установка

У той же час, концентрація вимірювалась портативним TDS-метром, а для вимірювання потоку використовувалась об'ємна методика (фіксування об'єму, який було зібрано за певний період часу). Тому визначення кожного експериментального значення вимагало значного часу та значного споживання досліджуваних розчинів. Тому модернізація такої установки є доцільною.

Модернізація була спрямована на збільшення продуктивності експериментів.

З цією метою було вирішено використовувати ротаметри для вимірювання швидкості потоку і TDS-метри для вимірювання концентрацій. Загальний вигляд модернізованої експериментальної установки показано на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Установа після модернізації

Запропонована модернізація дозволяє вимірювати миттєві значення концентрації у розділеному розчині, пермеаті та ретентаті, а також швидкості потоку пермеату та ретентату. Тому з тією ж кількістю розділеного розчину та меншим часом за допомогою модернізованої установки можна отримати більше експериментальних даних. Таким чином, продуктивність експериментальних досліджень буде збільшена.

3.4 Результати

Наукові дослідження включали в себе дослідження залежності опору мембрани від модуля концентраційної поляризації для чотирьох різних речовин: сульфату магнію, нітрату натрію, нітрату кальцію та хлориду натрію. Для отримання цих даних було проведено серію експериментів із змінними концентраціями речовин та вимірюванням відповідного опору мембрани.

Зібрані дані були оброблені з використанням методу найменших квадратів, що дозволило отримати графіки залежності опору мембрани від модуля концентраційної поляризації для кожної з речовин рис 3.4-3.8. Ці графіки відображають взаємозв'язок між концентрацією речовини та опором мембрани, що дає можливість краще розуміти фізичні властивості досліджуваних речовин.

Крім того, в результаті досліджень була створена таблиця 3.1 з коефіцієнтами, які були використані для побудови графіків. Ці коефіцієнти є важливими величинами, які дозволяють математично описати залежність між опором мембрани та концентраційною поляризацією. За час проведення дослідів коефіцієнти визначалися за методом найменших квадратів.

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 \quad (3.9)$$

Коефіцієнти легко знайти за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2} \quad (3.10)$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3.11)$$

Вибірковий коефіцієнт кореляції розраховується за формулою:

$$r^* = b_1 \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}} \quad (3.12)$$

Умова існування залежності має вигляд:

$$\left| r^* \right| - \frac{1,96(1 - (r^*)^2)}{\sqrt{n}} > 0 \quad (3.13)$$

Таблиця 3.1 – Таблиця коефіцієнтів експериментальних досліджень

	MgSO ₄	NaNO ₃	CaNO ₃	MgSO ₄ (2)	NaCl
b ₀	11,578	11,172	12,634	12,165	13,442
b ₁	896,5	1062,687	344,187	340,722	-187,844
c	3,8E+11	1,5E+11	4,3E+12	1,47E+12	2,8E+13
srt	9,1E-07	4,10E-07	5,74E-06	1,98E-06	2,07E-05
r*	0,856	0,681	0,824	0,479	-0,855
умова	0,716	0,418	0,680	0,177	0,787

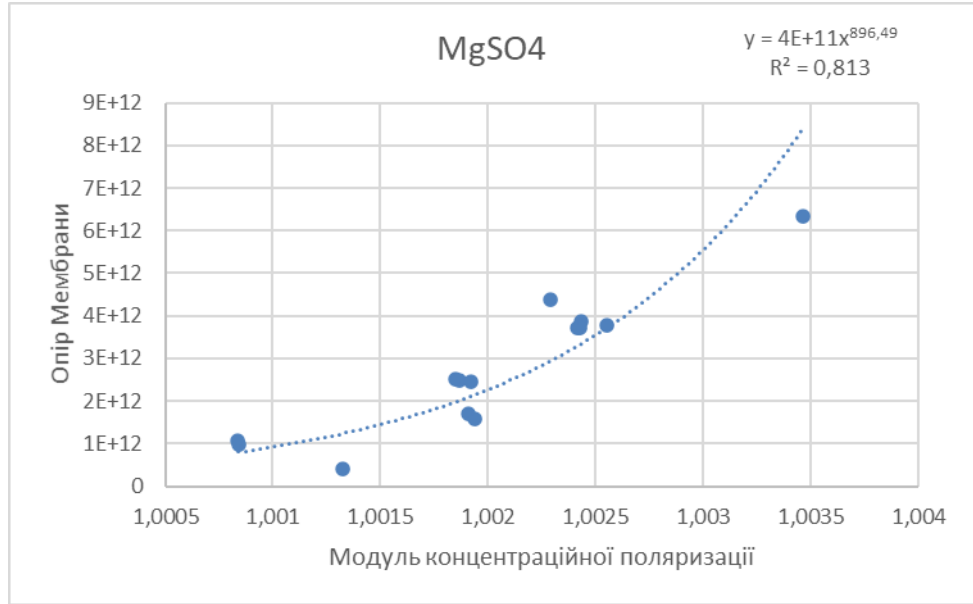


Рисунок 3.4 – Графік залежності опору мембрани від модуля концентраційної поляризації для речовини сульфату магнію

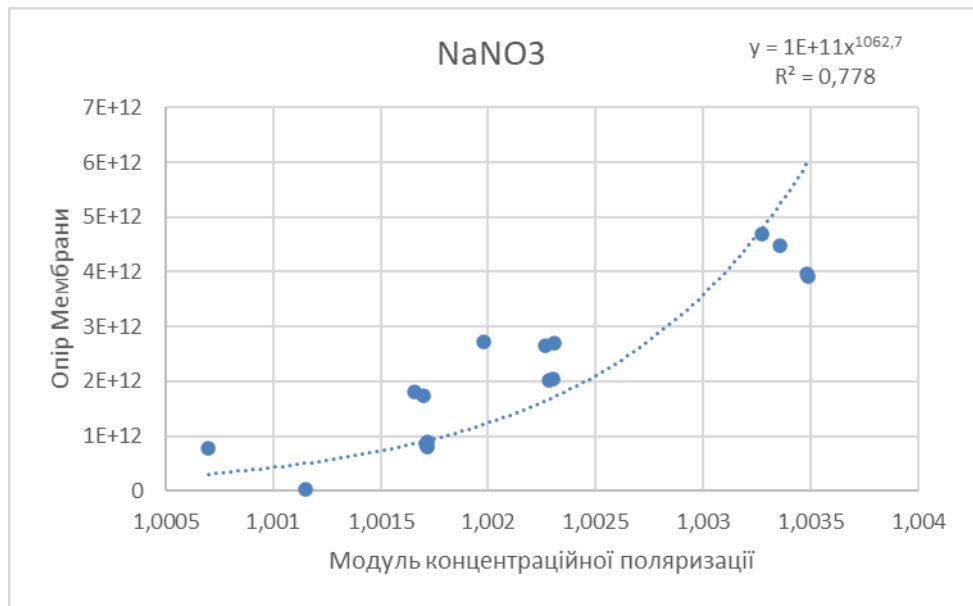


Рисунок 3.5 – Графік залежності опору мембрани від модуля концентраційної поляризації для речовини нітрат натрію

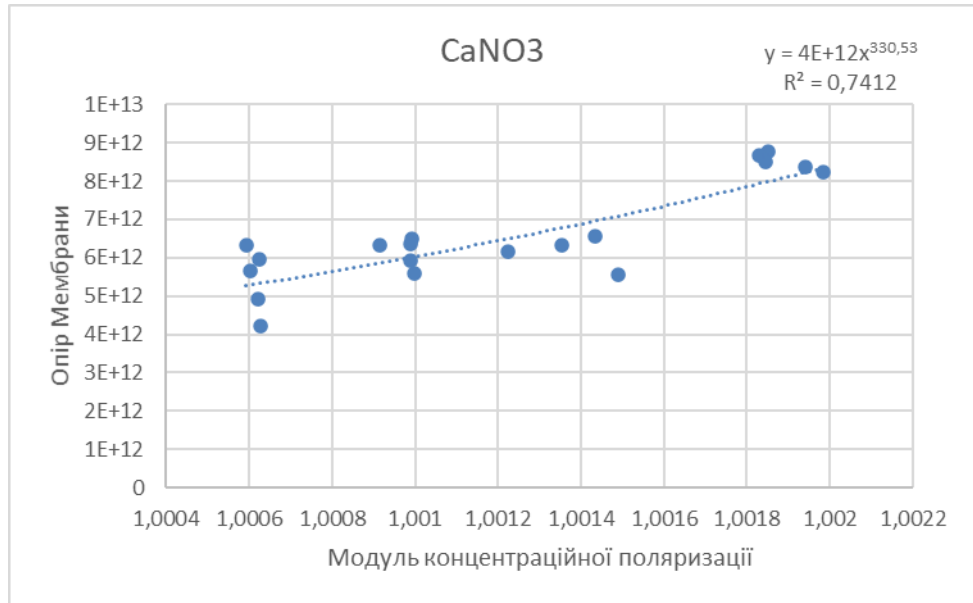


Рисунок 3.6 – Графік залежності опору мембрани від модуля концентраційної поляризації для речовини нітрат кальцію

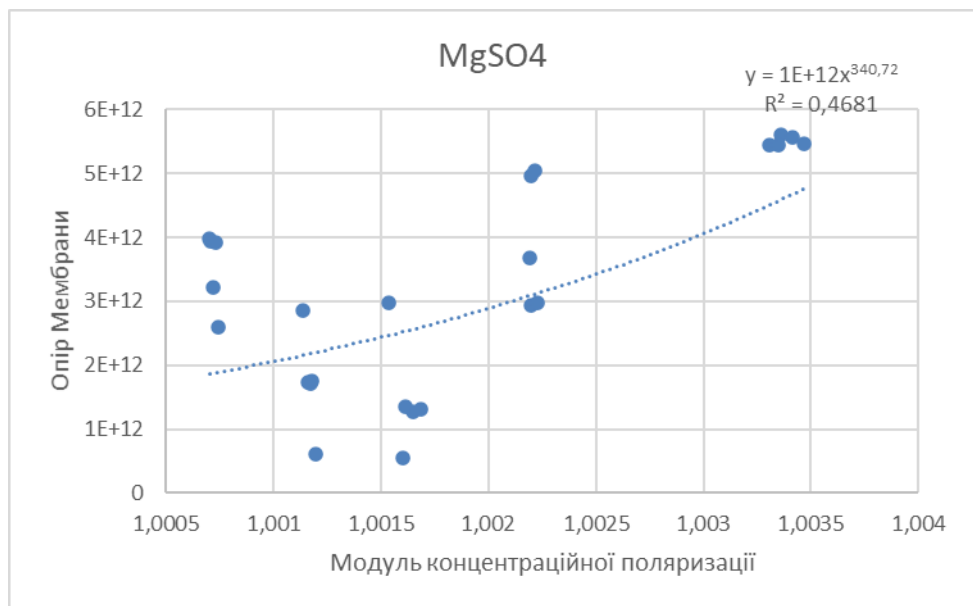


Рисунок 3.7 – Графік залежності опору мембрани від модуля концентраційної поляризації для речовини сульфату магнію

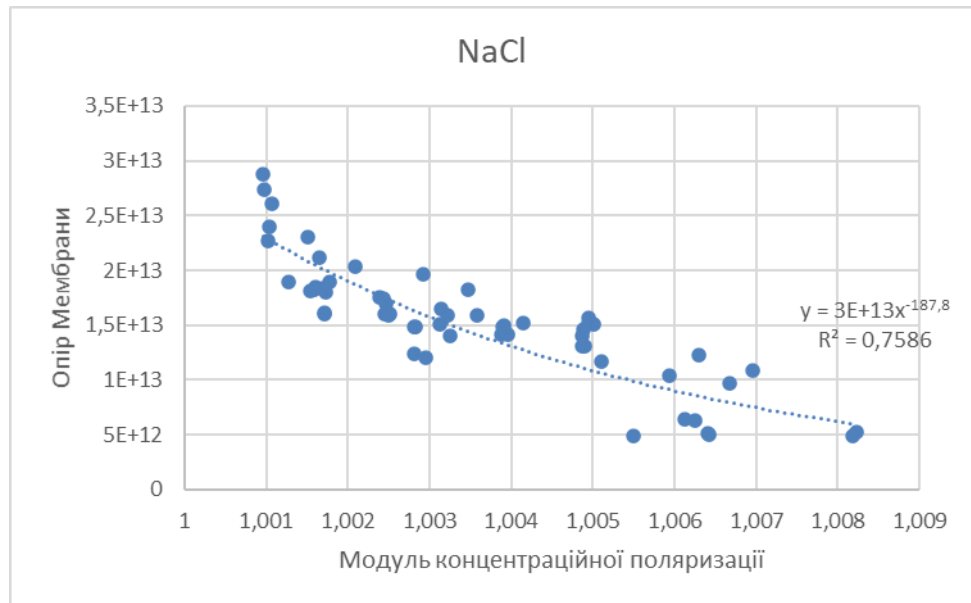


Рисунок 3.8 – Графік залежності опору мембрани від модуля концентраційної поляризації для речовини хлорид натрію

Отримані результати є цінним внеском у вивчення фізичних властивостей речовин та їх взаємодії з мембранами. Вони можуть бути використані для подальших наукових досліджень та розробки нових технологій, які базуються на проникненні речовин через мембрани та їх електрофізичних характеристиках.

3.5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Сучасний розвиток науки і техніки приносить принципові нововведення у всі сфери матеріального виробництва, суттєво змінюючи технологічні процеси та матеріали, що використовуються, предмети та знаряддя праці. В свою чергу зміни технології та устаткування призводять до зміни умов праці та трудового процесу в цілому.

Апарати, які вводяться в експлуатацію, як і все інше обладнання, повинно відповідати всім вимогам техніки безпеки і охорони праці, які сформульовані в галузевих стандартах, а також в затверджених інстанціями інструкціях, правилах

і нормах. Темою магістерської дисертації є «Закономірності концентраційної поляризації при зворотному осмосі». Контроль параметрів технологічного процесу здійснюється оператором лінії, пульт якого знаходиться в навчальній лабораторії площиною 30 м² корпусу №19 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Шкідливими і небезпечними виробничими факторами при роботі та обслуговуванні виробничої схеми є:

- повітря робочої зони;
- ураження електричним струмом;
- пожежонебезпека.

3.5.1 Повітря робочої зони

Виходячи з прийнятої експериментальної установки можна сказати, що приміщення без надлишкового тепловиділення, тобто $Q < 20$ ккал/год м³ або $Q < 23.27$ Дж/с. м³ Категорія робіт оператора легка Іа, так як показник енерговитрати складає до 273 Дж/с. Параметри повітря робочої зони представлені в таблиці 3.1, в якій вказані також оптимальні умови.

Фактична концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони відповідають загальним санітарно-гігієнічним вимогам до повітря робочої зони - наказ МОЗ від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».

Параметри повітря робочої зони відповідають ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Забезпечення параметрів в зимовий час здійснюються за допомогою водяного опалення з температурою теплоносія 70- 90 °С, а в теплий час року вентиляцією та кондиціонуванням.

Для відводу цих речовин в конструкції лінії передбачена місцева вентиляція відкритого типу. До місцевих відсмоктувачів відкритого типу належать

всмоктувальні панелі, витяжні зонти та бортові відсмоктувачі. Витяжні зонти потрібні для вловлювання потоків шкідливих речовин, що направлені вгору. Їх доцільно використовувати у випадку, коли джерело утворення пилу, парів та газів переміщується по площині робочого місця як в горизонтальній, так, і у вертикальній площинах.

Параметри повітря робочої зони наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри повітря робочої зони

Сезон року	Категорія робіт	Фактична температура, °C	Фактична відносна вологість, %	Фактична швидкість руху повітря, м/с
Холодний період року	Легка I а	19-20	40-65	0,2
Теплий період року	Легка I а	20-25	40-70	0,2

При проектуванні штучної (механічної) загальнообмінної вентиляції, яка призначена для вилучення з приміщення надлишків тепла, вологи та інших шкідливих виділень необхідно приймати розрахункові параметри згідно з ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Розрахунок механічної вентиляції повинен включати визначення найбільш раціонального способу вилучення або попередження утворення токсичних, пожежо- чи вибухонебезпечних концентрацій пароповітряних сумішей (загальнообмінні або місцеві вентиляційні установки і системи); визначення необхідної кількості повітря для вентиляції виходячи із кількості шкідливих речовин, які вилучаються з приміщення, відомої кратності повітрообміну в приміщенні, або надлишкового тепла, яке необхідно асимілювати до санітарно - допустимих норм відповідно до наказу МОЗ від 14.07.2020 № 1596 «Про

затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».

3.5.2 Небезпека ураження електричним струмом

Устаткування лінії, що розробляється, буде знаходитись в сухому приміщенні з нормальною температурою і вологістю повітря. Підлога приміщення залізобетонна. Згідно ПУЕ воно відноситься до приміщень з підвищеною безпекою.

Для живлення елементів установки використовується трифазна напруга 220/380 В з частотою 50 Гц з глухозаземленою нейтраллю.

Причини ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом можуть бути такими:

1. замикання на корпусі;
2. випадки дотику людей до відкритих струмопровідних частин електроустаткування;
3. старіння ізоляції і, як наслідок, втрата ізоляційних властивостей;
4. дотик до частин установки, що можуть опинитися під напругою у випадку короткого замикання.

Для забезпечення електробезпечності передбачені організаційні і технічні заходи:

- А) Інструктаж і навчання безпечним методам праці.
- Б) Установлення плакатів і знаків безпеки (на небезпечних місцях - джерелах живлення, на регуляторах, і т. ін.)
- В) Вирівнювання потенціалу.
- Г) Ізоляція струмоведучих частин. Контроль ізоляції здійснюється прибором ПНКИ. $R_{із}=0,5 \text{ м*Ом}$.
- Г) Використання електрозахистних засобів, у т.ч. діелектричних рукавичок, інструментів з ізолюючими ручками, покажчиків напруги.

Д) Захисне занулення.

Е) Захисне відключення.

Так як маємо установку з глухозаземленою нейтраллю, то використовуємо захисне занулення (рисунок 3.9).

Занулення виконують електричним з'єднанням металічних частин електроустановок з заземленою точкою джерела струму за допомогою нульового захисного провідника.

В аварійному режимі:

$$I_{к.з.} = \frac{U_{\phi}}{z + r_0} = \frac{220}{0,2 + 0,4} = 366,67 \text{ A} > 300 \text{ A}$$

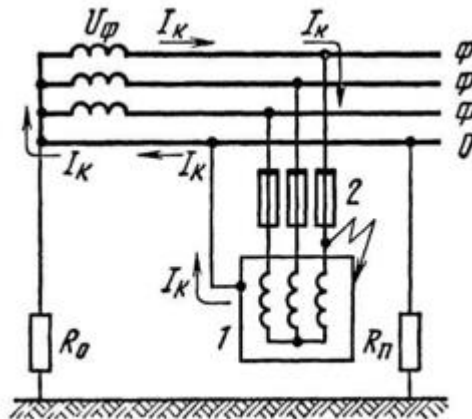


Рисунок 3.9 – Захисне занулення

Параметри відповідають ДНАОП 0.00-1.32-01 «Правила улаштування електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок».

3.5.3 Пожежна безпека та надзвичайні ситуації

У процесі роботи обладнання не використовуються вибухонебезпечні речовини. Виходячи з цього технологічний процес регенерації відноситься до категорії Д (ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою»).

Стійкість споруди за ПУЕ відповідає ступеню вогнестійкості II. Згідно ПУЕ клас зони установки П-Па.

Причини, що можуть викликати загорання:

- несправність електроустаткування;
- струми короткого замикання і навантаження кабелів живлення;
- загорання ізоляції електропроводки; Засоби запобігання виникненню пожежі:

- дотримання технологічних норм і правил експлуатації;
- паління тільки у відведених для цього місцях;
- своєчасне проведення інструктажу з техніки безпеки серед обслуговуючого персоналу;
- наявність засобів сигналізації, зокрема, системи електричної пожежної сигналізації (ЕПС) і засобів оперативного зв'язку з пожежною частиною;
- наявність засобів пожежогасіння в безпосередній близькості від установки (пісок, вогнегасники).

Для гасіння невеликих ділянок загорання при виключеному та включеному (до 1000В) електроустаткуванні застосовують вуглекислотні вогнегасники ОУ-5 (1 шт.) та установки пожежогасіння порошкові закачані типу «САМ9» (1 шт.).

Відповідно до закону про охорону праці і національної програми по охороні праці, виробничі будівлі, споруди, устаткування, технологічні процеси повинні відповідати вимогам, що забезпечують безпечні умови праці.

У випадку надзвичайної ситуації, наприклад такої як ворожий ракетний обстріл, руйнування будівлі і обладнання залежить від міцності будівлі і величини ударної хвилі, яка залежить від центру вибуху до об'єкту та кількості вибухової речовини.

Для зменшення шкоди, уражень людей та не розповсюдження вибуху потрібно:

- укріпити цех додатковими колонами або фермами;
- всі кабельні лінії прокласти під землею;

- зменшити запаси отруйних та вибухонебезпечних об'єктів на території цеху;
- розробити схему евакуації людей при надзвичайній ситуації;
- контролювати наявність та стан вогнегасників;
- закріпити всі верстати та апаратуру на фундамент.

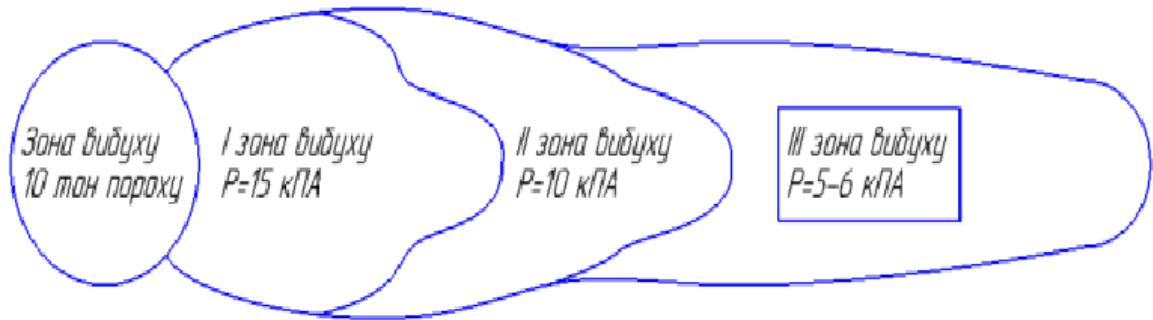


Рисунок 3.10 – Схема зони вибуху

При ракетній загрозі спершу потрібно сповістити всіх працівників, потім евакуювати весь персонал в укриття.

3.6 Висновки

У даному розділі було зроблено:

- Описана експериментальна установка, що використовувалася в експериментах;
- показана математична модель осмотичної моделі;
- виявили, проаналізували і зробили рекомендації для усунення шкідливих і небезпечних факторів, які можуть виникати при моделюванні, випробуванні та експлуатації експериментального устаткування;
- ми встановили наступне:
 - а) Мікроклімат, який відповідає діючим нормативним документам
 - б) Електробезпека, щоб попередити причини ураження струмом.

в) пожежна безпека, яка відповідає вимогам, що забезпечують безпечні умови праці

4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

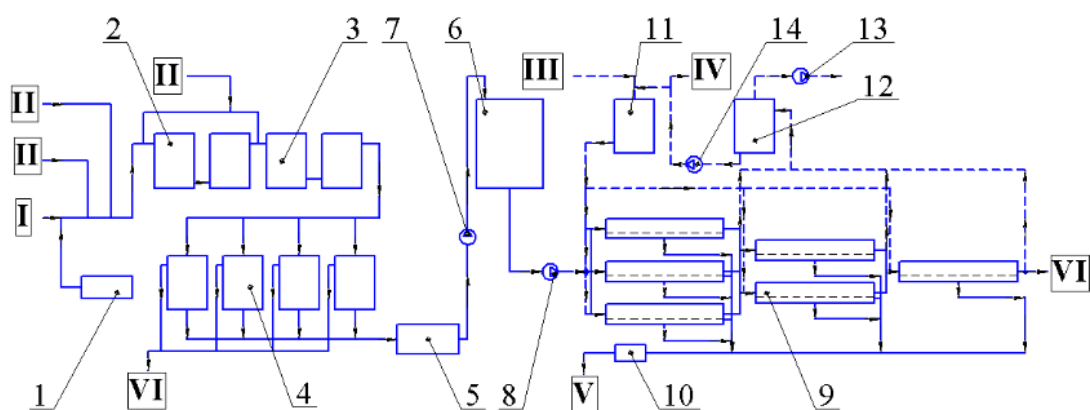
4.1 Практичне застосування

В основу розробки стартап-проекту покладено ідею регенерації мембранних рулонованих модулів. А саме, пропонується збільшити ресурс мембран (регенерація, відновлення), шляхом зменшення концентраційної поляризації.

Сьогодні у всьому світі мембранні методи очищення стічних вод вже не викликають сумнівів у своїй ефективності і конкурентоспроможності. Безліч закордонних компаній виробляють різноманітні мембрани, мембранні модулі і установки очищення природної і стічної води на їх основі.

Для доведення практичного застосування згідно обґрунтованої методики досліджень була взята за основу вже існуюча схема розташування контрольно-вимірювальних приладів блоку.

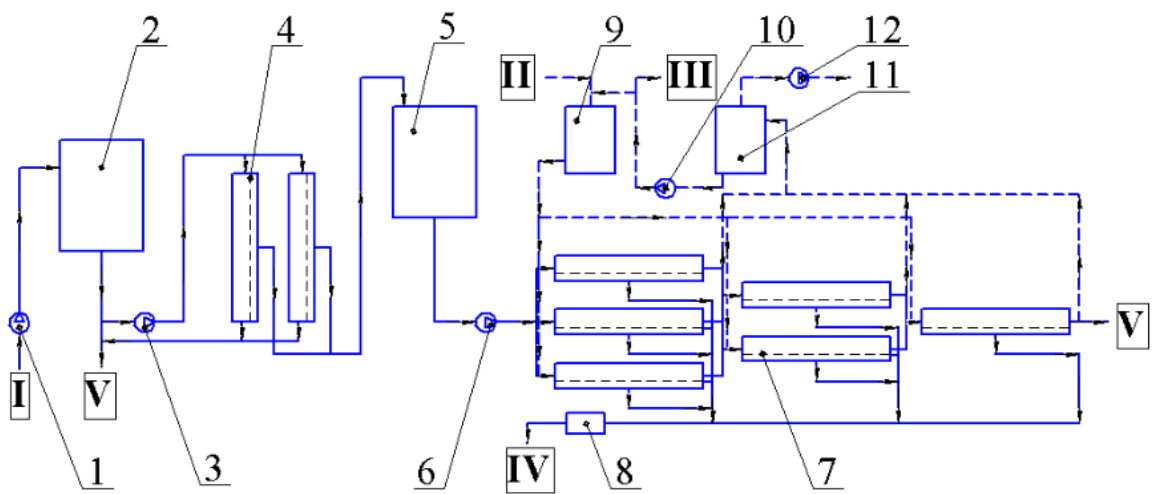
Схеми установки наведена на рисунках 4.1-4.3.



1 – система хлорування; 2 – ємність дестабілізації; 3 – флокулятор; 4 – фільтр; 5 – проміжна ємність; 6 – накопичувальна ємність підготовленої води; 7 – насос; 8 – насос високого тиску; 9 – каскад мембранних апаратів; 10 – пост-

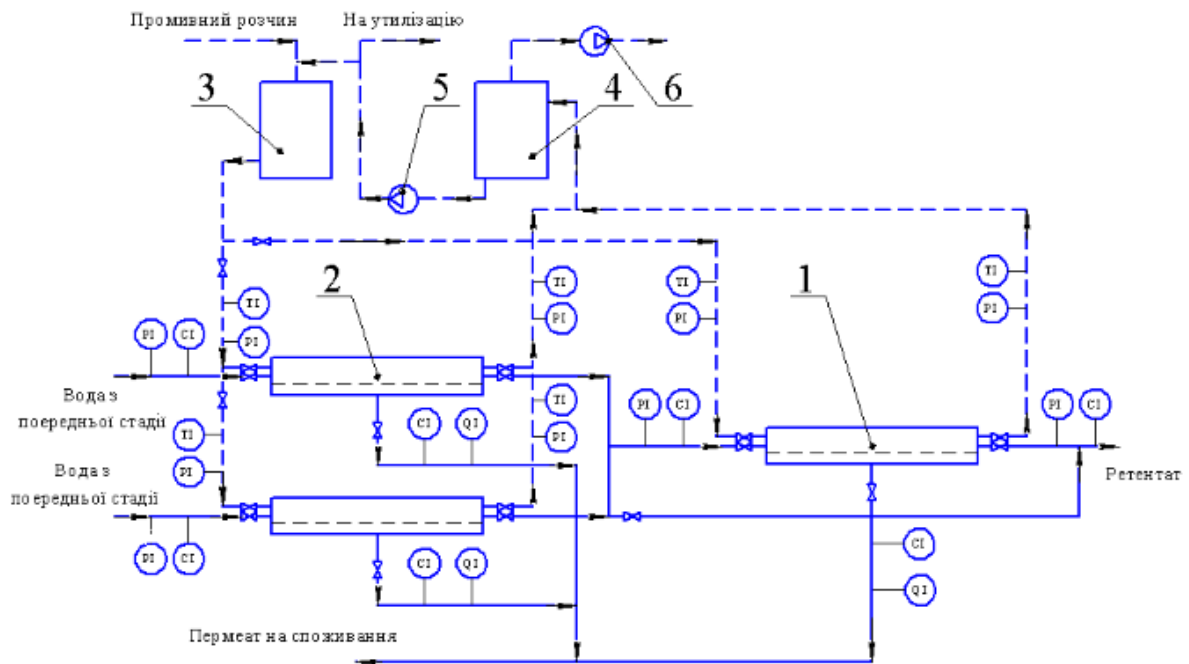
фільтр; 11 – ємність з промивним розчином; 12 – ресивер; 13 – вакуум-насос; 14 – циркуляційний насос; I – подача сировини; II – дозування реагентів; III – подача промивного розчину; IV – відведення промивного розчину; V – відведення очищеної води; VI – дренаж

Рисунок 4.1 – 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 4.2 – Принципова схема установки зворотноосмотичної підготовки води з мембранною (мікрофільтрацією) попередньою обробкою, що доповнена блоком регенерації



1 – мембранні апарати i -ї секції каскаду; 2 – мембранні апарати секції каскаду; 3 – ємність з промивним розчином; 4 – вакуумна ємність; 5 – циркуляційний насос; 6 – вакуум-насос

Рисунок 4.3 – Схема розташування контрольно-вимірювальних приладів блоку регенерації мембранних апаратів в установці

Принцип роботи установки з традиційною системою попередньої обробки «сирої води» (рисунок 5.1) наступний. «Сира вода» (морська вода, солонувата поверхнева вода, або вода зі свердловини) піддається знезараженню хлором за допомогою блоку хлорування 1, далі в потік вводиться коагулянт $FeCl_3$ та корегується показник рН дозуванням кислоти. Вода послідовно подається в дестабілізуючу ємність 2 та каскад коагуляторів 3 де відбувається коалесценція та осадження зважених твердих частинок. За необхідності відбувається подача в систему поліелектролітів для покращення процесу коагуляції. Залишки твердих частинок та коагулянту видаляються в фільтрах 4.

Шлам видаляється в дренажну систему, а фільтрат через проміжну ємність 5 насосом 7 перекачується в накопичувальну ємність 6, звідки насосом високого

тиску 8 подається в каскад зворотноосмотичних мембранних апаратів 9 (на схемі показаний однопрохідний конічний каскад, який найбільш поширений серед систем зворотного осмосу). Також в накопичувальній ємності можливе дозування антискейлантів (на схемі не показано). Пермеат з мембранних апаратів 9 після проходження пост-фільтра 10 подається на поживання або технологічне використання, ретентат зливається в дренажну систему або іде на утилізацію. При перевищенні забруднення окремих мембранних апаратах вище допустимого рівня даний апарат відключається від подачі сировини, та підключається до установки регенерації. В режимі регенерації за рахунок розрідження (абсолютний тиск 0,005-0,009 МПа при температурі 40-45 °С), створюваного вакуум насосом 13 в вакуумній ємності 12 з ємності 11 промивний розчин (знесолена вода, розчин лимонної кислоти ($C_6H_8O_7$) або розчин гідрокарбонату натрію (Na_2CO_3)) подається до мембранного апарата, що підлягає регенерації. При русі промивного розчину в каналах мембранного модуля (або модулів) в апараті відбувається розчинення і вилучення шару осаду, внаслідок чого сумарний опір перенесенню зменшується і зростає продуктивність модуля. Циркуляція промивного розчину здійснюється за допомогою циркуляційного насоса 14.

В установці з мікрофільтраційною попередньою обробкою (рисунок 4.2) сира вода насосом 1 подається в збірник 2, звідки насосом 3 подається на мікрофільтраційні апарати 4. Ретентат з мікрофілтарційних апаратів зливається в дренажну систему, а пермеат подається в накопичувальну ємність 5. Подальший процес підготовки води та регенерації мембранних модулів протікає аналогічно з протіканням в установці з традиційною системою обробки.

Контроль рівня забруднення доцільно здійснювати за значеннями потоку пермеату, якості пермеату та гідравлічного опору мембранного модуля. Згідно рекомендацій, наведених в [102], гранично допустимим є зменшення потоку пермеату на 10%, збільшення концентрації розчинених речовин в пермеаті на

10% та збільшення гідравлічного опору апаратів на 15%. Відповідно необхідно забезпечити вимірювання і контроль тиску на вході в кожен мембранний апарат, вимірювання і контроль тиску на виході з напірного каналу кожного апарата, вимірювання і контроль концентрації в пермеаті та контроль витрат пермеату. Схема розташування контрольно-вимірювальних приладів показано на рисунку 4.3.

Крім того для забезпечення контролю процесу також необхідно забезпечити вимірювання концентрації на вході до модуля, а також вимірювання температури та тиску промивного розчину, та підтримувати ці параметри на рівні $p = 0,007-0,009$ МПа, та $t = 40-45^{\circ}\text{C}$.

При роботі апаратів в режимі розділення розчину крани на трубопроводі подачі промивного розчину в апарат та на трубопроводі видалення промивного розчину в кожному апараті закриті. Відкритими залишаються крани на трубопроводах подачі сировини та на трубопроводах відведення пермеату та ретентату. При досягненні критичного рівня забруднення модуля по одному з трьох параметрів, відбувається перехід системи в режим регенерації. Спершу перекривається кран подачі сировини, за ним перекриваються крани на трубопроводах відведення пермеату і ретентату. Одночасно вмикається вакуум-насос 6, а по досягненню розрідження на рівні $0,07-0,08$ МПа (абсолютний тиск $0,02-0,03$ МПа), відкривається кран на вихідному трубопроводі системи регенерації, через який видаляються залишки ретентату з апарата в вакуумну ємність 4.

Після цього, вакуум-насос вимикається, залишки пермеату зливаються з вакуумної ємності 4 і насос повторно вмикається, і після досягнення розрідження на рівні тиску насичення при робочій температурі промивного розчину (рекомендована температура $35-45^{\circ}\text{C}$, що відповідає розрідженню $0,09-0,094$ МПа) відкривається кран подачі промивного розчину і відбувається течія промивного розчину в каналах мембранного модуля апарату, що регенерується. Кран подачі промивного розчину дозволяє регулювати витрату промивного

розчину і, відповідно, режим промивання, а також здійснювати періодичне підвищення тиску. Циркуляція розчину забезпечується насосом 5. Після завершення регенерації, кран подачі промивного розчину перекривається, за рахунок розрідження видаляються рештки промивного розчину з розчиненим осадом, перекривається кран відведення промивного розчину, відриваються крани відведення пермеату та ретентату, після чого відновлюється подача сировини.

4.2 Опис ідеї проекту

Ідея стартап проекту: модифікація та автоматизація даної установки, за допомогою реле, регулятора і вимірювача витрат і як результат збільшення ресурсу та модернізація існуючих мембран(регенерація, відновлення), шляхом зменшення концентраційної поляризації.

В процесі зворотного осмосу відбувається явище концентраційної поляризації, що в свою чергу призводить забруднення поверхні мембрани осадом, який складається зі зважених частинок та сполук, що не розчиняються. Це заважає проходженню процесу. У таблиці 5.1 показано зміст ідеї та можливі потенційні ринки.

Таблиця 4.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
Модифікований метод мембранного модуля для збільшення продуктивності і ресурсу мембрани	Хімічна промисловість Очищення води Харчова промисловість	1. Здешевлення вартості мембрани порівняно з новими 2. Підвищена кількість повторного використання

Для визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик розробленого проекту, проведено порівняння техніко-економічних характеристик.

Оскільки аналогічних послуг на ринку не виявлено. Порівняння буде проводитись з продавцями нових мембранних модулів. Найбільш популярними торговими марками є RemontOsmos та ВОДА ВОЗДУХ, таблиця 8.2.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

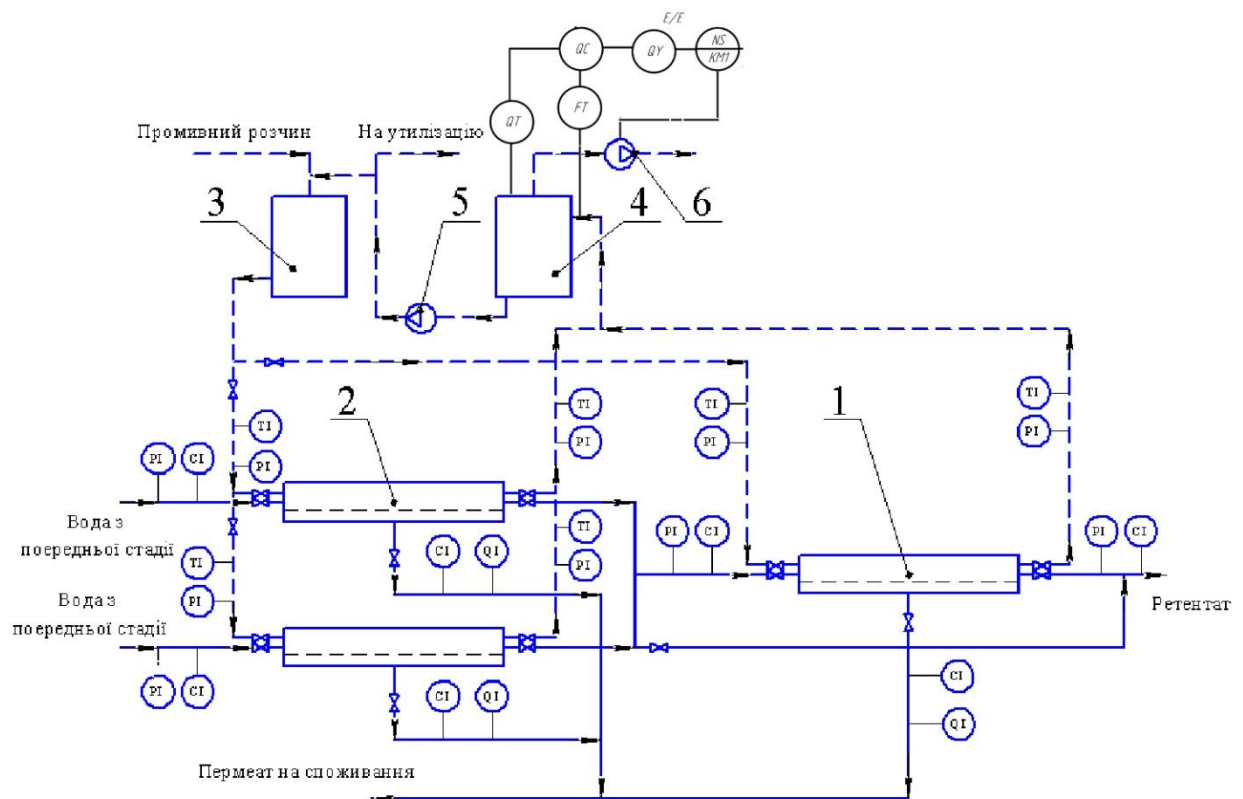
№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W(слабка	N (нейтральна	S (сильна
		Мій проект	RemontOsmos	ВОДА ВОЗДУХ			
1.	Асортимен обладнання	Можливість відновлення будь-якого модуля	Не завжди обладнання є наявним на складі		-	-	+
2.	Кількість разів повторного використання	5	0		-	-	+
3.	Вартість послуги	Вартість з одиницю сягає від 400 грн	Вартість з одиницю сягає від 700 грн		-	-	+

Поштовхом до рішення об'єднання клітинок для обох конкурентів є спільні їх ознаки, або невелике їх коливання.

Визначений перелік сильних (асортимент обладнання, кількість разів повторного використання, вартість послуги) характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

4.3 Технологічний аудит ідеї продукту

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.



- 1 – мембранні апарати і-ї секції каскаду; 2 – мембранні апарати секції каскаду; 3 – ємність з промивним розчином; 4 – вакуумна ємність; 5 – циркуляційний насос; 6 – вакуум-насос

Рисунок 4.4 – Модернізована схема розташування контрольних вимірювальних приладів блоку регенерації мембранних апаратів в установці

В оновленій установці на лінії пермеату стоїть вимірювач витрат і вимірювач концентрації. За ним регулятор QC, який, в свою чергу, подає сигнал перетворювачам електричного сигналу QY, і від нього сигнал іде на виконавчі механізми, які переключують крани і вмикають насос за допомогою електричного реле NS/KM1 керуванням живлення електромотора.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Шлях регенерації	Регенерація проходить гідродинамічним методом	Дані технології існують. В доробці їх є необхідності.	Дані технології знаходяться відкритому доступі.
2	Шлях регенерації	Регенерація проходить за допомогою хімічних речовин	Дані технології існують. В доробці їх немає необхідності.	Дані технології знаходяться відкритому доступі.
<p>Обрана технологія реалізації ідеї проекту:</p> <p>1 – Регенерація гідродинамічним методом з використанням пульсацій</p>				

Проаналізувавши технологічну здійсненність проекту можна зробити висновок, що проект можна реалізувати.

4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів- конкурентів.

Для цього спочатку проводився аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку, таблиця 8.4.

Середня норма рентабельності в галузі 20% вища ніж середній банківський відсоток на вкладення 15%. За попереднім оцінюванням можна сказати, що ринок є привабливим для входження [65].

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, млн грн	9,8
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Під час війни знаходиться в стагнації, або навіть спадає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Фінансові, особистісні, цінові
5	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20

Визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформовано орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи, таблиця 4.5.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Потреба у багаторазовому повторному використанні мембранних модулів	Підприємств, що займаються очиткою води	Потенційна група клієнтів одна, тому відмінностей немає	Якість води (кількість солей та мінералів) Економічна ефективність Ціна

Після визначення потенційних груп клієнтів проводився аналіз ринкового середовища: складено таблиці факторів, що перешкоджають ринковому впровадженню проекту, таблиця 4.6, та факторів, що йому сприяють таблиця 4.7. Фактори в таблицях подано в порядку зменшення значущості [65].

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакції компанії
1	Висока вірогідність появи нових конкурентів	Тенденції зміни числа конкурентів	Зниження ціни

Продовження таблиці 4.6

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакції компанії
2	Політико-правові «Закон України про підприємницьку діяльність» ,«Закони України про ліцензування певних видів господарської діяльності».	Може вплинути на працездатність проекту. Недостатня підтримка державою нових підприємців. Дорогоартісні ліцензії, заборона на діяльність без ліцензії.	Відповідність вимогам законодавства України та країн з якими ведеться співпраця
3	Соціо-культурні Консервативність поглядів споживачів	Небажання споживачів використовувати інноваційні рішення	Пояснення споживачам, що пропоновані послуги зможуть підвищити ефективність використання мембран, як модернізацію. Альтернатива повної заміни обладнання
4	Науково-технічний прогрес	Поява нової технології регенерації мембранних модулів	Розробка нового об'єкта та технології, декларування власної ціни на дану пропозицію

Продовження таблиці 4.6

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакції компанії
5	Демографічні Відтік населення з країни в зв'язку з війною	Повільне збільшення попиту на регенерацію мембран	Поступове збільшення числа потенційних клієнтів в майбутньому
6	Соціально культурні. Консервативність поглядів споживачів	Небажання споживачів використовувати нові технології	Пояснення споживачам, що пропоновані послуги зможуть підвищити ефективність використання мембран
7	Наслідки війни	Зниження попиту на регенерацію мембран	Розширення ринків збуту за межі країни або пошук альтернативних сегментів
8	Наслідки пандемії	Зменшення виробництва та споживання	Переключення на виробництво альтернативних продуктів або пошук нових ринків
9	Стан економіки країни під час війни	Зниження інвестицій та зростання економічних обмежень	Оптимізація виробничих процесів та зменшення витрат
10	Підтримка країн західної Європи	Фінансова та технічна підтримка проєкту	Встановлення партнерських відносин та співпраця з країнами західної Європи
11	Економічні (Також як наслідок війни)	Зміни у валютних курсах	Перегляд цінової політики та оптимізація витрат

Продовження таблиці 4.6

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакції компанії
12	Технологічні	Швидкий технологічний прогрес у галузі	Оновлення обладнання та розробка нових продуктів
13	Екологічні	Законодавство щодо екологічних вимог	Впровадження екологічно чистих технологій та забезпечення відповідності нормам

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Політика протекціонізму	Захист внутрішнього ринку, обмеження імпорتنих та експортних податків, субсидій	Розвиток баромембранної промисловості України
Залучення закордонних інвесторів для відбудови економіки України після закінчення війни	Залучення інвесторів до фінансування проєкту	Активна агітація серед інвесторів щодо фінансування проєкту

Отже, було сформовано можливу реакцію компанії появи нових загроз та можливостей. Після чого проводився аналіз пропозиції: визначалися загальні ризиконкуренції на ринку, таблиця 4.8.

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції : Монополістична конкуренція	Є безліч компаній, що надають різноманітні послуги і що конкурують між собою. Вхідні і вихідні бар'єри існують, але невисокі. Послуги кожного виробника відрізняються якимись особливостями.	Створення послуг під замовлення.
2. За рівнем конкурентної боротьби: Національна	Створення чогось нового	Створення унікальної технології
3. За галузевою ознакою: Міжгалузєва	Конкуренція за більш вигідні умови	Удосконалення структури послуг відповідно до потреб.
4. Конкуренція за видами товарів: Товарно-видова	Зосередження конкурентоспроможності на якості послуг	Постійний моніторинг ринку щодо появи технологій заміників.
За характером конкурентних переваг. Цінова	Головним засобом боротьби є ціна	Зменшення ціни (за рахунок зменшення витрат)
За інтенсивністю: не марочна	Репутація проєкту	Створення високого рівня ділової репутації, що сприятиме впізнаваності стартапу

4.5 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проєкту

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера, таблиця 4.9).

Таблиця 4.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Пряму конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замісники
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки	Фірми, що надають схожі послуги (Ремонт Осмос, Вода Воздух)	Можливості входження в ринок є оскільки потребується очищення великої кількості мембран	Транспортування мембранних модулів відбувається своїми силами	Клієнту завжди необхідне. Конкурентно спроможні послуги за низькою ціною	Ми маємо конкурентну перевагу – це нижча ціна, та унікальна технологія

Можна зробити висновок, що для того щоб проєкт був конкурентоспроможним на ринку він повинен бути інноваційним та малозатратним щоб подолати всі бар'єри на стадії розвитку. Та з огляду на конкурентну ситуацію на ринку, доведено потенційні можливості існування стартапу.

На основі аналізу конкуренції, таблиця 4.9, а також із урахуванням вимог споживачів до товару, таблиця 4.5, та факторів маркетингового середовища, таблиці 4.6-4.7, визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності [66], таблиця 4.10.

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ціна	Зменшення вартості надання послуг шляхом збільшення ресурсу
2	Екологічність	Безвідходне виробництво та екологічно чисті технології сприяють збереженню навколишнього середовища, задоволенню екологічних потреб споживачів та формуванню позитивного іміджу компанії.
3	Інноваційність	Впровадження нових технологій дозволяє компанії бути впереду конкурентів, задовольняти змінні потреби клієнтів та залучати нові ринки.
4	Послуги післяпродажного обслуговування	Надання високоякісних послуг післяпродажного обслуговування, таких як технічна підтримка, консультації та сервісні роботи, є важливим фактором для споживачів.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11. - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ціна						Δ ■	○	
2	Екологічність								○ Δ ■
3	Інноваційність						Δ ■	○	
4	Послуги післяпродажного обслуговування					○ Δ ■			

Δ - Ремонт Осмос

■ - Вода Воздух

○ – мій проект

Сильні сторони проекту: безвідходність виробництва, а також менша ціна затакі самі послуги.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities)), таблиця 8.12, на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін, таблиця 4.12 [66].

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 4.12 - SWOT аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Унікальність технології 2. Енергоефективність. Робота за вільним графіком працівників 3. Ефективність 4. Відносно великий асортимент послуг, що надаються 5. Універсальність – застосування модернізованого обладнання 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Малий досвід роботи на ринку 2. Низька дохідність проєкту
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Залучення до співпраці фахівців в інженерії 2. Модернізація та проєктування нового обладнання 3. Встановлення партнерських відносин та співпраця з країнами західної Європи 4. Швидкий технологічний прогрес у галузі 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Поява нових конкурентів 2. Зниження інвестицій та зростання економічних обмежень 3. Нестабільний валютний курс

Таблиця 4.13 – Таблиця можливостей і загроз

	Можливості			Загрози		
Сильні сторони	-	+	-	+	-	+
	+	+	-	+	-	-
	+	+	-	-	-	+
Слабкі сторони	+	-	-	+	+	-
	-	+	-	-	+	-
	-	-	+	-	-	-

За даним дослідженням в нас посилення сильних сторін за рахунок можливостей.

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (таблиця 4.13).

Таблиця 4.14 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Загарбник	Значні	Максимум рік
Наступник	Суттєві	Максимум рік

Після аналізу обираємо альтернативу **Загарбник**.

Найоптимальніший шлях вирішення управлінської проблеми – адекватне комбінування напрямів та шляхів розв’язання проблеми, всебічне просування власного бренду, неупинна праця над якістю, ергономічністю товару.

4.6 Розроблення ринкової стратегії ринку

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів, таблиця 4.14, [67].

Таблиця 4.15 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	2	3	4	5	6
	Підприємства, що використовують своєму виробництві очищення води	Визначатиметься готовністю підприємств піти на додаткові витрати пов'язані з впровадженням чи імплементації ідеї проекту	Залежатиме від рівня, темпів розвитку економіки і галузей – споживачів зокрема, а також рівня і характеру підтримки іновативного підприємства зі сторони держави	Низька	Високі бар'єри входу на ринок
Обрано наступні цільові групи: підприємства, що займаються водопідготовкою різних рівнів.					

За результатами аналізу профілю групи споживачів, було визначено цільові групи, таблиця 4.14, для яких пропонується стратегія диференційованого маркетингу [65]. Для роботи в обраних сегментах ринку було сформовано базову стратегію розвитку, таблиця 4.15 [67].

Таблиця 4.16 - Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Ринкове позиціонування	Диференціація структури маркетингу.	Передбачає надання послуг важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять послугу відмінною від послуг конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях послуг, бути реальною або уявною.	Стратегія диференціації

Отже, для роботи в обраних сегментах ринку було обрано стратегію диференціації, яка дозволяє компанії домогтись більшої рентабельності за рахунок того, що ринок готовий прийняти більш високу ціну (цінову премію бренду).

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки, таблиця 4.17, [68].

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Передбачається розвиток ринку	Ні	Стратегія наслідування лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, таблиця 4.4, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку, таблиця 4.14, та стратегії конкурентної поведінки, таблиця 4.15, розроблено стратегію позиціонування, таблиця 4.16, що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельний проект [68].

Таблиця 4.18 - Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту
Підвищення ефективності, енергоефективності.	Стратегія диференціації	Ефективність, енергоефективність

В результаті виконання даного підрозділу було узгоджено систему рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначає напрям роботи стартап-компанії на ринку

4.7 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 4.17 підсумовано результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару [69].

Таблиця 4.19 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Підвищення ефективності регенерації мембранних модулів, енергоефективності.	Ефективність регенерації, енергоефективність	Ефективність регенерації, Енергоефективність, екологічність

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару.

Ці послуги призначені для виробництв, які використовують мембранний процес для очищення води, фільтрації рідин або інших процесів, де мембрани використовуються для розділення речовин і забезпечення якості продукції. Оскільки це послуги, то дизайн не є основним фактором. Проте, професійна команда фахівців забезпечує високий рівень кваліфікації та дотримання вимог стандартів при проведенні модернізації мембран.

Таблиця 4.20 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Більший час експлуатації мембран за рахунок регенерації гідродинамічним способом Створення унікальної технології регенерації мембранних рулонованих модулів з дотриманням всіх ГОСТів та ДСТУ.
II. Товар із підкріпленням	Створення різних видів послуг: консалтингові послуги, проведення аналізу забруднень і надання рекомендацій по експлуатації.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.19). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.21 - Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на послуги-замінники	Рівень цін на товари- аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
Відповідно до розміру мембран, ціна на регенерацію варіюється від 800 до 1800 грн/штука	Відповідно до Розміру мембран, ціна на нове обладнання від 1600 до 2400 грн/штука	Промисловий ринок залежить від замовлення послуг	Ціна на товари нижча ніж в конкурентів

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (таблиця 4. 20).

Таблиця 4.22 - Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник послуг	Глибина каналу збуту	Оптимальна Система збуту
Закупівля оптом	Якість послуги, Швидкість перевезення до клієнта	Нульовий рівень. Адже використовуються власні сили	Власні сили

При визначенні оптимальної системи збуту було вирішено, що ми будемо проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту).

Останньою і основною складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів, таблиця 4.21, [70].

Таблиця 4.23 - Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція Рекламного звернення
Цільові клієнти орієнтовані на використання вузько-спеціалізованих комунікацій, що визначаються галузевими особливостями їх приналежності	Інтернет, виставки, семінари, друкована продукція.	Спеціалізовані виставки. Присвячені Технологіям очистки води: «Фильтры и технологии очистки воды», «AquaPro», «Aqua Ukraine»	Привернути Увагу до унікальності ідеї стартапу	«Русійна сила інновацій»

Результатом останнього пункту має стати ринкова (маркетингова) програма, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого буде впроваджено проект, та відповідну обрану альтернативу ринкової поведінки.

4.8 Висновки

- Визначено сильні, слабкі та нейтральні характеристики розробленого проекту, проведено порівняння техніко-економічних характеристик з аналогічними апаратами найбільш популярних торгових марок, що дозволило нам зробити попередні висновки щодо доцільності реалізації даного проекту;
- Обрано стратегію посилення сильних сторін за рахунок використання ринкових можливостей, так як імовірність отримання ресурсів найбільша, а строк реалізації найменший;
- Наявність попиту, що визначається потребою підвищення ефективності, енергоефективності, свідчить про можливість ринкової комерціалізації проекту;
- Маркетингові дослідження обраного сегменту ринку, оцінки рівня та динаміки конкуренції в базовій та спорідненій галузях, дозволяють стверджувати про перспективи створення та розвитку стартап-проекту.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну задачу дослідження процесу зворотного осмосу і уточнення закономірностей концентраційної поляризації при проведенні цього процесу. За результатами досліджень були зроблені такі висновки:

1. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень досліджена закономірність концентраційної поляризації при зворотному осмосі.
2. Проведено експериментальні дослідження та отримано уточнене критеріальне рівняння для розрахунку модуля концентраційної поляризації.
3. Запропоновано модернізування конструкції апарата для можливості зменшення витрат.

CONCLUSIONS

The dissertation solved an important scientific and technical problem of studying the reverse osmosis process and clarifying the laws of concentration polarisation during this process. The following conclusions have been drawn based on the results of the research:

1. According to the results of theoretical and experimental studies, the regularity of concentration polarisation in reverse osmosis was investigated.
2. Experimental studies have been carried out and a refined criterion equation for calculating the concentration polarisation modulus has been obtained.
3. The modernisation of the apparatus design is proposed to reduce costs.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гулієнко С.В. Моделювання процесів мембранного розділення. Навчальний посібник. Київ.: НТУУ «КПІ».- 2018.
2. Дытнерский Ю.И. Обратный осмос и ультрафильтрация.- М.: «Химия», 1978.-С. 176, 168. – 352 с.
3. Л.В. Іванченко, В.Я. Кожухар, В.В. Брем Хімія і технологія води. Навчальний посібник. Одеський Національний Політехнічний Університет, Одеса «Екологія». – 2017.
4. Warsinger, D. M., Swaminathan, J., Guillen-Burrieza, E., Arafat, H. A., & Lienhard V, J. H. (2015). Theoretical limits of flux improvement from novel reverse osmosis desalination techniques. *Journal of Membrane Science*, 474, 193-205.
5. Li, Q., Miao, R., Zhou, M., & Liu, Z. (2021). The design and performance of reverse osmosis membrane systems: A review. *Chemical Engineering Journal*, 409, 128014.
6. Penders, J., & Blok, K. (1997). Reverse osmosis: A state-of-the-art review. *Desalination*, 113(2-3), 145-153.
7. Шимчук В. П., Васильченко І. Ю "Методи очищення води в промисловості". Київ - 2015
8. Warsinger, D. M., Tow, E. W., Nayar, K. G., & Lienhard V, J. H. (2018). Energy efficiency and recovery in seawater reverse osmosis systems: current developments and future challenges. *Desalination*, 431, 2-13
9. Якоб М. А., "Хімічна технологія водоочищення", Львів – 2009.
10. В. М. Коваленко, О. О. Топорков. "Основи техніки водопостачання та водовідведення". Харків – 2012.
11. Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), 712-717.

12. Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 309, 197-207.
13. Комлева, П. В. Зворотний осмос та нанofільтрація в очищенні води / П. В. Комлева, В. А. Виноградова. – К.: НДУ, 2009. – 196 с.
14. Білецька, О. О. Основні методи очищення води для питного водопостачання / О. О. Білецька, І. В. Ткаченко, А. М. Грицай // Науковий вісник НЛТУ України. – 2015. – Т. 25, № 4. – С. 90-94.
15. Стороженко, Г. Ю. Використання баромембранних процесів для очищення води у хімічній промисловості / Г. Ю. Стороженко, В. Д. Кузьменко, О. П. Кравець // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 5, № 5(71). – С. 40-43.
- 16.
17. Jadhav, N. Y. Reverse Osmosis: Design, Processes, and Applications for Engineers [Text] / N. Y. Jadhav, V. M. Dhore. – CRC Press, 2021. – 426 p.
18. Kim, I. S. Reverse Osmosis and Nanofiltration [Text] / I. S. Kim, T. Matsuura. – Elsevier, 2010. – 408 p.
19. Матюшин, М. В. Застосування зворотного осмосу у водопостачанні та водоочистці / М. В. Матюшин // Вода і водоочищення. – 2015. – № 1. – С. 68-74.
20. Matsuura, T., Ismail, A. F., & Matsuura, T. (2013). Reverse Osmosis Membrane Research: Based on the 4th International Membrane Science and Technology Conference. Springer.
21. Li, N. N., Fane, A. G., Ho, W. S. W., & Matsuura, T. (2021). Advanced Membrane Technology and Applications. Wiley.
22. Ісаєв С.Д., Брик М.Т. (2003). Запобігання забрудненню і регенерація мембран, що використовуються в процесах водоочистки. Наукові записки. Том 21. Біологія та екологія, 50-58.

23. Zydney, A. L. (2015). Challenges in the development of high-performance membranes for use in reverse osmosis and nanofiltration. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 47-53.

24. Zydney, A. L. (2015). Challenges in the development of high-performance membranes for use in reverse osmosis and nanofiltration. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 47-53.

25. Park, H., Lee, S., & Park, J. (2019). Reduction of concentration polarization in membrane filtration using nanobubble water. *Journal of Membrane Science*, 573, 287-295.

26. Azizi Namaghi, H., Pourafshari Chenar, M., Haghighi Asl, A., Esmaeili, M., Pihlajamäki, A., Kallioinen, M., & Mänttari, M. (2019). Fouling and cleaning of microfiltration membranes for treatment of oily wastewaters: A review. *Separation and Purification Technology*, 220, 115-131.

27.

28. Дитнерский, Ю.И. Баромембранные процессы: Теория и расчет. – М.: Химия, 1986. – 272 с.

29. Dévora-Isiordia, G.E., Cásares-De la Torre, C.A., Morales-Mendivil, D.P., Montoya-Pizeno, R., Velázquez-Limón, N., Aguilar-Jiménez, J.A., & Ríos-Arriola, J. (2023). Recent advances in membrane technology for water treatment: A review. *Membranes*, 13(1), 3.

30. Zhou, Z., Ling, B., Battiato, I., Husson, S.M., & Ladner, D.A. (2020). Understanding fouling mechanisms of surface-functionalized membranes during ultrafiltration of oil-in-water emulsions. *Journal of Membrane Science*, 597, 117671.

31. Chen, Z., Qu, F., Gu, J., Liu, H., & Gao, C. (2017). Effect of cross-flow velocity, oil concentration and salinity on the critical flux of an oil-in-water emulsion in microfiltration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 120, 48-58.

32. Jung, O., Saravia, F., Wagner, M., Heißler, S., & Horn, H. (2019). Membrane fouling in microfiltration of secondary effluent: Effects of different filtration modes and cleaning strategies. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10.
33. Jang, Eui-Soung; Mickols, William; Sujanani, Rahul; Helenic, Alysha; Dilenschneider, Theodore J.; Kamcev, Jovan; Paul, Donald R.; Freeman, Benny D. (2019). "High-flux reverse osmosis membranes incorporating interfacially polymerized polyamide barrier layers". *Journal of Membrane Science*. 570-571: 34-43.
34. Sablani M.E.A., Goosen M.F.A., Al-Belushi R.H., Wilf M. Membrane-based technologies for sustainable water reuse in agriculture: a review. *Desalination*. 2001. Vol. 137. Pp. 167-182.
35. Ahmed, M.A.; Amin, S.; Mohamed, A.A. (2023). "Effect of feed water composition on the performance of reverse osmosis membranes for seawater desalination".
36. Giacobbo, A.; Bernardes, A.M.; Rosa, M.J.F.; De Pinho, M.N. (2018). "Influence of membrane cleaning on the performance of a submerged membrane bioreactor treating real wastewater".
37. Wei, W.; Zou, X.; Ji, X.; Zhou, R.; Zhao, K.; Wang, Y. (2021). "Performance evaluation of thin-film composite forward osmosis membranes for desalination of high-salinity brine". *Membranes*. 11 (5): 353.
38. Bhattacharyya, D.; Back, S.L.; Kermode, R.L. (1990). "Effects of membrane orientation and spacer geometry on reverse osmosis performance". *Journal of Membrane Science*. 54 (1-2): 123-138. doi:10.1016/0376-7388(90)85007-8.
39. Wei, W.; Zou, X.; Ji, X.; Zhou, R.; Zhao, K.; Wang, Y. (2021). "Performance evaluation of thin-film composite forward osmosis membranes for desalination of high-salinity brine". *Membranes*. 11 (5): 353. doi:10.3390/membranes11050353.
40. Hoek, E.M.V. (2004). "Modeling concentration polarization in reverse osmosis processes". *Desalination*. 167: 287-293.

41. Ahmed, M.A.; Amin, S.; Mohamed, A.A. (2023). "Effect of feed water composition on the performance of reverse osmosis membranes for seawater desalination". *Heliyon*. 9 (5): e14908.
42. Gun T. Desalination. Volume 35, December 1980, Pages 59-103.
43. Sablani M.E.A., Goosen M.F.A., Al-Belushi R.H., Wilf M. Membrane-based technologies for sustainable water reuse in agriculture: a review. *Desalination*. 2001. Vol. 137. Pp. 167-182.
44. Kim, J. K., Kim, J. H., & Lee, S. (2017). Effect of flow rate and pressure on reverse osmosis membrane performance: Comparison between spiral-wound and flat-sheet membrane modules. *Desalination*, 416, 108-118.
45. L. Song, M. Elimelech, Theory of concentration polarization in cross-flow filtration, *Journal of Chemical Society* 91 (1995) 3389–3398
46. K.L. Chen, L. Song, S.L. Ong, W.J. Ng, The development of membrane fouling in fullscale RO processes, *Journal of Membrane Science* 232 (2004) 63–72.
47. E.M.V. Hoek, S. Bhattacharjee, M. Elimelech, Effect of membrane surface roughness on colloid-membrane DLVO interactions, *Langmuir* 19 (2003) 4836–4847
48. E. Matthiasson, B. Sivik, Concentration polarization and fouling, *Desalination* 35 (1980) 59–103.
- I. Sutzkover, D. Hasson, R. Semiat, Simple technique for measuring the concentration polarization level in a reverse osmosis system, *Desalination* 131 (2000) 117–127.
49. V.L. Vilker, C.K. Colton, K.A. Smith, Concentration polarization in protein ultrafiltration. Part II: Theoretical and experimental study of albumin ultrafiltered in an unstirred batch cell, *AIChE Journal* 27 (1981) 637–645.
50. R.M. McDonogh, H. Bauser, N. Stroh, Grauschopf, Experimental in situ measurement of concentration polarization during ultra- and micro-filtration of bovine

serum albumin and dextran blue solutions, *Journal of Membrane Science* 104 (1995) 51–63.

51. T.F. Speth, R.S. Summers, A.M. Gusses, Nanofiltration foulants from a treated surface water, *Environmental Science and Technology* 32 (1998) 3612–3617.

52. R. Oliviera, Understanding adhesions: a means for preventing fouling, *Experimental Thermal and Fluid Science* 14 (1997) 316–322.

53. C.A.C. Van de Lisdonk, J.A.M. Van Paassen, J.C. Schippers, Monitoring scaling in nanofiltration and reverse osmosis membrane systems, *Desalination* 132 (2000) 101–108

54. C.J. Lin, S. Shirazi, P. Rao, Mechanistic model for CaSO₄ fouling on nanofiltration membrane, *Journal of Environmental Engineering* 131 (10) (2005) 1387–1392.

55. S.R. Fabish, Y. Cohen, Fouling and rejection behavior of ceramic and polymermodified ceramic membranes for ultrafiltration of oil-in-water emulsions and microemulsions, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 191 (2001) 27–40.\

56. B. Van der Bruggen, C. Vandecasteele, Modelling of the retention of uncharged molecules with nanofiltration, *Water Research* 36 (2002) 1360–1368.

57. N.P. Cheremisinoff, *Liquid Filtration* Elsevier, 1998, pp. 59–87

58. L.F. Song, Flux decline in cross-flowmicrofiltration and ultrafiltration-mechanisms and modeling of membrane fouling, *Journal of Membrane Science* 139 (1998) 183–200

59. Shirazi S., Lin C.-J., Chen D. Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes – A critical review // *Desalination*. – 2010. – Vol. 250. – p. 236-248.

60. Yu C.-H., Wu Ch.-H., Lin Ch.-H., Hsiao Ch.-H., Lin Ch.-F.. Hydrophobicity and molecular weight of humic substance on ultrafiltration fouling and resistance // *Separation and Purification Technologies* – 2008. – Vol. 64. – P. 206-212.

61. Корнієнко Я.М. Фізична модель процесу регенерації рулонованих мембранних модулів / Корнієнко Я.М., Гулієнко С.В // Наукові парці ОНАХТ. – 2013. - Випуск 43. - Т.1 - с. 65-68
62. Мулдер М. Введение в мембранную технологию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 513 с. ил.
63. Hulienko, S., Leshchenko, O. (2019). Influence of operating pressure on concentration polarization layer resistance in reverse osmosis. *Ukrainian Food Journal*, Vol. 8(1), pp. 119-132, doi: 10.24263/2304-974X-2019-8-1-13.
64. Hulienko S. V., Protsiuk O. O., Gatilov K. O., Kaminskyi V. S. (2019). The estimation of feed solution composition influence on concentration polarization layer resistance during reverse osmosis. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 6(2), pp. F24-F29, doi: 10.21272/jes.2019.6(2).f4.
65. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. - Київ : НТУУ "КПІ", 2016. - 28 с.
66. Маркетинг стартап-проектів [Електронний ресурс] : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню "магістр" / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. - Електронні текстові данні (1 файл: 3,2 Мбайт). - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. - 218 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>
67. Юдіна Н.В. Міждисциплінарні платформи стартап-проектів [Електронний ресурс] // Міждисциплінарні дискусії : Матеріали науково-теоретичного семінару "Міждисциплінарні дослідження: теоретико-методологічні виміри", 5 грудня 2017 р. - Київ, Київський національний університет імені Тараса Шевченка Інститут міжнародних відносин Навчально-науковий центр "Синтез". - 2017. - С. 20-24. –

68. Юдіна Н. В. Визначення циклічних залежностей в економіці України на основі аналізу окремих макроекономічних показників. Економічний Вісник НТУУ "КПІ". №13(2016).

69. Юдіна Н. В. "Дорожня карта" підприємства у контексті футурології техногенної економіки. Традиції і інновації. [Електронний ресурс] / Н. В. Юдіна // Інновації та фундаментальні науки в умовах техногенної економіки : зб. матеріалів міждисциплінар. наук.-практ. конф., Київ, 25 листоп. 2016 р. / [уклад. Л. І. Юдіна]. - К., 2016.

70. Yudina N.V. Methods of the Startup-Project Developing Based on 'the Four-Dimensional Thinking' in Information Society. Marketing and Management of innovations. - 3'2017, - P. 245-256. - DOI:10.21272/mmi.2017.3-23 - Access mode : <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>

71. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 381 с.

72. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. - М.: Наука, 1972. - 721 с

ДОДАТОК А.
РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

А.1 Визначення похибок прямих вимірювань

Прямим вимірюванням підлягали вимірювання маси, часу, концентрації, температури, тиску об'єму пермеату та об'єму рететанту. Величини, що підлягали вимірюванню, прилади та параметри точності вимірювання наведені в таблиці А.1.

Таблиця А.1 – Характеристики вимірювальних приладів

Назва величини	Назва приладу	Одиниця вимірювання	Границі вимірювання	Одиниця молодшого розряду	Гранична допустима похибка приладу, %
Маса	Ваги	кг	0-30	0,005	±0,02
Час	Секундомір	с	0-60	0,01	±0,02
Концентрація	TDS-метр	Ррт (мг/дм ³)	0-9990	1	±2
Температура	Термопара ХК	°С	0-50	0,1	±0,02
Розрідження	Мановакуумметр	МПа	-0,1-0,15	0,002	±1,3
	Вакуумметр	МПа	-0,1-0	0,0005	±0,5
	Вакуумметр	МПа	-0,1-0	0,002	±2
Об'єм пермеату	Мірний циліндр	мл.	0-250	2	±0,8
Об'єм пермеату	Мірний циліндр	мл.	0-1000	10	±1

Довірчий інтервал шуканої величини визначався з ймовірністю $\alpha = 0,95$ (ступінь ризику $p = 0,05$). Результати записувались у вигляді:

$$x = \bar{x} \pm \Delta_{\Sigma} \quad (\text{A.1})$$

де x – середнє арифметичне значення величини;

Δ_{Σ} – значення абсолютної похибки вимірювання, залежить від умов проведення експерименту та складається з суми систематичної та раптової похибок.

При цьому враховувалося, що зменшення раптової похибки Δ_p до значення меншого $1/3$ величини сумарної систематичної похибки є недоцільним.

A.1.1 Визначення похибок прямих вимірювань концентрації

Результати вимірювань концентрації наведені в таблиці A.2

Таблиця A.2 – Результати вимірювань концентрації

№ досліду	Значення величини,	$(\bar{x} - x_i)^2$
1	251	0
2	252	1
3	250	1
4	251	0
5	250	1
6	252	1
	$\bar{x} = 251$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 4$

Визначаємо середньоквадратичну похибку прямого вимірювання:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{4}{6-1}} = 0,8944 \quad (\text{A.2})$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{1}{3} = 0,333 \quad (\text{A.3})$$

Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{s} = \frac{0,333}{0,8944} = 0,372 \quad (\text{A.4})$$

Розраховуємо сумарну похибку результату прямого вимірювання:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha n} \frac{s}{\sqrt{n}} = 1 + 2,6 \frac{0,8944}{\sqrt{6}} = 1,949 \quad (\text{A.5})$$

де $t_{\alpha n}$ – коефіцієнт Стюдента, для імовірності 0,95 і кількості вимірювань $n=6$ за таблицею наведеною в [71] визначаємо. $t_{\alpha n} = 2,6$.

Дійсне значення концентрації можна записати:

$$C = \bar{C} \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{C} \pm 1,949 \text{ мг/дм}^3 \quad (\text{A.6})$$

А.1.2 Визначення похибок прямих вимірювань часу

Результати вимірювань часу наведені в таблиці А.3

Таблиця А.3 – Результати вимірювань концентрації

№ досліду	Значення величини,	$(\bar{x} - x_i)^2$
1	120,6	0,03423
2	120,41	$2,5 \cdot 10^{-5}$
3	120,56	0,02103
4	120,6	0,03422
5	120,07	0,1190
6	120,41	$2,5 \cdot 10^{-5}$
7	120,22	0,03802
8	120,32	0,009025
9	120,53	0,01322
10	120,43	0,000225
	$\bar{x} = 120,415$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,2691$

Визначаємо середньоквадратичну похибку прямого вимірювання:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,2691}{10-1}} = 0,1728 \quad (\text{A.7})$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,01}{3} = 0,00333 \quad (\text{A.8})$$

Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{0,00333}{0,1728} = 0,01928 \quad (\text{A.9})$$

Розраховуємо сумарну похибку результату прямого вимірювання:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha n} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,1 + 2,3 \frac{0,1728}{\sqrt{10}} = 0,1357 \quad (\text{A.10})$$

де $t_{\alpha n}$ – коефіцієнт Стюдента, для імовірності 0,95 і кількості вимірювань $n=6$ за таблицею наведеною в [71] визначаємо. $t_{\alpha n} = 2,3$.

Дійсне значення концентрації можна записати:

$$\tau = \bar{\tau} \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{\tau} \pm 0,1357 \text{ с} \quad (\text{A.11})$$

А.1.3 Визначення похибок прямих вимірювань об'єму

Результати вимірювань часу наведені в таблиці А.4

Таблиця А.4 – Результати вимірювань об'єму пермеату

№ досліду	Значення величини,	$(\bar{x} - x_i)^2$
1	$2,41 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-12}$
2	$2,35 \cdot 10^{-4}$	$1,225 \cdot 10^{-11}$
3	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-12}$
4	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-12}$
5	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-12}$

Продовження таблиці А.4

№ досліду	Значення величини,	$(\bar{x} - x_i)^2$
6	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-13}$
7	$2,40 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-12}$
8	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-13}$
9	$2,41 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-12}$
10	$2,40 \cdot 10^{-4}$	$2,25 \cdot 10^{-12}$
	$\bar{x} = 2,385 \times 10^{-4}$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 3,65 \times 10^{-11}$

Визначаємо середньоквадратичну похибку прямого вимірювання:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{3,65 \times 10^{-11}}{10-1}} = 2,014 \times 10^{-6} \quad (\text{A.12})$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{2,10 \times 10^{-6}}{3} = 6,667 \times 10^{-7} \quad (\text{A.13})$$

Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{6,667 \times 10^{-7}}{2,014 \times 10^{-6}} = 0,331 \quad (\text{A.14})$$

Розраховуємо сумарну похибку результату прямого вимірювання:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha n} \frac{S}{\sqrt{n}} = 2,10 \times 10^{-6} + 2,3 \frac{2,014 \times 10^{-6}}{\sqrt{10}} = 3,465 \times 10^{-6} \quad (\text{A.15})$$

де $t_{\alpha n}$ – коефіцієнт Стюдента, для імовірності 0,95 і кількості вимірювань $n=6$ за таблицею наведеною в [71] визначаємо. $t_{\alpha n} = 2,3$.

Дійсне значення об'єму пермеату можна записати:

$$V = \bar{V}_p \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{V}_p \pm 3,465 \times 10^{-6} \text{ м}^3 \quad (\text{A.16})$$

А.2 Визначення похибок непрямих вимірювань

Непрямим вимірюванням підлягають вимірювання швидкості руху рідини в каналах мембрани та коефіцієнт масовіддачі.

У випадку, коли невідома величина є функцією двох або більшої кількості незалежно змінюваних величин $Y = f(X_1, X_2 \dots X_n)$ $Y = f(X_1, X_2 \dots X_n)$, абсолютне значення похибки визначаємо за залежністю [72]:

$$\Delta Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \Delta_{\Sigma i}\right)^2} \quad (\text{A.17})$$

де $\frac{\partial f}{\partial X_i}$ часткова похідна по змінній X_i , сумарна абсолютна похибка якої дорівнює $\Delta_{\Sigma i}$

A.2.1 Визначення похибок непрямих вимірювань об'ємних витрат ретентату

Об'ємна витрата ретентату визначається за результатами вимірювань визначається за формулою:

$$J_r = \frac{V_r}{\tau} \quad (\text{A.18})$$

Тоді похибка вимірювання об'ємних витрат ретентату становитиме:

$$\Delta J_r = \sqrt{\left(\frac{\partial J_r}{\partial V_r} \Delta_{\Sigma V_r}\right)^2 + \left(\frac{\partial J_r}{\partial \tau} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\tau} \Delta_{\Sigma V_p}\right)^2 + \left(-\frac{V_r}{\tau^2} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{120,41} 1,727 \times 10^{-5}\right)^2 + \left(-\frac{6,45 \times 10^{-4}}{120,41^2} 0,1358\right)^2} = 1,07 \times 10^{-7} \quad (\text{A.19})$$

Отже результат визначення об'ємних витрат ретентату записуємо:

$$J_r = \bar{J}_r \pm \Delta J_r = \bar{J}_r \pm 1,07 \times 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с} \quad (\text{A.20})$$

A.2.2 Визначення похибок непрямих вимірювань об'ємних витрат пермеату

Об'ємна витрата пермеату визначається за результатами вимірювань визначається за формулою:

$$J_r = \frac{V_r}{\tau} \quad (\text{A.21})$$

Тоді похибка вимірювання об'ємних витрат пермеату становитиме:

$$\begin{aligned} \Delta J_p &= \sqrt{\left(\frac{\partial J_p}{\partial V_p} \Delta_{\Sigma V_p}\right)^2 + \left(\frac{\partial J_p}{\partial \tau} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\tau} \Delta_{\Sigma V_p}\right)^2 + \left(-\frac{V_p}{\tau^2} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{120,41} 3,465 \times 10^{-6}\right)^2 + \left(-\frac{2,385 \times 10^{-4}}{120,41^2} 0,1358\right)^2} = 2,886 \times 10^{-8} \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

Отже результат визначення об'ємних витрат пермеату запишемо:

$$J_p = \bar{J}_p \pm \Delta J_p = \bar{J}_p \pm 2,886 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{с} \quad (\text{A.23})$$

ДОДАТОК Б.
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОЛІДЖЕНЬ МАСООБМІНУ
В КАНАЛАХ РУЛОННОГО МЕМБРАННОГО МОДУ

Б.1 Результати вимірювань при визначенні коефіцієнтів критеріального рівняння

Результати експериментальних досліджень наведені в таблиці Б.1

Таблиця Б.1 – Результати експериментальних досліджень

№	Rm	f	$\xi_i = \lg Re$	$\eta_i = \lg Sh$	ξ_i^2	$\xi_i \cdot \eta_i$	η_i^2
1	2,6E+13	1,0011	0,0005	13,42	2,15E-07	0,006	180,03
2	2,4E+13	1,0010	0,0004	13,38	2,01E-07	0,006	178,99
3	2,3E+13	1,0010	0,0004	13,36	1,97E-07	0,006	178,38
4	2,9E+13	1,0010	0,0004	13,46	1,75E-07	0,006	181,15
5	2,7E+13	1,0010	0,0004	13,44	1,78E-07	0,006	180,55
6	1,9E+13	1,0016	0,0007	13,27	4,79E-07	0,009	176,04
7	1,9E+13	1,0013	0,0006	13,28	3,03E-07	0,007	176,32
8	1,8E+13	1,0017	0,0007	13,26	5,48E-07	0,010	175,93
9	1,8E+13	1,0017	0,0007	13,25	5,62E-07	0,010	175,69
10	1,8E+13	1,0024	0,0010	13,25	1,07E-06	0,014	175,44
11	1,7E+13	1,0025	0,0011	13,23	1,14E-06	0,014	175,00
12	1,6E+13	1,0024	0,0011	13,20	1,13E-06	0,014	174,35
13	1,6E+13	1,0025	0,0011	13,20	1,18E-06	0,014	174,33
14	1,7E+13	1,0024	0,0011	13,24	1,11E-06	0,014	175,34
15	2,0E+13	1,0029	0,0013	13,29	1,60E-06	0,017	176,73
16	1,7E+13	1,0031	0,0014	13,22	1,85E-06	0,018	174,74
17	1,4E+13	1,0032	0,0014	13,15	1,98E-06	0,019	172,86
18	1,6E+13	1,0032	0,0014	13,20	1,95E-06	0,018	174,30
19	1,5E+13	1,0031	0,0014	13,18	1,83E-06	0,018	173,71
20	1,6E+13	1,0036	0,0015	13,20	2,40E-06	0,020	174,31
21	1,5E+13	1,0041	0,0018	13,18	3,23E-06	0,024	173,79
22	1,8E+13	1,0017	0,0007	13,26	5,37E-07	0,010	175,95
23	1,8E+13	1,0015	0,0007	13,26	4,44E-07	0,009	175,81
24	2,3E+13	1,0015	0,0007	13,36	4,31E-07	0,009	178,57
25	1,8E+13	1,0016	0,0007	13,26	4,77E-07	0,009	175,89
26	1,6E+13	1,0025	0,0011	13,20	1,17E-06	0,014	174,27
27	2,0E+13	1,0021	0,0009	13,31	8,15E-07	0,012	177,14
28	1,8E+13	1,0035	0,0015	13,26	2,26E-06	0,020	175,90
29	1,5E+13	1,0049	0,0021	13,16	4,49E-06	0,028	173,31
30	1,3E+13	1,0049	0,0021	13,12	4,52E-06	0,028	172,04
31	1,0E+13	1,0059	0,0026	13,02	6,62E-06	0,033	169,50
32	1,3E+13	1,0049	0,0021	13,12	4,46E-06	0,028	172,02
33	1,2E+13	1,0051	0,0022	13,07	4,90E-06	0,029	170,72
34	1,2E+13	1,0063	0,0027	13,09	7,41E-06	0,036	171,31
35	1,1E+13	1,0070	0,0030	13,04	9,08E-06	0,039	169,97
36	1,9E+13	1,0018	0,0008	13,28	5,88E-07	0,010	176,28

Продовження таблиці Б.1

№	Rm	f	$x_i = \lg Re$	$y_i = \lg Sh$	x_i^2	$x_i * y_i$	y_i^2
37	1,6E+13	1,0017	0,0007	13,21	5,52E-07	0,010	174,49
38	1,6E+13	1,0017	0,0007	13,21	5,52E-07	0,010	174,37
39	2,1E+13	1,0016	0,0007	13,33	5,11E-07	0,010	177,60
40	1,2E+13	1,0028	0,0012	13,09	1,49E-06	0,016	171,43
41	1,2E+13	1,0029	0,0013	13,08	1,64E-06	0,017	171,13
42	1,5E+13	1,0028	0,0012	13,17	1,51E-06	0,016	173,48
43	1,5E+13	1,0028	0,0012	13,17	1,49E-06	0,016	173,51
44	1,4E+13	1,0039	0,0017	13,15	2,83E-06	0,022	172,96
45	1,4E+13	1,0039	0,0017	13,15	2,93E-06	0,023	172,97
46	1,5E+13	1,0039	0,0017	13,17	2,86E-06	0,022	173,56
47	1,5E+13	1,0039	0,0017	13,17	2,85E-06	0,022	173,52
48	1,4E+13	1,0049	0,0021	13,15	4,46E-06	0,028	172,87
49	4,9E+12	1,0055	0,0024	12,69	5,67E-06	0,030	160,99
50	1,5E+13	1,0050	0,0022	13,18	4,70E-06	0,029	173,68
51	1,5E+13	1,0049	0,0021	13,18	4,59E-06	0,028	173,73
52	1,6E+13	1,0049	0,0021	13,20	4,58E-06	0,028	174,12
53	9,7E+12	1,0067	0,0029	12,98	8,36E-06	0,038	168,60
54	5,0E+12	1,0064	0,0028	12,70	7,73E-06	0,035	161,34
55	6,3E+12	1,0062	0,0027	12,80	7,32E-06	0,035	163,87
56	5,1E+12	1,0064	0,0028	12,71	7,68E-06	0,035	161,49
57	6,4E+12	1,0061	0,0027	12,81	7,04E-06	0,034	164,03
58	5,3E+12	1,0082	0,0036	12,72	1,26E-05	0,045	161,83
59	4,9E+12	1,0082	0,0035	12,69	1,25E-05	0,045	161,04

**ДОДАТОК В.
КОПІЇ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ
МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ**



Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Інститут технічної теплофізики НАН України
Інститут Газу НАН України
Грузинський технічний університет

**Збірник тез доповідей XXII міжнародної
науково-практичної конференції студентів,
аспірантів і молодих вчених**

**”РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОБЛАДНАННЯ”**

*до 75-річчя від дня
заснування Інституту технічної
теплофізики Національної
академії наук України*

24-26 травня
Київ 2022



Збірник тез доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів,
аспірантів і молодих вчених ”Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”
УДК 661.741.1

Актуальні напрямки дослідження явищ концентраційної поляризації

студент Вірич С.В., доц., к.т.н. Гулієнко С.В.,

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Явища концентраційної поляризації (КП) та утворення осадів на поверхні мембран є однією з найбільших проблем при експлуатації мембранного обладнання. Вони полягають збільшення концентрації розчинених речовин біля поверхні мембрани, які створюють додатковий опір розділенню. Вони виникають в наслідок фундаментальної природи мембранного розділення. Розчинена речовина переноситься до поверхні мембрани і, внаслідок селективних властивостей мембрани, накопичуватися біля поверхні [1-5].

До основних напрямків досліджень є визначення впливу робочих параметрів на процес, зокрема температури [1]. Результати показали, що для всіх типів досліджених мембран, потік пермеату істотно не змінювався в залежності від температури. Також було помічено, що товщина шару КП зменшується з температурою.

Активно досліджується розвиток забруднень, зокрема з використанням індикатора хлориду натрію, щоб визначити вплив забруднення на рівень КП в системі зворотного осмосу [2], а також досліджується модель опору для прогнозування динамічних характеристик зворотного осмосу, призначеного для очищення стічних вод виробництва оливкової олії [3].

Крім того, важливим для розуміння є розвиток теоретичних уявлень про розглядувані явища та розвиток розрахункових залежностей. Була розроблена модель вдосконалена модель концентраційної поляризації на основі диференційного матеріального балансу в нестационарному режимі [4]. Крім того, в роботі [5], були встановлені емпіричні (критеріальні) залежності для розрахунку коефіцієнтів масовиддачі та коефіцієнтів тертя при русі в мембранному каналі зі спейсерами в умовах інтенсивного розвитку КП.

Збірник тез доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

Отже, велика кількість досліджень, пов'язаних з явищем КП свідчить про важливість цього напрямку. Крім того, залишається достатньо велика кількість не вирішених проблем, пов'язаних з цим явищем, тому подальші дослідження в цій галузі залишаються перспективними.

Перелік посилань:

1. Baghdadi Y. N., Alnouri S. Y., Matsuura T., Tarboush B. J. A. (2018). Temperature Effects on Concentration Polarization Thickness in Thin-Film Composite Reverse Osmosis Membranes. *Chemical Engineering & Technology* 41(10). Pages 1905-1912. <https://doi.org/10.1002/ceat.201800184>
2. Ochando-Pulido J.M., Verardo V., Segura-Carretero A., Martinez-Ferez A. (2015). Analysis of the concentration polarization and fouling dynamic resistances under reverse osmosis membrane treatment of olive mill wastewater, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Volume 31, Pages 132-141, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.06.017>.
3. Chong T.H., Wong F.S., Fane A.G. (2007). Enhanced concentration polarization by unstirred fouling layers in reverse osmosis: Detection by sodium chloride tracer response technique, *Journal of Membrane Science*, Volume 287, Issue 2, 2007, Pages 198-210, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.10.035>.
4. Rathore N. S., Kundariya N., Sadistap S., Narain A. (2013). Mathematical modeling and simulation of concentration polarization layer in reverse osmosis process, 2013 Students Conference on Engineering and Systems (SCES), pp. 1-4, doi: 10.1109/SCES.2013.6547547.
5. Gu B, Adjiman CS, Xu XY. Correlations for Concentration Polarization and Pressure Drop in Spacer-Filled RO Membrane Modules Based on CFD Simulations. *Membranes*. 2021; 11(5):338. <https://doi.org/10.3390/membranes11050338>



**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

**Інститут технічної теплофізики НАН України
Інститут Газу НАН України
Грузинський технічний університет**

**Збірник тез доповідей XXII міжнародної
науково-практичної конференції студентів,
аспірантів і молодих вчених
"РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОБЛАДНАННЯ"**

до 75-річчя від дня
заснування Інституту
технічної теплофізики
Національної академії наук
України

5 - 7 грудня
Київ 2022

Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

УДК 66.081.63

THE MODERNIZATION OF THE EXPERIMENTAL SET-UP FOR THE DETERMINATION OF CONCENTRATION POLARIZATION LAYER RESISTANCE DURING REVERSE OSMOSIS

Master degree student Virych S.I., associate professor, Ph.D. Hulienko S.V.

**National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

Abstract: The description of the experimental set-up for the determination of the concentration layer resistance is represented. The advantages of the measurements method used in the removed set-up are analyzed.

Key words: reverse osmosis, membrane, concentration polarization, experiment, measurement

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ШАРУ КОНЦЕНТРАЦІЙНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ПРИ ЗВОРОТНОМУ
Магістрант Вірич С.І., к.т.н., доцент Гулієнко С.В.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Анотація: Наведено опис модернізованої експериментальної установки для визначення опору шару концентраційної поляризації та проаналізовано переваги методів вимірювання, які використовуються в оновленій установці.

Ключові слова: зворотній осмос, мембранна, концентраційна поляризація, експеримент, вимірювання

Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

Concentration polarization is one of the most important factors hindering the development and application of baromembrane processes. As a result of this phenomenon, fouling can form on the membrane surface, which makes additional resistance to mass transfer. Also, the resistance to mass transfer is caused by the concentration polarization layer itself, moreover, reliable dependences for determining the resistance of the concentration polarization layer have not yet been defined [1].

In previous works [2, 3], a technique for experimental determination of the resistance of the concentration polarization layer during the separation of mineral salt solutions by reverse osmosis was developed, and an experimental setup was developed, the general view of which is shown in Figure 1. The methodology involved the measurement of permeate and retentate flow rates, as well as concentrations in the separated solution, permeate and retentate.



Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

Figure 1. – Existing experimental setup

At the same time, the concentration was measured by a portable TDS meter, and the volumetric method was used to measure the flow rate (fixing the volume that was collected for a certain period of time). As a result, the determination of each experimental value required considerable time, as well as significant consumption of the studied solutions. Therefore, the modernization of such an installation is expedient.

The modernization was aimed at increasing the productivity of the experiments.

For this purpose, it was decided to use rotameters to measure flow rates and flow TDS meters to measure concentrations. The general view of the modernized experimental setup is shown in Figure 2.

Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

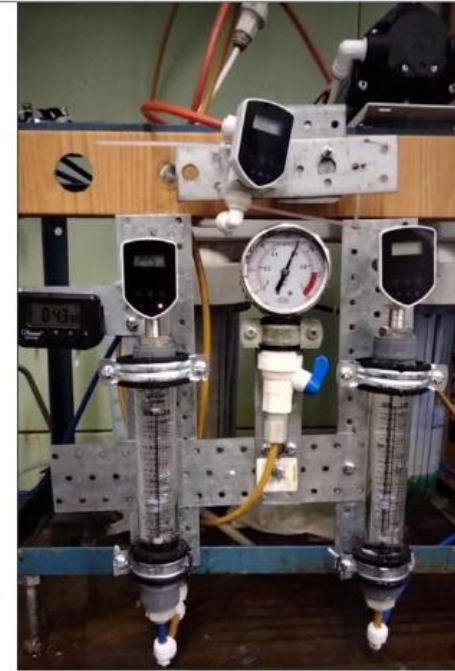


Figure 2 – Setup after modernization

The proposed modernization allows to measure instantaneous concentration values in the separated solution, permeate and retentate, as well as permeate and retentate flow rates. Therefore, more experimental data can be obtained with the same amount of separated solution and less time using the modernized unit. Thus, it will increase the productivity of experimental research.

Збірник тез доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

Reference:

1. Shirazi, S., Lin, C.-J., Chen, D. (2010). Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes – A critical review. *Desalination*, Vol. 250(1), pp. 236–248, doi: 10.1016/j.desal.2009.02.056.
2. Huliienko, S., Leshchenko, O. (2019). Influence of operating pressure on concentration polarization layer resistance in reverse osmosis. *Ukrainian Food Journal*, Vol. 8(1), pp. 119–132, doi: 10.24263/2304-974X-2019-8-1-13.
3. Huliienko S. V., Protsiuk O. O., Gatilov K. O., Kaminskyi V. S. (2019). The estimation of feed solution composition influence on concentration polarization layer resistance during reverse osmosis. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 6(2), pp. F24-F29, doi: 10.21272/jes.2019.6(2).f4.



**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

**Інститут технічної теплофізики НАН України
Інститут Газу НАН України
Грузинський технічний університет**

**Збірник тез доповідей XXIV міжнародної
науково-практичної конференції студентів,
аспірантів і молодих вчених**

**”РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОБЛАДНАННЯ”**

до 75-річчя від дня
заснування Інституту
технічної теплофізики
Національної академії наук
України

3 травня
Київ 2023

Збірник тез доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

УДК 66.081.6

INORGANIC FOULING OF PRESSURE-DRIVEN MEMBRANE PROCESSES

Virych Sviatoslav, Hulienko Serhii

**National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

Abstract. The main modern directions of contamination of membrane processes are given. Special attention is paid to concentration polarization. The considered algorithm features effective methods of cleaning and manufacturing a membrane for stable operation. Ways to improve the cleaning process are identified.

KEY WORDS: MEMBRANE, POLLUTION, CONCENTRATION POLARIZATION, OSMOSIS.

НЕОРГАНІЧНЕ ЗАБРУДНЕННЯ МЕМБРАННИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ТИСКОМ

студент Вірич Святослав, к.т.н., доц. Гулієнко Сергій Валерійович

**Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"**

Анотація. Наведені основні сучасні напрямки забруднення мембранних процесів. Особливу увагу приділено концентраційній поляризації. Розглянутий алгоритм особливостей ефективних методів очищення та виготовлення мембрани для стабільної роботи. Визначені шляхи покращення процесу очищення.

Ключові слова: МЕМБРАНА, ЗАБРУДНЕННЯ, КОНЦЕНТРАЦІЙНА ПОЛЯРИЗАЦІЯ, ОСМОС.

Збірник тез доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

Мембрана є селективним бар'єром між двома фазами, який обмежує транспортування твердих, колоїдних і розчинених хімічних речовин крім розчинника або води. В останні роки мембран процеси широко використовуються в текстильній, фармацевтичній, целюлозно-паперова, напівпровідникова, дубильна та шкіряна, гірничодобувна, молочна промисловість, переробка харчових продуктів і напоїв, біотехнологія промисловості, а також для очищення води та стічних вод. У воді і очищення стічних вод, чотири типи мембран (мікрофільтр, ультрафільтр, нанофільтр і мембрана зворотного осмосу) широко використовуються для видалення твердості, кольору, біогенності та дезінфекції продуктами та їх прекурсорами для отримання необхідної якості оброблених води.

Традиційними методами видалення забруднюючих речовин з води та стічних вод є коагуляція, флокуляція, седиментація, фільтрація піску, іонна обміну, електроосадження, екстракції, осаження та біологічного деградація тощо. Більшість із них мають недоліки, пов'язані з послідовними стадіями гетерогенних реакцій або розподілом речовин між різними фазами, що зазвичай вимагає тривалого експлуатаційний період і велика площа. Тому основною проблемою є концентраційна поляризація і забруднення.

Для досягнення постійного потоку в мембранній системі очищення води необхідна відповідна техніка очищення. У більшості експериментів із забрудненням осмосу на стенді, в яких зазвичай використовуються плоскі листові мембранні купони осмосу, забруднення та знижений потік є більш оборотними, ніж в інших мембранних процесах, керованих тиском. Відновлення потоку в режимі осмосу було набагато вищим, ніж у іншому режимі в експериментах з альгінатним обростанням за ідентичних умов очищення, хоча швидкість зниження потоку мембрани була однаковою в двох режимах. Зворотність обростання осмосу була пов'язана з менш

Збірник тез доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

компактним шаром органічного обростання, що утворився в режимі осмосу через відсутність гідравлічного тиску. [1]

Як показано з новітніх досліджень давня проблема забруднення мембрани перешкоджає загальній продуктивності системи в осмосі, як це відбувається в мембранних процесах, керованих тиском. Таким чином, важливо розуміти механізми забруднення та їх стратегії пом'якшення, включаючи ефективні методи очищення та виготовлення мембрани проти обростання для стабільної роботи осмоса. Оскільки інформація, пов'язана з забрудненнями в процесах осмоса, все ще обмежена, потрібне поглиблене та систематичне вивчення. Цей огляд досліджує механізми забруднення осмоса в різних категоріях, включаючи органічні, неорганічні та біологічні джерела та наслідки очищення. На основі цього огляду автори обговорили деякі подальші думки щодо розуміння механізмів забруднення мембрани та їх стратегій пом'якшення в процесах осмосу. [2]

Також в одному, з нещодавніх досліджень були отримані якісні залежності концентраційних поляризаційних залежностей шару від прикладеного тиску трансмембранний потік і число Рейнольдса узгоджуються з теорією плівкової концентраційної поляризації. Більш того, кореляція між концентрацією поляризаційного опору шару і індекс концентраційної поляризації, що дозволяє припустити про можливість до отримати достовірну розрахункову залежність концентраційного поляризаційного опору шару від робочих параметрів процесів мембранного розділення під тиском [3].

З прикладу, можна зрозуміти, що є проблема з визначенням опору шару концентраційної поляризації (КП), а саме КП утворює висококонцентрований шар біля поверхні мембрани, який чинить опір масообміну, тобто опір концентраційної поляризації. Завдяки КП концентрація накопиченої розчиненої речовини та частинок стає настільки

Збірник тез доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

високий, що біля мембрани може утворитися окалина або шар поверхню, яка чинить опір. Опір концентраційної поляризації викликає забруднення на поверхні мембрани. Важливо розрізнити між КП та стійкістю до обростання, хоча обидва не є повністю незалежні один від одного. КП частинок є спільною для обох пористі і непористі мембрани. Однак концентраційна поляризація розчинних іонів є застосовується тільки для непористих мембран. Це вже частково розглядати в статті про «Опір поляризаційного шару під час зворотного осмосу» [4].

Тому можна вважати, що даний напрямок дослідження є дуже перспективним.

References:

1. Mi, B.; Elimelech, M. Organic fouling of forward osmosis membranes: Fouling reversibility and cleaning without chemical reagents. *J. Membr. Sci.* 2010, 348, 337–345.
2. Yip, N.Y.; Tiraferri, A.; Phillip, W.A.; Schiffman, J.D.; Elimelech, M. High performance thin-film composite forward osmosis membrane. *Environ. Sci. Technol.* 2010, 44, 3812–3818
3. Influence of operating pressure on concentration polarization layer resistance in reverse osmosis, Serhii Hulienko, Oksana Leshchenko
4. The Estimation of Feed Solution Composition Influence on Concentration Polarization Layer Resistance during Reverse Osmosis, Hulienko S. V. Protsiuk O. O., Gatilov K. O., Kaminskyi V. S.



№78/2023

Znanstvena misel journal

The journal is registered and published in Slovenia.

ISSN 3124-1123

The frequency of publication – 12 times per year.

Journal is published in Slovenian, English, Polish, Russian, Ukrainian.

The format of the journal is A4, coated paper, matte laminated cover.

All articles are reviewed

Edition of journal does not carry responsibility for the materials published in a journal.

Sending the article to the editorial the author confirms it's uniqueness and takes full responsibility for possible consequences for breaking copyright laws

Free access to the electronic version of journal

Chief Editor – Christoph Machek**The executive secretary** - Damian Gerbec

Dragan Tsallaev — PhD, senior researcher, professor

Dorothea Sabash — PhD, senior researcher

Vatslav Blažek — candidate of philological sciences

Philip Matoušek — doctor of pedagogical sciences, professor

Alicja Antczak — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Katarzyna Brzozowska — PhD, associate professor

Roman Guryev — MD, Professor

Stepan Filippov — Doctor of Social Sciences, Associate Professor

Dmytro Teliga — Senior Lecturer, Department of Humanitarian and Economic Sciences

Anastasia Plihtiy — Doctor of Economics, professor

Znanstvena misel journal

Slovenska cesta 8, 1000 Ljubljana, Slovenia

Email: info@znanstvena-journal.com

Website: www.znanstvena-journal.com

16

Znanstvena misel journal №78/2023

CHEMISTRY**ОПР КОНЦЕНТРАЦІЙНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ У МЕМБРАНИ: ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ****Гулієнко С.В.***Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент***Вірч С.І.***Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***RESISTANCE TO CONCENTRATION POLARISATION AT THE MEMBRANE: INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS AND MATHEMATICAL MODELLING****Huliienko S.,***National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Associate Professor,***Virych S.***National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***Анотація**

У цій науковій статті проведено дослідження, пов'язані зі зворотним осмосом та концентраційною поляризацією. У вступному розділі розглянуто загальний контекст і визначено актуальність даної проблеми, розглянуті основні аспекти зворотного осмосу, його принцип дії та використання. Описано недавні дослідження, спрямовані на вивчення явища концентраційної поляризації в контексті зворотного осмосу. Представлені експериментальні та теоретичні підходи, що дозволяють більш детально зрозуміти і квантифікувати це явище. Також надано огляд отриманих результатів з проведених досліджень і встановлено основні висновки, що стосуються впливу концентраційної поляризації на ефективність процесу зворотного осмосу.

Abstract

This Research and Analysis paper presents a review of research related to reverse osmosis and concentration polarisation. In the introductory section, the general context and relevance of the problem are discussed, and the main aspects of reverse osmosis, its principle of operation and use are reviewed. Recent research aimed at studying the phenomenon of concentration polarisation in the context of reverse osmosis is described. Experimental and theoretical approaches are presented that allow for a more detailed understanding and quantification of this phenomenon. An overview of the results obtained from the studies is also provided, and the main conclusions regarding the effect of concentration polarisation on the efficiency of the reverse osmosis process are established.

Ключевые слова: зворотний осмос, концентраційна поляризація, мембрана.**Keywords:** reverse osmosis, concentration polarisation, membrane

Метою літературного огляду є математичне моделювання процесу, тобто пошук сумарного опору мембрани через модуль концентраційної поляризації. Особливо, показати емпіричну залежність даного опору.

Зворотний осмос

Зворотний осмос - це процес, за допомогою якого можна очистити воду від різних домішок та солей шляхом пропускання її через мембрану певної пористості. Вперше про зворотний осмос було згадано в 1748 році. Але лише в другій половині ХХ століття цей процес став широко використовуватися в промисловості, наукових та медичних дослідженнях [1].

Важливість зворотного осмосу полягає в тому, що він дозволяє очистити воду від більшості

домішок та забруднень, включаючи солі та мінерали, що є небажаними для питної води. Процес зворотного осмосу може бути використаний для очищення води з будь-якого джерела, включаючи морську воду та воду з високим вмістом мінеральних солей [2].

Баромембранні процеси, такі як зворотний осмос, найчастіше використовуються для очищення води та забезпечення доступу до чистої питної води у місцях з обмеженими ресурсами. Ці процеси стали необхідними у водопостачанні та водоочистці, щоб забезпечити люду водою в якості джерела життя [3].

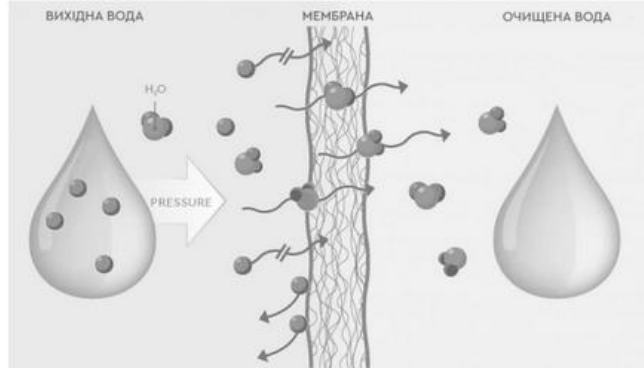


Рисунок 1.1 Технологія зворотного осмосу

На сьогоднішній день існує багато способів використання зворотного осмосу для очищення води від різних домішок та солей. Баромембранні процеси можуть бути використані у багатьох галузях, таких як хімічна промисловість, фармацевтична та харчова промисловість, електроенергетика, а також для очищення стічних вод [4].

Одним з методів підвищення ефективності процесу зворотного осмосу є використання баромембранних процесів. У цих процесах замість звичайної мембрани використовують баромембрану, яка дозволяє пропускати воду при високому тиску, а розчин - ні. Це забезпечує вищу продуктивність та зниження витрат енергії порівняно з традиційними методами зворотного осмосу [5].

До переваг баромембрани можна віднести її високу механічну міцність та стійкість до біологічного та хімічного впливів. Баромембрани також дозволяють обробляти розчини з високою концентрацією солей, що робить їх ефективними в процесах десаляції води та очищенні водопровідних систем [6].

Актуальні експериментальні дослідження концентраційної поляризації

Дослідження показали, що існує кілька факторів, які можуть впливати на рівень концентраційної поляризації в мембранах: розмір пор, підбір матеріалу мембрани, хімічний склад розчину, тиск та температура. Наприклад, відомо, що використання наноструктурованих мембран може допомогти зменшити концентраційну поляризацію в зворотно-осмотичних процесах [7].

В дослідженні [8] показало, що використання наноструктурованих мембран з макромолекулярними покриттями зменшує концентраційну поляризацію у порівнянні з традиційними мембранами.

З іншого боку, дослідження [9] показали, що при використанні наноструктурованих мембран з гідрогелевими покриттями спостерігається збільшення концентраційної поляризації у порівнянні з традиційними мембранами. Ця стаття присвячена

дослідженню осадження забруднень на обертаючихся мембранах зворотного осмосу, яке призводить до зменшення продуктивності процесу очищення. Авторами розглядають методи моніторингу та характеристики осадження забруднень на мембранах, а також стратегії попередження та мінімізації осадження для збереження ефективності процесу очищення.

Дослідження [10] показали, що використання мембран зі спеціальним покриттям на основі іонних рідин може зменшити концентраційну поляризацію у зворотно-осмотичних процесах. У статті йдеться про використання мембранного процесу для очищення води з одиниць відновлення сірки від сульфідів та інших забруднень. Авторами використовували тонкоплівкову нанокластерну мембрану для зниження вмісту сульфідів до менше 10 мг/л. У статті наведені результати експериментальних досліджень, а також детальний опис методології та устаткування, використовуваного для виконання досліджень.

Також, дослідження [11] показали, що використання наноструктурованих мембран з модифікованими поверхнями може зменшити ефект концентраційної поляризації, тоді як дослідження [12] вказують на те, що концентраційна поляризація може бути зменшена за допомогою використання мембран з покриттям на основі вуглецевих нанотрубок. Стаття [13] досліджує проблему концентраційної поляризації при використанні оберненої осмосу з мембранами зі спеціальними поверхневими характеристиками. Авторами провели експериментальні дослідження, показали ефективність використання нових мембран і надали висновки щодо їхнього використання.

Відомо, що на ефективність роботи мембрани впливають фактори, такі як температура та склад поданого розчину. Результати досліджень [14] підтверджують, що зміна температури поданого розчину може вплинути на процес концентраційної

поляризації, що може знизити продуктивність мембрани. У цій статті досліджується вплив зміни температури подачі води на процес зворотного осмосу в реверсних осмотичних мембранах. Дослідження проводилися експериментальним шляхом на основі аналізу впливу температури подачі на концентраційну поляризацію. Автори дійшли висновку, що збільшення температури веде до зменшення концентраційної поляризації, що дозволяє підвищити ефективність процесу зворотного осмосу.

Також, деякі дослідження, такі як стаття [15] та дослід [16], демонструють, що використання наноструктурованих мембран може зменшити концентраційну поляризацію, що призводить до більш ефективної роботи мембрани. Стаття [17] досліджує проблему концентраційної поляризації при використанні оберненої осмосу з мембранами зі спеціальними поверхневими характеристиками. Авторами провели експериментальні дослідження, показали ефективність використання нових мембран і надали висновки щодо їхнього використання. У другій статті автори описують методику визначення концентраційної поляризації в процесі нанофільтрації на плоских мембранах з використанням Раман-мікроспектроскопії. Авторами провели експериментальні дослідження, де вони зіставляли отримані результати з результатами моделювання. Висновком статті полягає в тому, що розроблена методика може бути використана для вивчення та оптимізації процесів нанофільтрації з метою зниження концентраційної поляризації.

Дослідження [18] вказують на те, що некервана розробка технології мембранної очистки води може привести до некоректної роботи мембран, що знижує їхню продуктивність. Ця стаття присвячена дослідженню впливу ефекту концентраційної поляризації та термодинамічної некоректності на процес перенесення солей через мембрани зворотного осмосу. Авторами провели експериментальні дослідження, використовуючи різні методики та математичні моделі, та прийшли до висновку, що як концентраційна поляризація, так і термодинамічна некоректність значно впливають на ефективність процесу перенесення солей через мембрани зворотного осмосу.

Звідси видно, що концентраційна поляризація є важливою проблемою у водоочисних процесах, таких як зворотної осмос та нанофільтрація. Різні дослідження показують, що концентраційна поляризація може бути зменшена шляхом застосування різних технік, таких як зміна температури вхідної води, розробка мембран зі спеціальними поверхневими властивостями та зменшення відкладень на мембранах. Дослідники також звертають увагу на те, що недоліки концентраційної поляризації можуть призвести до зменшення продуктивності та скорочення терміну служби мембран. Таким чином, подальші дослідження у цій галузі є важливими для покращення ефективності водоочистки та забезпечення сталої роботи мембран.

Актуальні теоретичні дослідження концентраційної поляризації

Основна мета теоретичних досліджень, які були проаналізовані, полягає в аналізі та моделюванні явища концентраційної поляризації в процесі зворотного осмосу та ультрафільтрації/нанофільтрації.

У статті [19] автори також використовують чисельні методи для прогнозування ефекту концентраційної поляризації та поведінки потоку в процесі зворотного осмосу. Вони досліджували вплив параметрів, таких як швидкість потоку, концентрація соли та висота мембрани на ефективність процесу. Ця стаття присвячена числовому аналізу, який допомагає передбачити поведінку концентраційної поляризації та потоку в зворотної осмотичній системі. Дослідження проводяться методом чисельного моделювання, що дозволяє прогнозувати, як буде залежати ефективність процесу зворотного осмосу від різних факторів, таких як довжина модуля, діаметр трубки та тиск на вході в систему.

У статті [20] автори використовували експериментальний підхід для визначення впливу концентраційної поляризації на ефективність процесу зворотного осмосу. Вони також розглядали різні методи зменшення цього ефекту, такі як використання змінних потоків та оптимізація геометрії мембрани. Ця стаття є теоретичним дослідженням, що описує методи кількісної оцінки та зменшення концентраційної поляризації в системах зворотного осмосу. В статті автори представляють математичні моделі та аналізують ефективність різних методів зменшення концентраційної поляризації.

У статті [21] автори досліджують вплив концентраційної поляризації на процес відновлення поліфенолів з виноробних стоків методом ультрафільтрації / нанофільтрації. Результати показують, що концентраційна поляризація має значний вплив на відновлення поліфенолів, знижуючи продуктивність мембрани та збільшуючи час проходження стоку через систему фільтрації. Авторами досліджували вплив різних факторів, таких як рівень температури та витрата фільтрувального потоку, на ефективність процесу відновлення поліфенолів та знаходять оптимальні параметри. Ця стаття є дослідженням впливу концентраційної поляризації на відновлення поліфенолів з відходів виноробної промисловості за допомогою ультрафільтрації/нанофільтрації. Авторами проводили експериментальні дослідження та моделювання процесу для оцінки впливу параметрів, таких як швидкість перепускання, тиску та розміру порів, на концентраційну поляризацію.

У статті [22] автори використовують комп'ютерну гідродинамічну модель для аналізу концентраційної поляризації в мембранах зворотного осмосу. Вони досліджують різні фактори, які впливають на ефективність фільтрування, такі як товщина мембрани, геометрія фільтрувального елемента та властивості рідини, що фільтрується. Результати дослідження показують, що зменшення товщини мембрани та збільшення витрати фільтрувального потоку може підвищити продуктивність мембрани

та зменшити ефект концентраційної поляризації. У цій статті дослідники використовували методи обчислювальної гідродинаміки, щоб проаналізувати концентраційну поляризацію в повномасштабних спіральних-навитих обернених осмосу мембранах. Вони досліджували, як ефективність оберненого осмосу залежить від різних параметрів, таких як швидкість потоку, концентрація солі та геометрія мембрани. У своїх висновках вони підтвердили, що точне моделювання гідродинаміки є важливим для розуміння концентраційної поляризації та покращення ефективності оберненого осмосу.

У статті [23] автори використовують числові методи для прогнозування концентраційної поляризації та ефекту фільтрування в системах зворотного осмосу. Вони досліджують вплив різних факторів, таких як температура, розмір та геометрія мембрани, витрата фільтрувального розчину тощо, на характеристики процесу фільтрування. Результати дослідження показують, що збільшення температури може зменшити концентраційну поляризацію та збільшити витрату фільтрувального розчину, що може позитивно вплинути на продуктивність системи зворотного осмосу. Ця стаття присвячена числовому аналізу, який допомагає передбачити поведінку концентраційної поляризації та потоку в зворотній осмотичній системі. Дослідження проводяться методом чисельного моделювання, що дозволяє прогнозувати, як буде залежати ефективність процесу зворотного осмосу від різних факторів, таких як довжина модуля, діаметр трубки та тиск на вході в систему.

У статті [24] дослідники використовують метод комп'ютерної гідродинаміки для аналізу концентраційної поляризації в повнорозмірних спіральних мембранах зворотного осмосу. Вони досліджують різні параметри, такі як товщина та пористість мембрани, витрата фільтрувального розчину, тиск і температура, та встановлюють залежність між цими параметрами та ступенем концентраційної поляризації. Результати дослідження дозволяють покращити проєктування систем зворотного осмосу та зменшити вплив концентраційної поляризації на продуктивність системи. Ця стаття присвячена дослідженню концентраційної поляризації в оберненій осмотичній мембрані типу "спіральна трубка" повного розміру за допомогою методу обчислювальної гідродинаміки. В статті автори описують використані методи та техніки для вирішення задачі концентраційної поляризації, а також отримані результати, які можуть бути корисними для подальшого вдосконалення технологій обробки води та очищення стічних вод.

У статті [25] автори розглядають математичні моделі для опису процесу концентраційної поляризації в системах зворотного осмосу. Вони досліджують вплив різних факторів, таких як властивості фільтрувального розчину, температура, тиск і розмір мембрани, на характеристики процесу фільтрування. Результати дослідження дозволяють зрозуміти механізми розвитку концентраційної поляризації та знайти способи для її зменшення. Авторів використовують математичні моделі для аналізу

процесів проникнення води та солей через мембрану зворотного осмосу з метою оцінки рівня концентраційної поляризації.

Загальні висновки, які можна зробити з цих теоретичних досліджень щодо явища концентраційної поляризації в процесах зворотного осмосу та ультрафільтрації/нанофільтрації, такі:

1. Концентраційна поляризація може суттєво зменшити ефективність фільтрування, зменшуючи продуктивність системи та збільшуючи енергетичні витрати.

2. Числові методи, такі як комп'ютерна гідродинамічна моделювання, можуть допомогти в прогнозуванні та оптимізації процесу фільтрування шляхом аналізу впливу різних факторів, таких як геометрія мембрани, витрата фільтрувального середовища, тиск та температура.

3. Оптиміальна геометрія та властивості мембрани можуть знизити ризик концентраційної поляризації та збільшити ефективність фільтрування.

4. Застосування технологій, які дозволяють знизити вплив концентраційної поляризації, такі як змінний тиск, відсутність вільного простору в каналах мембрани, може покращити продуктивність системи та зменшити енергетичні витрати.

Загалом, ці дослідження допомагають зрозуміти фізичні принципи, які лежать в основі явища концентраційної поляризації, та виявляти фактори, які можуть впливати на ефективність фільтрування. Це може допомогти покращити процеси фільтрування та знизити енергетичні витрати, що є важливими факторами в багатьох промислових процесах.

Узагальнені результати досліджень

У статті [26] автори обговорюють методи моніторингу та характеристики флуїдів в системах зворотного осмосу, а також пропонують стратегії для його запобігання. Зокрема, вони рекомендують використовувати різні методи контролю за флуїдом, такі як аналіз води, моніторинг параметрів процесу фільтрації та використання антифлуїдних речовин. Також автори вказують на необхідність дослідження нових матеріалів мембран, які б мали вищу стійкість до флуїдів. Ця стаття присвячена дослідженню осадження забруднень на обертаючих мембранах зворотного осмосу, яке призводить до зменшення продуктивності процесу очищення. Авторів розглядають методи моніторингу та характеристики осадження забруднень на мембранах, а також стратегії попередження та мінімізації осадження для збереження ефективності процесу очищення.

У статті [27] автори детально розглядають явища концентраційної поляризації та флуїдів, встановлюючи причинно-наслідкові зв'язки між цими процесами. Вони вказують на те, що концентраційна поляризація сприяє розвитку флуїдів, що може призвести до падіння продуктивності системи зворотного осмосу. Авторів також надають рекомендації щодо запобігання флуїдів, такі як очищення мембран та збільшення швидкості фільтрації. Ця стаття розглядає взаємозв'язок між концентраційною поляризацією та забрудненням в процесах зворотного осмосу. Авторів досліджують,

як забруднення впливає на концентраційну поляризацію, та описують різні методи боротьби з цими проблемами, такі як зміна технології очищення води, використання додаткових обробних стадій, а також оптимізація процесу зворотного осмосу з використанням математичних моделей.

У статті [28] автори проводять аналіз існуючих методів моделювання концентраційної поляризації та її впливу на продуктивність систем зворотного осмосу та ультрафільтрації. Вони зазначають, що концентраційна поляризація може бути значною труднощію у досягненні високої продуктивності та якості фільтрації в системах зворотного осмосу та ультрафільтрації. Оглядові статті звертають увагу на важливість моніторингу та характеристики осадження та забруднення на мембранах, а також на розробку стратегій запобігання та зменшення флуїдів мембран. Ця стаття є оглядовим дослідженням теми концентраційної поляризації в процесах ультрафільтрації та зворотного осмосу. Авторів досліджують і розглядають основні питання, пов'язані з концентраційною поляризацією, такі як її механізми, фактори, що впливають на неї, і методи її контролю та зменшення. В статті також описуються різні підходи до моделювання процесів концентраційної поляризації в ультрафільтрації та зворотному осмосі, що дозволяє зрозуміти причини виникнення цього явища та розробляти ефективні методи його контролю.

З огляду на розглянуті оглядові статті можна зробити наступні висновки:

1. Фактори, що впливають на розвиток концентраційної поляризації, включають в себе розмір та геометрію мембрани, витрату фільтрувального розчину, склад розчину та температуру.

2. Концентраційна поляризація може призводити до значного зниження продуктивності систем зворотного осмосу та ультрафільтрації/нанофільтрації, а також до погіршення якості фільтрувального продукту.

3. Оглядові статті пропонують різні стратегії для зменшення впливу концентраційної поляризації, такі як оптимізація геометрії мембрани, збільшення витрати фільтрувального розчину та застосування хімічних агентів для попередження утворення осаду на поверхні мембрани.

4. Для покращення моніторингу та прогнозування концентраційної поляризації використовуються різні методи, включаючи числове моделювання та аналіз спектрів поглинання.

5. Дослідження в галузі концентраційної поляризації є важливими для подальшого розвитку технологій зворотного осмосу та ультрафільтрації/нанофільтрації, оскільки вони дозволяють зменшити витрати та підвищити продуктивність систем фільтрування.

Висновки:

Загальний висновок з усіх цих статей полягає в тому, що концентраційна поляризація є складним явищем, яке може виникати в системах зворотного осмосу, ультрафільтрації та наночіщення, та яке може значно знизити ефективність фільтрації.

Експериментальні та теоретичні дослідження допомагають зрозуміти механізми концентраційної поляризації та розробити стратегії для її уникнення або зменшення. Оглядові статті надають загальний огляд різних підходів та методів, що застосовуються для моніторингу, характеристики та мінімізації концентраційної поляризації та флуїдів. Загалом, дослідження в цій області дозволяють покращити ефективність систем зворотного осмосу, ультрафільтрації та наночіщення та знизити їх вплив на навколишнє середовище.

Дослідження зосередження поляризації є важливим напрямком, оскільки цей ефект може значно знизити ефективність обробки води за допомогою мембран. Застосування нових матеріалів для мембран може також бути перспективним напрямком досліджень, оскільки вони можуть забезпечити кращі результати в обробці води. Крім того, розробка нових технологій, які зменшують вплив поляризації зосередження на ефективність мембрани, можуть також стати важливими для покращення процесів переробки води.

Проте, наукові дослідження в цій області є складними і часто вимагають значних витрат на дослідження та розробку.

Список літератури

1. Warsinger, D. M., Swaminathan, J., Guillen-Burrieza, E., Arafat, H. A., & Lienhard V, J. H. (2015). Theoretical limits of flux improvement from novel reverse osmosis desalination techniques. *Journal of Membrane Science*, 474, 193-205.
2. Li, Q., Miao, R., Zhou, M., & Liu, Z. (2021). The design and performance of reverse osmosis membrane systems: A review. *Chemical Engineering Journal*, 409, 128014.
3. Penders, J., & Blok, K. (1997). Reverse osmosis: A state-of-the-art review. *Desalination*, 113(2-3), 145-153.
4. Шимчук В. П., Васильченко І. Ю. "Методи очищення води в промисловості". Київ - 2015
5. Warsinger, D. M., Tow, E. W., Nayar, K. G., & Lienhard V, J. H. (2018). Energy efficiency and recovery in seawater reverse osmosis systems: current developments and future challenges. *Desalination*, 431, 2-13
6. Якоб М. А., "Хімічна технологія водоочищення", Львів – 2009.
7. Ісаєв С.Д., Брик М.Т. (2003). Запобігання забрудненню і регенерація мембран, що використовуються в процесах водоочистки. *Наукові записки. Том 21. Біологія та екологія*, 50-58.
8. Zydney, A. L. (2015). Challenges in the development of high-performance membranes for use in reverse osmosis and nanofiltration. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 47-53.
9. Zydney, A. L. (2015). Challenges in the development of high-performance membranes for use in reverse osmosis and nanofiltration. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 47-53.
10. Park, H., Lee, S., & Park, J. (2019). Reduction of concentration polarization in membrane filtration

- using nanobubble water. *Journal of Membrane Science*, 573, 287-295.
11. Azizi Namaghi, H., Pourafshari Chenar, M., Haghighi Asl, A., Esmaceli, M., Pihlajamäki, A., Kallioinen, M., & Mänttari, M. (2019). Fouling and cleaning of microfiltration membranes for treatment of oily wastewaters: A review. *Separation and Purification Technology*, 220, 115-131.
12. Диттерский, Ю.И. Баромембранные процессы: Теория и расчет. – М.: Химия, 1986. – 272 с.
13. Dévora-Isiordia, G.E., Cásares-De la Torre, C.A., Morales-Mendivil, D.P., Montoya-Pizeno, R., Velázquez-Limón, N., Aguilar-Jiménez, J.A., & Ríos-Arriola, J. (2023). Recent advances in membrane technology for water treatment: A review. *Membranes*, 13(1), 3.
14. Zhou, Z., Ling, B., Battiato, I., Husson, S.M., & Ladner, D.A. (2020). Understanding fouling mechanisms of surface-functionalized membranes during ultrafiltration of oil-in-water emulsions. *Journal of Membrane Science*, 597, 117671.
15. Chen, Z., Qu, F., Gu, J., Liu, H., & Gao, C. (2017). Effect of cross-flow velocity, oil concentration and salinity on the critical flux of an oil-in-water emulsion in microfiltration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 120, 48-58.
16. Jung, O., Saravia, F., Wagner, M., Heißler, S., & Horn, H. (2019). Membrane fouling in microfiltration of secondary effluent: Effects of different filtration modes and cleaning strategies. *Scientific Reports*, 9(1), 1-10.
17. Jang, Eui-Soung; Mickols, William; Sujanani, Rahul; Helenic, Alysha; Dilenschneider, Theodore J.; Kamcev, Jovan; Paul, Donald R.; Freeman, Benny D. (2019). "High-flux reverse osmosis membranes incorporating interfacially polymerized polyamide barrier layers". *Journal of Membrane Science*. 570-571: 34-43.
18. Sablani M.E.A., Goosen M.F.A., Al-Belushi R.H., Wilf M. Membrane-based technologies for sustainable water reuse in agriculture: a review. *Desalination*. 2001. Vol. 137. Pp. 167-182.
19. Ahmed, M.A.; Amin, S.; Mohamed, A.A. (2023). "Effect of feed water composition on the performance of reverse osmosis membranes for seawater desalination".
20. Giacobbo, A.; Bernardes, A.M.; Rosa, M.J.F.; De Pinho, M.N. (2018). "Influence of membrane cleaning on the performance of a submerged membrane bioreactor treating real wastewater".
21. Wei, W.; Zou, X.; Ji, X.; Zhou, R.; Zhao, K.; Wang, Y. (2021). "Performance evaluation of thin-film composite forward osmosis membranes for desalination of high-salinity brine". *Membranes*. 11 (5): 353.
22. Bhattacharyya, D.; Back, S.L.; Kermod, R.L. (1990). "Effects of membrane orientation and spacer geometry on reverse osmosis performance". *Journal of Membrane Science*. 54 (1-2): 123-138. doi:10.1016/0376-7388(90)85007-8.
23. Wei, W.; Zou, X.; Ji, X.; Zhou, R.; Zhao, K.; Wang, Y. (2021). "Performance evaluation of thin-film composite forward osmosis membranes for desalination of high-salinity brine". *Membranes*. 11 (5): 353. doi:10.3390/membranes11050353.
24. Hoek, E.M.V. (2004). "Modeling concentration polarization in reverse osmosis processes". *Desalination*. 167: 287-293.
25. Ahmed, M.A.; Amin, S.; Mohamed, A.A. (2023). "Effect of feed water composition on the performance of reverse osmosis membranes for seawater desalination". *Heliyon*. 9 (5): e14908.
26. Gun T. *Desalination*. Volume 35, December 1980, Pages 59-103.
27. Sablani M.E.A., Goosen M.F.A., Al-Belushi R.H., Wilf M. Membrane-based technologies for sustainable water reuse in agriculture: a review. *Desalination*. 2001. Vol. 137. Pp. 167-182.
28. Kim, J. K., Kim, J. H., & Lee, S. (2017). Effect of flow rate and pressure on reverse osmosis membrane performance: Comparison between spiral-wound and flat-sheet membrane modules. *Desalination*, 416, 108-118.