

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

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.

\_\_\_\_\_ Ярослав КОРНІЄНКО

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Спеціалізація / освітньо наукова програма – Обладнання хімічних, нафтопереробних та целюлозно-паперових виробництв

на тему: **Процес масообміну при вилученні осадів з поверхні рулонних мембранних модулів**

Виконав: студент VI курсу, групи ЛН-91мн

Ігор ТЕРЕЩЕНКО \_\_\_\_\_

Науковий керівник: кандидат технічних наук,

доцент Сергій ГУЛІЄНКО \_\_\_\_\_

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях

к.т.н., доцент Андрій КОВТУН \_\_\_\_\_

Техніо-економічне обґрунтування доцільності

модернізації устаткування к.т.н., доцент Наталія ЮДІНА \_\_\_\_\_

Рецензент \_\_\_\_\_

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

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

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

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації

немає запозичень праць інших авторів без відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_ Ігор ТЕРЕЩЕНКО

Київ 2021

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

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра машин і апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Спеціалізація / освітньо наукова програма – Обладнання хімічних, нафтопереробних та целюлозно-паперових виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,

д-р техн. наук, проф.

\_\_\_\_\_ Ярослав КОРНІЄНКО

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Терещенко Ігоря Юрійовича

**1. Тема дисертації:** Процес масообміну при вилученні осадів з поверхні рулонних мембранних модулів

науковий керівник Гулієнко Сергій Валерійович, к. т. н., доцент

затверджена наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р. № \_\_\_\_\_.

**2. Термін подання студентом дисертації:** 12 травня 2021 р.

**3. Об’єкт дослідження:** Процеси перенесення в системі рідина — тверде тіло.

**4. Предмет дослідження:** Кінетика процесу видалення осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на поверхні мембрани в стіснених умовах.

**5. Перелік завдань, які потрібно розробити:**

- обґрунтувати фізичну модель процесу видалення осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на поверхні мембрани;
- скласти математичну модель процесів масообміну при вилученні осадів;
- уточнити критеріальну залежність для визначення коефіцієнту перенесення при вилученні осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на робочій поверхні мембрани;
- визначити вплив технологічних параметрів на процес масообміну при температурній кавітації та сформулювати умови його інтенсифікації;
- вдосколити методику тестової оцінки ефективності процесу регенерації зворотноосмотичних та нанофільтраційних рулонованих модулів.

**6. Орієнтовний перелік ілюстрованого матеріалу:** Креслення апарату зворотного осмосу (A2), презентація магістерської дисертації.

**7. Орієнтовний перелік публікацій:** заплановано публікування двох статей в наукових фахових виданнях, участь у 6 конференціях з опублікуванням 6 тез доповідей.

**8. Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	канд. техн. наук, доцент Андрій КОВТУН		
Техніо-економічне обґрунтування доцільності модернізації устаткування	канд. техн. наук, доцент Наталія ЮДИНА		

**9. Дата видачі завдання:** 01 вересня 2019 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів дисертації	Примітка
1	2	3	4
1.	Аналіз літературних і патентних джерел щодо модернізації процесу сушіння. Формулювання задач досліджень	14.10.2019	
2.	Підготовка матеріалів з результатами аналізу літератури до публікації тез доповідей та участі у конференції.	14.11.2019	
3.	Розробка фізичної моделі процесу вилучення осаду	30.12.2020	
4.	Розробка математичної моделі процесу вилучення осаду	28.02.2020	
5.	Розробка методики досліджень щодо перевірки робочої гіпотези та положень фізичної моделі процесу вилучення осаду	30.03.2020	
6.	Підготовка матеріалів з результатами досліджень до публікації статті у фахових виданнях, публікації тез доповідей та подачі деклараційного патенту на корисну модель.	30.04.2020	
7.	Розробка моделі процесу вилучення осаду та креслень модернізованого апарату для впровадження результатів роботи.	30.05.2020	

Студент

\_\_\_\_\_ Ігор ТЕРЕЩЕНКО  
Підпис

Науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_

Сергій ГУЛІЄНКО  
Підпис

## РЕФЕРАТ

УДК 628.16.081

Магістерська дисертація на тему: «Процес масообміну при вилученні осадів з поверхні рулонних мембранних модулів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Керівник С. Гулієнко. – К., 2021. – с. Виконавець – І. Терещенко.

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

Предмет дослідження: кінетика процесу видалення осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на поверхні мембрани в стіснених умовах.

Метою дослідження є встановлення та уточнення закономірностей перенесення маси в процесі регенерації забруднених мембранних модулів.

Обрано та пояснена фізична модель вилучення осаду з поверхні мембран.

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 уточнюючі експериментальні дослідження, в результаті яких було отримано уточнене критеріальне рівняння для визначення коефіцієнтів масовіддачі при регенерації мембранних модулів.

Проведено розрахунки за математичною моделлю, які показали, що використання виправленого безрозмірного рівняння дозволяє з більшою точністю прогнозувати тривалість регенерації мембранних модулів.

Складено правила безпеки та охорони праці.

Запропонована модифікована схема багатоступеневої конструкції процесу переробки ретантату та пермеату процесу зворотного осмосу для відбракування хлорофенолу зі стічних вод.

Було запропоновано вдосконалену методику розрахунку тривалості регенерації та створена оригінальна програма розрахунку на мові програмування пайтон.

МЕМБРАННЕ РОЗДІЛЕННЯ, КОНЦЕНТРАЦІЙНА ПОЛЯРИЗАЦІЯ, ОПР, РЕГЕНЕРАЦІЯ, ОСАД.

## РЕФЕРАТ

УДК 628.16.081

Магистерская диссертация на тему: «Процесс массообмена при изъятии осадков с поверхности рулонных мембранных модулей» / НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»; Руководитель С. Гулиенко. - М., 2021. - с. Исполнитель - И. Терещенко.

Объект исследования: процессы переноса в системе жидкость - твердое тело.

Предмет исследования: кинетика процесса удаления осадков, образованных в результате концентрационной поляризации на поверхности мембраны в ограниченных условиях.

Целью работы является установление и уточнение закономерностей переноса массы в процессе регенерации загрязненных мембранных модулей.

Выбрана и объяснена физическая модель извлечения осадка с поверхности мембран.

Составлена математическая модель извлечения осадка и математическая модель процесса массообмена.

Обосновано применение критериального уравнения, параметры которого определяются экспериментально.

Описанная экспериментальная установка, которая использовалась в экспериментах.

Проведены уточняющие экспериментальные исследования, в результате которых было получено уточненное критериальное уравнение для определения коэффициентов массообмена при регенерации мембранных модулей.

Проведены расчеты по математической модели, которые показали, что использование исправленного безразмерного уравнения позволяет с большей точностью прогнозировать продолжительность регенерации мембранных модулей.

Составлен правила безопасности и охраны труда.

Предложена модифицированная схема многоступенчатой конструкции процесса переработки ретантату и пермеата процесса обратного осмоса для отделения хлорофенола из сточных вод.

Было предложено усовершенствованную методику расчета продолжительности регенерации и создана оригинальная программа расчета на языке программирования Пайтон.

МЕМБРАННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ, КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ, СОПРОТИВЛЕНИЕ, РЕГЕНЕРАЦИЯ, ОСАДОК.

## ABSTRACT

UDC 628.16.081

Magister dissertation on the theme: "The process of mass transfer in the extraction of sediments from the surface of the roll membrane modules" / NTUU "KPI. Igor Sikorsky "; Leader S. Gulienko. - K., 2021. - p. Performer - I. Tereshchenko.

Object of research: liquid-solid transfer processes in the system.

Subject of research: kinetics of the process of removal of sediments formed due to concentration polarization on the membrane surface under compressed conditions.

The aim of the work is to establish and clarify the regularities of mass transfer during the regeneration of contaminated membrane modules.

The physical model of sediment extraction from the membrane surface is chosen and explained.

A mathematical model of sludge extraction and a mathematical model of the mass transfer process are compiled.

Substantiated the application of the criterion equation, the parameters of which are determined experimentally.

The experimental setup used in the experiments was described.

Refining experimental researches were carried out, as a result of which the refined criterion equation for definition of coefficients of mass transfer at regeneration of membrane modules was received.

Calculations based on a mathematical model were performed, which showed that the use of the corrected dimensionless equation allows to predict the duration of regeneration of membrane modules with greater accuracy.

Rules of safety and labor protection are made.

A modified scheme of a multi-stage design of the retentate and permeate reverse osmosis processing process for the rejection of chlorophenol from wastewater is proposed.

An improved method for calculating the regeneration duration was proposed and an original calculation program in the Python programming language was created.

MEMBRANE SEPARATION, CONCENTRATION POLARIZATION, RESISTANCE, REGENERATION, PRECIPITATION.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	11
ВСТУП.....	13
1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	16
1.1 Класифікація мембран.....	16
1.2 Забруднення мембран.....	17
1.3. Методи очищення мембран.....	23
1.4. Висновки.....	32
1.5. Мета та задачі дослідження.....	32
2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МАСООБМІНУ ПРИ ВИДАЛЕННІ ОСАДІВ З РУЛОНОВАНИХ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ.....	34
2.1. Фізична модель процесу регенерації забруднених рулонованих модулів з використанням пульсацій.....	34
2.2 Математична модель процесу видалення осаду.....	37
2.3 Математична модель процесу перенесення маси при видаленні осаду, утвореного внаслідок концентраційної поляризації.....	41
2.3.1 Математична модель процесу видалення осаду.....	44
2.3.2 Математична модель масообміну при русі рідини в каналах рулонованого мембранного модуля у випадку вилучення осаду.....	48
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕГЕНЕРАЦІЇ В ПУЛЬСАЦІЙНОМУ РЕЖИМІ.....	49
3.1 Матеріали.....	49
3.2 Опис експериментальної установки.....	49
3.3 Процедура експерименту та основні вимірювання.....	50
3.4 Результати експериментальних досліджень.....	52
3.5 Узагальнення результатів дослідження.....	55
3.6 Результати розрахунків за математичною моделлю.....	57
3.7 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	60
3.7.1 Повітря робочої зони.....	61

3.7.2	Небезпека ураження електричним струмом.....	62
3.7.3	Виробничий шум та вібрації.....	64
3.7.4	Розрахунок зниження шуму і додаткового звукопоглинання.....	66
3.7.5	Пожежна безпека та надзвичайні ситуації.....	69
3.8	Висновки.....	71
4.	ОБГРУНТУВАННЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	73
4.1	Вступ.....	73
4.2	Алгоритм розрахунку часу вилучення осаду.....	74
4.3	Висновки.....	79
5.	РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ.....	80
5.1.	Опис ідеї проекту.....	80
5.2	Технологічний аудит ідеї проекту.....	82
5.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	83
5.4	Аналіз умов конкуренції в галузі за Портером.....	87
5.5	Розроблення ринкової стратегії ринку.....	91
5.6	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	94
5.7	Висновки.....	97
	ВИСНОВКИ.....	98
	ВЫВОДЫ.....	99
	CONCLUSIONS.....	100
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	101
	ДОДАТОК А. ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РЕГЕНЕРАЦІЇ.....	115
	ДОДАТОК Б. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕГЕНЕРАЦІЇ.....	120
	ДОДАТОК В. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ.....	122
	ДОДАТОК Г. КОПІЇ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ.....	136

ДОДАТОК Д. СПЕЦИФІКАЦІЯ ДО СКЛАДАЛЬНОГО КРЕСЛЕННЯ

..... 149

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

$C$  – концентрація, кг/м<sup>3</sup>;

$C_f$  – концентрація розчинених речовин в розділюваному розчині, кг/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – концентрація розчинених речовин в пермеаті, кг/м<sup>3</sup>;

$C^p$  – рівноважна концентрація розчинених речовин в промивному розчині, кг/м<sup>3</sup>;

$C_0$  – початкова концентрація розчинених речовин в промивному розчині, кг/м<sup>3</sup>;

$C_1$  – середня концентрація розчинених речовин в промивному розчині, кг/м<sup>3</sup>;

$d_e$  – еквівалентний діаметр, м;

$D$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;

$F$  – площа поверхні мембрани, м<sup>2</sup>;

$J$  – потік речовини через мембрану, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);

$J_0$  – потік речовини через мембрану чистого модуля, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);

$J_f$  – потік речовини через мембрану забрудненого модуля, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);

$J_p$  – потік речовини через мембрану модуля, після регенерації м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);

$K$  – коефіцієнт перенесення маси, м/с;

$L$  – довжина мембранного модуля, м;

$M$  – маса розчиненого осаду, кг;

$M_{II}$  – початкова маса осаду, кг;

$p$  – тиск, МПа

$R$  – коефіцієнт розділення;

$R_c$  – опір шару забруднень, м<sup>-1</sup>;

$R_{cp}$  – опір шару концентраційної поляризації, м<sup>-1</sup>

$R_m$  – опір мембрани, м<sup>-1</sup>;

$R_T$  – загальний опір перенесенню речовини через мембрану, м<sup>-1</sup>;

$S$  – площа поперечного перерізу каналу рулонованого мембранного модуля, м<sup>2</sup>;

$t$  – температура, °C;

$V$  – об'єм промивного розчину, м<sup>3</sup>;

$V_C$  – об'ємна витрата промивного розчину, м<sup>3</sup>/с;

$W$  – швидкість руху рідини в каналах мембранного модуля, м/с;

Грецькі символи:

$\alpha$  – питомий опір шару забруднень, м<sup>-2</sup>;

$\delta$  – товщина шару забруднень, м;

$\Delta$  – перепад, різниця;

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с;

$\pi$  – осмотичний тиск, МПа;

$\tau$  – тривалість регенерації, с.

Критерії (числа) подібності:

$Eu$  – критерій Ейлера;

$Pe$  – критерій Пекле;

$Re$  – критерій Рейнольдса;

$Sc$  – критерій Шмідта;

$Sh$  – критерій Шервуда.

## ВСТУП

### Актуальність теми

Внаслідок антропогенних та техногенних факторів, кліматичних змін та інших чинників стан водних ресурсів постійно погіршується і в таких умовах зростає значень технологій очищення та підготовки води для питних та виробничих потреб. Мембранні процеси, зокрема зворотній осмос та нанофільтрація, є одними з найефективніших, що обумовило їх поширення в промислових установках, та мають ряд переваг порівняно з традиційними процесами, проте основним недоліком в роботі мембранних модулів є забруднення і передчасний вихід модулів з ладу. Забруднення мембранних модулів виникають внаслідок явища концентраційної поляризації та утворення осадів на поверхні мембрани. Застосування методів попередньої підготовки розділюваних розчинів, модифікація поверхні мембран, дозування антискелантів дозволяє суттєво пом'якшити забруднення, проте періодичне проведення процесу регенерації залишається актуальною потребою. Існуючі методи регенерації дозволяють зменшити негативні наслідки утворення осадів, однак мають обмежену ефективність. Методам інтенсифікації процесу масообміну при видаленні осаду в джерелах літератури приділено не достатньо уваги. Закономірності процесу перенесення маси при видаленні осадів з поверхні мембран, зокрема рулонованих, залишаються не визначеними. Існуючі методи регенерації в переважній більшості ґрунтуються на емпіричних даних, методик прогнозування властивостей мембрани після регенерації не виявлено. В попередній роботі було розроблено метод регенерації спіральних мембранних модулів з використанням локального закипання при розрідженні та математична модель, що описує масообмін при розчиненні в каналі спірального мембранного модуля.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Магістерська робота виконувалася відповідно до плану наукової роботи кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і спеціальності

133 «Галузеве машинобудування», а також за ініціативною темою «Підвищення ефективності баромембранних процесів», державний реєстраційний номер 0120U101185.

**Метою дослідження** є встановлення та уточнення закономірностей перенесення маси в процесі регенерації забруднених мембранних модулів.

**Задачі дослідження:**

- обґрунтувати фізичну модель процесу видалення осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на поверхні мембрани;
- скласти математичну модель процесів масообміну при вилученні осадів;
- уточнити критеріальну залежність для визначення коефіцієнту перенесення при вилученні осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на робочій поверхні мембрани;
- визначити вплив технологічних параметрів на процес масообміну при температурній кавітації та сформулювати умови його інтенсифікації;
- вдосколити методику тестової оцінки ефективності процесу регенерації зворотноосмотичних та нанофільтраційних рулонованих модулів.

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

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

**Методи дослідження.** Метод теорії подібності, експериментальні методи, зокрема ваговий метод вимірювання витрат, методи математичного модулювання.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- отримали подальший розвиток уявлення про процеси перенесення маси при вилученні осадів з поверхні мембранних модулів;
- отримано уточнену критеріальну залежність для розрахунку коефіцієнтів перенесення маси при вилученні осадів з поверхні мембранних модулів;
- вдосконалено методику розрахунку тривалості регенерації;

- встановлено, що зміна концентрації розчинених речовин в промивному розчині, не чинить суттєвого впливу на рушійну силу процесу.

**Практичне значення одержаних результатів.** Була запропонована модифікована схема багатоступеневої конструкції процесу переробки ретантату та пермеату процесу зворотного осмосу для відбракування хлорофенолу зі стічних вод, було запропоновано вдосконалену методику розрахунку тривалості регенерації та створена оригінальна програма розрахунку на мові програмування пайтон.

**Особистий внесок здобувача** полягає у постановці задач дослідження, проведенні експериментальних досліджень, обробці результатів експериментів, розв'язку математичної моделі.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення доповідалися на XVII Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, XVIII Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, IX Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, X Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, X Міжнародної науково-практичної конференції «КОМПЛЕКСНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ».

**Публікації.** 8 друкованих праць, з них 2 статті у наукових виданнях, одне з яких фахове категорії Б, друге зарубіжна, 6 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

# 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1. Вступ

Розділення за допомогою мембранних технологій за останні три десятиліття набирають все більшої популярності і стають однією з найперспективніших технологій 21 століття. Як передова технологія очищення стічних вод, мембранна технологія відіграє ключову роль у зниженні рівня забруднюючих речовин при очищенні та / або концентруванні широкого спектру рідин від води та стічних вод до фармацевтичних та хімічних продуктів. Мембранні процеси представляють великий інтерес, оскільки вони зменшують кількість одиничних операцій, переробляють технологічну воду та відновлюють цінні продукти для інших цілей. Вони також розглядаються як привабливі альтернативи порівняно із звичайними процесами очищення стічних вод завдяки їх властивим перевагам, таким як вибіркоче розділення, безперервна та автоматична робота, легке та добре організоване проведення процесу, очищення без додавання хімічних речовин, легке нарощування та низька вимога до місця [1]. Тому мембранні методи (наприклад, мікрофільтрація (МФ), ультрафільтрація (УФ), нанофільтрація (НФ) та зворотний осмос (ЗО)) загалом та мембранні біореактори (МБР), зокрема, широко застосовуються для вдосконаленого очищення води та стічних вод. Однак, оскільки різні фактори впливають на експлуатаційні витрати мембранної системи, такі як потреби в енергії, витрати на електроенергію, робочу силу, матеріали, очищення мембрани, утворення осаду та термін служби та заміни мембрани, залишаються деякі обмеження щодо використання мембран для очищення води та стічних вод [2]. Основною перешкодою для застосування мембранних процесів є швидке зменшення потоку пермеату з часом внаслідок забруднення мембран. Тобто ефективність мембрани та забруднення мембран становлять суттєві проблеми для технологій, пов'язаних із ЗО, НФ, УФ та МФ [3].

## 1.2. Класифікація мембран

Застосування мембранних систем очищення води у промисловості почалося приблизно з 70-х років двадцятого сторіччя і тепер використовується в усіх сферах життя.

Мембранні технології – це ресурсозберігаючі технології, їх використання дає можливість значно підвищити чистоту та якість стічних вод, а також знизити забруднення природних водних ресурсів завдяки можливості багаторазового використання води, що пройшла очистку, у закритих системах водопостачання.

Характеристики та властивості мембран можуть бути пристосовані в залежності від технічних вимог, що зумовлює їх широке застосування в багатьох процесах промисловості [3-11].

Класифікація мембран проводиться за різними ознаками. За походженням мембрани поділяються на природні (біологічні) та синтетичні. Потім ці два основних класи діляться на декілька підкласів в залежності від властивості матеріалу (рисунок 1.1) [12].

Методи мембранного розділення поділяються відповідно до типів мембран, що використовуються, рушійних сил та сфер застосування цих мембран.

Залежно від рушійної сили, що примушує рідину проникати крізь тонку перегородку (мембрану) процеси поділяються на [8]:

- баромембранні процеси - різниця тисків;
- дифузійно-мембранні процеси - різниця концентрацій розчинених у воді речовин;
- термомембранні процеси - різниця температур по обидві сторони перегородки;
- електромембранні процеси - електрорушійна сила (різниця електрохімічних потенціалів).

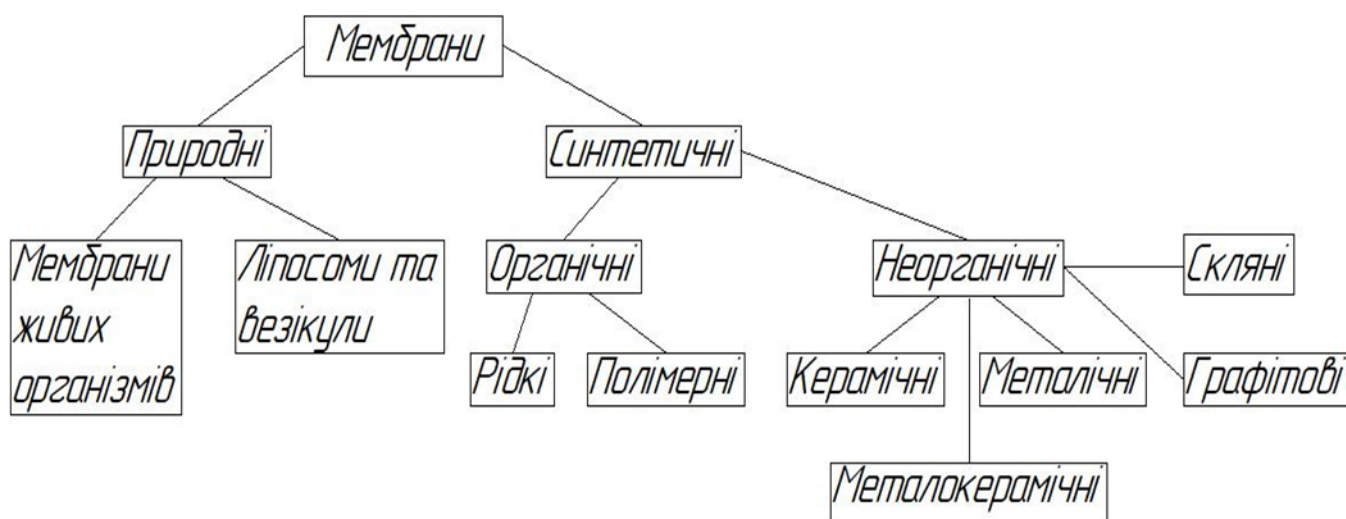


Рисунок 1.1 Класифікація мембран за походженням і матеріалом

Найбільш поширеними довгий час були баромембранні процеси. Мембрани, що використовуються у цих процесах, поділяються на 4 типи, в залежності від розміру утримуваних частинок та розміру пор: мікрофільтраційні, ультрафільтраційні, нанофільтраційні та зворотноосмотичні.

Розмір пор мембрани зменшується від мікрофільтрації до зворотного осмосу. Це значить, що максимальний розмір утримуваних частинок на поверхні робочого шару мембрани зменшується. До того ж, чим менше пори у мембрани, тим вище опір, який вона чинить потоку, і тим більший тиск потрібен для того, щоб забезпечити процес мембранного розділення [13].

Найбільш селективними та ефективними відповідно до коефіцієнту розділення розчинів є зворотноосмотичні мембрани. Вони мають найменші пори серед інших типів мембран, існують навіть теорії, які вважають ці мембрани непористими. Мембрани зворотного осмосу використовують у харчовій та фармацевтичній промисловостях, комунальних системах та у безлічі виробничих процесів, де потрібна вода високої якості, адже середній відсоток затримування у цих мембран становить 96-99% від всіх розчинених речовин [14]. Зазвичай зворотноосмотичні мембрани використовують на завершальних стадіях очищення стічних та природних вод.

В промисловості для апаратів баромембранних процесів встановлюються вимоги

відповідно до можливостей їх виробництва та умов експлуатації [15]. Апарат для проведення мембранних процесів повинен бути простим при складанні та встановленні, мати велику робочу поверхню мембрани на одиницю об'єму, мати можливість постійно міняти мембрани. Рідина при русі в перетинах та елементах пристрою повинна мати достатньо високу швидкість потоку для зменшення впливу концентраційної поляризації, а також має бути рівномірно розподілена по поверхні мембрани. Також треба, щоб падіння тиску в апараті було мінімальним. Необхідне дотримання вимог, які пов'язані з функціонуванням апарату під високим тиском, а саме: герметичність, механічна міцність та ін. Конструкцію треба підбирати для кожного окремо взятого процесу. Ця конструкція повинна забезпечувати найбільш ефективні умови саме для цього конкретного процесу.

За способом укладання мембран пристрої поділяють на такі основні типи:

- рулонні або спіральні;
- порожнисто-волоконні;
- трубчасті;
- плоскокамерні.

**Рулонний мембранний елемент** має вигляд пакета, три сторони якого герметично запаяні, а четвертий кріпиться до перфорованої трубки. Через неї видаляється пермеат (очищена вода). Декілька таких пакетів разом з сітками-сепараторами намотуються на трубку. Відокремлена вода тече крізь міжмембранні канали в продовжному напрямі [17]. Пермеат виходить крізь вихідний отвір. Типова конструкція рулоного мембранного модуля, у даному випадку для зворотного осмосу, показана на рисунок 1.2.

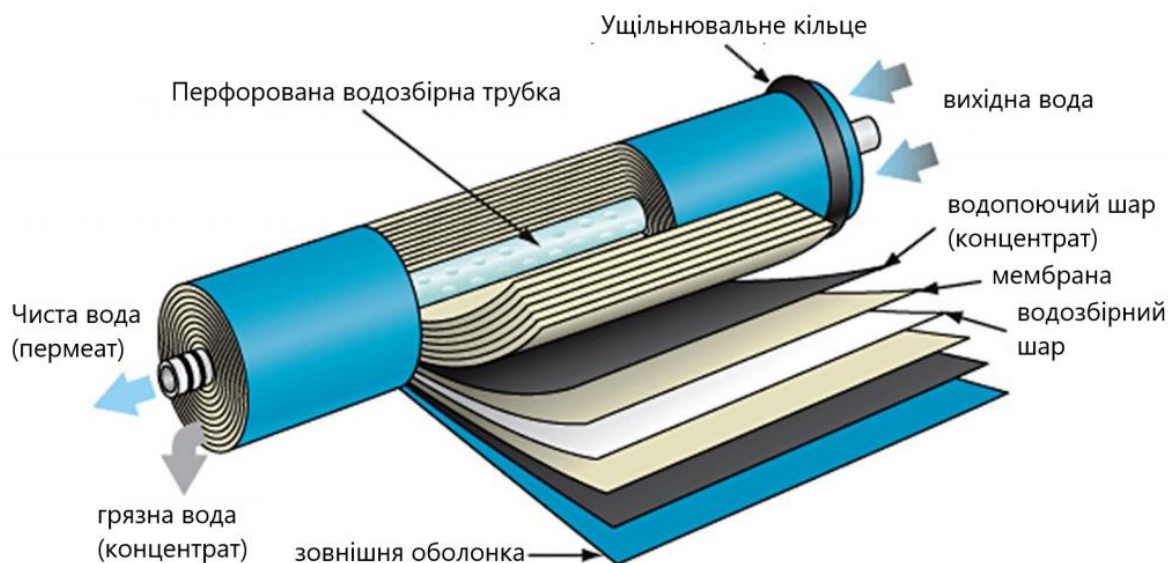


Рисунок 1.2 Будова рулонованого мембранного модуля зворотного осмосу

Основними перевагами таких мембранних модулів є: простота конструкції, надійність, висока питома поверхня мембрани ( до 1000 м/м), простота обслуговування, можливість регенерації [8]. Діаметр промислового мембранного модуля (рисунок 1,3 а) сягає 0,25 м, довжина становить 1,5 м, висота напірного каналу 0,001 м. Діаметри побутових мембранних модулів (рисунок 1.3 б) зазвичай становлять приблизно 0,05 м, довжина напірного каналу приблизно 0,3 м, висота напірного каналу  $0,35 \cdot 10^{-3}$  м.



а)



б)

Рисунок 1.3 – Фотографії рулонованих мембранних модулів: (а) промислового, (б) побутового

Рулонні мембранні апарати часто використовуються на середніх та великих підприємствах.

**Порожнисто-волоконний** мембранний елемент має вигляд порожнистого волокна. Апарат виглядає як циліндр, в якому знаходиться пучок пористих порожнистих волокон із зовнішнім діаметром близько 80-100 мкм і товщиною стінки близько 20 мкм. Забруднена вода зрошує поверхню волокна, а пермеат поступає у внутрішній канал [17-19].

Апарати з мембранами з порожнистих волокон діляться на наступні групи:

- з паралельним розташуванням порожнистих волокон;
- з циліндричними мембранними елементами;
- з U-подібним розташуванням порожнистих волокон.

Розглянемо пристрій і принцип дії апарату з мембранами з U-подібних порожнистих волокон (рисунок 1.4). Вони прості у виготовленні і збірці, зручні в монтажі та експлуатації, мають низьку матеріаломісткість, тому знаходять широке практичне застосування.

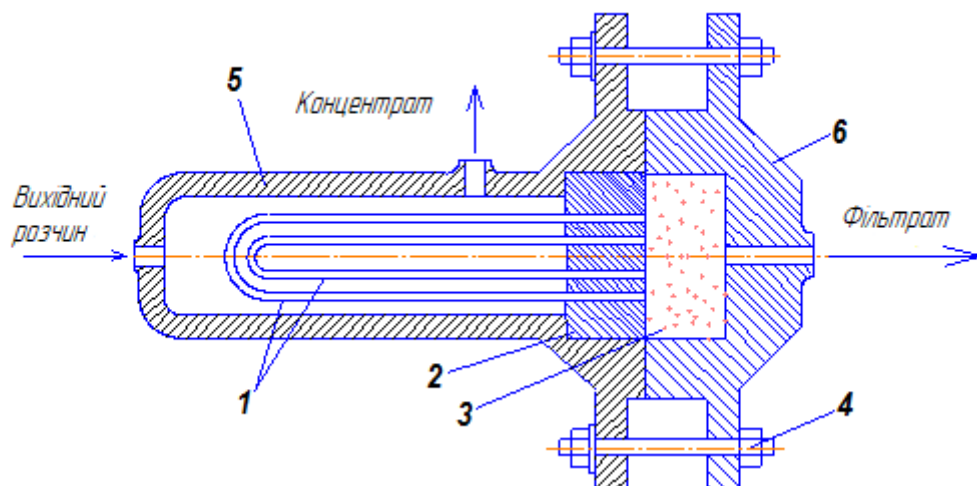


Рисунок 1.4. Схема апарату з U – подібними порожнистими волокнами: 1 - напівпроникні мембрани; 2 - шайба; 3 - пориста підкладка; 4 - болти; 5 - корпус апарату; 6 - кришка апарату.

Мембранний елемент цього апарату складається з U-подібного пучка 1

порожнистих волокон довжиною 1,5-2,0 м і шайби 2, що служить для склеювання епоксидною смолою всіх відкритих кінців порожнистих волокон. Шайба 2 спирається на пористу підкладку 3. Шайба з підкладкою затиснуті за допомогою фланцевого з'єднання болтами 4 між корпусом 5 і кришкою 6 апарату.

Апарати з мембранами у вигляді порожніх волокон компактні і продуктивні. Один апарат діаметром 240 мм і довжиною 1220 мм дозволяє знесолювати і отримувати 50 м<sup>3</sup> чистої води на добу, що недосяжно в інших апаратах при таких габаритах.

Однак недоліком цих пристроїв є нерівномірність упаковки волокон, що в свою чергу може спричинити скорочення ефективної поверхні. Іншим дуже значним недоліком є висока вартість, яка майже у два рази більше вартості рулонованих мембранних модулів. До того ж, порожнисто-волоконні мембранні апарати не можуть бути відновлені. У разі виходу з ладу частини порожніх волокон доводиться замінювати весь пучок волокон.

**Трубчастий** фільтруючий елемент (рисунок 1.5) являє собою змінний вузол апаратів для проведення зворотного осмосу або ультрафільтрації, що складається з напівпроникною мембрани 1, дренажного каркаса, виготовленого з пористої трубки 2, і дренажної прокладки 3, що запобігає вдавненню мембрани в канали пористої трубки і її розрив під дією тиску робочої суміші [18].

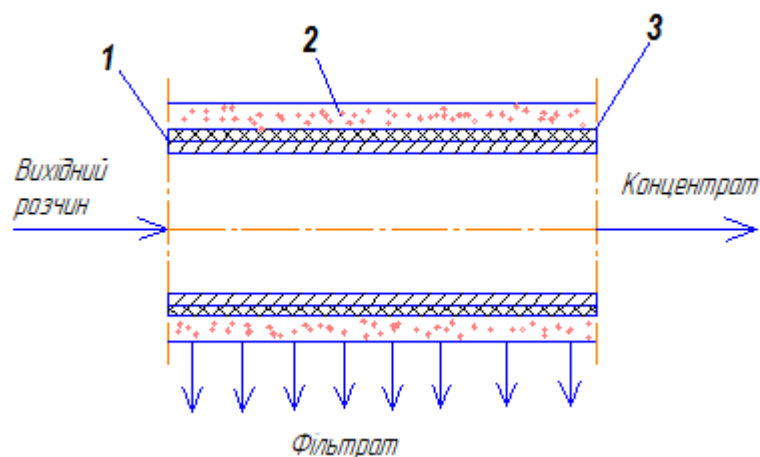


Рисунок 1.5. Трубчастий фільтруючий елемент з мембраною усередині пористої трубки: 1 напівпроникна мембрана; 2 - пориста трубка; 3 - дренажна прокладка.

**Плоскокамерні** фільтруючі елементи знаходять застосування в установках невеликої продуктивності. Типовим є апарат типу «фільтр-прес» (рисунок 1.6).

Апарат зібраний з розділяючих елементів, кожен з яких складається з двох мембран 1, покладених по обидві сторони плоскою пористої пластини 2, призначеної для збору і стоку фільтрату. Пластини розташовані на відстані 0,5-5 мм одна від одної, утворюючи камери 3 для стоку розділяється розчину. Пакет фільтруючих елементів затискається між двома кришками 4,5 і стягується болтами або шпильками 6. Вихідний розчин послідовно перетікає через всі камери, концентрується і в вигляді концентрату виводиться з апарату. Фільтрат, який пройшов через мембрани, надходить в пористі пластини і через колектор 7 виводиться з апарату.

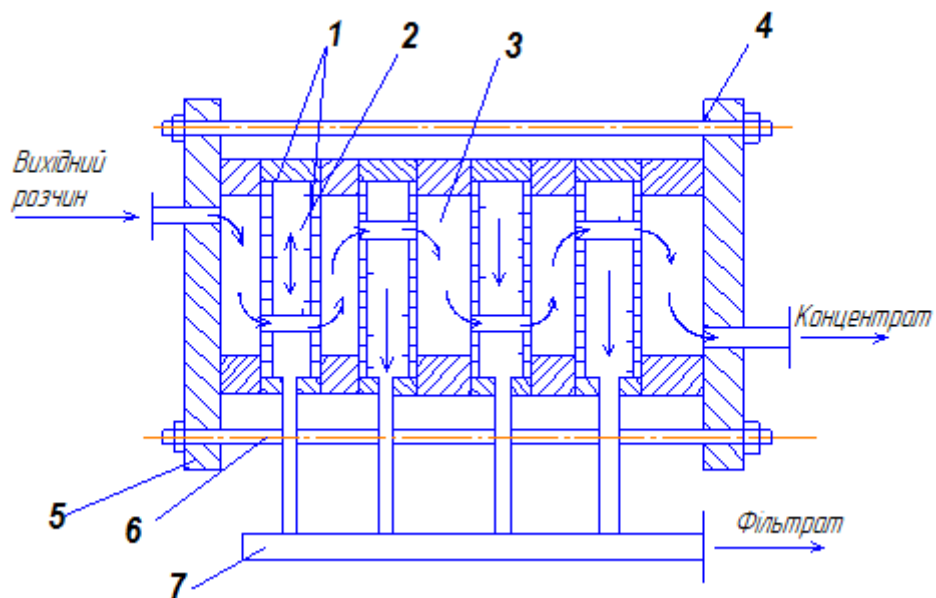


Рисунок 1.6. Схема апарату з плоскокамерними фільтруючими елементами:

1 мембрани; 2 пористі пластини; 3 камери; 4,5-кришки; 6 шпильки; 7- колектор

### 1.3. Забруднення мембран(wang)

**Концентраційна поляризація, зовнішні забруднення та внутрішні забруднення**

Протягом останнього десятиліття Чанг та ін. [20], Ле-Клех та ін. [21], Meng et al. [22], Drews [23] та Wang et al. [24] здійснили комплексні огляди досягнень забруднення мембран, висвітливши всі аспекти забруднення, такі як мембранні

матеріали, характеристики кормової біомаси та умови експлуатації. Тут, на основі цих публікацій, узагальнюються основні типи забруднення мембран у мембранному модулі. На мембранний потік у ньому може впливати концентраційна поляризація, зовнішнє забруднення та внутрішнє забруднення відповідно до його розташування щодо мембранної структури [25,33,20].

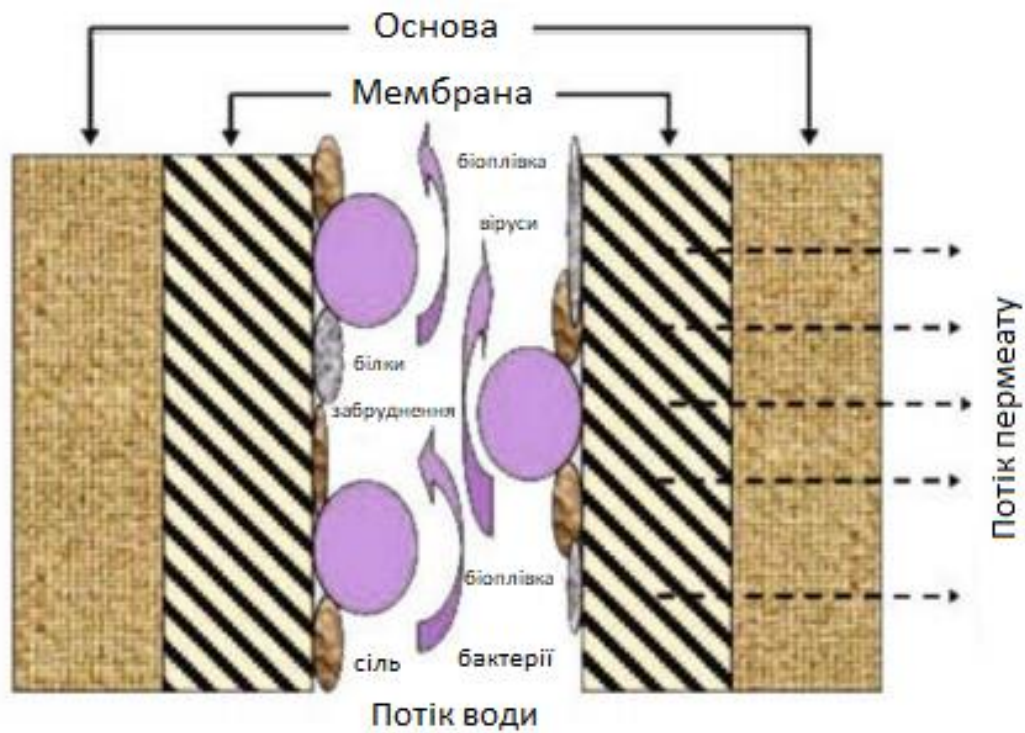


Рисунок 1.7. Мікробіологічна схема забруднення поверхні мембрани зворотного осмосу.

**Концентраційна поляризація (КП)** визначається як накопичення розчинених речовин або частинок у тонкому шарі рідини, що прилягає до поверхні мембрани [34–36], що є невід’ємним явищем мембранної фільтрації. КП може збільшити опір потоку рідини і, таким чином, зменшити потік пермеату. КП визначається конвективним потоком, що рухається фільтрацією, та зсувом, що надається на прикордонному шарі КП [37]. Збільшення швидкості поперечного потоку може полегшити КП.

**Зовнішні забруднення.** Осадження частинок, колоїдів та макромолекул на поверхнях мембрани призводить до зовнішніх забруднень. Його також називають "забруднюючим шаром" на поверхнях мембрани. Загалом, зовнішні забруднення можна розділити на два типи забруднюючих шарів: шар кеку за рахунок накопичення на мембрані затриманих твердих речовин та шар гелю в результаті осадження розчинних макромолекул, колоїдів та неорганічних розчинених речовин [38–40].

**Внутрішні обростання.** Внутрішні забруднення спричинені адсорбцією та осадженням розчинених речовин та дрібних частинок у внутрішній структурі мембран, наприклад, адсорбцією забруднень до стінок пор та звуженням чи блокуванням пір [20,21,41]. В інших публікаціях це також визначається як „блокування пор” [42–44].

**Біозабруднення, органічне забруднення та неорганічне забруднення.** Мембранне забруднення можна класифікувати на біозабруднення, органічне забруднення та неорганічне забруднення на основі біологічних та хімічних характеристик мембранних забруднень [22,45]. Біологічна, органічна та неорганічна природа мембранних забруднень визначає вибір засобів для очищення мембран, які можуть мати значний вплив на ефективність очищення мембран.

**Біозабруднення (біотверді речовини).** Цей тип забруднення утворюється внаслідок відкладення та розростання мікроорганізмів на поверхнях мембрани. Колонізація мембранних поверхонь мікроорганізмами є одним із важливих факторів у процесі біообростання [46,47]. Його також називають «біоплівка» або «біокейк» в інших місцях [48–50]. У деяких публікаціях біозабруднення розглядається як не лише прикріплення / ріст мікробних клітин, але і адсорбція органічних речовин, що виробляються мікроорганізмами [47]. Забруднення, спричинені органічними речовинами, що утворюються мікроорганізмами, класифікуються як органічні забруднення, наприклад, розчинні мікробні продукти (РМП) та позаклітинні полімерні речовини (ППР). Якщо мембранні модулі експлуатуються в режимі надкритичного потоку, може виникнути сильне

біооброблення і шар осадового шару утвориться на мембранних поверхнях [41,51]. Домінуючими забруднювачами для біооброблення (муловий шар) є біотверді речовини, але вони також включають частину органічних речовин.

**Органічні забруднення.** Органічні забруднення спричинені відкладенням білків, полісахаридів, гумінових кислот та інших органічних речовин (розчинних або колоїдних), що походять із води або мікробної секреції. Зокрема, гелевий шар може утворюватися в МБР з використанням підкритичного потоку внаслідок безперервного органічного забруднення [38,39,52–55]. РМП та ППР розглядаються як ключові мембранні органічні забруднення в мембранних модулях. У більшості випадків катіони металів взаємодіють з деякими функціональними групами органічних речовин (біополімерами), утворюючи хелатні полімери (органічно-неорганічні комплекси) [53]. Наприклад, альгінат може спричинити сильне забруднення мембран у присутності кальцію [55].

**Неорганічні забруднення.** Неорганічне забруднення в мембранних модулях є результатом хімічного осадження неорганічних кристалів та / або біологічного осадження неорганічно-органічних комплексів [22,56]. Іони металів,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  та  $\text{Al}^{3+}$ , а також такі аніони, як  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  та  $\text{OH}^-$ , можуть реагувати та призводити до хімічного осадження, якщо концентрації насичення перевищуються на поверхнях мембрани або інших специфічних ділянках. Крім того, неорганічні частинки, що існують у системах, також можуть прикріплюватися до мембранних поверхонь або перекривати пори мембрани, викликаючи неорганічні забруднення [57].

**Оборотні, необоротні, залишкові та непоправні забруднення.** Наступні чотири типи забруднення можна визначити, виходячи з міцності прикріплення забруднюючих матеріалів до мембран або методу, використовуваного для відновлення початкової проникності мембран.

**Оборотні забруднення.** Оборотно забруднення є результатом нещільного прикріплення забруднених матеріалів до мембранних поверхонь, які можна

видалити фізичним методом очищення, наприклад, сильним зсувним зусиллям або зворотним змивом. Його також називають «знімним» або «тимчасовим» забрудненням [25,22]. Загалом осадження твердих біовідходів (формування шару кеку) розглядається як основний фактор, що спричиняє оборотні забруднення. При тривалій експлуатації домінування зворотних забруднень може бути результатом поганої фільтруваності мулу та / або низької ефективності фізичного очищення. У цьому випадку слід застосовувати посилені методи фізичного очищення для очищення довгостроково розвинених оборотних забруднень.

**Необоротні обростання.** Утворення твердий шару забруднення з розчиненими речовинами під час безперервної фільтрації призведе до того, що оборотний забруднення трансформується в незворотний забруднюючий шар, наприклад, утворення шару гелю при тривалій роботі підкритичного потоку [63]. Звуження пор або блокування пір також менш оборотне і розглядається як інший вид безповоротного забруднення. У класичному визначенні незворотні забруднення неможливо усунути методом фізичного очищення, і це називається фізично незворотними забрудненнями [25,58,59]. Як було сказано раніше, метод біологічного очищення вже пропонувався в [29,30]. Отже, незворотні забруднення можна також класифікувати на біологічно незворотні забруднення крім фізично незворотних забруднень (рисунок 1.8).

**Залишкові забруднення.** Концепція залишкового забруднення запропонована Крауме та ін. [60] та Джадда [25]. Залишкові забруднення неможливо усунути за допомогою хімічно посиленого зворотного промивання або технічного очищення, але можна видалити шляхом відновлення очищення.

**Непоправні обростання.** Як тільки мембрана забруднюється під час тривалої експлуатації, первісна проникність первинної мембрани ніколи не відновлюється. Залишився опір, який можна визначити як «безповоротне забруднення», і він не легко усувається типовим хімічним очищенням [25,61]. Його також називають "постійним забрудненням" або "довготривалим незворотним забрудненням", яке

накопичується протягом ряду років і, зрештою, може визначити життя мембрани [62].

### 1.3 Методи очищення мембран

Регенерація мембран, як правило, поділяється на очищення *in situ* та *ex situ* на основі мембранних модулів у мембранних апаратах або поза апаратом під час чищення. Він також класифікується на фізичне, хімічне та біологічне / біохімічне очищення відповідно до механізмів видалення забруднень або використовуваних чистячих засобів.

**Очищення *in-situ* та *ex-situ*.** В роботі авторів [63] добре проілюстровано методи регенерації мембранних модулів на прикладі мембранних біореакторів (МБР). Залежно від того, чи залишаються мембранні модулі в мембранному біореакторі під час очищення, мембранне очищення можна класифікувати на "*in-situ*" (онлайн-очищення) та "*ex-situ*" очищення (очищення не на місці (ОННМ) [64]).

Як видно на рисунку 1.8, низка методів очищення належать до очищення мембран на місці, наприклад, періодична фільтрація (релаксація), очищення ультразвуком на місці, очищення частинок або суспендованих носіїв, зворотна промивка, біологічне / біохімічне очищення, хімічно посилене зворотне промивання (ХПЗП), технічне чищення або термінова очистка на місці (ОНМ), очищення в повітрі (ОВП), а також відновлення (інтенсивне) очищення. Очищення *ex-situ* вимагає видалення мембранних модулів з мембранного резервуару, і можна проводити фізичне очищення в поєднанні з хімічним очищенням (рисунок 1.8). Загалом, очищення на місці є кращим у МБР під час роботи порівняно з очищенням мембран *ex-situ*. Очищення на місці проводиться частіше, ніж прибирання *ex-situ*. Інтервал часу для очищення *ex-situ*, як правило, один раз на 1–3 роки [64–66], тоді як чищення *in-situ* можна проводити кожні 10 хв або тижнів,

або кілька місяців залежно від умов забруднення мембран та застосовуваних стратегій очищення [25].

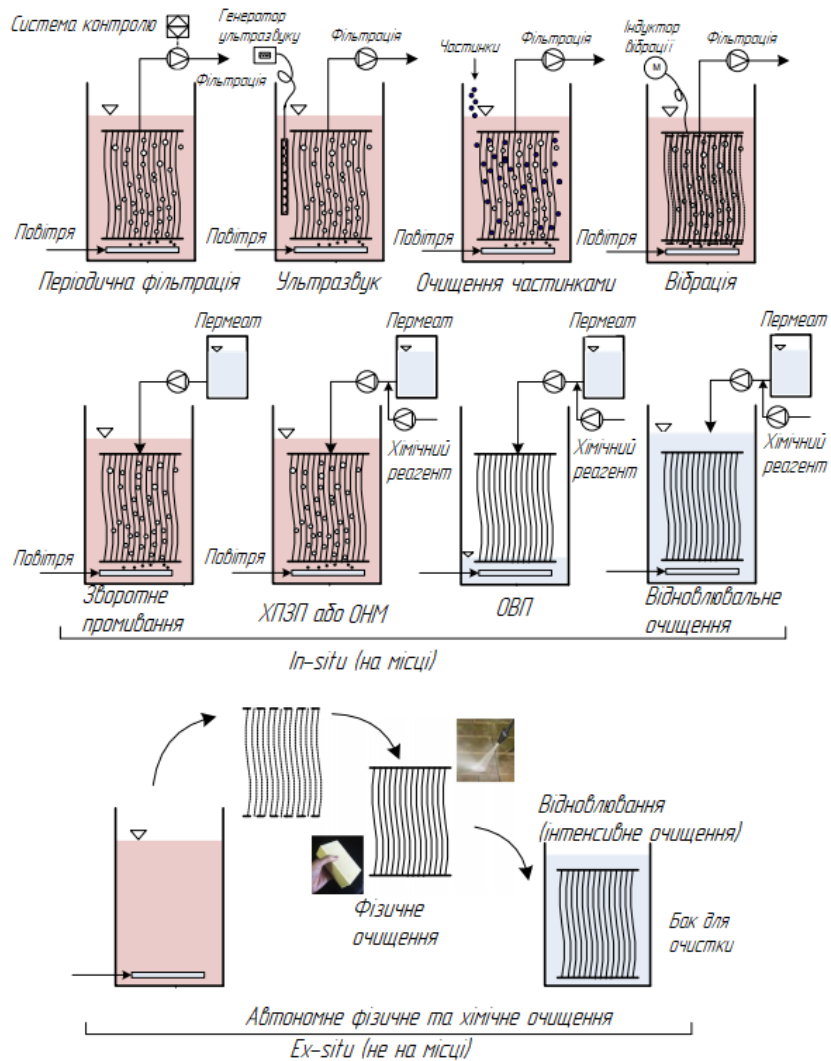


Рисунок 1.8. Очищення мембран *in-situ* та *ex-situ*. ХПЗП: хімічно посилене зворотне промивання; ПНМ: прибирання на місці; ОВП: очищення в повітрі (у злитому мембранному баку).

**Фізичне, хімічне та біологічне / біохімічне очищення.** На основі механізмів видалення забруднень, очищення мембран можна загалом класифікувати на чотири типи, тобто фізичне, хімічне, фізико-хімічне та біологічне / біохімічне очищення. У МБР вищезазначені методи можуть використовуватися окремо, але часто поєднуються в очищенні мембрани з метою ефективного відновлення проникності мембрани.

**Фізичне очищення.** Фізичне очищення зазвичай досягається або зворотним промиванням, тобто зворотним потоком, яке просто припиняє проникнення, продовжуючи промивати мембрану бульбашками повітря [25]. Зі збільшенням кількості досліджень щодо фізичного очищення також пропонується низка інших стратегій, наприклад, обробка ультразвуком [68], додавання зважених частинок і носіїв [69] та механічне очищення [40]. Вібрація також є перспективним методом фізичного очищення в МБР [70]. Вищезазначені методи зазвичай виконують *in situ*, тоді як протирання губкою та промивання водою під тиском застосовуються *ex situ* для відновлення проникності мембрани. Загалом, фізичне очищення, яке застосовується для усунення оборотних забруднень (наприклад, відкладених біотвердих речовин та шару пирога), є менш ефективним порівняно з хімічним очищенням. Однак для цього не потрібні хімічні реагенти, і, отже, рідше спричиняють деградацію / пошкодження мембран, за винятком деяких жорстких механічних чисток.

**Хімічне очищення.** Хімічне очищення визначається як усунення незворотних забруднень за допомогою хімічних реагентів, таких як основи (їдкий натр), кислоти (хлоридна, сульфатна, лимонна, щавлева тощо) та окислювачі (гіпохлорит та перекис водню) [31]. Як показано на рисунку 1.8, хімічне очищення може мати декілька протоколів, заснованих на процесі очищення, тобто очищення на місці та інтенсивне очищення на місці. Технічне очищення *in situ* включає (1) ПНМ, тобто очищення мембрани *in situ* без зливу мембранного бака, (2) ОВП, яке має очистити мембрану з осушеним мембранним резервуаром. Відновлювальне очищення, що дозволяє змочувати мембрани в реагенті для очищення з більшою концентрацією в злитому баку мембрани (рис. 2), може проводитися або *in situ* (очищення на місці), або *ex situ* під час чищення мембран в режимі офлайн. Крім того, хімічні агенти можна також використовувати разом з іншими фізичними засобами для підвищення його ефективності або зменшення хімічного навантаження.

**Фізико-хімічне очищення.** Фізико-хімічні методи очищення використовують методи фізичного очищення з додаванням хімічних речовин для підвищення

ефективності очищення. Типовим фізико-хімічним методом очищення, що застосовується в МБР, є ХПЗП шляхом додавання нижчої концентрації хімічного миючого засобу до води зворотного промивання. ХПЗП періодично проводять, якщо звичайне фізичне очищення (наприклад, зворотна промивка) не може ефективно відновити проникність мембрани [71]. Взагалі кажучи, ХПЗП також називають одним із видів технічного очищення. Також розроблені інші фізико-хімічні протоколи очищення, наприклад, хімічне очищення, посилене ультразвуком [72].

**Біологічне / біохімічне очищення.** Біологічне / біохімічне очищення можна широко визначити як використання чистячих сумішей, що містять біоактивні агенти для видалення мембранних забруднень з мембран [36,73,74]. Три підходи, як показано на рисунку 1.8, в основному використовуються для досягнення біохімічного очищення мембран, тобто ферментативний підхід, роз'єднання енергії та гасіння кворуму. Повідомлялося, що використання хижих мікроорганізмів може також здійснити біологічне очищення мембран [75], хоча до практичного використання потрібно пройти довгий шлях. Слід зазначити, що для більшості комерціалізованих плоских мембранних модулів зворотна промивка не застосовується через структуру мембран, а очищення мембран зазвичай проводиться поєднанням релаксації та хімічного очищення. Однак деякі нові плоскі мембрани можна повторно промивати, наприклад, модуль BIO-CELLs, вироблений MICRODYN-NADIR GmbH, мембрану A3 Water Solutions FS та інші нещодавно розроблені панелі [25,76–78]. Керамічна мембрана, будь-якої типу FS або трубчастого типу, може бути стирається у зворотному напрямку [79]

## 1.4 Висновки

В даному розділі було виявлено:

- мембранне очищення води є ефективними та поширеними;

- основним недоліком використання мембранних апаратів є концентраційна поляризація та утворення осадів на поверхні мембран;
- розглянуті методи очищення забруднених мембранних модулів та встановлені основні переваги та недоліки існуючих методів;
- визначені перспективні напрямки дослідження в даній галузі.

### **1.5 Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є встановлення та уточнення закономірностей перенесення маси в процесі регенерації забруднених мембранних модулів. Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні задачі дослідження:

- обґрунтувати фізичну модель процесу видалення осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на поверхні мембрани,
- скласти математичну модель процесів масообміну при вилученні осадів;
- уточнити критеріальну залежність для визначення коефіцієнту перенесення при вилученні осадів, утворених внаслідок концентраційної поляризації на робочій поверхні мембрани;
- визначити вплив технологічних параметрів на процес масообміну при температурній кавітації та сформулювати умови його інтенсифікації;
- вдосколити методику тестової оцінки ефективності процесу регенерації зворотноосмотичних та нанофільтраційних рулонованих модулів.

## 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МАСООБМІНУ ПРИ ВИДАЛЕННІ ОСАДІВ З РУЛОНОВАНИХ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ

### 2.1 Обґрунтування базових принципів фізичної моделі роботи зворотноосмотичних та нанофільтраційних модулів

В даному проекті розглядається процес регенерації мембранних рулонованих модулів для зворотного осмосу та нанофільтрації. За основу для фізичної та математичної моделі приймається модель осмотичного тиску. Потік речовини через мембрану, згідно цієї моделі, можна виразити феноменологічним рівнянням [80]:

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

де  $\Delta p$  – робочий перепад тиску, Па;

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

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;

$R_T$  – загальний опір перенесенню, м<sup>-1</sup>.

Загальний опір перенесенню, м<sup>-1</sup> [80]:

$$R_T = R_m + R_{cp} + R_c + R_p \quad (2.2)$$

де  $R_m$  – опір мембрани, м<sup>-1</sup>;

$R_{cp}$  – опір шару концентраційної поляризації, м<sup>-1</sup>;

$R_c$  – опір шару забруднень, м<sup>-1</sup>;

$R_p$  – опір заблокованих пор, м<sup>-1</sup>.

В ідеальних умовах є тільки опір мембрани, але в реальному робочому випадку є також інші складові загального опору. Опір шару осаду (забруднень) – одна з

найбільших часток сумарного опору. Більш того, мембрани для зворотного осмосу та для нанофільтрації не мають проблем з блокуванням пор через те, що розміри цих пор занадто малі (не більше  $10^{-9}$  м). Тому в процесі регенерації зусилля будуть спрямовані на зниження або навіть повне усунення опору шару забруднень [81-83].

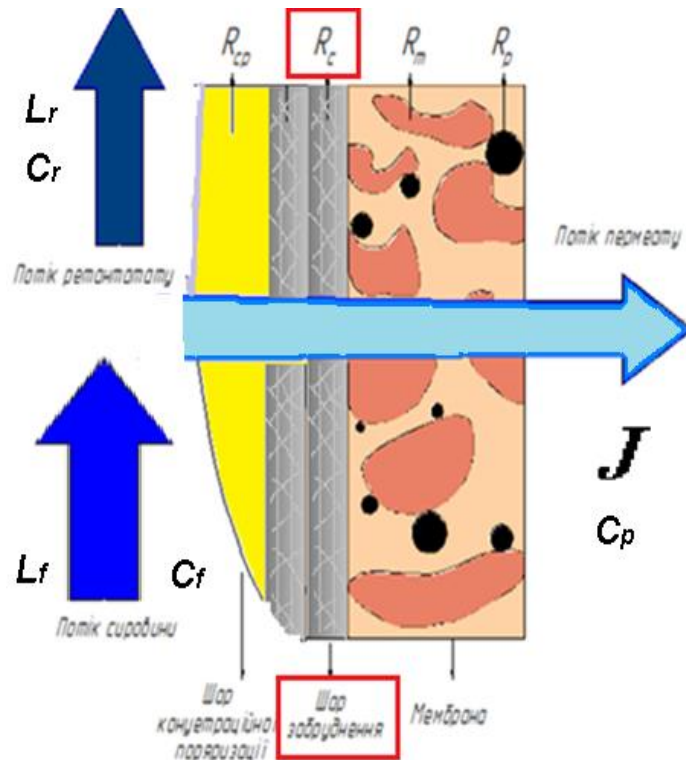


Рисунок 2.1 – Схема опорів перенесенню речовини через мембрану

Через те, що шар забруднень складається з елементів початкового розчину, наприклад неорганічні осаді формуються шляхом кристалізації пересиченого розчину в шарі концентраційної поляризації, можна зробити припущення, що шар осаду може бути розчинений. Якщо на поверхні мембран накопичуються малорозчинні сполуки, наприклад сульфату кальцію або карбонатів кальцію та магнію, можна використати хімічні реагенти, які реагують з речовинами шару осаду та утворюють розчинні сполуки [84]. Завдяки цьому осад можна вивести з модуля у вигляді розчину або у вигляді колоїдної суспензії (багатокомпонентний осад).

Через те, що рулонні мембранні модулі у процесах зворотного осмосу та нанофільтрації найбільш поширені, надалі будуть розглядатися модулі саме цієї конструкції. Однак, видалення осадів, які утворилися внаслідок концентраційної поляризації, в них складніше, ніж в плоскорамних та трубних модулях. Схему модуля було представлено на рисунку 2.2.

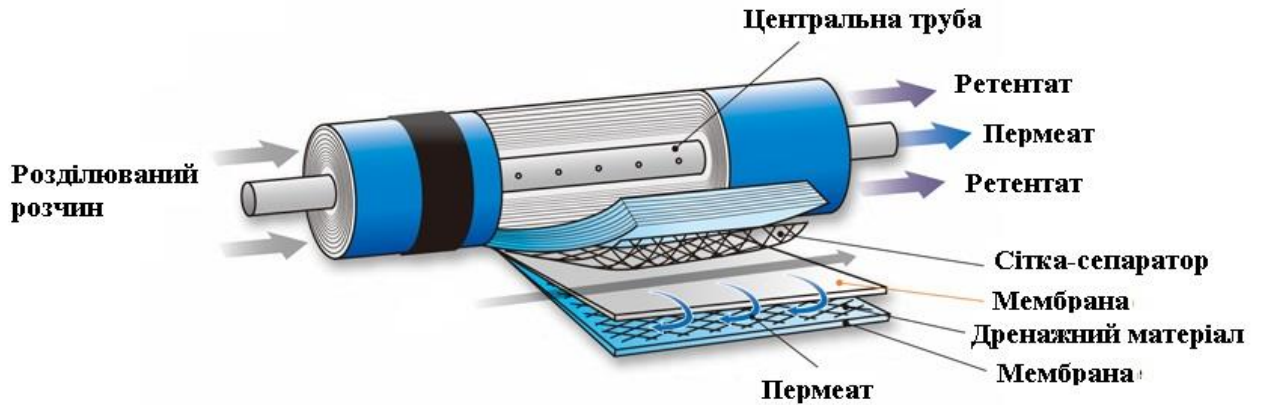


Рисунок 2.2 – Схема рулонового мембранного модуля

У рулонних, або спіральних апаратах (рисунок 2.2) мембранний елемент має вид пакета; три його кромки герметизовані, четверта прикріплена до перфорованої трубки для відводу пермеата, на яку накручується пакет разом із сіткою-сепаратором. Розділювальний розчин рухається в осевому напрямі по міжмембранним каналам, а пермеат - спіралеподібно по дренажному матеріалу і поступає у відповідну трубку. В ході мембранного розділення концентрація розчинених речовин в пермеаті зменшується, а в ретентаті зростає. Апарати цього типу відрізняються високою щільністю упаковки мембран ( $300-800 \text{ м}^2 / \text{м}^3$ ), але складніші у виробництві, ніж плоскокамерні. Вони використовуються в установках середньої та більшої продуктивності для розділення рідких та газових сумішей. Товщина сітки-сепаратора визначає висоту каналу, та для побутових мембран вона становить 0,35 мм.

## 2.2. Фізична модель процесу регенерації забруднених рулонованих модулів

За основу взято модель, яку було розроблено у попередній роботі [86].

Основним процесом при регенерації мембрани є розчинення, яке відбувається при очищенні розчину, що надходить у контакт мембранного каналу з твердою речовиною. Тип розчинів для чищення слід вибирати залежно від природи речовини, що пізніше випадає. Процес розчинення розглядається як контрольований дифузійний процес масопереносу, при якому маса транспортується з твердої фази (шар кеку) в рідку фазу (миючий розчин). Процес відбувається в мембранному каналі, утвореному двома витками мембрани, і сіткою сепаратором між ними (рисунок 2.3).

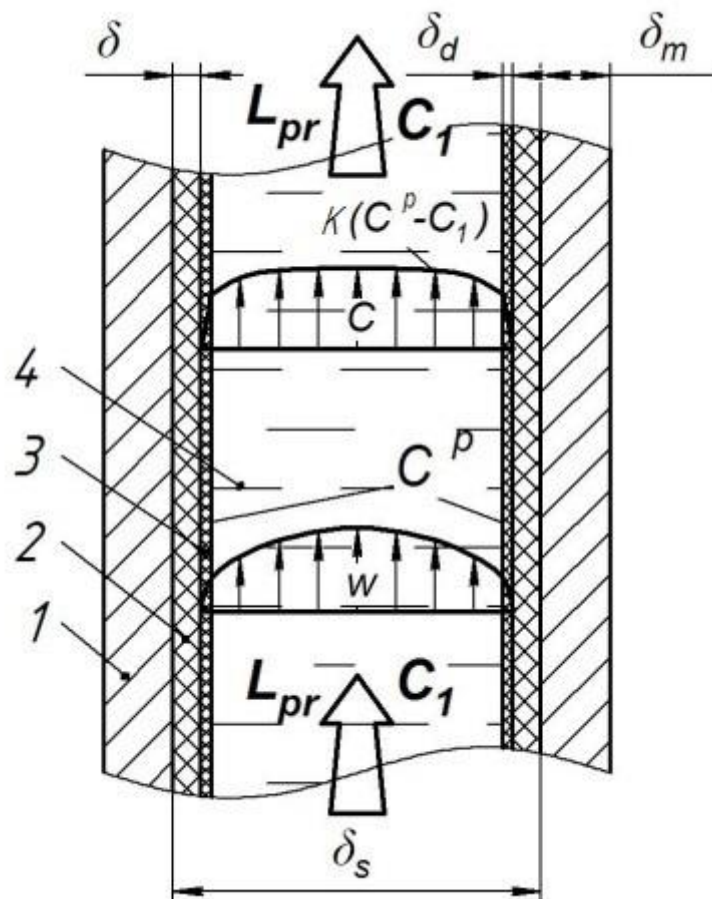


Рисунок 2.3. Схема масообміну в мембранному каналі 1 - мембрана, 2 - шар кеку, 3 - дифузійний підшар; 4 - основна маса миючого розчину.

Ширина каналу визначається розміром сітки, який становить менше одного міліметра. На початку процесу розчинення на поверхні твердої речовини миттєво утворюється дифузійний підшар.

Концентрація розчинного матеріалу шару макухи в цьому підшарі дорівнює рівноважній концентрації. Якщо концентрація цього матеріалу в обсязі миючого розчину менша, відбувається масообмін, як показано на рисунку 2.4 та на рисунку 2.5 (елемент видалення А з рисунку 2.4).

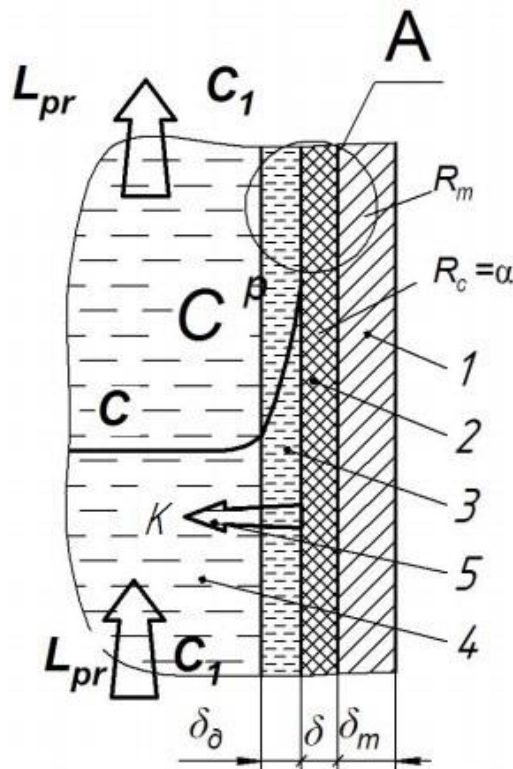


Рисунок 2.4. Схема масообміну на поверхні шару торта: 1 - мембрана, 2 - шар торта, 3 - дифузійний підшар; 4 - основна маса миючого розчину; 5 - напрямок масообміну;  $L_{pr}$  витрата миючих розчинів;  $C_1$  - концентрація розчинного матеріалу шару осадів в миючому розчині;  $C_p$  - рівноважна концентрація;  $K$  - коефіцієнт перенесення маси; в - схема зміни концентрації;  $\delta_m$  - товщина мембрани;  $\delta_c$  - товщина шару пирога;  $\delta_d$  - товщина дифузійного підшару;  $R_m$  - мембранний опір;  $R_c$  - опір шару кеку;  $\alpha$  - питома стійкість шару пирога, А - елемент видалення, показаний на рисунку 2.5.

Основний опір масопереносу зосереджений у дифузійному підшарі. Миючий розчин зазвичай тече в ламінарних умовах, тому можливість гідродинамічної інтенсифікації обмежена. Для зменшення опору дифузійного підшару було запропоновано використовувати тиск розрідження і температуру випаровування миючого розчину під робочим тиском (коли робочий тиск дорівнює тиску пари насичення) [87]. У цьому випадку в основній частині миючого розчину утворюються бульбашки пари, які згортаються і руйнуються в потоці миючого розчину.

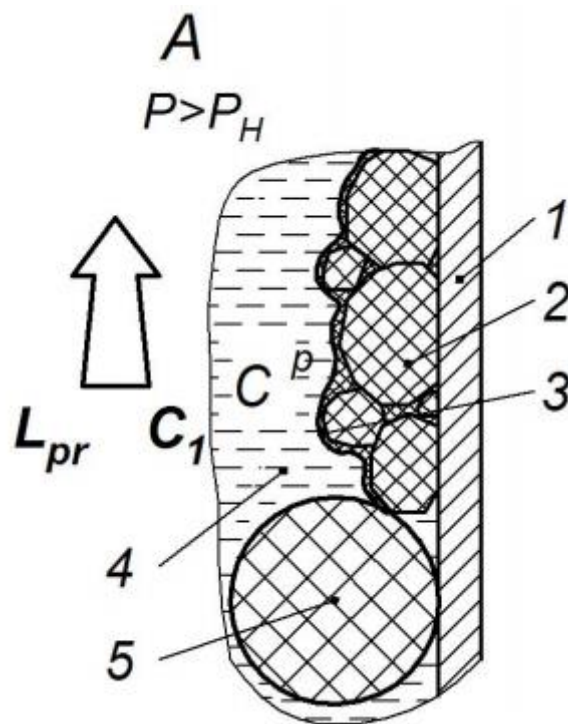


Рисунок 2.5. Схема масообміну на поверхні шару пирога (елемент видалення А на фіг.3) 1 - мембрана, 2 - шар осаду, 3 - дифузійний підшар; 4 - основна маса миючого розчину; 5 - розпірка;  $L_{pr}$  витрата миючих розчинів;  $C_1$  - концентрація розчинного матеріалу шару макухи в миючому розчині;  $C_p$  - рівноважна концентрація;  $P$  - робочий тиск;  $P_H$  - тиск пари насичення.

Утворення та руйнування бульбашок пари призведе до інтенсивного перемішування основної маси миючого розчину та дифузійного підшару. Це

забезпечує освіження зони масообміну та інтенсифікацію процесу масообміну (рисунок 2.6). В окремих умовах випаровування може стати настільки інтенсивним, що парові бульбашки можуть створювати додатковий опір масопереносу. Щоб уникнути цього ефекту було запропоновано використовувати періодичне підвищення робочого тиску під час регенерації.

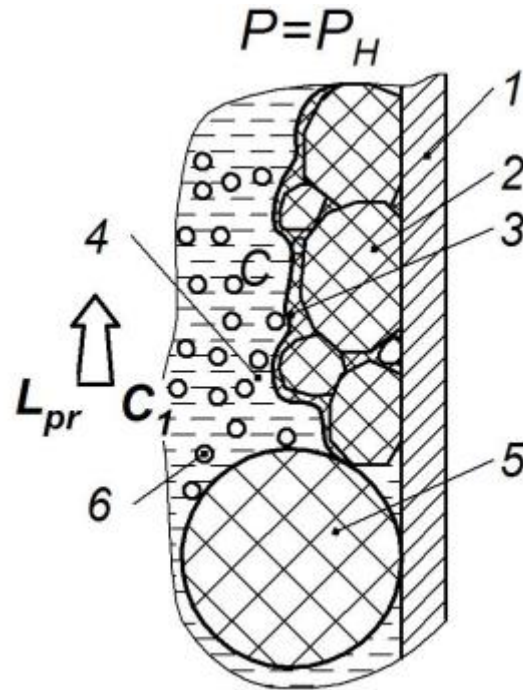


Рисунок 2.6. Схема масообміну під субатмосферним тиском та температурою випаровування миючого розчину під робочим тиском: 1 - мембрана, 2 - шар кеку, 3 - дифузійний підшар; 4 - основна маса миючого розчину; 5 – сітка-сепаратор; 6 - парові бульбашки;  $L_{pr}$  витрата миючих розчинів;  $C_1$  - концентрація розчинного матеріалу шару осаду в миючому розчині;  $C_p$  - рівноважна концентрація;  $P$  - робочий тиск;  $P_H$  - тиск пари насичення.

## 2.3 Математична модель процесу перенесення маси при видаленні осаду, утвореного внаслідок концентраційної поляризації

### 2.3.1 Математична модель процесу видалення осаду

За основу взято математичну модель процесу видалення осаду, яку було розроблено у попередній роботі [85].

Умова, при якій визначається час повного розчинення утвореної маси твердої речовини:

$$M_{\Pi} - M = 0 \quad (2.3)$$

де  $M_{\Pi}$  – початкова маса осаду, кг;

$M$  – маса розчиненого осаду, кг.

Диференційна форма кінетичного рівняння для визначення маси видаленого осаду [88, 99]:

$$dM = K(C^p - C_1)Fdt \quad (2.4)$$

$d\tau$  – тривалість процесу розчинення, с;

$K$  – коефіцієнт перенесення маси, м/с;

$C^p$  – рівноважна концентрація розчинених речовин осаду в розчині, кг/м<sup>3</sup>;

$C_1$  – середня концентрація розчинених речовин осаду в розчині, кг/м<sup>3</sup>;

$F$  – площа поверхні осаду (площа поверхні мембрани), м<sup>2</sup>.

Згідно фізичної моделі, розглядається шар осаду товщиною  $\delta_c$ , що рівномірно розподіляється на поверхні мембрани, товщиною  $\delta_m$  (рисунок 2.7).

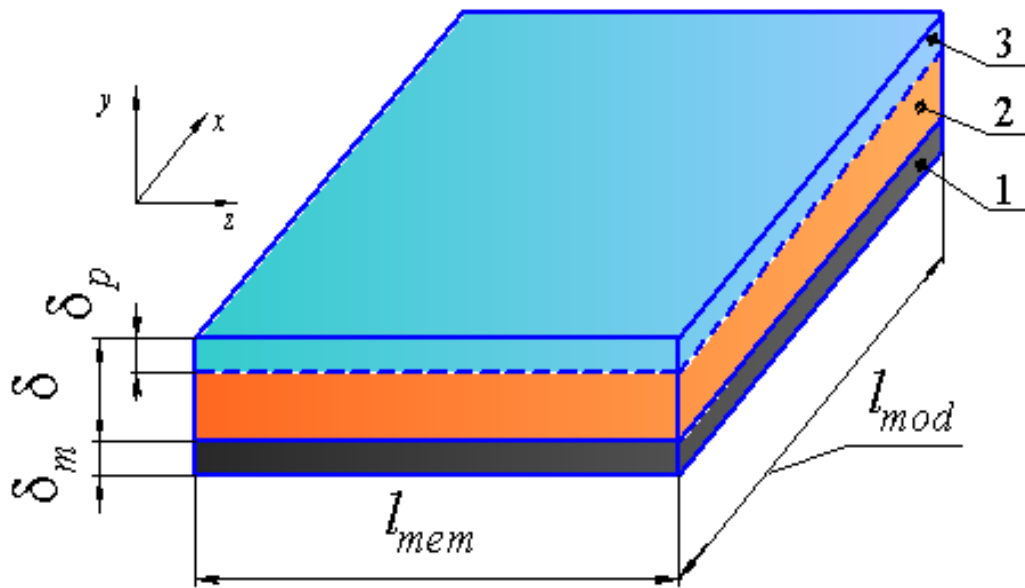
Площа поверхні мембрани в модулі дорівнює  $F = 2 \cdot l_{mem} \cdot l_{mod}$ . Маса осаду

зменшується в процесі очистки, через що стоншується шар осаду на  $\delta_p$  (рисунок 2.7). Тому маса видаленої речовини шару осаду дорвнює:

$$M = \rho \cdot F \cdot \delta_p (1 - \varepsilon_0) \quad (2.5)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу осаду, кг/м<sup>3</sup>;

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



1 – мембрана; 2 – шар осаду; 3 – шар осаду, що вилучається

Рисунок 2.7 – Зміна товщини шару осаду в процесі вилучення

Якщо урахувати це, рівняння (2.3) набуває вигляду:

$$\frac{d\rho \cdot F \cdot \delta_p (1 - \varepsilon_0)}{d\tau} = \frac{F \cdot \rho \cdot (1 - \varepsilon_0) d\delta_p}{d\tau} = K(C^p - C_1)F, \quad (2.6)$$

або

$$\frac{d\delta_p}{d\tau} = \frac{K}{\rho(1 - \varepsilon_0)} (C^p - C_1), \quad (2.7)$$

Зміна середньої концентрації в промивному розчині описується рівнянням робочої лінії процесу. Маса твердої речовини, що переходить в розчин за проміжок часу  $\Delta\tau$  становить:

$$M = V(C_1 - C_0) \quad (2.8)$$

$V$  – загальний об'єм промивного розчину, м<sup>3</sup>;

$C_0$  – початкова концентрація розчиненої речовини в промивному розчині, кг/м<sup>3</sup>.

Враховуючи вираз (2.5) рівняння (2.8) можна представити як:

$$\rho \cdot F \cdot \delta_p = V(C_1 - C_0) \quad (2.9)$$

З рівняння (2.9)  $C_1$  дорівнює:

$$C_1 = C_0 + \frac{\rho \cdot F \cdot \delta_p \cdot (1 - \varepsilon_0)}{V} \quad (2.10)$$

Підставляємо вираз (2.10) у рівняння (2.7) та маємо:

$$\frac{d\delta_p}{d\tau} = \frac{K}{\rho(1 - \varepsilon_0)} \left( C^p - C_0 - \frac{\rho \cdot F \cdot \delta_p \cdot (1 - \varepsilon_0)}{V} \right), \quad (2.11)$$

Сформулюємо початкові умови для розв'язання виразу (2.11):

$$\delta_p = 0 \text{ при } \tau = 0. \quad (2.12)$$

Рівняння (2.11) за граничних умов (2.12) розв'язується за допомогою числових методів. Це дозволяє визначити час зменшення заданої товщини шару осаду.

Через те, що, відповідно до фізичної моделі, процес проходить за умов, які близькі до ізотермічних, тому згідно виразу (2.4) товщина розчиненого шару осаду і маса розчиненого зв'язана через постійний множник  $\rho \cdot F \cdot (1 - \varepsilon_0)$ . Це означає, що процес розчинення може бути виражений через масу розчиненого матеріалу. Тому матеріальний баланс:

$$M = M_{\Pi} - (M_{\Pi} - M) = V(C_1 - C_0) \quad (2.13)$$

Розв'язуємо (2.12) відносно  $C_1$  та отримуємо:

$$C_1 = C_0 + \frac{M_{\Pi}}{V} \left( 1 - \frac{M_{\Pi} - M}{M_{\Pi}} \right) \quad (2.14)$$

Підставляємо рівняння (2.5) в рівняння (2.3) та знаходимо кінцевий варіант кінетичного рівняння:

$$dM = K \left( C^p - C_0 - \frac{M_{\Pi}}{V} \left( 1 - \frac{M_{\Pi} - M}{M_{\Pi}} \right) \right) F d\tau \quad (2.15)$$

Маса розчиненого матеріалу дорівнює нулю на початку процесу, тому початкові умови виражаються наступним чином:

$$M = 0 \text{ при } \tau = 0. \quad (2.16)$$

Розв'язання рівняння (2.15) за граничних умов (2.16) дозволяє визначати час розчинення заданої маси осаду, але для цього необхідно визначити коефіцієнт перенесення маси  $K$ .

### **2.3.2 Математична модель масообміну при русі рідини в каналах рулонованого мембранного модуля у випадку вилучення осаду**

Необхідно визначити рівняння, що дозволить розрахувати коефіцієнти перенесення маси при русі промивного розчину в каналах рулонованого модуля. Для цього приймається припущення, що процес перенесення маси вважається квазістаціонарним [88], а мембранний модуль в даному випадку вважається умовно розгорнутим в площину.

В такій системі процес течії та масовіддачі описується рівнянням збереження вигляду [100-102]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + W_x \frac{\partial C}{\partial x} + W_y \frac{\partial C}{\partial y} + W_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - C \cdot \text{div} W + q_v \quad (2.17)$$

У рівнянні (2.17) є невідомі компоненти швидкості, які знаходяться з системи рівнянь Нав'є-Стокса [100-102]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_x}{\partial t} + W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_x}{\partial y} + W_z \frac{\partial W_x}{\partial z} &= g_x - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \left( \frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial W_y}{\partial t} + W_x \frac{\partial W_y}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_y}{\partial y} + W_z \frac{\partial W_y}{\partial z} &= g_y - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \nu \left( \frac{\partial^2 W_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial W_z}{\partial t} + W_x \frac{\partial W_z}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_z}{\partial y} + W_z \frac{\partial W_z}{\partial z} &= g_z - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \nu \left( \frac{\partial^2 W_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Рівняння нерозривності [100-102]:

$$\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} = 0 \quad (2.19)$$

Система рівнянь (2.17) – (2.19) визначає процеси руху рідини та масообміну в каналах рулонованого мембранного модуля. Ця система рівнянь не розв'язується в загальному випадку через свою складність та повинна бути спрощена.

Після спрощень, представлених в роботі [85], система рівнянь (2.17) – (2.19) приймає вигляд:

$$\begin{aligned}
W_x \frac{\partial C}{\partial x} + W_y \frac{\partial C}{\partial y} &= D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \\
W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_x}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + v \left( \frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} \right) \\
W_x \frac{\partial W_y}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_y}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + v \left( \frac{\partial^2 W_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_y}{\partial y^2} \right) \\
\frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} &= 0
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Для того, щоб визначити розв'язок системи рівнянь (2.20) слід сформулювати граничні умови.

Якщо враховувати явище адгезії на поверхні стінок каналів [163], швидкості руху рідини на гранях паралелепіпеда дорівнюватимуть нулю. На початку мембранного каналу профіль швидкості ще не сформований і компоненти  $W_x$  та  $W_y$  будуть однакові і дорівнювати відношенню об'ємної витрати промивного розчину до площі поперечного перерізу. На вході в канал мембранного модуля масообмін не відбувається, тому концентрацію в цьому випадку можна прийняти рівною початковій в промивному розчині. На поверхні контакту фаз концентрація змінна, тому для опису процесу слід використовувати граничні умови тертого роду [162]. Звідси випливає, що граничні умови можна записати у вигляді:

$$\begin{cases}
C = C_o \text{ при } x = 0 \\
-D \frac{\partial C}{\partial y} = K(C^p - C) \text{ при } y = 0 \text{ та } y = \delta_c \\
W_x = W_y = W_0 \text{ при } x = 0 \\
W_x = W_y = 0 \text{ при } y = 0 \text{ та } y = \delta_c
\end{cases} \tag{2.21}$$

Система рівнянь (2.20) з граничними умовами (2.21) описує масообмін та гідродинаміку в процесі руху рідини в каналі мембранного модуля.

Приведення системи рівнянь (2.20) та граничних умов (2.21) до безрозмірного вигляду, яке було проведено в роботі [85], показує, що дана система

рівнянь може бути замінена критеріальним рівнянням, яке зв'язує між собою критерії Рейнольдса, Ейлера, Пекле та Шервуда, а також геометричний симплекс  $\frac{d_e}{L}$ , що враховує геометричні особливості напірного каналу:

$$f\left(\text{Re}, \text{Eu}, \text{Pe}, \text{Sh}, \frac{d_e}{L}\right) = 0 \quad (2.22)$$

В даному випадку шуканою величиною є коефіцієнт перенесення маси  $K$ , що є складовою частиною критерію Шервуда  $\text{Sh} = \frac{K\delta}{D}$ , який функціонально залежить від інших величин, що входять в рівняння (2.22):

$$\text{Sh} = f\left(\text{Re}, \text{Eu}, \text{Pe}, \frac{d_e}{L}\right) \quad (2.23)$$

Критерій Ейлера у вигляді функції від критерію Рейнольдса [167]:

$$\text{Eu} = A\text{Re}^m \quad (2.24)$$

Вилучаємо критерій Ейлера:

$$\text{Sh} = f\left(\text{Re}, \text{Pe}, \frac{d_e}{L}\right) \quad (2.25)$$

Критерій Пекле як добуток величин [165]:

$$\text{Pe} = \frac{Wd_e}{D} = \frac{Wd_e}{D} \cdot \frac{v}{v} = \frac{Wd_e \cdot v}{v \cdot D} \quad (2.26)$$

У даному випадку перший множник критерій Рейнольдса, другий – критерій Шмідта [100]:

$$\text{Sc} = \frac{v}{D} \quad (2.27)$$

Заміняємо критерій Пекле на критерій Шмідта, адже його простіше визначити. Тоді рівняння (2.25) має вигляд:

$$\text{Sh} = f\left(\text{Re}, \text{Sc}, \frac{d_e}{L}\right) \quad (2.28)$$

Тоді критеріальна залежність набуває вигляду степеневі функції [97]:

$$\text{Sh} = A \text{Re}^n \text{Sc}^m \left(\frac{d_e}{L}\right)^p \quad (2.29)$$

Рівняння (2.29) є розв'язком системи рівнянь (2.20) з граничними умовами (2.21)[85]. Це рівняння дає змогу визначити коефіцієнт перенесення маси, який необхідний для розв'язання математичної моделі процесу. Коефіцієнт  $A$  та показники степенів  $n$ ,  $m$  та  $p$  слід знайти при узагальненні результатів експериментальних досліджень масообміну при видаленні осаду.

## 2.4 Висновки

У даному розділі було:

- пояснені базові принципи фізичної моделі роботи зворотноосмотичних та нанофільтраційних модулів
- обрана та пояснена фізична модель вилучення осаду з поверхні мембран;
- складена математична модель вилучення осаду;
- складена математична модель процесу масообміну;
- обґрунтовано застосування критеріального рівняння, параметри якого визначаються експериментально.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕГЕНЕРАЦІЇ

#### 3.1 Матеріали

Дослідження проводилися з використанням з комерційно доступними мембранними модулями типу TFC-75 виробництва DOW Filmtec. Площа поверхні мембран становила  $F = 0.46 \text{ м}^2$ , площа поперечного перерізу каналів в модулі  $S = 3.675 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , товщина спейсера  $\delta = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , довжина модуля  $l = 0,26 \text{ м}$  [86].

На поверхню мембран наносився штучний шар осаду забруднення. В якості забруднюючого матеріалу використовувався NaCl. Як промивний розчин використовувалася деіонізована вода.

#### 3.2 Опис експериментальної установки

В даному дослідженні використовувалася існуюча експериментальна установка (рисунок 3.1), яка включає електронні ваги 1, ємність з промивним розчином 2, регулювальні крани 3 та 5, ресивер 4, промивна камера 6, мембранний модуль 7, вакуум-насос 8, кран з'єднання з атмосферою 9, проміжна ємність 10, система відбору проб промивного розчину 11, персональний комп'ютер 12, електричний нагрівач 13.

У установці реалізується промивання під розрідженням, яке створюється вакуумом насосом 8. Розрідження також забезпечує необхідний перепад тиску для руху промивного розчину.

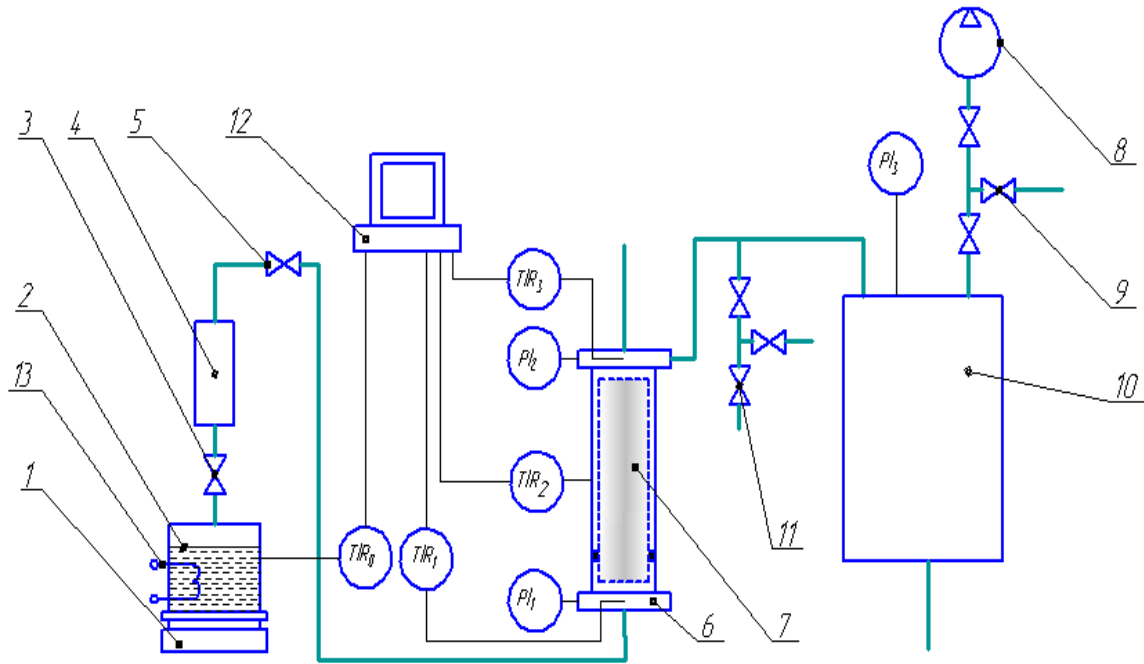


Рисунок 3.1 – Схема експериментальної установки

Установка оснащена блоком хромель-копелевих термопар, що дозволяють вимірювати температуру в ємності 6 на вході в модуль 7 та виході з нього, а також в ємності з промивним розчином та в оточуючому середовищі. Також встановлені вакуумметри та мановакуумметри для вимірювання розрідження на вході в модуль 7 та на виході з нього, а також в проміжній ємності 10.

Для вимірювання концентрації промивного розчину після проходження модуля передбачена система кранів для відбору проб 11. Концентрація промивного розчину вимірювалася за допомогою портативного TDS-метра.

### 3.3 Процедура експерименту та основні вимірювання

Дане дослідження спрямоване на пошук критеріального рівняння, як і у роботі [86], то необхідно забезпечити вимірювання параметрів, що входять до складу критеріїв. Враховуючи з розділу 2, що рівняння шукається у вигляді (2.29):

$$\text{Sh} = A \text{Re}^m \text{Sc}^n \left( \frac{d_e}{l} \right), \quad (3.1)$$

де  $Sh = k \cdot d_e / D$  критерій Шервуда,  $Re = w \cdot d_e \cdot \rho / \mu$ ,  $Sc = \mu / (D \cdot \rho)$  – критерій Шмідта,  $d_e = 2 \cdot \delta$ ,  $k$  – коефіцієнт перенесення маси,  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $w$  – швидкість промивного розчину,  $\rho$  – густина промивного розчину,  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості промивного розчину.

В такому разі необхідно вимірювати величини, що входять до складу критерії подібності, тобто коефіцієнт перенесення маси, швидкість промивного розчину, а для визначення фізичних параметрів необхідно знати температури, тиск та склад промивного розчину.

В ході досліджень безпосереднім вимірювань підлягали такі величини як тиск, температура та концентрація NaCl в промивному розчині. Швидкість руху промивного розчину вимірювалася ваговим методом, тобто фіксувалося значення зміни ваги ємності з промивним розчином 2 за заданий проміжок часу. Для визначення коефіцієнта перенесення маси використовувалося основне рівняння масовіддачі :

$$M = k(C^* - C_1)F\tau, \quad (3.2)$$

де  $M$  – маса вилученого осаду,  $C^*$  – рівноважна концентрація,  $C_1$  – концентрація в промивному розчині,  $\tau$  – тривалість процесу.

Звідси отримаємо:

$$k = \frac{M}{(C^* - C_1)F\tau}, \quad (3.3)$$

Маса вилученого осаду визначалася з матеріального балансу:

$$M = G(x_o - x_i)\tau, \quad (3.4)$$

де  $G$  – масова витрата промивного розчину,  $x_i$  та  $x_o$  – масові частки NaCl на вході і виході з мембранного модулі відповідно.

Густина і коефіцієнт кінематичної в'язкості, а також рівноважну концентрацію визначалися як і роботі [116] за довідковими даними, наведеними в [118, 119]. Для визначення коефіцієнтів дифузії використовувалися

експериментальні дані, наведені в [120]. Корекція табличних значень, здійснювалося так само, як і роботі [116].

Порядок експерименту був таким. В ємність 2 завантажувався промивний розчин (деіонізована вода з відомою концентрацією на рівні 5-15 мг/дм<sup>2</sup>), за допомогою електричного нагрівача 13 температура промивного розчину доводилася до заданого значення. Одночасно з цим за допомогою вакуум-насоса 8 створювалося задане розрідження в проміжній ємності 10. Далі за допомогою регулювальних кранів 3 та 5 виставлялося задані значення розрідження в промивній камері 7 на вході в мембранний модуль 7 та виході з нього. При цьому ваговим методом вимірювалася витрати (швидкість) промивного розчину, та температура на вході в мембранний модуль 7 та на виході з нього, а також здійснювався відбір проб промивного розчину на виході з мембранного модуля за допомогою системи кранів 11, для вимірювання його концентрації. Значення температури безперервно фіксувалися на персональному комп'ютері 12 за допомогою програмного модуля IndexTem.

### **3.4 Результати дослідження**

Відповідно до описаної методики була проведена серія уточнюючих експериментів. Також, при аналізі результатів використовувалися дані, отримані в попередньому дослідженні [86]. Оскільки в дослідах використовувалася лише одна розчинена речовина, а саме NaCl, то для забезпечення варіювання значень критерію Шервуда дослідження проводилися при різних температурах. При цьому, нижня межа температури відповідала мінімальній температурі оточуючого середовища, а саме 14°C. Верхня межа приймалася за термічною стійкістю композитних мембран, і була обрана 40°C. Розрідження в промивній ємності варіювалося в межах 0,06–0,095 МПа, що відповідає абсолютним тискам 0,005–0,04 МПа. Швидкість руху промивного розчину варіювалася в межах 0,000567 – 0,0827 м/с. Такі робочі умови відповідали діапазону зміни критерію Рейнольдса в межах 0,4-60, а критерій Шмідта змінювався в межах 568-630.

Оскільки в роботах [112, 114, 115] відмічається, що показник степеня при критерії Шмідта в дуже широкому діапазоні його значень дорівнює  $n = 0.33$ , в цій роботі було зроблено припущення, що в умовах проведення досліджень таке значення також залишається справедливим. В такому разі, задача отримання критеріального рівняння зводилася до визначення показника степеня при критерії Рейнольдса  $m$  та множника  $A$ . Перевірка прийнятого припущення має бути здійснена шляхом аналогічних експериментальних досліджень в більш широкому діапазоні зміни значень критерію Шмідта.

При аналізі експериментальних даних, весь діапазон отриманий масив розбивався на проміжки, в межах яких значення критерію Шмідта змінювалося не більш ніж на 2%. Для кожного з них діапазонів проводилася визначення показника степеня в залежності  $Sh = ARe^m$ . Така залежність лінеаризується в логарифмічних координатах, тому використовувалася саме така система координат. Графічні залежності  $Sh = f(Re)$  для деяких діапазонів значень критерію Шмідта показані на рисунках 3.2–3.5.

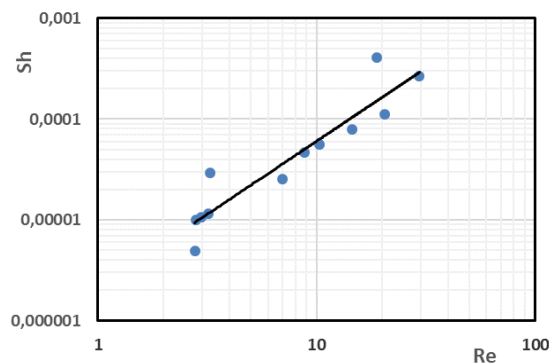


Рисунок 3.2 – Залежність критерію Шервуда від критерію Рейнольдса ( $Sc = 610-613$ )

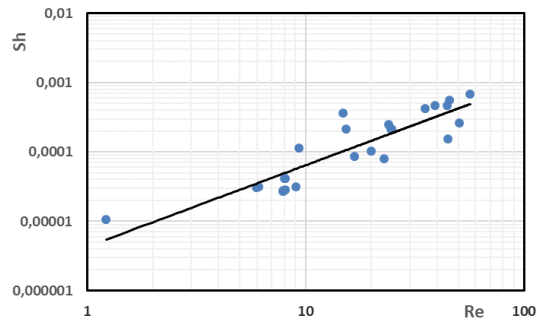


Рисунок 3.3 – Залежність критерію Шервуда від критерію Рейнольдса ( $Sc = 620-621$ )

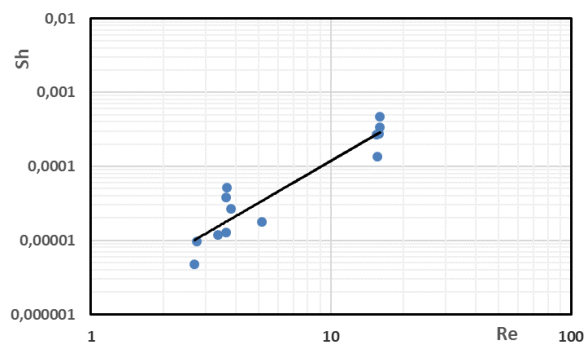


Рисунок 3.4 – Залежність критерію Шервуда від критерію Рейнольдса ( $Sc = 626-628$ )

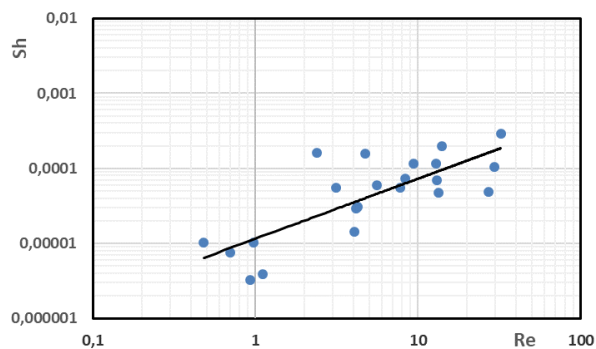


Рисунок 3.5 – Залежність критерію Шервуда від критерію Рейнольдса ( $Sc = 633-634$ )

В усіх розглядуваних діапазонах графічні залежності в логарифмічних координатах можуть бути апроксимовані лінійною залежністю, що дозволяє узагальнити результати експериментів.

### 3.5 Узагальнення результатів дослідження

Оскільки графічні залежності, наведені на рисунках 3.2-3.5, мають лінійних характер, залежності виду  $\lg(\text{Sh}) = \lg(\text{Re})$  були апроксимовані лінійною залежністю за методом найменших квадратів, відповідно до методики наведеної в [121]. Кутіві коефіцієнти цієї залежності дорівнюють показникам степеня при критерії Рейнольдса  $m$ . Розраховані значення цієї величини наведені в таблиці 1. Спостерігається варіювання цієї величини навколо середнього значення  $m' = 1,155$ , яке використовувалося для узагальнення результатів. З цією метою було побудована графічна залежність  $\text{Sh} = f(\text{Re}^{1.155} \text{Sc}^{0.33})$  в логарифмічних координатах, яка представлена на рисунку 3.6.

Таблиця 3.1 – Значення показників степеня при критерії Рейнольдса

Значення Sc	Значення $m$
580-584	2.059
596-599	1.742
600-603	1.016
604-606	1.021
610-613	1.450
614-617	1.088
620-621	1.173
622-623	1.168
624-625	1.001
626-628	1.885
629-630	0.401
631-632	0.757
633	0.795
634	0.099
Середнє значення	1,155

Як видно з рисунку 3.6, узагальнююча залежність  $Sh = f(Re^{1.155}Sc^{0.33})$  апроксимується за методом найменших квадратів в логарифмічній системі координат лінійною залежністю з кутовим коефіцієнтом  $k = 0.69$ . Це дозволяє уточнити значення показника степеня при критерії Рейнольдса, а саме  $m = m' \cdot k = 0.8$ . Зберігаючи значення показника ступеня при критерію Шмідта  $n = 0.33$ , остаточне узагальнення результатів здійснюється у вигляді  $Sh = f(Re^{0.8}Sc^{0.33}(d_e/l))$ , як показано на рисунку 3.7.

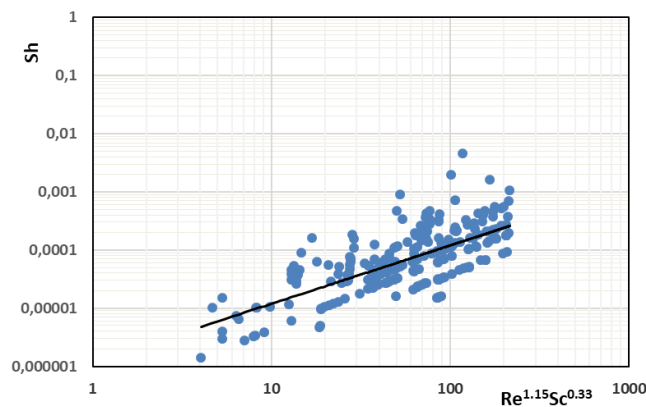


Рисунок 3.6 – Узагальнююча залежність  $Sh = f(Re^{1.155}Sc^{0.33})$

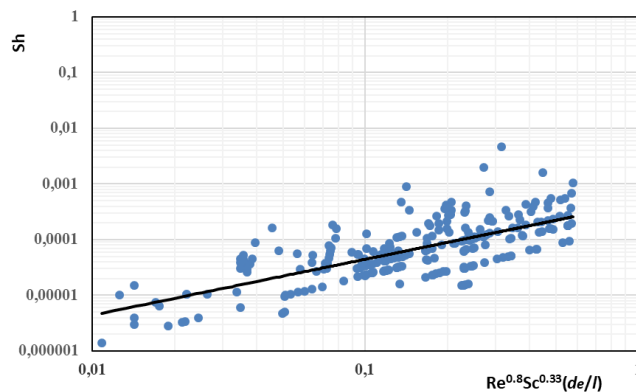


Рисунок 3.7 – Узагальнена критеріальна залежність

Узагальнююча критеріальна залежність за методом найменших квадратів апроксимується з показником степеня (кутовим коефіцієнтом прямої в логарифмічних координатах), що дорівнює 1,0023, що з достатньою для інженерних розрахунків точністю може бути прийнято як 1. В такому разі остаточна критеріальна залежність набуває вигляду:

$$\text{Sh} = 0.00045 \text{Re}^{0.8} \text{Sc}^{0.33} \left( \frac{d_e}{l} \right). \quad (3.5)$$

Отримане критеріальне рівняння дійсне в межах зміни критерію Рейнольдса в межах 0,4-60 для випадку регенерації спіральних мембранних модулів.

Вибірковий коефіцієнт кореляції залежності (3.5) становить  $r^* = 0.712$ , а статистичний аналіз, здійснений за методикою наведеною в [121] підтверджує існування залежності.

Показник степеня при критерію Шмідта приймався за даними, наведеними в інших дослідженнях [112, 114, 115].

### 3.6 Результати розрахунків за математичною моделлю

У попередній роботі розроблено метод регенерації спіралью намотаних мембранних модулів із застосуванням вакуумування. Також була розроблена математична модель цього процесу, яка дозволяє розрахувати тривалість процесу регенерації [86]. Однак у цій роботі було використано безрозмірне рівняння, яке було отримано з кількома припущеннями, що призводять до завищення коефіцієнта масообміну. Це рівняння було виправлено в роботі [125]. Поточна робота спрямована на покращення оцінки часу регенерації з урахуванням виправленого безрозмірного рівняння. Крім того, у роботі [86] вплив змін концентрації миючого розчину не враховувався, отже, покращена оцінка також мала на меті перевірити надійність цього припущення.

Процес видалення маси з поверхні мембрани описується рівнянням [4]:

$$\frac{dM}{d\tau} = K \left( C^p - C_0 - \frac{M_{\Pi}}{V} \left( 1 - \frac{M_{\Pi} - M}{M_{\Pi}} \right) \right) F \quad (3.6)$$

Початкові умови:  $M = 0$  для  $\tau = 0$ .

Визначення коефіцієнта масообміну  $K$ , на відміну від роботи [86], в поточних дослідженнях було використано наступне безрозмірне рівняння [125]:

$$\text{Sh} = 0.00045 \text{Re}^{0.8} \text{Sc}^{0.33} (d_e / l) \quad (3.7)$$

Розв'язування проводилося за методом Рунге - Кутта, розрахунки проводились за допомогою програми, написаної мовою програмування Python у двох варіантах (з урахуванням зміни концентрації в розчині для чищення).

Розрахунки проводили для випадку забруднення, яке складається з  $FeCl_3$  (цей матеріал використовується як модельний забруднювач в експериментальних дослідженнях) з початковою масою 0,002 кг та робочою температурою  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Масова витрата миючого розчину в межах 0,001-0,025 кг / с. які відповідають реальному робочому стану установки регенерації. Результати розрахунку представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Результати розрахунків

Витрата промивного розчину, G, кг/с	З урахуванням зміни концентрації промивного розчину		Без урахуванням зміни концентрації промивного розчину	
	Критерій Рейнольдса, Re	Тривалість повного вилучення осаду, $\tau$ , с	Критерій Рейнольдса, Re	Тривалість повного вилучення осаду, $\tau$ , с
0,0010	2,163	141000	2,163	141119
0,0025	5,407	67740	5,410	67801
0,0050	10,814	38910	10,814	38942
0,0075	16,221	28130	16,221	28154
0,0100	21,628	22350	21,628	22366
0,0125	27,035	18700	27,035	18710
0,0150	32,442	16160	32,442	16171
0,0175	37,849	14290	37,849	14295
0,0200	43,256	12840	43,256	12846
0,0225	48,663	11690	48,663	11691
0,0250	54,070	10740	54,070	10746

Як видно з таблиці 3.2, різниця у часі повного видалення шару пирога для розрахунку з урахуванням зміни концентрації в миючому розчині незначна, отже, припущення, зроблене в роботі [86], є обґрунтованим. У той же час тривалість регенерації значно відрізняється. У роботі [125] було зазначено, що попередня кореляція масообміну отримана із завищеними значеннями дифузійності. Результати вдосконаленого розрахунку показують, що це призвело до завищення тривалості регенерації в 4-5 разів, тому для практичного розрахунку слід використовувати виправлене безрозмірне рівняння. Залежність тривалості обробки режиму руху показана на рисунку 3.8.

Як видно з таблиці 3.2, різниця між тривалістю повного вилучення осаду з урахування зміни концентрації є нехтовно малою, отже припущення, зроблене в роботі [123] є обґрунтованим. В той же час, тривалість регенерації суттєво відрізняється.

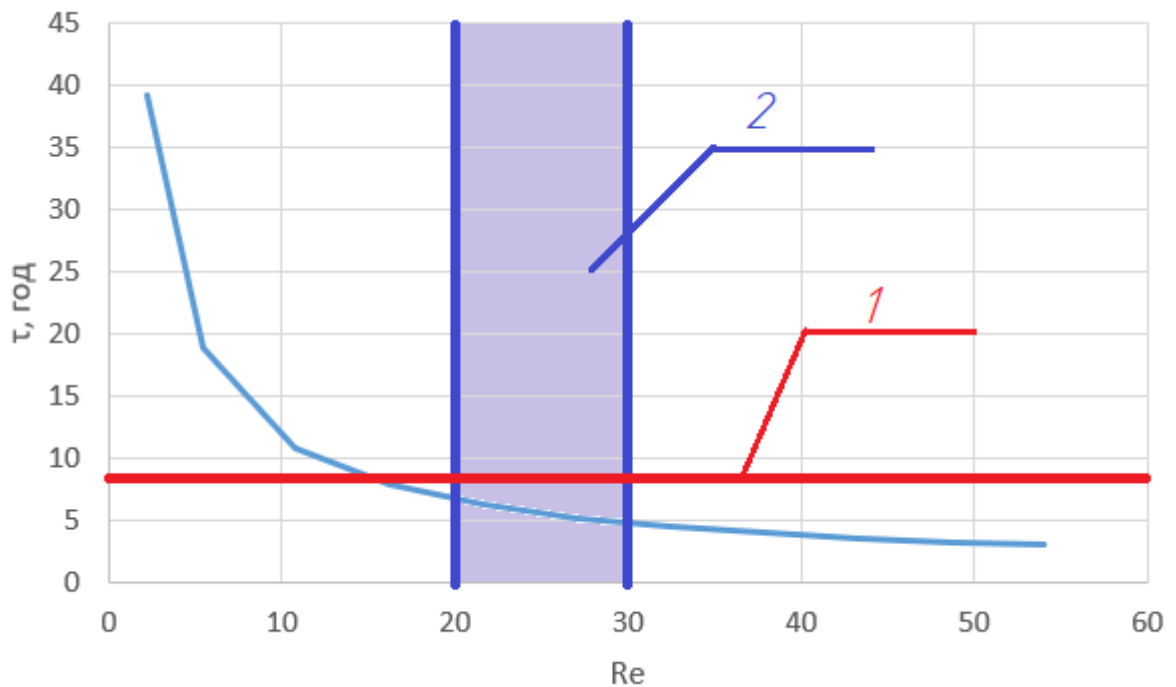


Рисунок 3.8 Залежність тривалості регенерації від критерію Рейнольдса: 1 це тривалість регенерації за існуючими рекомендаціями, 2 рекомендована область проведення процесу згідно запропонованого методу.

В роботі [124] відмічається, що попередня криєтріальна залежність отримана при завищених значеннях коефіцієнта дифузії. Результати уточнених розрахунків показують, що внаслідок цього спостерігається переоцінка тривалості регенерації в 4-5 разів, отже для більш точного розрахунку необхідно користуватися уточненим критеріальним рівнянням.

Як видно з результатів розрахунку, представлених на рисунку 3.8, із збільшенням значення числа Рейнольдса тривалість регенерації спочатку різко зменшується, а потім стабілізується. Висновок, зроблений в [86], що найбільш раціонально проводити процес за значеннями критерію Рейнольдса в діапазоні  $Re = 20-30$ , також є виправданим, враховуючи дату вдосконалення.

Використання виправленого безрозмірного рівняння дозволяє з більшою точністю прогнозувати тривалість регенерації мембранних модулів. Більше того, припущення про незначний вплив зміни концентрації миючого розчину на значення коефіцієнта масопередачі видається обґрунтованим.

### **3.7 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 «Процес регенерації мембранних модулів в пульсаційному режимі». Контроль параметрів технологічного процесу здійснюється оператором лінії, пульт якого знаходиться в виробничому приміщенні, площею  $300 \text{ м}^2$  і об'ємом  $1800 \text{ м}^3$  та висотою 6 м.

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

- повітря робочої зони;
- ураження електричним струмом;
- небезпека впливу елементів устаткування нагрітих до високих температур;
- виробничий шум, вібрація;
- пожежонебезпека.

### **3.7.1 Повітря робочої зони**

Виходячи з прийнятої технологічної схеми маємо приміщення без надлишкового тепловиділення, тобто  $Q < 20$  ккал/год  $\text{м}^3$  або  $Q < 23.27$  Дж/с.  $\text{м}^3$  Категорія робіт оператора легка, так як показник енерговитрати складає до 273 Дж/с. Параметри повітря робочої зони представлені в таблиці 3.3, в якій вказані також оптимальні умови.

Фактична концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони відповідають ГОСТ 12.1.005-88/98 «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря 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 3.3.

Таблиця 3.3 – Параметри повітря робочої зони

Сезон року	Категорія робіт	Фактична температура, °С	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 ГОСТ 12.1.005—88/98 «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони».

### 3.7.2 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 небезпекою .

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:

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

Для забезпечення електробезпечності передбачені організаційні і технічні заходи:

- Інструктаж і навчання безпечним методам праці.
- Установлення плакатів і знаків безпеки (на небезпечних місцях - джерелах живлення, на регуляторах, і т. ін.)
- Вирівнювання потенціалу.
- Ізоляція струмоведучих частин. Контроль ізоляції здійснюється прибором ПНКИ.  $R_{i3}=0,5\text{МОм}$
- Використання електрозахистних засобів, у т.ч. діелектричних рукавичок, інструментів з ізолюючими ручками, покажчиків напруги.

- Захисне занулення.
- 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

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

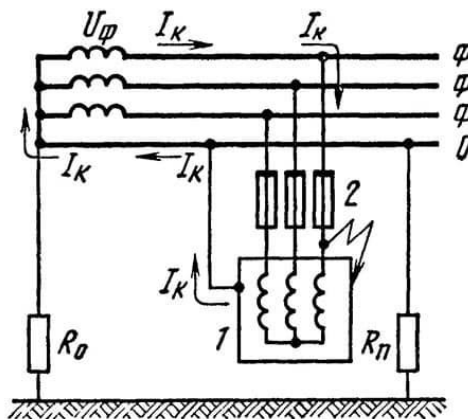


Рисунок 3.9 – Захисне занулення

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

### 3.7.3 Виробничий шум та вібрації

Джерела виробничого шуму та вібрації:

- компресор

Шум може тимчасово активізувати або постійно пригнічувати психічні процеси організму людини. Фізіологічні та біологічні наслідки можуть з'являтися

у формі порушення функцій слуху та інших аналізаторів, зокрема вестибулярного апарату, координуючої функції кори головного мозку, нервової системи, систем травлення і кровообігу.

Встановлено, що втрата слуху настає при впливі шуму в діапазоні частот 3000 – 6000 Гц, а порушення розбірливості мови - при частотах 1000 – 2000 Гц. Максимальна вірогідність втрати слуху протягом перших десяти років роботи і з плином часу ця небезпека зростає.

Несподівані та різкі шуми можуть викликати переляк та неадекватну поведінку. Постійний шум може негативно впливати на сенсорні функції знижуючи, наприклад, швидкість руху очей, звуження поля зору, викликаючи зміну кольорового сприйняття, порушення рівноваги, втрату больової чутливості.

Індивідуальні особливості людини, пов'язані з різними психологічними реакціями на вплив шуму суттєво впливають на його сприйняття. Шум не лише погіршує самопочуття людини і знижує продуктивність праці на 10- 15%, але нерідко призводить до професійних захворювань. Матеріальні збитки від цих захворювань значно більші, ніж від інших професійних захворювань. У зв'язку з цим боротьба з шумом має не лише санітарно - гігієнічне, але й велике техніко - економічне значення. Тому необхідно розробити комплекс інженерно - технічних та організаційних заходів щодо зниження шуму до нормативних значень.

Рівень тиску звуку в октавних смугах частот, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку (дБА) для постійних робочих місць при працюючій установці, встановлені за ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку». Так як шумові характеристики електродвигунів згідно ГОСТ 16372-93 «Машини електричні обертові. Допустимі рівні шуму (МЭК 34-9-90)» перевищують передбачені ДСН норми допустимих рівнів звукового тиску рівня звуку і еквівалентних рівнів звуку на робочих місцях, то в цьому випадку необхідно вжити заходів щодо зниження шуму до нормативних значень.

### 3.7.4 Розрахунок зниження шуму і додаткового звукопоглинання

Лінія для регенерації знаходиться в приміщенні довжиною 30 м , шириною 10 м, висотою 6 м і об'ємом 1800 м<sup>3</sup> .

Рівень звукової потужності виробничої лінії (джерело шуму) наведено в таблиці 3.4. Загальна площа огорожувальних поверхонь = 1260 м.

Потрібно визначити величину додаткового звукопоглинання  $\Delta A_n$  для точки, розташованої на віддалі 6 м від джерела шуму і вибрати конструкцію звукопоглинача.

Таблиця 3.4 – Акустична потужність джерела шуму

Середньо-геометрична частота Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Рівень звукової потужності дБ	93	95	98	95	96	97	98	93

Визначаємо величину граничного радіусу за формулою:

$$r = 0,2\sqrt{B_{8000}} \text{ м} \quad (3.8)$$

Для об'єму  $V=1800\text{м}^3$  знаходимо постійну приміщення (категорія б, таблиця 3.5).

Визначаємо  $B_{1000}$  за графіком;  $B_{1000}=100\text{м}^2$ ,

$$B_{8000}=\mu B_{1000} \quad (3.9)$$

де  $\mu$  частотний множник, який знаходиться по таблиці 3.6.

Таблиця 3.5 – Вибір індексу прямої

Опис приміщення	Індекс прямої
Без меблів, з невеликою кількістю людей (металообробні цехи, вентиляційні камери, генераторні, машинні зали, випробувальні стенди і т.п.).	а
З жорсткими меблями або з невеликою кількістю людей і м'якими меблями (лабораторії, ткацькі та деревообробні цехи, кабінети і т. п.).	б

Таблиця 3.6 – Частотний множник  $\mu$ 

Об'єм приміщення м <sup>3</sup>	Середньо геометрична частота, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1800	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5
	0,65	0,62	0,64	0,75	1	1,5	2,4	4,2
	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6

тоді  $B_{8000} = \mu B_{1000} = 100 \cdot 6 = 600 \text{ м}^2$ .

При таких вихідних даних (3.8) приймає вигляд:

$$r = 0,2\sqrt{B_{8000}} = 0,2\sqrt{600} = 4,9 \text{ м.}$$

Величина очікуваного рівня звукового тиску визначається за формулою:

$$L = L_p + 10 \lg \left( \frac{a}{S} + \frac{4}{B_u} \right), \quad (3.10)$$

де  $L_p$  — октавний рівень звукової потужності шуму, дБ;

$S$  — площа уявної поверхні правильної геометричної форми, що оточує джерело і проходить через розрахункову точку, м<sup>2</sup>.

Тоді необхідне зниження рівнів звукового тиску в розрахунковій точці від одного джерела шуму визначається як різниця очікуваного рівня звукового тиску в розрахунковій точці до реалізації заходів щодо зниження шуму  $L$  та допустимого рівня  $L_{\text{дон}}$ :

$$\Delta L_n = L - L_{\text{дон}}, \quad (3.11)$$

При визначенні  $\Delta L_n$  як  $L_{\text{дон}}$  приймаємо криву граничного спектра ГС-75. Розрахунок наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7– Розрахунок необхідного зниження шуму

Величина, що визначається	Одини ці вимірю вання	Середньо геометрична частота октавної смуги, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$L_p$	дБ	93	95	98	95	96	97	98	93
$B_{1000}$	м	-	-	-	-	100	-	-	-
$\mu$	-	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6
$B = \mu B_{1000}$	м	50	50	55	70	100	160	300	600
$a'/2\pi r^2$ ( $a'=1, r=6$ м)	-	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
$4/B$	м <sup>2</sup>	0,08	0,08	0,073	0,058	0,04	0,025	0,013	0,006
$\Sigma = 4/B + a'/2\pi r^2$	м <sup>2</sup>	$8,4 \cdot 10^2$	$8,4 \cdot 10^2$	$7,7 \cdot 10^2$	$6,2 \cdot 10^2$	$4,4 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^2$	$1,7 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$
$10/\lg \Sigma (4/B + a'/2\pi r^2)$	-	-11,8	-11,8	-11,1	-12,1	-13,6	-15,4	-17,7	-20
$L = L_p + 10/\lg \Sigma^*$ ( $4/B + a'/2\pi r^2$ )	дБ	81	83	87	83	82	81	80	73
$L_{\text{дон}}(\text{ГС-75})$	дБ	93	86	81	78	75	73	71	70
$\Delta L_n = L - L_{\text{дон}}$	дБ	-	-	6	5	7	8	9	3

В зоні відбитого звуку  $\Delta L_n$  такі, що звукопоглинальне облицювання може забезпечити необхідне зниження рівня звукового тиску. За графіками знаходимо

величину  $\Delta A_n$  додаткового звукопоглинання. Значення  $\Delta A_n$  знаходимо для октавних смуг, в яких має місце максимум частотної характеристики  $f$ -1000 та 2000 Гц.

Вибираємо плити “Вініпор” напівжорсткі товщиною 50 мм з повітряним прошарком 150мм.

Визначається необхідна площа облицювання. Результати розрахунку наведено в таблиці 3.8. Загальна площа облицювання складає 560 м<sup>2</sup> (стеля – 300 м<sup>2</sup> і стіни - 260 м<sup>2</sup>). Це відповідає необхідній величині площі облицювання.

Таблиця 3.8 – Розрахунок додаткового звукопоглинання

Величина, що визначається	Одиниці вимірювання	Середньгеометрична частота октавної смуги, Гц							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$B$	м <sup>2</sup>	50	50	55	70	100	160	300	600
$B+S$	м <sup>2</sup>	1310	1310	1315	1330	1360	1420	1560	1860
$a=B/(B+S)$	-	0,04	0,04	0,04	0,05	0,07	0,11	0,19	0,32
$k$	-	-	-	0,13	0,1	0,22	0,48	0,41	0,2
$\Delta A_n$	м <sup>2</sup>	-	-	175	150	300	550	500	250
$a_{ліч}$		-	-	0,83	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$S_{ліч}=\Delta A_n/a_{ліч}$	м <sup>2</sup>	-	-	210	150	300	550	500	250

Використання для акустичної обробки цеху звукопоглинальних плит забезпечує зниження рівнів відбитого звуку, а рівні звукового тиску в контрольній точці не перевищують допустимих величин, тобто 65 дБА.

В такому випадку величина загальної технологічної вібрації на постійних робочих місцях при працюючій установці у виробничих приміщеннях не перевищує норм, встановлених за ДСН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації».

### 3.7.5 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 (6 шт.) та установки пожежогасіння порошкові закачані типу «САМ9» (15 шт.).

Для захисту органів дихання застосовують повітряний апарат МПА-4х20.

В приміщенні, де розташовується установка, на відстані 30 метрів одне від одного повинні бути встановлені пожежні гідранти з рукавами довжиною до 10 метрів. Відстань до пожежного виходу повинна бути не більше 40 метрів.

Кількість виходів - не менше двох. Ширина дверей еваковиходу - 2 метри. Двері еваковиходу повинні відкриватись на зовні.

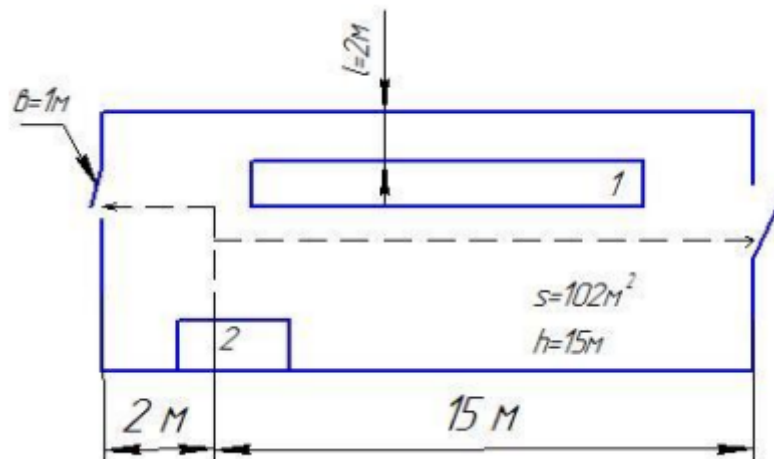


Рисунок 3.10 – План евакуації

Відповідність обладнання до вимог охорони праці

1. Перед початком роботи необхідно перевірити наявність усіх заземлень.
2. Шафа керування приводом закрита.
3. Підходи до електроприводів, пульта і шаф вільні.
4. Робота в спецодязі.
5. На випадок можливого самозаймання передбачені засоби гасіння.
6. Рівень шуму, вимірюваний при роботі машини, не перевищує 75 Дб на частоті 1000 Гц.
7. Під час роботи лінії категорично заборонено:
  - проводити ремонтні роботи;

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.

### **3.8 Висновки**

У даному розділі було зроблено:

- описана експериментальна установка, що використовувалася в експериментах;
- проведено уточнюючі експериментальні дослідження, в результаті яких було отримано уточнене критеріальне рівняння для визначення коефіцієнтів масовіддачі при регенерації мембранних модулів;
- проведено розрахунки за математичною моделлю, які показали, що використання виправленого безрозмірного рівняння дозволяє з більшою точністю прогнозувати тривалість регенерації мембранних модулів;
- складено правила безпеки та охорони праці.

## 4. ОБГРУНТУВАННЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Вступ

Процес зворотного осмосу застосовується в багатьох системах опріснення води, очищення стічних вод та обробці продуктів харчування та напоїв як ефективний метод очищення.

У роботі [126] досліджується ефективність багатоступеневої конструкції процесу переробки ретентату та пермеату процесу зворотного осмосу для відбракування хлорофенолу зі стічних вод.

Пропонується модифікувати систему очищення шляхом додавання у схему (рисунок 4.1) циркуляційний контур регенерації контур регенерації.

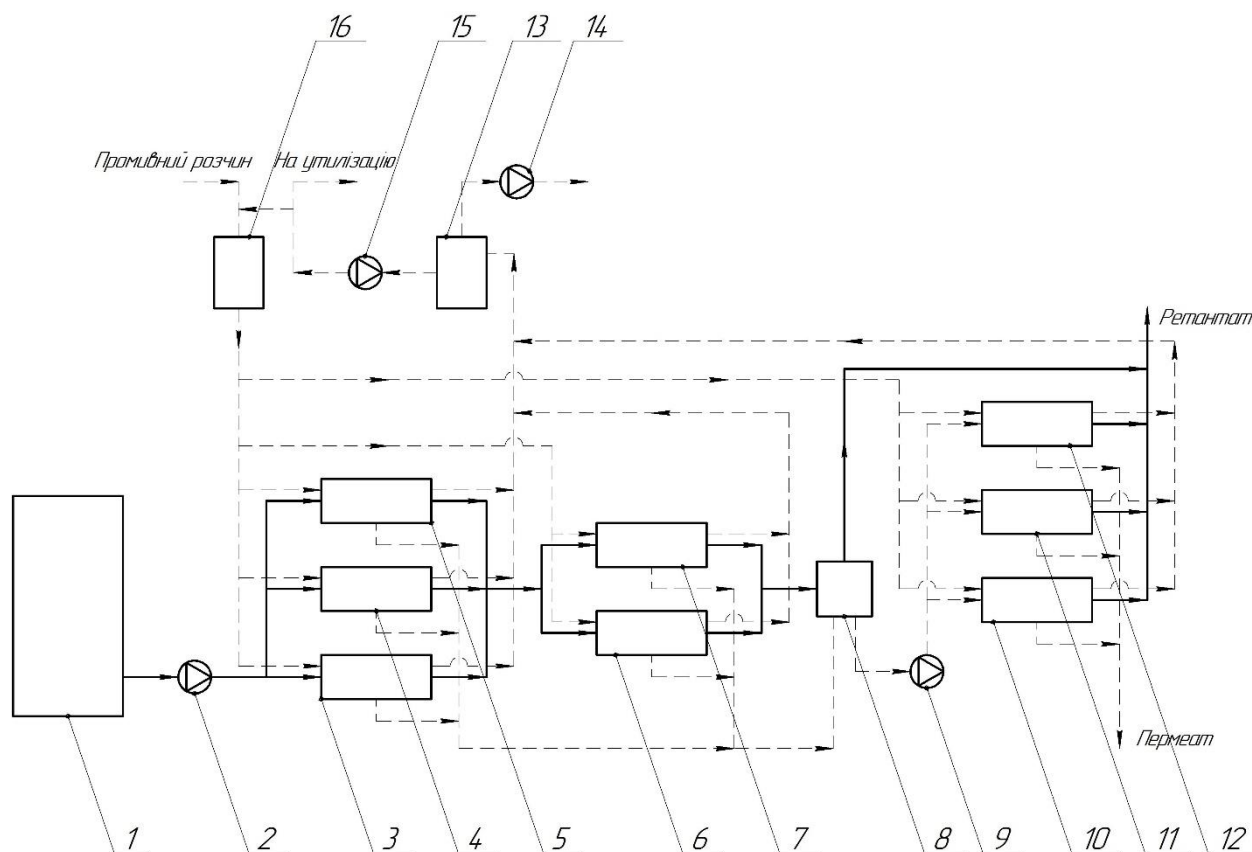


Рисунок 4.1. Модифікована схема багатоступеневої конструкції процесу переробки ретантату та пермеату процесу зворотного осмосу для відбракування хлорофенолу зі стічних вод: 1 – живильний бак, 2 – насос високого тиску, 3 – 7 та 10 – 12 – апарати зворотного осмосу, 8 – пристрій для рекуперації енергії, 9 – підсилювальний насос, 13 – проміжна ємність, 14 – вакуум-насос, 15 – циркулярний насос, 16 – ємність з промивним розчином.

На рисунку 4.1 зображена схема багатоступеневої конструкції процесу переробки ретантату та пермеату процесу зворотного осмосу для відбракування хлорофенолу зі стічних вод, яка працює в три стадії. Перша стадія включає в себе апарати зворотного осмосу 3 – 5, друга – апарати 6 та 7, а третя – апарати 10 – 12. Початкова суміш з живильного бака 1 за допомогою насоса високого тиску 2 потрапляє до апаратів першої стадії, потім до другої. Після цього за допомогою пристрою для відновлення енергії 8 та підсилювального насосу 9, який підтримує тиск на заданому рівні, розчин поступає до апаратів третьої, останньої стадії. При тому, циркуляційний контур регенерації функціонує так [85]. За допомогою вакуум-насоса 14 у ємності 13 створюється розрідження та різниця тисків у ємностях 13 та 16. Через цей перепад тисків промивний розчин з ємності 16 поступає до основної системи очищення та до апаратів зворотного осмосу усіх трьох стадій. Після цього використаний промивний розчин закачується у проміжну ємність 13. Для того, щоб промивний розчин можна було використати ще раз, його з ємності 13 знову перекачують у ємність 16 за допомогою циркуляційного насосу 15.

## 4.2 Алгоритм розрахунку часу регенерації

Мета розрахунку: визначення часу проходження процесу регенерації, тобто визначення часу вилучення осаду. Для цього було розроблений алгоритм, що ґрунтується на алгоритмі, показаному в роботі [85] та на математичній моделі процесу регенерації.

Вихідними даними для розрахунку є:

- потік пермеату чистого мембранного модуля,  $J_0$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2/\text{кг})$ ;
- потік пермеату забрудненого мембранного модуля,  $J_F$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2/\text{кг})$ ;
- опір чистої мембрани,  $R_m$ ,  $\text{м}^{-1}$ ;
- питомий опір шару забруднень,  $\alpha$ ,  $\text{м}^{-2}$ ;

- робочий перепад тиску,  $\Delta p$ , Па;
- різниця осмотичних тисків,  $\Delta \pi$ , Па.

Опір шару забруднень:

$$R_c = \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\mu J_F} - \frac{\Delta p - \Delta \pi}{\mu J_F}. \quad (4.1)$$

Маса осаду:

$$M_{II} = \frac{\rho_c \cdot F \cdot R}{\alpha}. \quad (4.2)$$

Еквівалентний діаметр:

$$d_e = 2\delta_c. \quad (4.3)$$

Витрати промивного розчину при обраному режимі регенерації:

$$V_C = \frac{Re \cdot v \cdot S}{d_e}. \quad (4.4)$$

Особливої уваги слід приділити використанню уточненого критеріального рівняння (блок 8):

$$Sh = 0,00045 Re^{0,84} Sc^{0,33} \left( \frac{d_e}{L} \right). \quad (4.5)$$

Коефіцієнт масовіддачі (блок 9):

$$K = \frac{Sh \cdot D}{d_e}. \quad (4.6)$$

Розрахунок коефіцієнтів Рунге-Кутта (блоки 12 15):

$$K_{1f} = K \left( C^p - C_0 - \frac{M_{II}}{V} \left( 1 - \frac{M_{II} - M_i}{M_{II}} \right) \right) F. \quad (4.7)$$

$$K_{2f} = K \left( C^p - C_0 - \frac{M_{II}}{V} \left( 1 - \frac{M_{II} - (M_i + K_{1f}h/2)}{M_{II}} \right) \right) F. \quad (4.8)$$

$$K_{3f} = K \left( C^p - C_0 - \frac{M_{II}}{V} \left( 1 - \frac{M_{II} - (M_i + K_{2f}h/2)}{M_{II}} \right) \right) F. \quad (4.9)$$

$$K_{4f} = K \left( C^p - C_0 - \frac{M_{II}}{V} \left( 1 - \frac{M_{II} - (M_i + K_{3f}h/2)}{M_{II}} \right) \right) F. \quad (4.10)$$

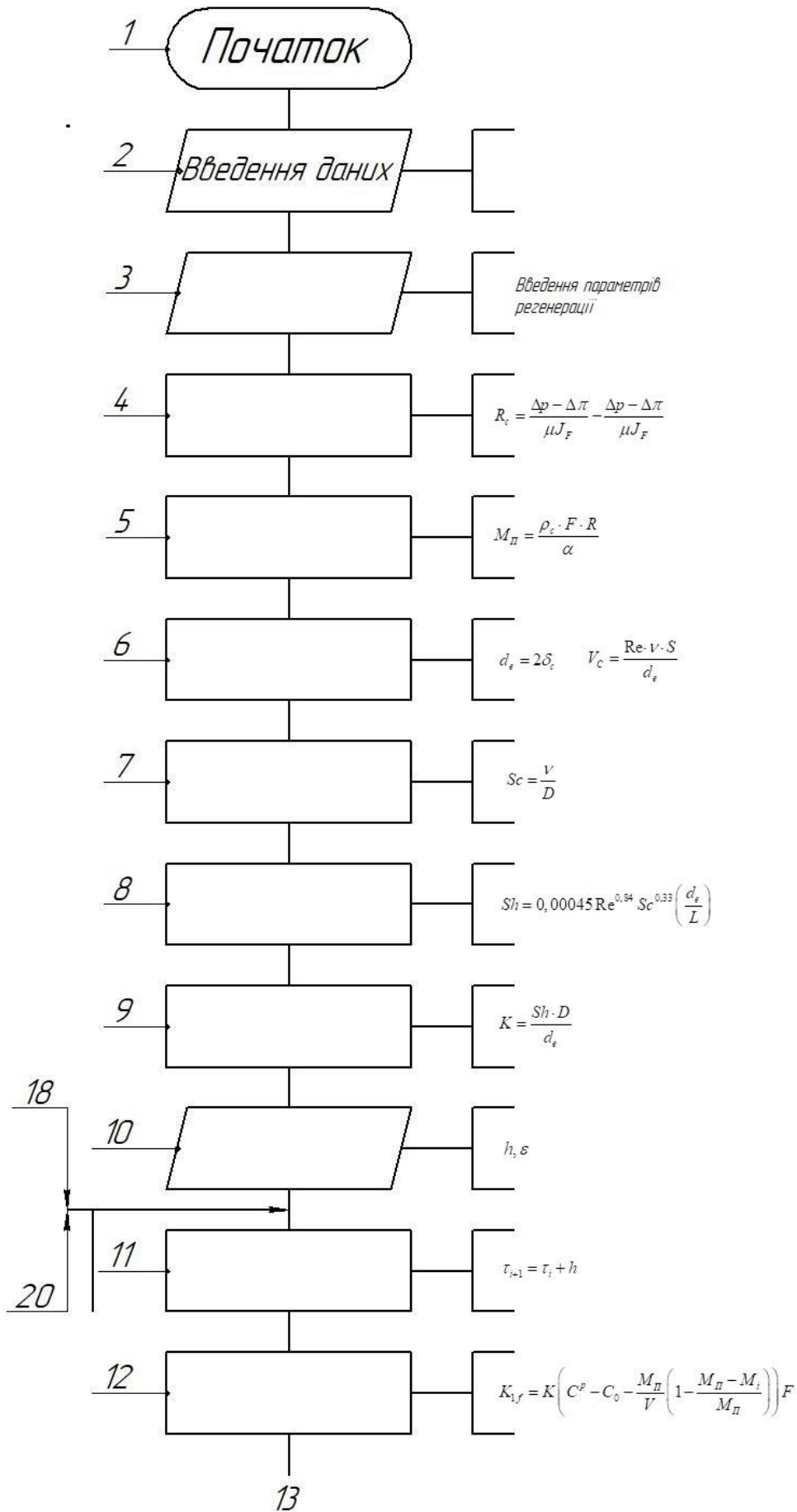


Рисунок 4.2 Алгоритмічна схема розрахунку часу регенерації

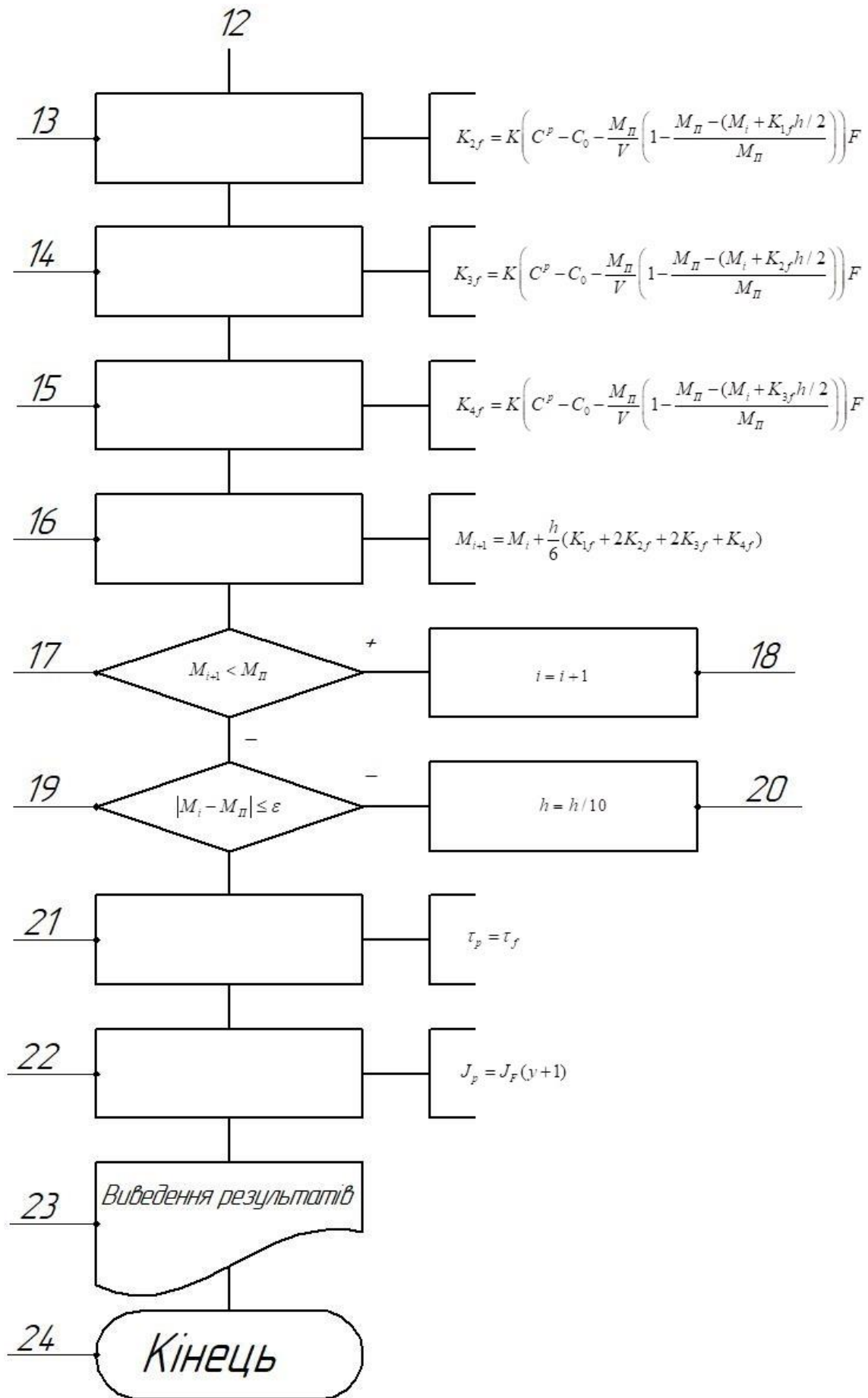


Рисунок 4.3 Алгоритмічна схема розрахунку часу регенерації (продовження)

Розрахунок маси розчиненої речовини та її порівняння з початковою (блоки 16 та 17):

$$M_{i+1} = M_i + \frac{h}{6} (K_{1f} + 2K_{2f} + 2K_{3f} + K_{4f}), \quad (4.11)$$

$$M_{i+1} < M_{II}. \quad (4.12)$$

Якщо маса розчиненої речовини менше, ніж початкова маса, то розрахунок переходить до блоку 18, і цикл йде на нове коло, початок якого блок 11. У іншому випадку перевіряється умова необхідної точності у блоці 19. Якщо ця умова залишається невиконаною, тоді крок зменшується у задану кількість разів у блоці 20 та цикл повторюється (блок 11).

### 4.3 Висновки

У даному розділі було зроблено:

- запропонана модифікована схема багатоступеневої конструкції процесу переробки ретантату та пермеату процесу зворотного осмосу для відбракування хлорофенолу зі стічних вод;
- було запропоновано вдосконалену методику розрахунку тривалості регенерації та створена оригінальна програма розрахунку на мові програмування пайтон.

## 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 5.1. Опис ідеї проекту

В 21 столітті перед людством постала проблема отримання чистої питної води та її споживання. Сьогодні мембранні методи очищення стічних вод набули широкого розповсюдження та вже не викликають сумнівів у своїй ефективності і конкурентоспроможності.

*Ідея стартап-проекту:* модифікована регенерація рулонованих модулів. Пропонується спосіб регенерації рулонованих мембранних модулів. Основна перевага цього методу у тому, що це підвищує ефективність та довговічність роботи мембранних модулів.

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 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
Модифікований метод регенерації рулонованого мембранного модуля	Хімічна промисловість Очищення води Харчова промисловість	Інноваційність технології Низька ціна Турбота про екологію

Такий підхід дає найбільш повний обсяг послуг покупцю. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- вказані технічні та економічні характеристики проекту;

- проведено пошук конкурентів на ринку ті збір технічної та економічної інформації для ідеї проекту та конкурентів;
- проведено порівняльний аналіз показників: для проекту визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (таблиця 5.2) [127].

Таблиця 5.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари конкурентів			W (слабка сторона а)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Lenercom	Applied Membranes Inc			
1.	Ефективність регенерації, %	98	97,6	98,1		+	
2.	Час регенерації, год	5,5	7	9			+
3.	Кількість повторного використання	8	5	6			+
4.	Вартість модуля регенерації(або процесу регенерації, якщо це послуга), грн	1000	1500	500 (послуга)		+	

Прямими конкурентами на ринку є Applied Membranes Inc, JIUWU HI-TECH, Lenercom, NX filtration, Fluence corp., Ecosoft. Для визначення характеристик

порівняємо проект з аналогічними товарами та послугами конкуруючих фірм, як приклад візьмемо Applied Membranes Inc та Lenercom.

Можна зробити висновок, що сильними сторонами є:

- час регенерації,
- кількість повторних використань регенованого модуля.

Нейтральні характеристики:

- вартість модуля регенерації або послуги регенерації (як можна бачити, у Applied Membranes Inc це послуга та коштує вона дешевше);
- ефективність регенерації.

Визначений перелік сильних характеристик та властивостей ідеї потенційної послуги (товару) є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

## 5.2 Технологічний аудит проекту

У межах даного підрозділу було проведено аудит способу, за допомогою якого можна реалізувати ідею проекту та наведено його у таблиці 5.3

Таблиця 5.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Модифікація методу регенерації рулонованого мембранного апарата та самого модуля регенерації	Надання послуг з регенерації мембранних модулів	Дані технології існують. В доробці їх є необхідність.	Дані технології знаходяться відкритому доступі.
	Встановлення модулю регенерації кінцевому споживачу	Дані технології існують. В доробці їх є необхідність.	Дані технології знаходяться відкритому доступі.
Обрана технологія реалізації ідеї проекту:			
1 – Встановлення модулю регенерації та технічна підтримка споживача через більшу лояльність та стабільніші прибутки			

Проаналізувавши технологічну здійсненність проекту можна зробити висновок, що проект можна реалізувати. Для реалізації проекту обрано встановлення модулю регенерації та технічна підтримка споживача.

### 5.3 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.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.4).

Середня норма рентабельності в галузі хімічної та харчової промисловості 20%, вища ніж середній банківський відсоток на вкладення 15%. За попереднім оцінюванням можна сказати, що ринок є привабливим для входження [127-134].

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од	6
Загальний обсяг продаж, млн грн	200
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Цінові, політичні
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 5.5.

Таблиця 5.5 – 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
Можливість регенерації забруднених рулонованих мембранних модулів для подальшого повторного використання	Підприємства, що займаються очисткою води (хімічна, фармацевтична, харчова промисловість)	Одна потенційна група клієнтів, із мінімальними відмінностями в залежності від галузі	<ul style="list-style-type: none"> <li>• якість очищення (висока ступінь фільтрації);</li> <li>• ціна;</li> <li>• надійність</li> <li>• технічна підтримка та обслуговування.</li> </ul>

Після визначення потенційних груп клієнтів проводився аналіз ринкового середовища: складено таблиці факторів, що перешкоджають ринковому впровадженню проекту, таблиця 5.6, та факторів, що йому сприяють таблиця 5.7. Фактори в таблицях подано в порядку зменшення значущості [128].

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Економічна криза	Складні економічні умови можуть знизити купівельну спроможність клієнта	Зниження ціни
Міжнародний карантин	Впливає на продаж товарів та послуг, затримки поставок як продукту, так і сировини	Узгодження поставок з клієнтами наперед, на півроку
Політична ситуація	Політичні конфлікти між країнами сильно впливають на курси валют та, відповідно, на продаж товару чи послуги	Не співпрацювати з «країнами-ізгоями» (які знаходяться під санкціями, наприклад) або зміна напрямку роботи

Таблиця 5.6 – Фактори можливостей

Фактор можливості	Зміст	Можлива реакція компанії
Екологія	Погіршення природніх умов, світ переходить до умовно чистих технологій	Одним з рекламних ходів може бути заява про збереження екології
Повернення фахівців до України	Збільшення можливостей найму нових робітників та інженерів	Пропонувати нові робочі місця фахівцям, що повернулися
Розвиток технологій автоматизації	Можливість автоматизації процесу регенерації мембрани	Розробка системи автоматизації
Інновації	Нові технології та способи використання	Розробка нових технологій та нових методів регенерації

Аналіз пропозиції: загальні риси конкуренції на ринку, таблиця 5.8.

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Вказати тип конкуренції - чиста	На ринку є багато незалежних конкуруючих фірм-продавців. Кожна фірма займає невелику частку ринку	Розвинута реклама та часткова підтримка з боку держави
2. За рівнем конкурентної боротьби - національна	Продукт з'являється на ринках різних держав	Вихід на велику кількість ринків одночасно
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Конкуренція виробників, що виробляють стандартизований продукт	Сертифікація продукції, відповідність найвищим стандартам
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між іншими товарами та послугами різних компаній на ринку	Поліпшення продуктивності продукту, комплексний підхід до обслуговування
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Конкуренція технологій, розробок, якості та репутації (на Західному ринку)	Об'єднання цінової та нецінової переваг на ринку для поліпшення процесу виробництва та залучення нових покупців
6. За інтенсивністю - марочна	Конкуренція торгових марок виробників	Вихід на ринок свого бренду/корпорації

## 5.4 Аналіз умов конкуренції в галузі за Портером

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальник	Клієнти	Товари-замінники
у	Applied Membranes Inc JIUWU HI-TECH Lenercom NX filtration Fluence corp. Ecosoft	Виробники суміжної з мембранним и модулями продукції. Отримання сертифікату на вироблення мембранних модулів та апаратів; отримання стартового капіталу в розмірі 40 000 000 грн.	Від постачальників залежить якість стандартних виробів, які необхідні при виробництві	Клієнтами можуть бути як звичайні люди, так і великі корпорації та підприємства, тому необхідно виробити гнучку стратегію перемовин із клієнтами	Продукти та послуги вже усталених компаній та брендів
Висновки:	Компанії підтримують конкурентне середовище за рахунок нових розробок та покращенню своєї продукції, розширенню обсягу послуг та поширенню свого впливу (промірна інтесивність)	Можливість входу в ринок оцінюється максимум в 4 роки. Потенційні конкуренти: виробники мембран та мембранних модулів.	Постачальники майже не диктують умови роботи через їх велику кількість	Клієнти можуть диктувати свої умови: ціна, технічна характеристика.	Можливість витіснення з ринку через великі обсяги виробництва більш старих компаній та напрацьованої клієнтної бази

Відповідно до наведеного аналізу головними силами є конкуренти та потенційні конкуренти. Також існує загроза виникнення конкуренції зі сторони

товарів (послуг) замінників. Для успішного виходу та закріплення на ринку потрібно поліпшити характеристики продукту, розробити рекламну стратегію та за можливістю розширити виробництво на суміжні галузі. На основі аналізу конкуренції (таблиця 5.9) та з урахуванням вимог споживачів, таблиця 5.5, та факторів маркетингового середовища (таблиці 5.6-5.7), визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності [129], таблиця 5.10.

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Інноваційні розробки та технології	Нові технології завжди цікавлять людей
2	Якість фільтрації, тобто висока якість кінцевого продукту - води	Це саме те, для чого покупці приходять – за можливістю отримати добре відфільтровану воду.
3	Послуги	Кількість та різноманіття послуг також має значну роль у наданню проекту конкурентоспроможності. Широкий спектр послуг – важливий фактор у очах покупців. Гарантія та підтримка продукту це те, що хоче кожен покупець.
4	Ціна	Загальна ціна мембранних модулів залежить від багатьох факторів, тому покупець має можливість самостійно оцінити ціноутворення або, що вірогідніше, буде порівнювати з товарами конкурентів.
5	Репутація виробника	Довіра клієнтів не береться з пустого місця, тому дотримання стандартів якості та відкритість (клієнт матиме змогу самостійно побачити продукт, усі його характеристики) сприятиме появі цієї довіри.
6	Ступінь задоволення потреб споживача	Споживач має отримати саме той продукт та саме для тих цілей, для яких він його й купує
7	Екологічність	Екологічність зараз дуже важлива, світ переходить на екологічні матеріали та джерела енергії.

Фактори конкурентоспроможності дають можливість оцінити майбутню роботу підприємства на ринку, виявити та посилити слабкі сторони та укріпити

сильні сторони компанії. За визначеними факторами конкурентоспроможності (таблиця 5.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (таблиця 5.11).

Для порівняльного аналізу обрані компанії AMI Applied Membranes Inc та Lenegcom.

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор Конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Інноваційні розробки та технології	20		2		1			
2	Якість фільтрації	15		2	1				
4	Послуги	15			1	2			
5	Ціна	10			1	2			
6	Репутація виробника	15			2			1	
7	Ступінь задоволення потреб споживача	11				2	1		
8	Екологічність	10		2		1			

1 AMI;

2 Lenegcorp.

Зважаючи на проведений аналіз, проект має наступну позицію на світовому ринку:

Сильні сторони:

- Інноваційні розробки та технології;
- Якість фільтрації;
- Послуги;
- Ціна;
- Екологічність

Слабкі сторони:

- Репутація виробника;
- Ступінь задоволення потреб споживача.

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 5.12 [127-134].

Таблиця 5.12 - SWOT аналіз стартап-проекту

<p><i>Сильні сторони:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Інноваційні розробки та технології</li> <li>2.Якість фільтрації</li> <li>3.Ціна</li> <li>4.Послуги</li> </ol>	<p><i>Слабкі сторони:</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Маркетинг</li> <li>2.Доступ до нових ринків</li> <li>3.Доступ до сировини</li> <li>4.Репутація</li> </ol>
<p><i>Можливості</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1.Екологія</li> <li>2.Щільність населення</li> <li>3.Автоматизація</li> <li>4.Інновації</li> </ol>	<p><i>Загрози</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Економічна криза</li> <li>2.Міжнародний карантин</li> <li>3. Політична ситуація</li> </ol>

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 5.13)

Альтернатива ринкового впровадження загарбник. Необхідно провести пошук фірми – спонсора.

Таблиця 5.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Наступник	Менш ймовірна	4 роки.
Загарбник	Ймовірна	3 роки

Найбільш оптимальний варіант управління –комбінування варіантів вирішення проблеми, просування власного бренду, розробка та підтримання високих стандартів якості.

### 5.5 Розроблення ринкової стратегії проекту

Визначення стратегії охоплення ринку, а саме опис цільових груп потенційних споживачів, таблиця 5.14 [127].

Таблиця 5.14. 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	Власники приватних будинків та власники невеликих підприємств, що спеціалізуються на фільтрації води (або потребують її для виробництва)	Готові	Високий попит на власному ринку	Помірна конкуренція	Середня важкість
Які цільові групи обрано: будинки, заводи, фабрики, підприємства, що спеціалізуються на фільтрації води (або потребують її для виробництва)					

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Виготовлення рулонованих мембранних модулів та модулів регенерації для будинків та малих підприємств, що займаються фільтрацією	Диференційований маркетинг	Гнучкість налаштувань, адаптивна ціна, якість, цілодобова підтримка	Стратегія диференціації

За базову стратегію розвитку обрано стратегію диференціації. Передбачається надання товару важливих з точки зору споживача властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару(у ширшому розумінні – комплексі маркетингу), бути реальною або уявною. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування.

У даному випадку, відмінністю, і реальною відмінністю, є інноваційна система регенерації мембран, що й буде виділяти товар серед товарів конкурентів [128].

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопроходцем» 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
1	Ні, на ринку вже існує схожі продукти, але на відміну від них, проект має інноваційні технічні рішення	Компанія буде займатися і пошуком нових споживачів та забирати клієнтів у конкурентів	Так, будуть копіюватися найбільш успішні (якщо такі є) властивості, але з власними доопрацюванням.	Стратегія наслідування лідера, у подальшому розвитку планується стратегія виклику лідера

Була обрана стабільна стратегія – стратегія наслідування лідера. Головна перевага такої стратегії – економія фінансових ресурсів, пов’язаних з необхідністю розширення товарного(галузевого) ринку, витратами на утримання домінуючого положення [127].

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Висока якість фільтрації(отримання добре відфільтрованої води), висока продуктивність, надійність	Стратегія диференціації	Розробка та впровадження регенераційних модулів з інноваційною системою регенерації поверхні мембран	Гнучкість у налаштуванні, модифікації та комплектації, якість, потужність, надійність в експлуатації

Починаючи таким чином можна досягти певної стабільності, щоб потім перейти до іншого етапу та до нової стратегії, а саме стратегії виклику лідера.

Вимогами до товару цільової аудиторії є висока якість фільтрації та фільтрованого продукту, та продуктивність, можливість вибрати необхідні технічні характеристики та комплектацію, спланувати витрати на продукт. Саме для цього була обрана стратегія лідерства диференціації – відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму від товарів-замінників. Також успішна диференціація дозволяє компанії домогтись більшої рентабельності за рахунок того, що ринок готовий прийняти більш високу ціну (цінову премію бренду).

## 5.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

У таблиці 5.18 підбито підсумки попереднього аналізу конкурентоспроможності товару [127-134].

Таблиця 5.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Гнучкість підбору комплектації під потреби користувача	Можливість підібрати тип модуля (або комплексу модулів) для широкої сфери діяльності, від приватного будинку чи квартири до великого підприємства	Розширення клієнтської бази
2	Якість	Надійність та стабільність експлуатації, технічна підтримка	Високий ККД, репутація надійного виробника
2	Продуктивність	Можливість використання на великих потужностях	Інноваційний метод регенерації мембран, що й збільшує продуктивність
3	Адаптивна цінова політика	Клієнт сам (або з допомогою консультацій) може вибрати комплектуючі та модель модуля, відповідно, може підібрати під свої фінансові можливості	Адаптивна цінова політика також передбачає де-які кореляції ціни в залежності від країни, де відбувається замовлення. У конкурентів такого немає
4	Цілодобова підтримка клієнту	Можливість допомоги при встановленні, монтуванні, обслуговуванні та ремонті як онлайн, так і з виїздом ремонтної чи монтажної бригади	Підтримка у тому числі «на місці» буде відбуватися цілодобово

Визначення концепції потенційного товару показало, що ключовими перевагами є: гнучкість та адаптивність типів та конфігурації модулів та ціни на них, якість продукту, висока продуктивність, а також цілодобова підтримка користувача, не має значення, власник маленької квартири чи великого підприємства. Усі ці переваги не тільки дозволять продуктивно працювати та гідно конкурувати з іншими компаніями, але й дозволить задовольнити клієнта, що позначиться на прибутку та на репутації компанії.

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Рулонований модуль регенерації різних модифікації та типів конструкцій для різних потреб. Модифікована конструкція та інноваційний метод розрахунку та регенерації поверхні мембран збільшує продуктивність по об'єму та якість отриманого пермеату		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості / характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1 Продуктивність	Нм	Тх/Тл
	2 Потужність	М	Тх/Тл
	3 Щільність	М	Тх/Тл
	4 Доступність на ринку	Нм	Е
	Якість: високоякісний, галузевий стандарт, стандарт ISO 20468-5		
	Пакування: модуль, змінні фільтри, монтажні прилади, інструкція, техпаспорт		
	Марка: «PF» MM 5		
III. Товар із підкріпленням	До продажу	Не потребує вимог	
	Після продажу	Цілодобова підтримка клієнтів	
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Захист патентного права та комерційна таємниця.			

Опис трьох рівнів моделі товару показав, що основним задумом товару є збільшення продуктивності по об'єму та висока якість профільованої рідини (пермеату). Пермеат – це рідина, яка є результатом процесу зворотного осмосу, в нашому випадку – чиста вода. Якість товару контролюється ISO, підтримка клієнтів здійснюється цілодобово та на всіх рівнях покупки, монтажу та експлуатації. Продукт захищено патентним правом та комерційною таємницею.

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послуг
1	20-30 тис\$	25-35 тис\$	30-200 тис\$	3-50 тис\$

Визначення меж встановлення ціни показало, що товари-замінники та товари аналоги коштують майже однаково – з 20 тис \$ і до 35 тис. \$, а рівень доходів клієнтів складає приблизно 3-50 тис\$ (клієнти власники приватних будинків, власники маленьких та середніх підприємств), то було обрано межі 3-50 \$ (ціна залежить від конфігурації комплектації), що дає перевагу над конкурентами.

Таблиця 5.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	У сегменті закупівля товару відбувається напряму з виробником через сайт або через представництво компанії (магазин, офіс)	1 Аналіз ринку потреб 2 Пошук потенційних клієнтів 3 Реклама 4 Система лояльності та підтримка	Канал нульового рівня	Інтернет, виставки, шоу-руми, тендерні торги

На сьогодні закупівля більшості товарів виконується через інтернет. Так як клієнти покупають товар напряму з виробником, або у випадку тендерів – через комітети, було обрано канал нульового збуту [129].

#### 5.22. Концепція маркетингових комунікації

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Клієнти дізнаються про товар через наукові статті, публікації у наукових та технічних видавництва, інтернет, соціальні мережі, виставки, та шукають товар з високою якістю й низькою ціною	Інтернет, технічні виставки, наукові та технічні роботи, бізнес форуми, статті, соціальні мережі	Інтернет маркетинг, наукові статті, реклама в соціальних мережах	Презентація товару, опис характеристик, розповідь про можливості тонкого налаштування, наявність сертифікатів якості	«Мембранні модулі від нашої компанії запорука якості та стабільності роботи»

Клієнти більшу частину інформації дізнаються через інтернет, соціальні мережі, наукові статті, технічні виставки, то ключовим маркетингом обрано інтернет-маркетинг, реклама в соціальних мережах та публікації в провідних наукових журналів (онлайн). Завдання рекламного повідомлення – презентація товару та його основних якостей, сертифікатів.

## 5.7 Висновки

- було виявлено, що є наявний попит, динаміка ринку, рентабельність роботи на ринку, відповідно є можливість ринкової комерціалізації проекту;
- з огляду на потенційні групи клієнтів, бар'єри входження, стан конкуренції та конкурентоспроможність проекту є перспективи впровадження проекту;
- в якості альтернативи ринкового впровадження доцільно обрати стратегію «загарбник»;
- зважаючи на проведений комплексний аналіз стартап-проекту, подальша імплементація проекту є доцільною.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну задачу вдосконалено ефективні способу регенерації мембранних модулів шляхом уточнення закономірностей масообміну при проведенні цього процесу. За результатами досліджень були зроблені такі висновки:

1. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано необхідність уточнення існуючої залежності, що описують процес масообміну в каналах рулонних мембранних модулів в умовах регенерації.

2. Проведено експериментальні дослідження та отримано уточнене критеріальне рівняння для розрахунку коефіцієнтів перенесення маси.

3. Вдосконалено методику розрахунку тривалості процесу регенерації з урахуванням встановлення закономірності масообміну.

4. Встановлено найбільш раціональний режим проведення регенерації, при яких тривалість процесу на 20-30% менша, ніж в загально прийнятій промисловій технологічній регенерації.

5. Запропоновано модернізування технологічної схеми та конструкції апарата для можливості проведення процесу регенерації по місцю.

## ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена важная научно-техническую задачу усовершенствована эффективные способа регенерации мембранных модулей путем уточнения закономерностей массообмена при проведении этого процесса. По результатам исследований были сделаны следующие выводы:

1. По результатам теоретических и экспериментальных исследований обоснована необходимость уточнения существующей зависимости, описывающие процесс массообмена в каналах рулонных мембранных модулей в условиях регенерации.

2. Проведены экспериментальные исследования и получены уточненное критериальное уравнение для расчета коэффициентов переноса массы.

3. Усовершенствована методика расчета продолжительности процесса регенерации на основе установления закономерности массообмена.

4. Установлено наиболее рациональный режим проведения регенерации, при которых продолжительность процесса на 20-30% меньше, чем в обще принятой промышленной технологической регенерации.

5. Предложено модернизуванню технологической схемы и конструкции аппарата для возможности проведения процесса регенерации по месту.

## CONCLUSIONS

In the magister`s work was solved the important scientific and technical problem of the effective way of regeneration of membrane modules by specification of laws of mass transfer at carrying out of this process. According to the results of research, the following conclusions were made:

1. Based on the results of theoretical and experimental studies, the need to clarify the existing dependence describing the process of mass transfer in the channels of rolled membrane modules in the conditions of regeneration is substantiated.

2. Experimental researches are carried out and the specified criterion equation for calculation of coefficients of transfer of weight is received.

3. The method of calculating the duration of the regeneration process has been improved, taking into account the establishment of the regularity of mass transfer.

4. The most rational mode of regeneration is established, in which the duration of the process is 20-30% less than in the generally accepted industrial technological regeneration.

5. Modernization of the technological scheme and design of the device for the possibility of carrying out the regeneration process on site is proposed.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Sonune, A., Ghate, R., 2004. Developments in wastewater treatment methods. *Desalination* 167, 55–63.
2. Bennett, A., 2005. Membranes in industry: facilitating reuse of wastewater. *Filtration & Separation* 42 (8), 28–30.
3. Frost Sullivan Europe Siemens Water Technologies, 2007. Membrane filtration technologies tackle water reuse and purification. *Membrane Technology* (1), 9–11.
4. Свитцов А.А. Мембранные технологии в России // *The Chemical Journal /Химический журнал*. 2010. №10. С.22.26.
5. Баландина А.Г., Хангильдин Р.И., Ибрагимов И.Г., Мартяшева В.А. Развитие мембранных технологий и возможность их применения для очистки сточных вод предприятий химии и нефтехимии // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2015. № 5. С.336-370.
6. Kilgus M., Geper V., Dinges N., Merten C., Eigenberger G., Schiestel T. Palladium coated ceramic hollow fibre membranes for hydrogen separation. *Desalination* 2006. Pp. 95-96/
7. Тимашев С.Ф. Физикохимия мембранных процессов. М.: Химия, 1980. 232 с.
8. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. Пер. с англ. М.: Мир, 1999. 513 с.
9. Хванг С.Т., Каммермейер К. Мембранные процессы разделения. Пер. с англ. М.: Химия, 1981. 464 с.
10. Андрианов А.П. Исследование и оптимизация работы установок очистки воды методом ультрафильтрации: автореф. дис... М.: МГСУ. 2003. 22 с.
11. Тверской В.А. Мембранные процессы разделения. Полимерные мембраны. М.: МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2008. 59 с.

12. Орлов Н. С. Ультра - и микрофльтрация. Теоретические основы. М.: МХТИ им. Д.И.Менделеева,1990. 174 с.
13. Дитнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 1986. 272 с.
14. Свитцов А.А. Введение в мембранные технологии. М.: ДеЛи принт, 2007. 280 с.93
15. Хохрякова Е.А., Резник Я.Е. Водоподготовка / Под ред. д.т.н. С.Е. Беликова. — Москва: Издательский Дом «Аква-Терм», 2007. — С. 100-112. — 240 с.
16. Волков С.В., Шахов С.В., Антипов С.Т. Аппарат для ультрафльтрации и обратного осмоса (Патент SU 1807883)
17. Гулієнко С.В. Дисертація на здобуття наукового ступеня к.т.н. Процес регенерації рулонованих мембранних модулів. Київ.: НТУУ «КПІ».- 2016. Гулієнко С.В. Дисертація на здобуття наукового ступеня к.т.н. Процес регенерації рулонованих мембранних модулів. Київ.: НТУУ «КПІ».- 2016.
18. Baker R. W. Membrane technology and applications. – 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. – 2004.
19. Porter M. Handbook of industrial membrane technology. – Westwood, New Jersey: Noyes publications. – 619 p.
20. Y. El Rayess, C. Albasi, P. Vacchin, P. Taillandier, M. Mietton-Peuchot, A. Devatine, Analysis of membrane fouling during cross-flow microfiltration of wine, *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 16 (2012) 398–408.
21. P. Le-Clech, V. Chen, T.A.G. Fane, Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment, *J. Membr. Sci.* 284 (2006) 17–53.
22. F. Meng, S.-R. Chae, A. Drews, M. Kraume, H.-S. Shin, F. Yang, Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material, *Water Res.* 43 (2009) 1489–1512.
23. A. Drews, Membrane fouling in membrane bioreactors—characterisation, contradictions, cause and cures, *J. Membr. Sci.* 363 (2010) 1–28.

24. Z. Wang, X. Mei, J. Ma, A. Grasmick, Z. Wu, Potential foulants and fouling indicators in MBRs: a critical review, *Sep. Sci. Technol.* 48 (2013) 22–50.
25. S. Judd, *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for water and Wastewater Treatment*, second edition, 2011.
26. M. Kraume, A. Drews, Membrane bioreactors in waste water treatment – status and trends, *Chem. Eng. Technol.* 33 (2010) 1251–1259.
27. A. Santos, W. Ma, S.J. Judd, Membrane bioreactors: two decades of research and implementation, *Desalination* 273 (2011) 148–154.
28. T. Zsirai, P. Buzatu, P. Aerts, S. Judd, Efficacy of relaxation, backflushing, chemical cleaning and clogging removal for an immersed hollow fibre membrane bioreactor, *Water Res.* 46 (2012) 4499–4507.
29. H.B. Petrus, H. Li, V. Chen, N. Norazman, Enzymatic cleaning of ultrafiltration membranes fouled by protein mixture solutions, *J. Membr. Sci.* 325 (2008) 783–792.
30. H. Xu, Y. Liu, Control and cleaning of membrane biofouling by energy uncoupling and cellular communication, *Environ. Sci. Technol.* 45 (2011) 595–601.
31. C. Liu, S. Caothien, J. Hayes, T. Caothuy, T. Otoyoy, T. Ogawa, Membrane chemical cleaning: from art to science, in: *Proceedings of 2001 Membrane Technology Conference*, AWWA, 2001.
32. I.S. Chang, P. Le Clech, B. Jefferson, S. Judd, Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment, *J. Environ. Eng.—ASCE* 128 (2002) 1018–1029.
33. J.B. Castaing, A. Masse, V. Sechet, N.E. Sabiri, M. Pontie, J. Haure, P. Jaouen, Immersed hollow fibres microfiltration (MF) for removing undesirable microalgae and protecting semi-closed aquaculture basins, *Desalination* 276 (2011) 386–396.
34. M.C. Porter, Concentration polarization with membrane ultrafiltration, *Prod. R&D* 11 (1972) 234–248
35. S. Bhattacharjee, A.S. Kim, M. Elimelech, Concentration polarization of interacting solute particles in cross-flow membrane filtration, *J. Colloid Interface Sci.* 212 (1999) 81–99.

36. Y. Zhao, K. Wu, Z. Wang, L. Zhao, S. Li, Fouling and cleaning of membrane—a literature review, *Environ. Sci.* 12 (2000) 241–251.
37. C.A. Romero, R.H. Davis, Experimental verification of the shear-induced hydrodynamic diffusion model of crossflow microfiltration, *J. Membr. Sci.* 62 (1991) 249–273.
38. X.-m. Wang, T.D. Waite, Role of gelling soluble and colloidal microbial products in membrane fouling, *Environ. Sci. Technol.* 43 (2009) 9341–9347.
39. Q. Wang, Z. Wang, Z. Wu, J. Ma, Z. Jiang, Insights into membrane fouling of submerged membrane bioreactors by characterizing different fouling layers formed on membrane surfaces, *Chem. Eng. J.* 179 (2012) 169–177.
40. P. van den Brink, F. Vergeldt, H. Van As, A. Zwijnenburg, H. Temmink, M.C. M. van Loosdrecht, Potential of mechanical cleaning of membranes from a membrane bioreactor, *J. Membr. Sci.* 429 (2013) 259–267.
41. E. Giraldo, M. LeChevallier, Dynamic mathematical modeling of membrane fouling in submerged membrane bioreactors, in: *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2006, pp. 4895–4913.
42. R.G. Holdich, G.M. Zhang, Internal fouling of microporous cross-flow filtration membranes with dilute latex suspensions, *Chem. Eng. J. Biochem. Eng. J.* 60 (1995) 31–37.
43. A. Broeckmann, J. Busch, T. Wintgens, W. Marquardt, Modeling of pore blocking and cake layer formation in membrane filtration for wastewater treatment, *Desalination* 189 (2006) 97–109.
44. E. Iritani, A review on modeling of pore-blocking behaviors of membranes during pressurized membrane filtration, *Dry Technol.* 31 (2013) 146–162.
45. D. Spettmann, S. Eppmann, H.C. Flemming, J. Wingender, Simultaneous visualisation of biofouling, organic and inorganic particle fouling on separation membranes, *Water Sci. Technol.* 55 (2007) 207–210.
46. J. Ma, Z. Wang, Y. Yang, X. Mei, Z. Wu, Correlating microbial community structure and composition with aeration intensity in submerged membrane bioreactors by 454 high-throughput pyrosequencing, *Water Res.* 47 (2013) 859–869.

47. L. Malaeb, P. Le-Clech, J.S. Vrouwenvelder, G.M. Ayoub, P.E. Saikaly, Do biological-based strategies hold promise to biofouling control in MBRs? *Water Res.* 47 (2013) 5447–5463.
48. Y.-L. Jin, W.-N. Lee, C.-H. Lee, I.-S. Chang, X. Huang, T. Swaminathan, Effect of DO concentration on biofilm structure and membrane filterability in submerged membrane bioreactor, *Water Res.* 40 (2006) 2829–2836.
49. S. Mafirad, M.R. Mehrnia, H. Azami, M.H. Sarrafzadeh, Effects of biofilm formation on membrane performance in submerged membrane bioreactors, *Biofouling* 27 (2011) 477–485.
50. B.-K. Hwang, C.-H. Lee, I.-S. Chang, A. Drews, R. Field, Membrane bioreactor: TMP rise and characterization of bio-cake structure using CLSM-image analysis, *J. Membr. Sci.* 419 (2012) 33–41.
51. Z. Wang, Z. Wu, A review of membrane fouling in MBRs: characteristics and role of sludge cake formed on membrane surfaces, *Sep. Sci. Technol.* 44 (2009) 3571–3596.
52. U. Metzger, P. Le-Clech, R.M. Stuetz, F.H. Frimmel, V. Chen, Characterisation of polymeric fouling in membrane bioreactors and the effect of different filtration modes, *J. Membr. Sci.* 301 (2007) 180–189.
53. Z. Wang, Z. Wu, X. Yin, L. Tian, Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (MBR) under sub-critical flux operation: membrane foulant and gel layer characterization, *J. Membr. Sci.* 325 (2008) 238–244.
54. J.-Y. Lee, B.-K. Choi, K.-H. Ahn, S.K. Maeng, K.-G. Song, Characteristics of flux and gel layer on microfilter and non-woven fabric filter surface based on anoxic-aerobic MBRs, *Bioprocess Biosyst. Eng* 35 (2012) 1389–1398.
55. D.T. Myat, M.B. Stewart, M. Mergen, O. Zhao, J.D. Orbell, S. Gray, Experimental and computational investigations of the interactions between model organic compounds and subsequent membrane fouling, *Water Res.* 48 (2014) 108–118.
56. A.R. Costa, M.N. de Pinho, M. Elimelech, Mechanisms of colloidal natural organic matter fouling in ultrafiltration, *J. Membr. Sci.* 281 (2006) 716–725.

57. J. Zhang, W.L.C. Loong, S. Chou, C. Tang, R. Wang, A.G. Fane, Membrane biofouling and scaling in forward osmosis membrane bioreactor, *J. Membr. Sci.* 403 (2012) 8–14.
58. T. Tsuyuhara, Y. Hanamoto, T. Miyoshi, K. Kimura, Y. Watanabe, Influence of membrane properties on physically reversible and irreversible fouling in membrane bioreactors, *Water Sci. Technol.* 61 (2010) 2235–2240.
59. C. Huyskens, S. Lenaerts, E. Brauns, L. Diels, H. De Wever, Study of (ir) reversible fouling in MBRs under various operating conditions using new online fouling sensor, *Sep. Purif. Technol.* 81 (2011) 208–215.
60. M. Kraume, D. Wedi, J. Schaller, V. Iversen, A. Drews, Fouling in MBR: what use are lab investigations for full scale operation? *Desalination* 236 (2009) 94–103.
61. A. Resosudarmo, Y. Ye, P. Le-Clech, V. Chen, Analysis of UF membrane fouling mechanisms caused by organic interactions in seawater, *Water Res.* 47 (2013) 911–921.
62. D.F. Ayala, V. Ferre, S.J. Judd, Membrane life estimation in full-scale immersed membrane bioreactors, *J. Membr. Sci.* 378 (2011) 95–100.
63. Zhiwei Wang, Jinxing Ma, Chuyang Y. Tang, Katsuki Kimura, Qiaoying Wang, Xiaomeng Han. Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review, *Journal of membrane science.* 468 (2014) 276-307.
64. C. Brepols, K. Drensla, A. Janot, M. Trimborn, N. Engelhardt, Strategies for chemical cleaning in large scale membrane bioreactors, *Water Sci. Technol.* 57 (2008) 457–463.
65. X. Han, J. Gu, B. Ai, S. Li, Y. Wen, L. Shi, Analysis on MBR process operation and membrane cleaning scheme in Beixiaohe WWTP, *China Water Wastewater* 26 (2010) 40–43.
66. X. Huang, X.H. Wen, Principles and Applications of MBR for Water Treatment, Science Press, Beijing, China, 2012.
67. P. Cornel, S. Krause, Membrane bioreactors in industrial wastewater treatment — European experiences, examples and trends, *Water Sci. Technol.* 53 (2006) 37–44.

68. T. Kobayashi, T. Kobayashi, Y. Hosaka, N. Fujii, Ultrasound-enhanced membrane-cleaning processes applied water treatments: influence of sonic frequency on filtration treatments, *Ultrasonics* 41 (2003) 185–190.
69. Q.Y. Yang, J.H. Chen, F. Zhang, Membrane fouling control in a submerged membrane bioreactor with porous, flexible suspended carriers, *Desalination* 189 (2006) 292–302.
70. X. Yang, R. Wang, A.G. Fane, C.Y. Tang, I.G. Wenten, Membrane module design and dynamic shear-induced techniques to enhance liquid separation by hollow fiber modules: a review, *Desalin. Water Treat.* 51 (2013) 3604–3627.
71. P. Buzatu, T. Zsirai, P. Aerts, S.J. Judd, Permeability and clogging in an immersed hollow fibre membrane bioreactor, *J. Membr. Sci.* 421 (2012) 342–348.
72. M. Cai, S. Wang, Y. Zheng, H. Liang, Effects of ultrasound on ultrafiltration of *Radix astragalus* extract and cleaning of fouled membrane, *Sep. Purif. Technol.* 68 (2009) 351–356.
73. A. Maartens, P. Swart, E.P. Jacobs, An enzymatic approach to the cleaning of ultrafiltration membranes fouled in abattoir effluent, *J. Membr. Sci.* 119 (1996) 9–16.
74. M.J. Muñoz-Aguado, D.E. Wiley, A.G. Fane, Enzymatic and detergent cleaning of a polysulfone ultrafiltration membrane fouled with BSA and whey, *J. Membr. Sci.* 117 (1996) 175–187.
75. E.-H. Kim, M. Dwidar, R.J. Mitchell, Y.-N. Kwon, Assessing the effects of bacterial predation on membrane biofouling, *Water Res.* 47 (2013) 6024–6032.
76. A. Grelot, A. Busnot, P. Grelier, A. Tazi-Pain, M. Heijnen, A. Grasmick, A new and appropriate fibre sheet configuration for MBR technologies, *Desalin. Water Treat.* 6 (2009) 25–32.
77. W. Doyen, W. Mues, B. Molenberghs, B. Cobben, Spacer fabric supported flatsheet membranes: a new era of flat-sheet membrane technology, *Desalination* 250 (2010) 1078–1082.
78. A. Grelot, P. Grelier, A. Tazi-Pain, B. Lesjean, U. Bruess, A. Grasmick, Performances and fouling control of a flat sheet membrane in a MBR pilotplant, *Water Sci. Technol.* 61 (2010) 2185–2192.

79. R. Alnaizy, N. Abdel-Jabbar, A. Aidan, N. Abachi, Modeling and dynamic analysis of a membrane bioreactor with backwash scheduling, *Desalin. Water Treat.* 41 (2012) 186–194
80. Shirazi S., Lin C.-J., Chen D. Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes – A critical review // *Desalination*. – 2010. – Vol. 250. – p. 236-248.
81. 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.
82. 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
83. Мулдер М. Введение в мембранную технологию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 513 с. ил.
84. Федоренко В. И. Ингибирование осадкообразования в установках обратного осмоса // *Серия Критические технологии. Мембраны*. – 2003. – №2. – С. 23-30.
85. Гулієнко С. В. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по темі: Процес регенерації рулонних мембранних модулів. НТУУ «КПІ», Київ 2016.
86. Yaroslav Korniyenko, Sergii Guliienko, Mykyta Lialka. Mathematical simulation of fouled membrane modules regeneration, *Ukrainian Food Journal* Volume 4, Issue 3 2015.
87. Darwish M. A. (2001), New idea for co-generation power desalting plants due to abandoned MSF desalination process, *Desalination*, 134, pp. 221-230.
88. Аксельруд, Г. А. Растворение твердых веществ [Текст]: научное издание / Г. А. Аксельруд, А. Д. Молчанов. - М. : Химия, 1977. - 272 с. : ил.
89. Petrescu S., Petrescu J. Lisa C. Mass transfer at solid dissolution // *Chemical engineering journal* – 1997 Vol. 66. – P. 57-63.
90. Petrescu S., Fehete I., Ciubotariu C. Mass transfer in fixed bed solid dissolution // *Chemical engineering journal* – 1998 – Vol. 69. – P. 39-45.

91. Elperin T., Fominykh A. Effect of solute concentration level on the rate of coupled mass and heat transfer during solid sphere dissolution in a uniform fluid flow // *Chemical Engineering Science* – 2001 – Vol. 56. – P. 3065-3074.
92. Kannan A., Pathan S. Enhancement of solid dissolution processes // *Chemical engineering journal* – 2004. – Vol. 102. – P. 45-49.
93. Ярослав Михайлович Гумницький: Бібліографічний показник. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – Вип. 47. – 120 с. (Бібліографія вчених Львівської політехніки).
94. Вітенько Т.М. Механізм та кінетичні закономірності інтенсифікуючої дії гідродинамічної кавітації у хіміко-технологічних процесах: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.17.08 / Вітенько Тетяна Миколаївна; Тернопіл. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. – Т., 2007. – 36 с.
95. 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.
96. 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
97. Korniyenko Y., Guliienko S., Lialka M. Mathematical simulation of fouled modules regeneration // *Ukrainian Food Journal.* – 2015. – Volume 4 – P. 481–493.
98. Корнієнко Я.М. Оцінка ефективності регенерації відпрацьованих рулонованих мембранних модулів / Я.М. Корнієнко, С.В. Гулієнко, М.О. Лялька // *Наукові парці ОНАХТ.* – 2015. - Випуск 47. - Т.1 – с.19-21.
99. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – 3-е изд., перера. и доп. М.: Высш. шк., 1979. – 439 с., ил.
100. Радченко Л. Б., Мікульнок І. О. Моделювання процесів хімічної технології. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2005. – Ч.1: Теоретичні основи. – 126 с.: іл.

101. Birn R. B., Stewart W., Lightfoot E. Transport phenomena. Second Edition. – New York/Chichester/Weinheim/Brisbane/Singapore/Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 912 p.
102. Korniyenko Y. Mathematical model of dissolving inorganic fouling in spiral wound membrane module / Korniyenko Y. , Gulienko S. // The Advanced Science Journal. --- 2014. -- issue 4. – p. 47-50.
103. Fortunato, L., Alshahri, A. H., Farinha, A. S. F., Zakzouk, I., Jeong, S., Leiknes, T. (2020). Fouling investigation of a full-scale seawater reverse osmosis desalination (SWRO) plant on the Red Sea: Membrane autopsy and pretreatment efficiency. *Desalination*. Vol. 496, 114536, doi: [10.1016/j.desal.2020.114536](https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114536)
104. Song W., Lee, L. Y., Liu E., Shi X., Ong S. L., Ng H. Y. Spatial variation of fouling behavior in high recovery nanofiltration for industrial reverse osmosis brine treatment towards zero liquid discharge. *Journal of Membrane Science*, 609, 118185, doi: [10.1016/j.memsci.2020.118185](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118185)
105. Wu Y.-H., Tong X., Zhao X.-H., Bai Y., Ikuno N., Ishii K., Hu H.-Y. (2021). The molecular structures of polysaccharides affect their reverse osmosis membrane fouling behaviors. *Journal of Membrane Science*. In Press, Journal Pre-proof, 118984, doi: [10.1016/j.memsci.2020.118984](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118984)
106. Jafari M., Vanoppen M., van Agtmaal M.C., Cornelissen E.R., Vrouwenvelder J. S., Verliefde A., van Loosdrecht M.C.M., Picioreanu C. (2021). Cost of fouling in full-scale reverse osmosis and nanofiltration installations in the Netherlands, *Desalination*. Vol. 500, 114865, doi: [10.1016/j.desal.2020.114865](https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114865)
107. Madaeni S.S., Samieirad S. (2010). Chemical cleaning of reverse osmosis membrane fouled by wastewater, *Desalination*. Vol. 257, pp. 80-86, doi: [10.1016/j.desal.2010.03.002](https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.002)
108. Ibrahim S., Nagasawa H., Kanezashi M., Tsuru T. (2020). Chemical-free cleaning of fouled reverse osmosis (RO) membranes derived from bis(triethoxysilyl)ethane (BTESE), *Journal of Membrane Science*, 601, 117919, doi: [10.1016/j.memsci.2020.117919](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.117919)

109. Li Y.-Sh., Shi L.-C., Gao X.-F., Huang J.-G. (2016). Cleaning effects of oxalic acid under ultrasound to the used reverse osmosis membranes with an online cleaning and monitoring system, *Desalination*. Vol. 390, pp. 62-71, doi: [10.1016/j.desal.2016.04.008](https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.04.008)
110. Dayarathne H.N.P., Choi J., Jang A. (2017). Enhancement of cleaning-in-place (CIP) of a reverse osmosis desalination process with air micro-nano bubbles, *Desalination*. Vol. 422, pp. 1-4, doi: [10.1016/j.desal.2017.08.002](https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.08.002)
111. Lu Y., Hu Y., Xu D., Wu L. (2006). Optimum design of reverse osmosis seawater desalination system considering membrane cleaning and replacing, *Journal of Membrane Science*, Vol. 282, pp. 7–13, doi: [10.1016/j.memsci.2006.04.019](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.04.019)
112. Zhang L.-Zh., Li Zh.-X. (2013). Convective mass transfer and pressure drop correlations for cross-flow structured hollow fiber membrane bundles under low Reynolds numbers but with turbulent flow behaviors, *Journal of Membrane Science*, Vol. 434, pp. 65–73, doi: [10.1016/j.memsci.2013.01.058](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.01.058)
113. Cavaco Morão A. I., Brites Alves A., Geraldes V. (2008). Concentration polarization in a reverse osmosis/nanofiltration plate-and-frame membrane module, *Journal of Membrane Science*, Vol. 325, pp. 580–591, doi: [10.1016/j.memsci.2008.08.030](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.08.030)
114. Ren Zh., Yang Y., Zhang W., Liu J., Wang H. (2013). Modeling study on the mass transfer of hollow fiber renewal liquid membrane: Effect of the hollow fiber module scale, *Journal of Membrane Science*, Vol. 434, pp. 65–73, doi: [10.1016/j.memsci.2013.03.030](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.03.030)
115. Koutsoua C.P., Yiantsios S.G., Karabelas A.J. (2009). A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: Effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number, *Journal of Membrane Science*, Vol. 326, pp. 234–251, doi: [10.1016/j.memsci.2008.10.007](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.10.007)
116. 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](https://doi.org/10.21272/jes.2019.6(2).f4)

117. Huliienko S., Leshchenko O. (2020). Influence of operating pressure on concentration polarization layer resistance in revers osmosis, *Ukrainian Food Journal*, Vol. 8 (1), pp. 119-132, doi: 10.24263/2304- 974X-2019-8-1-13
118. Nikolskij, B. (2013). *Chemist's Handbook, 3 – Chemical Equilibrium and Kinetics. Properties*. Demand Ltd.
119. Yaws, C. (1999), *Chemical Properties Handbook: Physical, Thermodynamic, Environmental, Transport, Safety and Heals Related Properties for Organic and Inorganic Chemicals*. New York, McGraw-Hill.
120. Dytnerskii, Iu. I. (1986). *Baromembrane Processes. Theory and Calculation*. Moscow, Chemistry.
121. Perry R. (1997). *Perry's chemical engineering handbook* (7th ed). New York, McGraw-Hill.
122. Huliienko S. V., Korniienko Y. M., Metlina M. S., Tereshenko I. Y., Kaminskyi V. S. (2020). The correction of the dimensionless equation for the mass transfer coefficient estimation during the membrane modules regeneration. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 7(2), pp. F24–F29, [https://doi.org/10.21272/jes.2020.7\(2\).f4](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(2).f4)
123. Jafari M., D'haese A., Zlopasa J., Cornelissen E.R., Vrouwenvelder J.S., Verbeke K., Verliefe A., van Loosdrecht M.C.M., Picioreanu C. (2020). A comparison between chemical cleaning efficiency in lab-scale and full-scale reverse osmosis membranes: Role of extracellular polymeric substances (EPS). *Journal of Membrane Science*. Vol. 609, 118189, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118189>
124. Kavitskaya A. A., Knyazkova T.V., Zadorozhnaya I.V. (1991). *Membranes and membranes, technologies*. - K., 1991, - P. 136.
125. Wenshan Guo, Huu-Hao Ngo, Jianxin Li. (2012). A mini-review on membrane fouling. *Bioresource Technology*. 2012. Pp
126. M.A. Al-Obaidi a , C. Kara-Zaïtri b , I.M. Mujtaba. Evaluation of chlorophenol removal from wastewater using multi-stage spiral-wound reverse osmosis process via simulation. *Computers and Chemical Engineering*, 2018.
127. 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 дані (1 файл: 3,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 218 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>

128. 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.

129. Standard Management Systems QUALITY MANAGEMENT Textbook for students and post-graduate students on specialty 131 "Applied mechanics"/ S. Fomichov, A. Banin, I. Skachkov, V. Lysak, O. Gaievskiy, N. Yudina, Kiev: KIM, 2018 – P. 266

130. 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>.

131. Юдіна Н. В. Визначення циклічних залежностей в економіці України на основі аналізу окремих макроекономічних показників. Економічний Вісник НТУУ «КПІ». №13(2016). <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/80084/75643>

132. Yudina Nataliya. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets. Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". №17(2020). P. 372-383. URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/216380/216473>

133. 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. – Режим доступу : <http://futuolog.com.ua/publish/2/Zbirnyk.pdf#page=6>.

134. Yudina N. V. Multi-Layering Management Concept On The Basis Of The Innovative Development International Marketing and Management of Innovations, №4, 2019, Bielsko-Biala (Poland), №4, 2019. E-ISSN 2451-1668. DOI

10.5281/zenodo.3252973 URL : [http://immi.ath.bielsko.pl/wp-content/uploads/2019/07/IMMI\\_11\\_2019.pdf](http://immi.ath.bielsko.pl/wp-content/uploads/2019/07/IMMI_11_2019.pdf)

**ДОДАТОК А**  
**ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ**  
**РЕГЕНЕРАЦІЇ**

```

from math import *
from numpy import *
import matplotlib.pyplot as plot

def ro(t):
    return 1000-0.0133*t-0.0051*t**2+1*10**(-5)*t**3

def mu(t):
    return (1.787-0.05372*t+0.0008737*t**2-
0.000007013*t**3+0.00000002137*10**4)*10**(-3)

def Cs(t):
    cpt=0.0175*t**2+0.058383*t+74.463
    Cs=cpt*1000/100
    return Cs

def D25(c):
    ct = [ 0, 289.8, 579.6, 869.4, 1159.2, 1449.0, 1738.8, 2028.6, 2318.4, 2608.2,
2898.0, 3187.8, 3477.6, 3767.4, 4057.2, 4347.0, 4636.0, 4926.0, 5216.4, 5506.2,
5793.0]
    Dt = [12.8, 6.94, 7.41, 7.68, 7.86, 7.98, 8.06, 8.12, 8.15, 8.17, 8.18,
8.17, 8.17, 8.15, 8.13, 8.11, 8.08, 8.06, 8.03, 8.00, 7.97]
    n = len(ct)
    for i in range(n):
        for i in range(n):
            if c>=ct[i] and c<ct[i+1]:
                D=Dt[i]+(Dt[i+1]-Dt[i])/(ct[i+1]-ct[i])*(c-ct[i])
                break
    return D*10**(-10)

```

```
#membrane area
F=0.46

#temperature
t=25

#initial concentration
C0=0.1

#Equivalent diameter
de=0.7*10**(-3)

#Module length
L=0.26

#The cross-sectional area of the channel
S=3.675*10**(-4)

#volume of circulating cleaning solution
V1=100*10**(-3)

#mass flow rate of cleaning solution
G=float(input('Please input the mass flow rate'))

#density of the cleaning solution
ros = ro(t)

#velocity of cleaning solution
w=G/(ros*S)

#viscosity of cleaning solution
mus = mu(t)

#Reynolds number
Re = w*de*ros/mus

print('Re=', Re)

#diffusion coefficient
D = D25(C0)
```

```

#Schmidt number
Sc=mu/(rho*D)
print ("Schmidt number Sc=",Sc)
#Sherwood number
Sh=0.00045*Re**0.8*Sc**0.33*(de/L)
print ("Sherwood number Sh=",Sh)
#Mass transfer coefficient
beta=(Sh*D)/de
print ("Mass transfer coefficient B=",beta)
#equilibrium concentration
Cst = Cs(t)

#initial time
tau0=0
#initial mass
M0=0.002
#array volume
n=10**6
#step by time
h=10
#arrays
tau=zeros(n+1)
M=zeros(n+1)
#initial elements of array
tau[0]=tau0
M[0]=0
i=0

```

```

def f(tau, M):
    return beta*(Cst-(C0+M0/V1*(1-(M0-M)/M0)))*F
while M[i] < M0:
    i=i+1
    tau[i+1]=tau[i]+h
    k1=h*f(tau[i], M[i])
    k2=h*f(tau[i]+h/2, M[i]+k1/2)
    k3=h*f(tau[i]+h/2, M[i]+k2/2)
    k4=h*f(tau[i]+h, M[i]+k3)
    dM=1/6*(k1+2*k2+2*k3+k4)
    M[i+1]=M[i]+dM

print(M[i])
print('tau=',tau[i])

#for j in range(i):
    #print(tau[j], M[j])

plot.plot (tau, M)
plot.show ()

```

**ДОДАТОК Б.**

**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕГЕНЕРАЦІЇ**

## Результати експериментальних досліджень ефективності регенерації з використанням в якості тестового розчину знесолею води

Результати експериментальних досліджень наведені в таблиці Б.1

Таблиця Б.1 – Результати експериментальних досліджень регенерації мембранного модуля

№	1	2	3	4	5	6	7
m, кг	10,321	10	9,5	9	8,5	8	7,5
Δm, кг		0,321	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Δτ, с	0	109,29	164,91	165,51	176,36	172,86	174,06
Ср, мг/л	6	6	6	6	6	6	6
Ск, мг/л		29	25	19	16	15	14
t1, °C		12,6	12,5	12,4	12,4	12,4	12,5
t2, °C		12,7	12,95	12,6	12,4	12,375	12,45
P1, кгс/см <sup>2</sup>		0,8	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
P2, кгс/см <sup>3</sup>		0,85	0,84	0,82	0,82	0,82	0,82
P3, кгс/см <sup>4</sup>		0,84	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82
ts		12,65	12,725	12,5	12,4	12,3875	12,475
ρ, кг/м <sup>3</sup>		999,0612	999,051	999,0814	999,09477	999,096434	999,0848
μ, Па·с		0,001234	0,001231	0,001239	0,00124235	0,00124279	0,00124
Cs, мг/л		17,5	15,5	12,5	11	10,5	10
Cs, мас. частк		$1,75 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$1,101 \cdot 10^{-5}$	$1,0509 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Cs, мас %		0,001752	0,001551	0,001251	0,00110101	0,00105096	0,001001
Mv, кг/с		0,002937	0,003032	0,003021	0,00283511	0,00289251	0,002873
Vv, м <sup>3</sup> /с		$2,94 \cdot 10^{-6}$	$3,03 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{-6}$	$2,8377 \cdot 10^{-6}$	$2,8951 \cdot 10^{-6}$	$2,88 \cdot 10^{-6}$
w, м/с		0,008	0,008258	0,008228	0,00772157	0,00787791	0,007824
Ср, кг/м <sup>3</sup>		0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Ск, кг/м <sup>3</sup>		0,029	0,025	0,019	0,016	0,015	0,014
Ср, мас. частк		$6,01 \cdot 10^{-6}$	$6,01 \cdot 10^{-6}$	$6,01 \cdot 10^{-6}$	$6,0054 \cdot 10^{-6}$	$6,0054 \cdot 10^{-6}$	$6,01 \cdot 10^{-6}$
Ск, мас. частк		$2,9 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,6014 \cdot 10^{-5}$	$1,5014 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
Md, кг		$7,39 \cdot 10^{-6}$	$9,51 \cdot 10^{-6}$	$6,51 \cdot 10^{-6}$	$5,0045 \cdot 10^{-6}$	$4,5041 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
C*, мас%		26,35553	26,35593	26,35475	26,354232	26,3541675	26,35462
C*, кг/м <sup>3</sup>		263,3079	263,3092	263,3054	263,303754	263,303548	263,305
Cs, кг/м <sup>3</sup>		0,0175	0,0155	0,0125	0,011	0,0105	0,01
β, м/с		$5,58 \cdot 10^{-10}$	$4,76 \cdot 10^{-10}$	$3,25 \cdot 10^{-10}$	$2,343 \cdot 10^{-10}$	$2,1514 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-10}$
D25, м/с		$1,48 \cdot 10^{-9}$	$1,48 \cdot 10^{-9}$	$1,48 \cdot 10^{-9}$	$1,483 \cdot 10^{-9}$	$1,483 \cdot 10^{-9}$	$1,48 \cdot 10^{-9}$
D, м/с		$1,97 \cdot 10^{-9}$	$1,97 \cdot 10^{-9}$	$1,98 \cdot 10^{-9}$	$1,9852 \cdot 10^{-9}$	$1,9858 \cdot 10^{-9}$	$1,98 \cdot 10^{-9}$
Re		4,535126	4,691444	4,644845	4,34678318	4,43322802	4,413567
Sh		0,000198	0,000169	0,000115	$8,2616 \cdot 10^{-5}$	$7,5836 \cdot 10^{-5}$	$6,71 \cdot 10^{-5}$
Sc		625,8475	625,6896	626,1636	626,374625	626,401017	626,2163

## Продовження таблиці Б.1

№	8	9	10	11	12	13	14
m, кг	7	6,5	6	5,5	5	4,5	4
$\Delta m$ , кг	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\Delta t$ , с	176,91	176,81	179,92	183,86	182,41	184,32	188,64
Ср, мг/л	6	6	6	6	6	6	6
Ск, мг/л	13	12	11	11	10	10	10
t1, °С	12,5	12,6	12,6	12,6	12,65	12,6	12,5
t2? °С	12,75	12,57	12,6	12,55	13	13	13,3
P1, кгс/см2	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,81
P2, кгс/см3	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
P3, кгс/см4	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
ts	12,625	12,585	12,6	12,575	12,825	12,8	12,9
$\rho$ , кг/м3	999,06457	999,07	999,0679	999,0713	999,037321	999,0407475	999,027006
$\mu$ , Па·с	0,0012345	0,001236	0,001235	0,001236	0,001227532	0,001228397	0,00122494
Сs, мг/л	9,5	9	8,5	8,5	8	8	8
s, мас. частк	$9,509 \cdot 10^{-06}$	$9,01 \cdot 10^{-06}$	$8,51 \cdot 10^{-06}$	$8,51 \cdot 10^{-06}$	$8,00771 \cdot 10^{-06}$	$8,00768 \cdot 10^{-06}$	$8,0078 \cdot 10^{-06}$
Сs, мас %	0,0009509	0,000901	0,000851	0,000851	0,000800777	0,000800775	0,00080079
Mv, кг/с	0,0028263	0,002828	0,002779	0,002719	0,002741078	0,002712674	0,00265055
Vv, м3/с	$2,829 \cdot 10^{-06}$	$2,83 \cdot 10^{-06}$	$2,78 \cdot 10^{-06}$	$2,72 \cdot 10^{-06}$	$2,74372 \cdot 10^{-06}$	$2,71528 \cdot 10^{-06}$	$2,6531 \cdot 10^{-06}$
w, м/с	0,0076978	0,007702	0,007569	0,007407	0,007465902	0,007388512	0,00721941
Ср, кг/м3	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Ск, кг/м3	0,013	0,012	0,011	0,011	0,01	0,01	0,01
p, мас. частк	$6,006 \cdot 10^{-06}$	$6,01 \cdot 10^{-06}$	$6,01 \cdot 10^{-06}$	$6,01 \cdot 10^{-06}$	$6,00578 \cdot 10^{-06}$	$6,00576 \cdot 10^{-06}$	$6,0058 \cdot 10^{-06}$
к, мас. частк	$1,301 \cdot 10^{-05}$	$1,2 \cdot 10^{-05}$	$1,1 \cdot 10^{-05}$	$1,1 \cdot 10^{-05}$	$1,00096 \cdot 10^{-05}$	$1,00096 \cdot 10^{-05}$	$1,001 \cdot 10^{-05}$
Md, кг	$3,503 \cdot 10^{-06}$	$3 \cdot 10^{-06}$	$2,5 \cdot 10^{-06}$	$2,5 \cdot 10^{-06}$	$2,00193 \cdot 10^{-06}$	$2,00192 \cdot 10^{-06}$	$2,0019 \cdot 10^{-06}$
C*, мас%	26,355403	26,35519	26,35527	26,35514	26,35646113	26,356328	26,356862
C*, кг/м3	263,30749	263,3068	263,3071	263,3067	263,3108831	263,3104563	263,312169
Сs, кг/м3	0,0095	0,009	0,0085	0,0085	0,008	0,008	0,008
$\beta$ , м/с	$1,635 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	$1,15 \cdot 10^{-10}$	$1,12 \cdot 10^{-10}$	$9,06121 \cdot 10^{-11}$	$8,9673 \cdot 10^{-11}$	$8,762 \cdot 10^{-11}$
D25, м/с	$1,483 \cdot 10^{-09}$	$1,48 \cdot 10^{-09}$	$1,48 \cdot 10^{-09}$	$1,48 \cdot 10^{-09}$	$1,483 \cdot 10^{-09}$	$1,483 \cdot 10^{-09}$	$1,483 \cdot 10^{-09}$
D, м/с	$1,974 \cdot 10^{-09}$	$1,98 \cdot 10^{-09}$	$1,98 \cdot 10^{-09}$	$1,98 \cdot 10^{-09}$	$1,96444 \cdot 10^{-09}$	$1,96565 \cdot 10^{-09}$	$1,9608 \cdot 10^{-09}$
Re	4,3608982	4,358441	4,284917	4,190136	4,253330861	4,206291595	4,12155951
Sh	$5,797 \cdot 10^{-05}$	$4,97 \cdot 10^{-05}$	$4,07 \cdot 10^{-05}$	$3,98 \cdot 10^{-05}$	$3,22884 \cdot 10^{-05}$	$3,1934 \cdot 10^{-05}$	$3,128 \cdot 10^{-05}$
Sc	625,90012	625,9844	625,9528	626,0055	625,4792195	625,531787	625,321594

**ДОДАТОК В.**

**РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ**

## В.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 В.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	ppm (мг/дм <sup>3</sup> )	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

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

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

де  $\bar{x}$  – середнє арифметичне значення величини;

$\Delta_{\Sigma}$  – значення абсолютної похибки вимірювання, залежить від умов проведення експерименту та складається з суми систематичної та раптової похибок.

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

### В.1.1 Визначення похибок прямих вимірювань концентрації

Результати вимірювань концентрації наведені в таблиці В.2

Таблиця В.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:

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

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{1}{3} = 0,333$$

Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{0,333}{0,8944} = 0,3723$$

Розраховуємо сумарну похибку результату прямого вимірювання:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha n} \frac{S}{\sqrt{n}} = 1 + 2,6 \frac{0,8944}{\sqrt{6}} = 1,949$$

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

Дійсне значення концентрації можна записати:

$$C = \bar{C} \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{C} \pm 1,949 \text{ мг/дм}^3$$

### В.1.2 Визначення похибок прямих вимірювань маси

Результати вимірювань маси наведені в таблиці В.3

Таблиця В.3 – Результати вимірювань маси

№ досліду	Значення величини,	$(\bar{x} - x_i)^2$
1	0,66	0,00001838
2	0,65	0,0002041
3	0,68	0,0002469
4	0,69	0,0006612
5	0,66	0,00001838
6	0,65	0,0002041
7	0,66	0,00001838
	$\bar{x} = 0,6649$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,001371$

Визначаємо середньоквадратичну похибку прямого вимірювання:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,001371}{7-1}} = 0,01512$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,005}{3} = 0,001667$$

Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{0,001667}{0,01512} = 0,1102$$

Розраховуємо сумарну похибку результату прямого вимірювання:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{an} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,005 + 2,4 \frac{0,01512}{\sqrt{7}} = 0,01871$$

де  $t_{an}$  – коефіцієнт Стюдента, для імовірності 0,95 і кількості вимірювань  $n=7$  за таблицею наведеною в визначаємо  $t_{an} = 2,4$ .

Дійсне значення маси можна записати:

$$M = \bar{M} \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{M} \pm 0,01871 \text{ кг.}$$

### В.1.3 Визначення похибок прямих вимірювань температури

Результати вимірювань температури наведені в таблиці В.4

Таблиця В.4 – Результати вимірювань температури

№ досліду	Значення величини,	$(\bar{x} - x_i)^2$
1	13	0
2	12,8	0,04
3	12,6	0,16
4	13	0
5	13,1	0,01
6	13,1	0,01
7	13,4	0,16
8	13	0
	$\bar{x} = 13$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,38$

Визначаємо середньоквадратичну похибку прямого вимірювання:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,38}{8-1}} = 0,2330$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,1}{3} = 0,03333$$

Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{0,03333}{0,2330} = 0,1431$$

Розраховуємо сумарну похибку результату прямого вимірювання:

$$\Delta_\Sigma = \delta + t_{an} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,1 + 2,4 \frac{0,2330}{\sqrt{8}} = 0,2077$$

де  $t_{an}$  – коефіцієнт Стюдента, для імовірності 0,95 і кількості вимірювань  $n=8$  за таблицею наведеною в визначаємо  $t_{an} = 2,4$ .

Дійсне значення температури можна записати:

$$t = \bar{t} \pm \Delta_\Sigma = \bar{t} \pm 0,2077 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

#### **В.1.4 Визначення похибок прямих вимірювань тиску**

Результати вимірювань тиску на вході в мембранний модуль наведені в таблиці В.5

Визначаємо середньоквадратичну похибку прямого вимірювання:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,000002875}{8-1}} = 0,0006409$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,002}{3} = 0,0006667$$

Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{0,0006667}{0,0006409} = 1,040$$

Таблиця В.5 – Результати вимірювань тиску на вході в мембранний модуль

№ досліду	Значення величини,	$(\bar{x} - x_i)^2$
1	0,091	$1,265 \cdot 10^{-6}$
2	0,089	$7,656 \cdot 10^{-7}$
3	0,09	$1,562 \cdot 10^{-8}$
4	0,09	$1,562 \cdot 10^{-8}$
5	0,09	$1,562 \cdot 10^{-8}$
6	0,09	$1,562 \cdot 10^{-8}$
7	0,089	$7,656 \cdot 10^{-7}$
8	0,09	$1,562 \cdot 10^{-8}$
	$\bar{x} = 0,08988$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,000002875$

Розраховуємо сумарну похибку результату прямого вимірювання:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha n} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,002 + 2,4 \frac{0,0006409}{\sqrt{8}} = 0,002544$$

де  $t_{\alpha n}$  – коефіцієнт Стюдента, для імовірності 0,95 і кількості вимірювань  $n=8$  за таблицею наведеною в визначаємо  $t_{\alpha n} = 2,4$ .

Дійсне значення тиску можна записати:

$$P_1 = \bar{P}_1 \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{P}_1 \pm 0,002544 \text{ МПа.}$$

Результати вимірювань тиску на виході з мембранного модуля наведені в таблиці В.6

Визначаємо середньоквадратичну похибку прямого вимірювання:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,000004}{8-1}} = 0,0007559$$

Таблиця В.6 – Результати вимірювань тиску на виході з мембранного модуля

№ досліду	Значення величини,	$(\bar{x} - x_i)^2$
1	0,092	$1,562 \cdot 10^{-6}$
2	0,09	$5,625 \cdot 10^{-7}$
3	0,091	$6,25 \cdot 10^{-8}$
4	0,091	$6,25 \cdot 10^{-8}$
5	0,091	$6,25 \cdot 10^{-8}$
6	0,091	$6,25 \cdot 10^{-8}$
7	0,0895	$1,562 \cdot 10^{-6}$
8	0,0905	$6,25 \cdot 10^{-8}$
	$\bar{x} = 0,09075$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,000004$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,0005}{3} = 0,0001667$$

Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{0,0001667}{0,0007559} = 0,2205$$

Розраховуємо сумарну похибку результату прямого вимірювання:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{an} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,005 + 2,4 \frac{0,0007559}{\sqrt{8}} = 0,001141$$

де  $t_{an}$  – коефіцієнт Стюдента, для імовірності 0,95 і кількості вимірювань  $n=8$  за таблицею наведеною в визначаємо  $t_{an} = 2,4$ .

Дійсне значення тиску можна записати:

$$P_2 = \bar{P}_2 \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{P}_2 \pm 0,001141 \text{ МПа.}$$

Результати вимірювань тиску в проміжній ємності наведені в таблиці

В.7

Таблиця В.7 – Результати вимірювань тиску проміжній ємності

№ досліду	Значення величини,	$(\bar{x} - x_i)^2$
1	0,096	$7,563 \cdot 10^{-6}$
2	0,093	$6,25 \cdot 10^{-8}$
3	0,093	$6,25 \cdot 10^{-8}$
4	0,093	$6,25 \cdot 10^{-8}$
5	0,092	$1,563 \cdot 10^{-6}$
6	0,093	$6,25 \cdot 10^{-8}$
7	0,092	$1,563 \cdot 10^{-6}$
8	0,094	$5,625 \cdot 10^{-7}$
	$\bar{x} = 0,9325$	$\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2 = 0,0000115$

Визначаємо середньоквадратичну похибку прямого вимірювання:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,0000115}{8-1}} = 0,001282$$

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,002}{3} = 0,0006667$$

Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{0,0006667}{0,001282} = 0,5201$$

Розраховуємо сумарну похибку результату прямого вимірювання:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha n} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,02 + 2,4 \frac{0,001282}{\sqrt{8}} = 0,003088$$

де  $t_{\alpha n}$  – коефіцієнт Стюдента, для імовірності 0,95 і кількості вимірювань  $n=8$  за таблицею наведеною в визначаємо  $t_{\alpha n} = 2,4$ .

Дійсне значення тиску можна записати:

$$P_3 = \bar{P}_3 \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{P}_3 \pm 0,003088 \text{ МПа.}$$

#### В.1.4 Визначення похибок прямих вимірювань часу

Результати вимірювань часу наведені в таблиці В.8

Таблиця В.8 – Результати вимірювань часу

№ 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:

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

Визначаємо допустиме значення раптової похибки:

$$\Delta_p = \frac{\delta}{3} = \frac{0,01}{3} = 0,003333$$

Визначається довірчий інтервал, виражений в долях середньоквадратичної похибки:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_p}{S} = \frac{0,003333}{0,1728} = 0,01928$$

Розраховуємо сумарну похибку результату прямого вимірювання:

$$\Delta_{\Sigma} = \delta + t_{\alpha n} \frac{S}{\sqrt{n}} = 0,1 + 2,3 \frac{0,1728}{\sqrt{10}} = 0,1357$$

де  $t_{\alpha n}$  – коефіцієнт Стюдента, для імовірності 0,95 і кількості вимірювань  $n=10$  за таблицею наведеною в визначаємо  $t_{\alpha n} = 2,3$ .

Дійсне значення часу можна записати:

$$\tau = \bar{\tau} \pm \Delta_{\Sigma} = \bar{\tau} \pm 0,1357 \text{ с.}$$

## В.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  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$  абсолютне значення похибки визначаємо за залежністю [169]:

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

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

### В.2.1 Визначення похибок непрямих вимірювань швидкості руху рідини в каналах рулонованого мембранного модуля

Швидкість руху рідини в каналах за результатами вимірювань визначається за формулою:

$$W = \frac{G}{S\tau} = \frac{\Delta M}{\rho S\tau} \quad (\text{B.3})$$

При цьому густина промивного розчину  $\rho$  та площа попереченого перерізу каналу рулонованого модуля  $S$  є константами для умов проведення вимірювань, а зміна маси  $\Delta M$  та час  $\tau$  визначалися прямими вимірюваннями. Тоді похибка вимірювання швидкості руху рідини становитиме:

$$\begin{aligned} \Delta W &= \sqrt{\left(\frac{\partial W}{\partial \Delta M} \Delta_{\Sigma \Delta M}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \tau} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\rho S\tau} \Delta_{\Sigma \Delta M}\right)^2 + \left(-\frac{\Delta M}{\rho S\tau^2} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{0,0003675999,03120,41} \cdot 0,01871\right)^2 + \left(-\frac{0,7079}{0,0003675999,03120,41^2} \cdot 0,1358\right)^2} = \\ &= 2,215 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Отже результат визначення швидкості запишемо:

$$W = \bar{W} \pm \Delta W = \bar{W} \pm 2,215 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

## **В.2.2 Визначення похибок непрямих вимірювань коефіцієнта перенесення маси**

Коефіцієнт перенесення маси за результатами вимірювань визначається за формулою:

$$K = \frac{\Delta M (C_{\kappa} - C_{\Pi})}{\tau \left( C^P + \frac{C_{\kappa} + C_{\Pi}}{2} \right) F} \quad (\text{B.4})$$

При цьому за умов вимірювань константою є концентрація насичення  $C^P$  та площа поверхні мембран  $F$ , решта величин визначаються за прямими вимірюваннями. Похибка непрямого вимірювання буде визначатися:

$$\Delta K = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial \Delta M} \Delta_{\Sigma \Delta M}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \tau} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial C_k} \Delta_{\Sigma C_k}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial C_n} \Delta_{\Sigma C_n}\right)^2} \quad (\text{A.5})$$

Для спрощення запису знайдемо окремо значення похідних в рівняння (A.5).

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta}{\partial \Delta M} &= \frac{(C_k - C_n)}{\tau \left(C^P + \frac{C_k + C_n}{2}\right) F} = \frac{6 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}}{120,43 \left(357 - \frac{6 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}}{2}\right) \cdot 0,43} = 1,011 \cdot 10^{-7} \\ \frac{\partial \beta}{\partial \tau} &= \frac{\Delta M (C_k - C_n)}{\tau^2 \left(C^P + \frac{C_k + C_n}{2}\right) F} = \frac{-0,707 \cdot (6 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3})}{120,43^2 \cdot \left(357 - \frac{6 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}}{2}\right) \cdot 0,43} = -3,5937 \cdot 10^{-10} \\ \frac{\partial \beta}{\partial C_k} &= \frac{\Delta M}{\tau F} \left( \frac{C_k - C_n}{2 \left(\frac{C_k}{2} + \frac{C_n}{2} - C^P\right)^2} - \frac{1}{\frac{C_k}{2} + \frac{C_n}{2} - C^P} \right) = \\ &= \frac{0,707}{120,43 \cdot 0,43} \left( \frac{6 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \left(\frac{6 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2} - 357\right)^2} - \frac{1}{\frac{6 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2} - 357} \right) = 3,575 \cdot 10^{-5} \\ \frac{\partial \beta}{\partial C_n} &= \frac{\Delta M}{\tau F} \left( \frac{C_k - C_n}{2 \left(\frac{C_k}{2} + \frac{C_n}{2} - C^P\right)^2} + \frac{1}{\frac{C_k}{2} + \frac{C_n}{2} - C^P} \right) = \\ &= \frac{0,707}{120,43 \cdot 0,43} \left( \frac{6 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \left(\frac{6 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2} - 357\right)^2} + \frac{1}{\frac{6 \cdot 10^{-3}}{2} + \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2} - 357} \right) = -3,575 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

Тоді похибка непрямого вимірювання становитиме:

$$\Delta K = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial \Delta M} \Delta_{\Sigma \Delta M}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial \tau} \Delta_{\Sigma \tau}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial C_k} \Delta_{\Sigma C_k}\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial C_{II}} \Delta_{\Sigma C_{II}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(1,001 \cdot 10^{-7} \cdot 0,01871\right)^2 + \left(-5,937 \cdot 10^{-10} \cdot 0,1356\right)^2 + \left(3,575 \cdot 10^{-5} \cdot 1,949 \cdot 10^{-3}\right)^2 + \left(-3,575 \cdot 10^{-5} \cdot 1,949 \cdot 10^{-3}\right)^2} =$$

$$9,856 \cdot 10^{-8}$$

Отже результат визначення коефіцієнта перенесення маси запишемо:

$$K = \bar{K} \pm \Delta K = \bar{K} \pm 9,856 \cdot 10^{-8} \text{ м/с.}$$

**ДОДАТОК Г.**

**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 XVII міжнародної  
науково-практичної конференції студентів,  
аспірантів і молодих вчених**

**”РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ТА ОБЛАДНАННЯ”**

25-26 листопада  
Київ 2019

**Збірник тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції студентів,  
аспірантів і молодих вчених ”Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”**

**УДК 66.081.63**

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕГЕНЕРАЦІЇ  
ЗАБРУДНЕНИХ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ**

магістрант Терещенко ЛЮ. к.т.н., доц. Гулієнко С.В.

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

Прісна вода – це один з найважливіших ресурсів. Вона використовується для забезпечення питною водою, що є однією з найважливіших біологічних потреб, а також для виробництва більшості харчових продуктів та напоїв. Але, на сьогодні, проблема дефіциту прісної води через антропогенні та техногенні фактори набуває глобального масштабу. В такій ситуації важливість технологій підготовки прісної води стає все більш значущою [1].

В останні десятиліття мембранні процеси, зокрема зворотній осмос та нанофільтрація, широко використовується для виробництва питної води та очищення води. Широкий діапазон застосувань обумовлюється зменшенням стадій обробки, неперервною та автоматизованою роботою, легким масштабним переходом, високою ефективністю розділення та меншим споживанням енергії порівняно з конкуруючими процесами [1].

Але існує ряд обмежень у розвитку та повномасштабному впровадженню мембранних процесів. Одне з основних обмежень виникає внаслідок забруднення мембран, що спричиняється різними твердими частинками, неорганічними солями, органічними речовинами, що зменшує продуктивність, збільшує необхідний вхідний тиск, погіршує якість продукту та суттєво скорочує строк служби мембран. Було зроблено багато спроб для вирішення цієї проблеми, які включали використання попередньої підготовки, зміну властивостей мембрани, зміну гідродинамічних умов в модулі та процес регенерації мембран [1].

В попередній роботі було розроблено метод регенерації спіральних мембранних модулів з використанням локального закипання при розрідженні

Збірник тез доповідей XVII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" та математична модель, що описує масообмін при розчиненні в каналі спірального мембранного модуля [1, 2]. Ці результати дозволяють розробити математичну модель, яка може передбачати продуктивність мембран після регенерації. При цьому, в математичну модель входить, коефіцієнт масовіддачі, який зазвичай визначають з критеріальних рівнянь. В результаті попередньої роботи було отримано такого рівняння [1]:

$$\text{Sh} = 0,394 \cdot \text{Re}^{0,84} \cdot \text{Sc}^{0,33} \left( \frac{d_e}{L} \right) \quad (1)$$

де  $\text{Sh} = \beta d_e / D$  – критерій Шервуда,;  $\text{Re} = w \cdot d_e \cdot \rho / \mu$  – критерій Рейнольдса;  $\text{Sc} = \mu / D \rho$  – критерій Шмідта;  $d_e = 2\delta_e$  – еквівалентний діаметр, м;  $L$  – довжина мембранного каналу, м;  $D$  – коефіцієнт дифузії,  $\text{m}^2/\text{c}$ ;  $w$  – швидкість промивного розчину,  $\text{m}/\text{c}$ ;  $\rho$  – густина промивного розчину,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості промивного розчину,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ .

Однак це рівняння отримане лише для однієї солі (хлориду натрію), що не дає змоги встановити вплив складу осаду на інтенсивність масообміну при його вилученні з поверхні мембрани, а відповідно і на тривалість процесу регенерації. Також, це зменшує точність прогнозування продуктивності мембранного модуля після регенерації. Тому уточнення рівняння один з урахуванням можливих варіацій у складі утвореного осаду є доцільним.

Метою даної роботи є встановлення впливу хімічного складу осаду на інтенсивність процесу регенерації.

#### Перелік посилань:

1. Lialka M, Korniyenko Y., Gulienko S. Mathematical simulation of fouled membrane modules regeneration. *Ukrainian Food Journal*. 2015. Vol. 4. Is. 3. P. 481–493.
2. Korniyenko Y., Gulienko S. Mathematical Model of Dissolving Inorganic Fouling in Spiral Wound Membrane Module. *The Advanced Science Journal*, 2014. Vol. 4. P. 47-50.



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 XVIII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених

### ”РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ”

21-22 травня  
Київ 2020

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

UDC 66.081.63

**THE CORRECTING OF THE RELATIONSHIP FOR THE DETERMINATIONS OF THE MASS TRANSFER COEFFICIENTS DURING THE SPIRAL WOUND MEMBRANE MODULES REGENERATION**

student Tereshenko I.Y., post graduated student Metlina M.S., assistant professor, Ph.D., Huliienko S.V., senior lecturer Ph.D., Novokhat O.A.

**National Technical University of Ukraine**

**«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

**АНОТАЦІЯ:** наведені результати учтнюючих експериментів інтенсивності масообміну при регенерації забруднених спіральних мембранних модулів, встановлено, що з урахуванням утонень критеріальна залежність в логарифмічних координатах залишається лінійною.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** мембранний модуль, забруднення, регенерація, масообмін, критеріальна залежність

**ABSTRACT:** The results of the correcting experiments for the determination of the mass transfer intensity during the spiral wound regeneration are represented. It was defined that with taking into account the dimensionless relationship remains linear in the logarithmic coordinates.

**KEY WORDS:** membrane module, fouling, regeneration, mass transfer, dimensionless relationship

The polarization phenomena lead to the drop in the transmembrane flux. After establishment of the steady state conditions, the further decreasing in flux does not occurs. Despite that the polarization phenomena are reversible, practically the continuous decreasing of the flux is often observed. This means that the flux deceleration is occurring. Such deceleration is the result of the fouling which can be designated as reversible or irreversible scaling on the membrane of the rejected particles such as colloids, macromolecules salts etc [1].

The fouling formation process is difficult for the theoretical description [1, 2]. Even fro the known solution it depends on physical and chemical parameters

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

such as concentration, temperature, pH, ionic strange, and also on specific of the interactions among the molecules, possibility of the hydrogen bond and dipole interactions [1, 2].

In previous works the method of the spiral wound membrane modules regeneration were developed with using of the local boiling under subatmospheric pressure and the mathematical model which describes the mass transfer in the membrane channels of the spiral wound module [3, 4]. These results allow developing of the calculation technique which can predict the membrane productivity after regeneration. For this purposes the dimensionless equations were defined in a form [3]:

$$\text{Sh} = 0,394 \text{Re}^{0,84} \text{Sc}^{0,33} \left( \frac{d_e}{L} \right) \quad (1)$$

where  $\text{Sh} = \beta d_e / D$  is the Sherwood number;  $\text{Re} = w \cdot d_e \cdot \rho / \mu$  is the Reynolds number;  $\text{Sc} = \mu / D \rho$  is the Schmidt number;  $d_e = 2\delta_e$  is the equivalent diameter, m;  $L$  is the membrane channel length, m;  $D$  is the diffusivity coefficient,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $w$  is the velocity of the cleaning solution;  $\text{m/s}$ ;  $\rho$  is the density of the cleaning solution,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mu$  is the dynamic viscosity of the cleaning solution,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ .

However, during the determination of the dimensionless equations for the defining of the diffusivity coefficients the Wikly-Chang equations was used which gives the inaccurate results for the case of the inorganic salts solutions. The more accurate results can be obtained with using of the reference data determined experimentally with corrections for the temperature change [5].

With aim of the corrections of the dimensionless equation the additional experimental researches were carried out. The obtained results were treated with using of the refined data about the diffusion coefficients (figure 1).

It can be seen from figure 1 that the relationship between the Sherwood number and the Reynolds number is still linear with corresponds to the assumptions done in previous researches [3, 4].

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

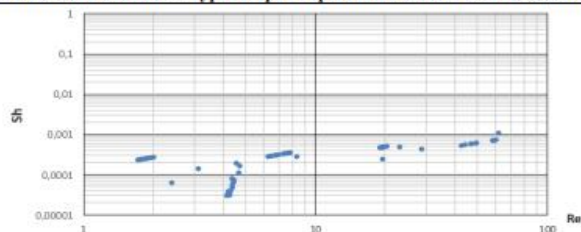


Figure 1 – The dependence of the Sherwood number from the Reynolds number

Thus, the results of the correcting experiments with previously obtained data allow correction of the dimensionless equation with taking into account the more accurate values of the diffusivity coefficients.

#### References:

1. Муддер М. Введение в мембранную технологию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 513 с. ил.
2. Shirazi S., Lin C.-J., Chen D. "Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes – A critical review", *Desalination*, Vol. 250, 2010, pp. 236-248.
3. Korniyenko Y., Gulienko S. "Mathematical model of dissolving inorganic fouling in spiral wound membrane module", *The Advanced Science Journal*, issue 4, 2014, pp. 47-50
4. Korniyenko Y., Gulienko S., Lialka M. Mathematical simulation of fouled modules regeneration // *Ukrainian Food Journal*. – 2015. – Volume 4 – P. 481–493.
5. Hulienko S.V., Protsiuk O.O., Gatilov K.O., Kaminskyi V.S. "The estimation of the feed solution influence on the concentration polarization layer resistance during reverse osmosis", *Journal of engineering science*, Volume 6, Issue 2, 2019, pp. F24-F28



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 XIX міжнародної  
науково-практичної конференції студентів,  
аспірантів і молодих вчених**

**”РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ТА ОБЛАДНАННЯ”**

25-26 листопада  
Київ 2020

XIX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

UDC 66.081.63

**THE CORRECTING OF THE RELATIONSHIP FOR OF THE MASS  
TRANSFER COEFFICIENTS DETERMINATIONS DURING THE  
MEMBRANE MODULES REGENERATION**

student Tereschenko I.Y., post graduated student Metlina M.S.,  
assistant professor, Ph.D., Hulienko S.V.

**National Technical University of Ukraine**

**«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

***Анотація:** Отримано уточнене критеріальне рівняння для розрахунку коефіцієнтів перенесення маси при регенерації мембранних модулів.*

***Ключові слова:** мембранний модуль, регенерація, критеріальна залежність*

***Abstract:** The adjusted dimensionless relationship for calculation of transfer coefficients during the membrane modules regeneration was obtained.*

***Key words:** membrane module, regeneration, dimensionless relationship*

The fouling of the membrane surface is one of the most important problem in exploitation of membrane plants including reverse osmosis. Despite the development of membrane with fouling resistance, methods of pretreatment and optimization of working parameters in module, the necessity of periodic regeneration is still actual question [1]

In realization of regeneration process the prediction of membrane properties after regeneration procedure are important and insufficiently researched topic, with was the object of the previous work [2]. However, in this work it was used the dimensionless equation, which was obtained with some admissions, which are not quite agree with real conditions. Therefore, the aim of this research is the correction

XIX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"

of the dimensionless equation for calculation of transfer coefficients during the membrane modules regeneration with using both previous and new experimental data

The researches were carried out with domestic membrane modules TFC-75 type. The imitative fouling of NaCl were deposited on the membrane surface. The regeneration process was carried out by the rinsing under subatmospheric pressure. The deionized water was used as cleaning agent. The flow rate of cleaning solution was measured by weight method. The concentration of NaCl in the input and output of membrane apparatus was measured by conductometric method. The data processing was carried out using the theory of similarity methodology [3].

During the data processing, as it was in previous work [2] the exponential quantity for Schmidt number was  $n = 0,33$ . In this case the problem of dimensionless equation obtaining was reduced to determination the exponential quantity for Reynolds number  $m$  and the factor  $A$ .

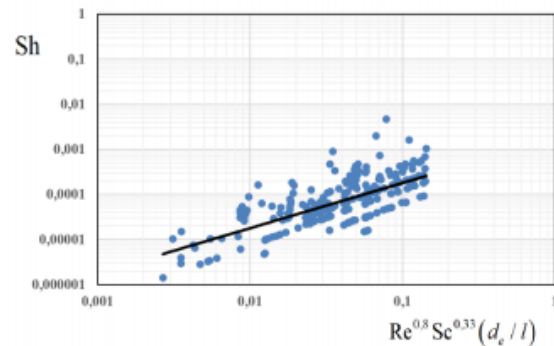
Depending from Schmidt number value all range of the result was divided into the 17 groups within them the Sc values was varied less to 5%. For each group, using the means squares method according to the technique described in [4], the approximation of relationship  $Sh = f(Re)$  was carried out, the mean value of exponential quantity  $m'$  was defined, which was specified. As a result, the value of exponential quantity was defined as  $m = 0,8$ . After that the approximation of generalized relationship was carried out (figure 1).

Approximation of the generalized dimensionless relationship allows to receive equation in the form:

$$Sh = 0,0018Re^{0,8} Sc^{0,33} \left( \frac{l}{d_e} \right) \quad (2)$$

As the result of the approximation the exponent of the generalized dependence is 1,0023, which means that there is no need in further clarification of the factors in the dimensionless equation.

XIX міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання"



**Figure 1 – The generalized dimensionless relationship**

The sample correlation coefficient of dependence (2) is  $r^* = 0.712$ , and statistical analysis confirms the existence of the dependence [4].

#### References:

1. Jafari M., D'haese A., Zlopasa J., Cornelissen E.R., Vrouwenvelder J.S., Verbeke K., Verliefde A., van Loosdrecht M.C.M., Picioreanu C. (2020). A comparison between chemical cleaning efficiency in lab-scale and full-scale reverse osmosis membranes: Role of extracellular polymeric substances (EPS). *Journal of Membrane Science*. Vol. 609, 118189, doi: [10.1016/j.memsci.2020.118189](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118189)
2. Korniyenko Y., Gulienko S., Lialka M. (2015). Mathematical simulation of fouled membrane modules regeneration. *Ukrainian Food Journal*. 2015. Vol. 4. Is. 3, pp. 481-493.
3. Радченко Л.Б. Моделивання процесів хімічної технології: Навч. Посібн. / Л.Б. Радченко, І.О. Мікульюк. – К.: ВПН ВПК «Політехніка», 2005. – Ч.1. – 126 с.
4. Ахназарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. // Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1985.- 327 с.: ил.

#### JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Volume 7, Issue 2 (2020)

Huliienko S. V., Korniyenko Y. M., Metlina M. S., Tereshenko I. Y., Kaminskyi V. S. (2020). The correction of the dimensionless equation for the mass transfer coefficient estimation during the membrane modules regeneration. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 7(2), pp. F24–F29, doi: [10.21272/jes.2020.7\(2\).f4](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(2).f4)



#### The Correction of the Dimensionless Equation for the Mass Transfer Coefficient Estimation during the Membrane Modules Regeneration

Huliienko S. V.<sup>1\*</sup>, Korniyenko Y. M.<sup>1</sup>, Metlina M. S.<sup>1</sup>, Tereshenko I. Y.<sup>1</sup>, Kaminskyi V. S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Peremohy Ave., 03056 Kyiv, Ukraine; <sup>2</sup> Technical University of Kosice, 9, Letna St., 042 00 Kosice, Slovak Republic

#### Article info:

Paper received: September 27, 2020  
The final version of the paper received: December 12, 2020  
Paper accepted online: December 21, 2020

#### \*Corresponding email:

[sergii.gulienko@gmail.com](mailto:sergii.gulienko@gmail.com)

**Abstract.** The cleaning or regeneration of fouled membrane modules is an essential procedure in the membrane equipment operation. Despite the development of some successful cleaning techniques, the predictions of the membrane separation process operation parameters after regeneration is still an unsolved problem. In our previous works, the attempt to develop the methodology of estimating the membrane productivity after the regeneration of the fouled spiral wound membrane modules by cleaning the subatmospheric pressure has been made. However, this methodology requires some improvement, including the correction of the dimensionless equation to calculate the mass transfer coefficient. In this work, a set of additional experiments was carried out, and the corrections of the mass transfer correlation were done using both new and previously obtained experimental data. As a result, the improved dimensionless equation was contained as  $Sh = 0.00045 Re^{0.8} Sc^{0.33} (d_e/l)$ . This equation is valid in the range of Reynolds number variation of 0.4–60.0 for the case of the regeneration of spiral wound modules and can be used for the prediction of the permeate flux after the regeneration procedure.

**Keywords:** reverse osmosis, fouling, cleaning, mass transfer correlation, diffusion coefficient, Reynolds number, Schmidt number, Sherwood number

#### 1 Introduction

The fouling of membrane surface is one of the main problems during exploitation of the membrane equipment, including reverse osmosis [1]. Despite the development of membranes with antifouling properties [2], methods of pretreatment [3], and optimization of the operating parameters in membrane modules [4], the necessity for periodic cleaning and regeneration is still significant [5].

During the regeneration process realization, the membrane separation properties' prediction after the regeneration procedure is still important and not well understood. In our previous work [6], an attempt to develop such a prediction technique has been made. However, in that work, the dimensionless equation was used, which was obtained with some assumptions, which in many cases do not correspond to the real conditions.

Therefore, the current article aims to improve the dimensionless relationship for calculating the mass transfer coefficient during the regeneration of membrane

modules. In this research, both new and previously obtained experimental data were used.

#### 2 Literature Review

The fouling layer's composition on the reverse osmosis membranes' surface could significantly depend on operation conditions and the chemical composition of feed solution [7–10]. The most typical kinds of fouling include the precipitations of the mineral salts, primarily sodium, magnesium and calcium [7, 8], and the organic compounds [7, 9]. Considering the negative economic impact of all kinds of fouling [10] each of them's specific character, it is necessary to choose the specific strategy of the regeneration for each particular case. In the current research, the primary attention was considered on mineral scaling with is common in many practical cases.

The primary method of the regeneration of fouled membrane modules is cleaning, mostly with using of chemical reagents [11]. The use of cleaning without

reagent is also can be applied [12]. The cleaning effect can be enhanced by using some physical processes, namely ultrasound impact [13], injection into the flow of the cleaning agent, air bubbles [14], and local boil of the cleaning agent under subatmospheric pressure [6]. The regeneration methods application can allow removing up to 91 % of the fouling layer material [13]. The presence of a large volume of experimental data and techniques can permit the optimization of the membrane separation system [13, 15]. However, in most cases, the evaluation of cleaning effectivity and the prediction of the membrane conditions after cleaning is carried out based on the empirical data, which are not systematized at the appropriate level. The physical phenomena, which take place during regeneration, including the mass transfer process between the cleaning solution and the substance in the fouling layer, are insufficiently studied.

The theory of similarity and dimension analysis methods is an effective tool for analyzing transfer phenomena under complicated conditions such as turbulent flow. These methods allow approximating empirical data in the relationships among the dimensionless parameters [16]. For the analysis of the membrane processes, that methods showed their effectiveness for the description of the mass transfer in plate-and-frame modules [16], hollow fiber modules [16, 18], and channels with spacers, which can be considered as models of plate-and-frame or spiral wound modules [19]. Dimension more negligible mass transfer correlations are also used to analyze concentration polarization intensity [17].

In previous work [6], the attempt of obtaining the mass transfer correlation for the case of spiral wound membrane module regeneration. This correlation was used for the evaluation of membrane separation process properties after regeneration. However, during the data analysis for obtaining the dimensionless equation, the diffusivities' values in solutions were calculated using the Wilke–Chang equation. The mentioned equation has overestimated the values of solute diffusivities. In work [20], it was shown that using the experimental data represented in reference literature is a more reliable way. Therefore, in the current work, the dimensionless equation's improvement for calculation of the mass transfer coefficients during membrane modules regeneration is carried out. As mentioned above, the latest data were uses as well as the previously obtained results.

### 3 Research Methodology

#### 3.1 Materials

The experiments were carried out using commercially available membrane modules TFC-75 manufactured by DOW Filmtec (USA). The membrane surface area of these membranes is  $F = 0.46 \text{ m}^2$ , the cross-section of the membrane channel is  $S = 3.675 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ , the spacer thickness is  $\delta = 0.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , the module length is  $l = 0.26 \text{ m}$  [21].

The artificial fouling layer was deposited on the membrane surface. The sodium chloride (NaCl) was used

as a fouling material. The deionized water was used as a cleaning solution.

#### 3.2 Description of the experimental set-up

In the current research, the existing experimental set-up (Figure 1) was used. It includes the electronic scales 1, the tank with cleaning solution 2, the control valves 3 and 5, the receiver 4, the cleaning chamber 6, the membrane module 7, the vacuum pump 8, the atmospheric valve 9, the intermediate tank 10, the system for sampling 11, the personal computer 12, the electric heater 13.

In the experimental set-up, the regeneration is realized in the cleaning under subatmospheric pressure produced by vacuum pump 9. The subatmospheric pressure also provides the pressure difference required for the cleaning solution flow.

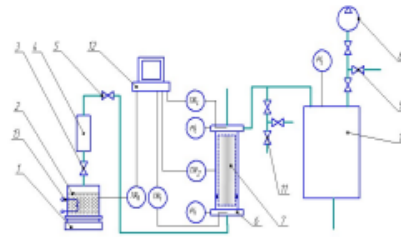


Figure 1 – The scheme of the experimental set-up

The block of chromel-copel thermocouples fits the experimental set-up. This allows to measure the temperature in the cleaning chamber 6 on the input and output of the membrane module 7 and the tank with cleaning solution 2 and in the environment. The vacuum gauges are also installed to measure the subatmospheric pressure on the input and output of membrane module 7 and in the intermediate tank 10.

For measuring the cleaning solution's concentration after passing through the membrane module 7, the system for sampling 11 is included. The concentration of NaCl in the cleaning solution is measured using the portable TDS-meter.

#### 3.3 Experimental procedure and main measurements

Since this research is dedicated to defining the dimensionless equation (mass transfer correlation), as it was done in works [16–19], it is necessary to provide the measurements the parameters with are involved in the dimensionless numbers. It should be noticed that the correlation is searched in the following form:

$$\text{Sh} = A \text{Re}^n \text{Sc}^m \left( \frac{d_e}{l} \right)^k, \quad (1)$$

where  $\text{Sh} = k \cdot d_e / D$  is the Sherwood number;  $\text{Re} = w \cdot d_e \cdot \rho / \mu$  is the Reynolds number;  $\text{Sc} = \mu / (D \rho)$  is the

Schmidt number;  $d_e = 2\delta$  is the equivalent diameter, m;  $k$  is mass transfer coefficient, m/s;  $D$  is the solute diffusivity,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $w$  is the cleaning solution velocity, m/s;  $\rho$  is the cleaning solution density,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\mu$  is the cleaning solution dynamic viscosity, Pa·s.

In this case, it is necessary to measure the mass transfer coefficient and cleaning solution velocity. For the determination of the physical parameters, namely diffusivity, density, and dynamic viscosity, the measurements of the temperature, pressure, and solute concentration in the cleaning solution are required.

During the investigation, such parameters as pressure, temperature, and concentration NaCl in the cleaning solution were measured directly. The cleaning solution's velocity was measured by the weight method, namely the change in mass of the tank with cleaning solution 2 during the predetermined period of time was recorded. For the determination of the mass transfer coefficient, the main equation of mass transfer was used [6]:

$$M = k (C^* - C_1) F \tau, \quad (2)$$

$M$  is the mass of removed fouling, kg;  $C^*$  is the equilibrium concentration of solvent,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_1$  is the solvent concentration in cleaning solution,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\tau$  is the process duration, s.

From equation (2), it can be obtained:

$$k = \frac{M}{(C^* - C_1) F \tau}, \quad (3)$$

The mass of removed fouling was defined from material balance [6]:

$$M = G(x_0 - x_1) \tau, \quad (4)$$

$G$  is the mass flow rate of cleaning solution,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $x_0$  and  $x_1$  are the mass fractions of NaCl on the input and output of the membrane module 7.

The density and dynamic viscosity and also the equilibrium concentration of NaCl were determined by the reference data, represented in [22, 23], as it was done in work [20]. For the determination of diffusivities, the experimental data represented in [24]. The corrections of the tabulated data were carried out in the same way as in work [20].

The experimental procedure was following. The cleaning solution (the deionized water with predetermined concentration at the level of 5–15  $\text{mg}/\text{dm}^3$ ) was loaded in tank 2, and using the electric heater 13, the temperature of the cleaning solution was brought to the predetermined value. Simultaneously, using the vacuum pump 8 the subatmospheric pressure was created in the intermediate tank 10. Using the control valves 3 and 5 the predetermined values of the pressure in the cleaning chamber 6 on the input and output of the membrane module 7 were set. Thereat the mass flow rate and velocity of cleaning solution and the temperature values on the input and output of the membrane module were measured, and also the sampling of cleaning solution on the output of membrane module was carried out using the system 11.

The values of temperature were continuously recorded on personal computer 12 using the program unit IndexTem.

### 4 Results

The set of improving experiments were carried out according to the described above technique. The results obtained in previous work [6] were also used during data processing. Since in the experiments only one material, namely NaCl, used as fouling model, for providing the variation in Schmidt number, the investigation was carried out under different temperatures. In this case, the lower level corresponded to the minimum ambient temperature, which was 14°C. The upper level was chosen considering the thermal stability of the membrane. Therefore, the maximum temperature was 40°C. The cleaning chamber's subatmospheric pressure was varied in a range of 0.06–0.095 MPa, which corresponds to the absolute pressure of 0.005–0.04 MPa. The cleaning solution velocity was varied in a range of 0.0006–0.0827 m/s. These operation conditions correspond to the variation of Reynolds number in a range of 0.4–60 and the Schmidt number change in a range 568–630.

Since in the works [16, 18, 19], the exponent for Schmidt number in a wide range of operation conditions remains constant and equal  $n = 0.33$ . Current research assumed that this value of the mentioned exponent is still reasonable. In this case, obtaining the dimensionless equation is confined to the determination of exponent  $m$  for Reynolds number and factor  $A$ . This assumption's verification should be done by a similar experimental investigation in the wider range of Schmidt number variation.

During the experimental data processing, all the data set were divided on the ranges, in which the values of the Schmidt number varies down to 2 %. For each range, the determination of the exponent in relationship  $\text{Sh} = A \text{Re}^n$  was carried out. That relationship is linearized in logarithm coordinates; therefore, this coordinate system was used. The graphical relationships  $\text{Sh} = f(\text{Re})$  for some rangers of Schmidt number values are represented in Figures 2–5.

In all considered ranges, the graphical relationships in logarithm coordinate systems can be approximated by linear dependence, allowing generalizing the experimental results.

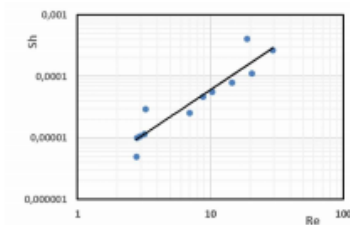


Figure 2 – The dependence of the Sherwood number from Reynolds number ( $\text{Sc} = 610\text{--}613$ )

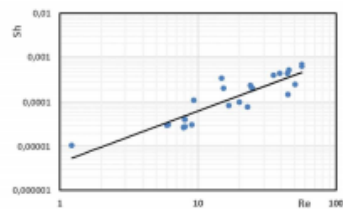


Figure 3 – The dependence of the Sherwood number from Reynolds number (Sc = 620-621)

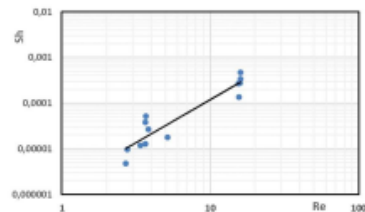


Figure 4 – The dependence of the Sherwood number from Reynolds number (Sc = 626-628)

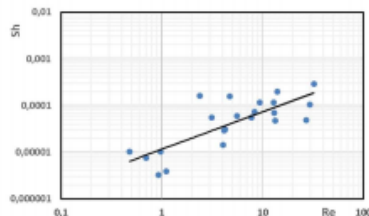


Figure 5 – The dependence of the Sherwood number from Reynolds number (Sc = 633-634)

## 5 Discussion

Since the graphical relationships, represented in Figures 2-5, are linear, the dependence in a form  $\lg(\text{Sh}) = \lg(\text{Re})$  were linearly approximated by the mean square method, according to the technique represented in [25]. The slopes of these dependences are equal to the exponents for the Reynolds number  $m$ . The calculated values of these parameters are shown in table 1. The mean value of the slope is equal to  $m' = 1.155$ , which was used for the generalization of experimental results. For this purpose, the relationship  $\text{Sh} = f(\text{Re}^{1.155}\text{Sc}^{0.33})$  was plotted in the logarithm coordinate system, as is shown in Figure 6.

Table 1 – The values of the exponent for Reynolds number

The value of Schmidt number (Sc)	The value of exponent $m$
580-584	2.059
596-599	1.742
600-603	1.016
604-606	1.021
610-613	1.450
614-617	1.088
620-621	1.173
622-623	1.168
624-625	1.001
626-628	1.885
629-630	0.401
631-632	0.757
633	0.795
634	0.099
The mean value	1,155

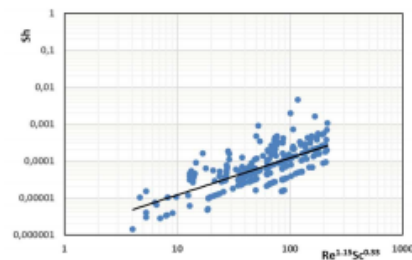


Figure 6 – The generalized dependence  $\text{Sh} = f(\text{Re}^{1.155}\text{Sc}^{0.33})$

It can be seen from Figure 6, the generalized dependence  $\text{Sh} = f(\text{Re}^{1.155}\text{Sc}^{0.33})$  can be approximated linearly in the logarithm scale. The mean squares method allows to determinate the slope, which is equal to  $k = 0.69$ . From this the correction of the exponent for Reynolds number can be done, namely  $m = m' \cdot k = 0.8$ . Keeping the value of the exponent for Schmidt number as  $n = 0.33$ , the final generalization was realized as the relationship in the form  $\text{Sh} = f(\text{Re}^{0.8}\text{Sc}^{0.33}(d_e/l))$ , as it is shown in Figure 7.

The generalized dimensionless dependence can be approximated with the exponent (slope of the line in logarithm coordinate system) equal to 1,0023, which can be accepted as 1 with satisfying accuracy for engineering calculations. In this case, the final dimensionless relationship would be written in the following form:

$$\text{Sh} = 0.00045 \text{Re}^{0.8} \text{Sc}^{0.33} \left(\frac{d_e}{l}\right). \quad (5)$$

The obtained dimensionless equation is valid in the range of Reynolds number variation of 0.4-60 for the regeneration of spiral wound modules.

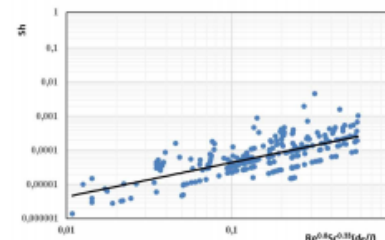


Figure 7 – The generalized dimensionless dependence

The sampling correlation coefficient of dimensionless equation (5) is equal to  $r^* = 0.712$ . The statistical analysis, which was carried out according to the technique represented in [25], proves the relationship's existence.

## References

- Tow E. W., Warsinger D. M., Truworthly A. M., Swaminathan J., Thiel G. P., Zubair S. M., Myerson A. S., Lienhard V J. H. (2018). Comparison of fouling propensity between reverse osmosis, forward osmosis, and membrane distillation. *Journal of Membrane Science*. Vol. 556, pp. 352-364, doi: 10.1016/j.memsci.2018.03.065
- Qi Y., Tong T., Zhao S., Zhang W., Wang Zh., Wang J. (2020). Reverse osmosis membrane with simultaneous fouling- and scaling-resistance based on multilayered metal-phytic acid assembly. *Journal of Membrane Science*. Vol. 601, 117888. doi: 10.1016/j.memsci.2020.117888
- Shon H.K., Vigneswaran S., Cho J. (2008). Comparison of physico-chemical pretreatment methods to seawater reverse osmosis: Detailed analyses of molecular weight distribution of organic matter in initial stage. *Journal of Membrane Science*. Vol. 320, Issues 1-2, pp. 151-158, doi: 10.1016/j.memsci.2008.03.063
- Nguyen Th.-T., Kook S., Lee Ch., Field R. W., Kim I. S. (2019). Critical flux-based membrane fouling control of forward osmosis: Behavior, sustainability, and reversibility. *Journal of Membrane Science*. Vol. 570-571, pp. 380-393, doi: 10.1016/j.memsci.2018.10.062
- Jafari M., D'haese A., Zlopasa J., Cornelissen E.R., Vrouwenvelder J.S., Verbeke K., Verliefde A., van Loosdrecht M.C.M., Picioreanu C. (2020). A comparison between chemical cleaning efficiency in lab-scale and full-scale reverse osmosis membranes: Role of extracellular polymeric substances (EPS). *Journal of Membrane Science*. Vol. 609, 118189, doi: 10.1016/j.memsci.2020.118189
- Korniyenko Y., Gulienko S., Lialka M. (2015). Mathematical simulation of fouled membrane modules regeneration. *Ukrainian Food Journal*. 2015. Vol. 4. Is. 3, pp. 481-493.
- Fortunato, L., Alshahri, A. H., Farinha, A. S. F., Zakzouk, I., Jeong, S., Leiknes, T. (2020). Fouling investigation of a full-scale seawater reverse osmosis desalination (SWRO) plant on the Red Sea: Membrane autopsy and pretreatment efficiency. *Desalination*. Vol. 496, 114536, doi: 10.1016/j.desal.2020.114536.
- Song W., Lee, L. Y., Liu E., Shi X., Ong S. L., Ng H. Y. Spatial variation of fouling behavior in high recovery nanofiltration for industrial reverse osmosis brine treatment towards zero liquid discharge. *Journal of Membrane Science*, 609, 118185, doi: 10.1016/j.memsci.2020.118185
- Wu Y.-H., Tong X., Zhao X.-H., Bai Y., Ikuno N., Ishii K., Hu H.-Y. (2021). The molecular structures of polysaccharides affect their reverse osmosis membrane fouling behaviors. *Journal of Membrane Science*. In Press, Journal Pre-proof, 118984, doi: 10.1016/j.memsci.2020.118984
- Jafari M., Vanoppen M., van Agtmaal M.C., Cornelissen E.R., Vrouwenvelder J. S., Verliefde A., van Loosdrecht M.C.M., Picioreanu C. (2021). Cost of fouling in full-scale reverse osmosis and nanofiltration installations in the Netherlands, *Desalination*. Vol. 500, 114865, doi: 10.1016/j.desal.2020.114865

Considering that Schmidt's exponent was assumed according to the data from other researches, namely [16, 18, 19], the dimensionless equation needs further corrections, namely the verification of the value of the exponent  $n$ . This means that further investigation in this area should be dedicated to clarifying the impact of the fouling layer's chemical composition on the mass transfer intensity.

## 6 Conclusions

As a result of the corrective experiments, the improved dimensionless equation for calculating the mass transfer coefficient during membrane modules regeneration was obtained. The proposed equation is valid in the range of Reynolds number variation of 0.4-60 for the regeneration of spiral wound modules. The obtained equation would define the required time of regeneration according to the technique developed in work [6] with higher accuracy than the previously defined similar equation. The dependence (5) should be further improved, namely the value of exponent for Schmidt number  $n$ . This means that the impact of the fouling layer's chemical composition on the mass transfer intensity, which is the aim of further research in this area.

11. Madaeni S.S., Samieirad S. (2010). Chemical cleaning of reverse osmosis membrane fouled by wastewater, *Desalination*. Vol. 257, pp. 80-86, doi: 10.1016/j.desal.2010.03.002
12. Ibrahim S., Nagasawa H., Kanazashi M., Tsuru T. (2020). Chemical-free cleaning of fouled reverse osmosis (RO) membranes derived from bis(triethoxysilyl)ethane (BTESE), *Journal of Membrane Science*, 601, 117919, doi: 10.1016/j.memsci.2020.117919
13. Li Y.-Sh., Shi L.-C., Gao X.-F., Huang J.-G. (2016). Cleaning effects of oxalic acid under ultrasound to the used reverse osmosis membranes with an online cleaning and monitoring system, *Desalination*. Vol. 390, pp. 62-71, doi: 10.1016/j.desal.2016.04.008
14. Dayarathne H.N.P., Choi J., Jang A. (2017). Enhancement of cleaning-in-place (CIP) of a reverse osmosis desalination process with air micro-nano bubbles, *Desalination*. Vol. 422, pp. 1-4, doi: 10.1016/j.desal.2017.08.002
15. Lu Y., Hu Y., Xu D., Wu L. (2006). Optimum design of reverse osmosis seawater desalination system considering membrane cleaning and replacing, *Journal of Membrane Science*, Vol. 282, pp. 7-13, doi: 10.1016/j.memsci.2006.04.019
16. Zhang L.-Zh., Li Zh.-X. (2013). Convective mass transfer and pressure drop correlations for cross-flow structured hollow fiber membrane bundles under low Reynolds numbers but with turbulent flow behaviors, *Journal of Membrane Science*, Vol. 434, pp. 65-73, doi: 10.1016/j.memsci.2013.01.058
17. Cavaco Morão A. I., Brites Alves A., Geraldes V. (2008). Concentration polarization in a reverse osmosis/nanofiltration plate-and-frame membrane module, *Journal of Membrane Science*, Vol. 325, pp. 580-591, doi: 10.1016/j.memsci.2008.08.030
18. Ren Zh., Yang Y., Zhang W., Liu J., Wang H. (2013). Modeling study on the mass transfer of hollow fiber renewal liquid membrane: Effect of the hollow fiber module scale, *Journal of Membrane Science*, Vol. 434, pp. 65-73, doi: 10.1016/j.memsci.2013.03.030
19. Koutsoua C.P., Yiantsios S.G., Karabelas A.J. (2009). A numerical and experimental study of mass transfer in spacer-filled channels: Effects of spacer geometrical characteristics and Schmidt number, *Journal of Membrane Science*, Vol. 326, pp. 234-251, doi: 10.1016/j.memsci.2008.10.007
20. 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).4.
21. Huliienko S., Leshchenko O. (2020). 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
22. Nikolskij, B. (2013). *Chemist's Handbook, 3 – Chemical Equilibrium and Kinetics*. Properties. Demand Ltd.
23. Yaws, C. (1999). *Chemical Properties Handbook: Physical, Thermodynamic, Environmental, Transport, Safety and Health Related Properties for Organic and Inorganic Chemicals*. New York, McGraw-Hill.
24. Dytynskii, Iu. I. (1986). *Baromembrane Processes. Theory and Calculation*. Moscow, Chemistry.
25. Perry R. (1997). *Perry's chemical engineering handbook* (7th ed). New York, McGraw-Hill.

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національний університет «Чернігівська політехніка» (Україна)**  
**Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» (Україна)**  
**Oerlikon Barmag GmbH (Німеччина)**  
**Херсонський національний технічний університет (Україна)**  
**Донбаська державна машинобудівна академія (Україна)**  
**Національний авіаційний університет (Україна)**  
**ТОВ «БАХ-Інжиніринг» (Україна)**  
**Інженерна академія України**  
**Академія наук вищої освіти України**  
**Лодзький технічний університет (Польща)**  
**Технічний університет в Кошице (Словаччина)**  
**Thyssenkrupp Materials International GmbH (Німеччина)**  
**Національний університет «Львівська політехніка» (Україна)**  
**Батумський державний університет ім. Ш. Руставелі (Грузія)**  
**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»**  
**Українське товариство механіки ґрунтів, геотехніки і фундаментобудування**  
**Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки (Україна)**



**Матеріали X міжнародної  
науково-практичної конференції**

## «КОМПЛЕКСНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ»

Том 1

**29 - 30 квітня 2020 р.  
м. Чернігів**

УДК 66.081.63

Huliienko Serhii, Ph.D.  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
[sergii.gulienko@gmail.com](mailto:sergii.gulienko@gmail.com)

Oleh Novokhat, Ph.D.  
Maryna Metlina, post graduate student  
Ihor Tereshchenko, master degree student

### THE ESTIMATION OF INFLUENCE OF SCHMIDT NUMBER ON THE MASS TRANSFER INTENSITY DURING THE SPIRAL WOUND MEMBRANE MODULES REGENERATION

The membrane separation processes, especially reverse osmosis, are widely used in chemical industry for the purification or concentration of the different mixtures and solutions. The most common design of the membrane apparatus includes the spiral wound membrane modules [1, 2].

The main problems in exploitation of the membrane equipment are the concentration polarization and the fouling formation on the membrane surface. These phenomena consist in following. During the membrane separation process, the transmembrane flux decreases with time due to accumulation of the solute in boundary layer. Also in this conditions the scaling of the solution components may occur. The concentration polarization and fouling formation determined the additional resistances to the mass transfer through the membrane. The irreversible fouling may also cause the damage of the membrane skin layer [1, 2].

With aim to reduce negative influence of the fouling formation in previous work the novel technique of the regeneration. This method involves the removing the material from fouling layer on contact with the cleaning solution by solving and dispersion the solids into the fluid flux. With aim of decreasing diffusive resistance of boundary layer it was proposed the using of subatmospheric pressure and the temperature of the evaporation of the cleaning solution under the applied conditions. In that case the in bulk of cleaning solution the vapour bubbles are formed, which are collapsed with time in the flux of the cleaning solution. The forming and collapsing of vapour bubbles would cause the intensive mixing in the bulk of the cleaning solution and decreasing of boundary layer thickness. The process is considered as diffusion controlled mass transfer. [3, 4].

For these conditions the dimensionless equation for the mass transfer coefficients calculations were defined in a form [4]:

$$Sh = 0,394 Re^{0,34} Sc^{0,33} \left( \frac{d_e}{L} \right) \quad (1)$$

where  $Sh = \beta d_e / D$  is the Sherwood number;  $Re = w d_e \rho / \mu$  is the Reynolds number;  $Sc = \mu / D \rho$  is the Schmidt number;  $d_e = 2 \delta_c$  is the equivalent diameter, m;  $L$  is the channel length, m;  $\beta$  is the mass transfer coefficient, m/s;  $D$  is the diffusivity coefficient,  $m^2/c$ ;  $w$  is the cleaning solution velocity, m/s;  $\rho$  is the cleaning solution velocity, m/s;  $\mu$  is the cleaning solution viscosity, Pa·s;  $\delta_c$  is the channel width, m.

However, during the defining the dimensionless equations some assumption were made and some of them were not sufficiently substantiated. The value of the power for Schmidt number was accepted according recommendation represented in [5]. Moreover, the values of the diffusivity coefficients were calculated using the Wilke-Chang equation, however, this relationship is suitable for the case of the organic compound solutions and its using for mineral salts solutions may lead to the drawbacks [6]. There for with aim to correction of the dimensionless equation the set of additional test experiments were carried out and during the data processing the experimental values of the diffusivity coefficients were used [7]. The

temperature correction facto according to [8] was also used. The results of the experiments are shown on the figure 1.

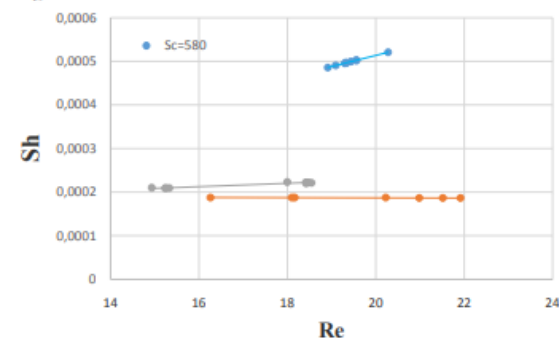


Fig. 1 – The dependance of the Sherwood number from Reynolds number during different values of the Schmidt number

During the additional test experiments the sodium chloride was used as test cake layer which was formed by coating of the concentrated solution on the membrane surface of the spiral wound module TFC-75. The deionized water was used as the cleaning solution. The variations in the Schmidt number was provided by temperature variation.

It can be seen from figure 1 that the results are controversial, since the change of the Schmidt number in a range 610-620 do not lead to significant changes in the Sherwood number whereas the decreasing the Sc value to 580 lead to increasing of the Sh value more than two times. The probably reasons of this difference are the nonobservance of the same conditions during the experiments (in particular the difference in applied pressure) and the narrow range of the Reynolds number change in a case of experiments under  $Sc=580$ .

Therefore, the further research is needed for the determination of the influence the Schmidt number on the mass transfer intensity. In particular, it is reasonable to carry out the experiments with different chemical composition of the fouling layer.

#### Reference

1. Мулдер М. Введение в мембранную технологию: Пер. с англ./ М. Мулдер. – М.: Мир, 1999. – 513 с. ил.
2. Shirazi S., Lin C.-J., Chen D. "Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes – A critical review", *Desalination*, Vol. 250, 2010, pp. 236-248
3. Korniyenko Y. Mathematical model of dissolving inorganic fouling in spiral wound membrane module / Korniyenko Y., Gulienko S. // *The Advanced Science Journal*. – issue 4. – 2014. – pp. 47-50
4. Korniyenko Y. Mathematical simulation of fouled modules regeneration / Korniyenko Y., Gulienko S., Lialka M. // *Ukrainian Food Journal*. – 2015. – Volume 4 – P. 481–493.
5. Кафаров В.В. Основы массопередачи. / В.В. Кафаров. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1979. – 439 с., ил.
6. Huliienko S.V. The estimation of the feed solution influence on the concentration polarization layer resistance during reverse osmosis / Huliienko S.V., Protsiuk O.O., Gatilov K.O., Kaminskyi V.S. // *Journal of engineering science*. – Volume 6, Issue 2, 2019. – pp. F24-F28
7. Дыгнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет. / Ю.И. Дыгнерский. – М.: Химия, 1985.
8. Thibodeaux L., Mackay D. Handbook of Chemical Mass Transport in the Environment. – New York CRC Press, 2011. – 616 p.



№53/2021

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

Vatsdav Blažek — candidate of philological sciences

Philip Matoušek — doctor of pedagogical sciences, professor

Alicja Antczak — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Katarzyna Brzozowski — PhD, associate professor

Roman Gurjev — MD, Professor

Stepan Filippov — Doctor of Social Sciences, Associate Professor

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

Anastasia Plahitij — Doctor of Economics, professor

Znanstvena misel journal

Slovenska cesta 8, 1000 Ljubljana, Slovenia

Email: info@znanstvena-journal.com

Website: www.znanstvena-journal.com

**TECHNICAL SCIENCE****THE EVALUATION OF THE TIME OF THE FOULED MEMBRANE MODULES REGENERATION WITH IMPROVED DATA*****Tereshenko I.,  
Gulienko S.****National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",***Abstract**

The calculations of the time of the membrane modules regeneration using the corrected dimensionless equation were carried out. It was defined that proposed equation allows avoiding the overestimation of regeneration time. The results show that assumption about the negligible influence of the concentration change in the cleaning solution is reliable.

**Keywords:** fouling, membrane, regeneration, dimensionless equation, calculation, cleaning solution, mass transfer coefficient.

Membrane fouling is one of the main problems during the exploitation of membrane equipment, which determines the necessity of periodic membrane regeneration [2].

Membrane fouling can be classified as reversible fouling and irreversible fouling, of which the distinction is entirely dependent on the context in which membranes are operated and cleaned [5]. Reversible fouling (including backwashable and non-backwashable) occurs due to the cake layer or concentration polarization of materials at the membrane rejection surface. Fouling of membranes is caused by complex physical and chemical interactions between the various fouling constituents in the feed and between these constituents and the membrane surface. Mass transport can lead to the attachment, accumulation, or adsorption of materials onto membrane surfaces and/or within membrane pores. Normally, foulants can be classified into the following four categories [5]: Particulates, Organic, Inorganic, Micro-biological organisms.

There are the following groups of methods of membrane regeneration [3]: mechanical, hydrodynamic, physical, chemical and combined, which include in part the techniques of the first four methods.

In previous work, the method of the spiral wound membrane modules regeneration with using of vacuuming. The mathematical model of this process, which allows calculating the regeneration process duration, also was developed [4]. However, in that work it was used the dimensionless equation, which was obtained with several assumptions that lead to the overestimation of the mass transfer coefficient. This equation was corrected in work [1]. The current work aims to carry out the improved evaluation of the regeneration time taking into account the corrected dimensionless equation. Also, in work [4] the influence of the changes in cleaning solution concentration did not take into account, therefore, the improved evaluation has also aimed to verify the reliability of that assumption.

The process of mass removal from the membrane surface is described by the equation [4]:

$$\frac{dM}{d\tau} = K \left( C^* - C_s - \frac{M}{V} \left( 1 - \frac{M_n - M}{M_n} \right) \right) F \quad (1)$$

The starting conditions are:  $M = 0$  for  $\tau = 0$ .

The determination of mass transfer coefficient  $K$ , unlike work [4], in the current research the following dimensionless equation was used [1]:

$$Sh = 0.00045 Re^{0.8} Sc^{0.33} (d_e / l) \quad (2)$$

The solving was carried out by the Runge-Kutta, the calculations were done using the program written in the programming language Python in two variants (with and without taking into account the concentration change in cleaning solution).

The calculations were carried out for the case of the fouling which consists of  $FeCl_3$  (this material used as model foulant in experimental researches) with an initial mass of 0.002 kg, and an operating temperature of 25°C. The mass flow rate of the cleaning solution in a range of 0.001-0.025 kg/s, which correspond to the real working condition of the regeneration setup. The results of the calculation are represented in table 1.

As it can be seen from table 1, the difference in the time of complete cake layer removal for the calculation with and without taking into account the concentration change in the cleaning solution is negligible, therefore, the assumption made in work [4] is reasonable. At the same time, the duration of the regeneration differs significantly. In work [1] it was pointed out that previous mass transfer correlation was obtained with overestimated values of diffusivities. The results of improved calculation show that this led to the overestimation of the regeneration duration in 4-5 times, therefore, for the practical calculation the corrected dimensionless equation should be used.

The dependence of the duration of processing of the flow regime is shown in Figure 1

Table 1

The mass flow rate of the cleaning solution, G, kg/s	With taking into account the concentration change in cleaning solution		Without taking into account the concentration change in cleaning solution	
	Reynolds number, Re	The time of complete cake layer removal, $\tau$ , s	Reynolds number, Re	The time of complete cake layer removal, $\tau$ , s
0,0010	2,163	141000	2,163	141119
0,0025	5,407	67740	5,410	67801
0,0050	10,814	38910	10,814	38942
0,0075	16,221	28130	16,221	28154
0,0100	21,628	22350	21,628	22366
0,0125	27,035	18700	27,035	18710
0,0150	32,442	16160	32,442	16171
0,0175	37,849	14290	37,849	14295
0,0200	43,256	12840	43,256	12846
0,0225	48,663	11690	48,663	11691
0,0250	54,070	10740	54,070	10746

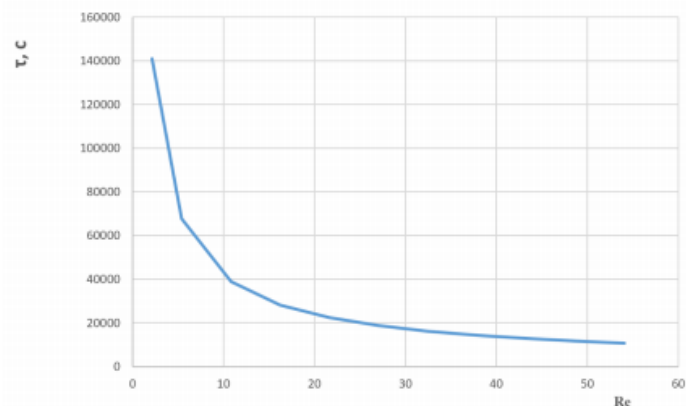


Figure 1. Dependence of regeneration duration on Reynolds number

As can be seen from the results of the calculation presented in Figure 1, with increasing Reynolds number value, the duration of regeneration at first decreases sharply, and then stabilizes. The conclusion made in [4] that is most rational to conduct the process at the values of the Reynolds test in the range of  $Re = 20-30$ , is also justified, with considering of the improving data.

#### Conclusion

The use of the corrected dimensionless equation allows predicting the duration of the membrane modules regeneration with higher accuracy. Moreover, the assumption about the negligible impact of the concentration change in the cleaning solution on the mass transfer coefficient value appears to be reasonable.

#### References

1. Hulienko S. V., Kornienko Y. M., Metlina M. S., Tereshenko I. Y., Kaminskyi V. S. (2020). The correction of the dimensionless equation for the mass transfer coefficient estimation during the membrane

modules regeneration. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 7(2), pp. F24-F29. [https://doi.org/10.21272/jes.2020.7\(2\).f4](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(2).f4)

2. Jafari M., D'haese A., Zlopasa J., Cornelissen E.R., Vrouwenvelder J.S., Verbeke K., Verliefde A., van Loosdrecht M.C.M., Picioreanu C. (2020). A comparison between chemical cleaning efficiency in lab-scale and full-scale reverse osmosis membranes: Role of extracellular polymeric substances (EPS). *Journal of Membrane Science*. Vol. 609, 118189. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118189>

3. Kavitskaya A. A., Knvazkova T.V., Zadorozhnaya I.V. (1991). *Membranes and membranes, technologies*. - K., 1991, - P. 136.

4. Korniyenko Y., Gulienko S., Lialka M. (2015). Mathematical simulation of fouled membrane modules regeneration. *Ukrainian Food Journal*. 2015. Vol. 4. Is. 3, pp. 481-493

5. Wenshan Guo, Huu-Hao Ngo, Jianxin Li. (2012). A mini-review on membrane fouling. *Biore-source Technology*. 2012. pp. 2734.

Ще дві тези доповідей очікують публікації.

**ДОДАТОК Д.**

**СПЕЦИФІКАЦІЯ ДО СКЛАДАЛЬНОГО КРЕСЛЕННЯ**