

ОСНОВИ МЕМБРАННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Лабораторний практикум

Укладач: С.В. Гулієнко



КПІ ім. Ігоря Сікорського

2025



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

Основи мембранної технології

Лабораторний практикум

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування
обладнання хімічної інженерії» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» (G11
Машинобудування (за спеціалізаціями))

Укладач: С.В. Гулієнко

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

УДК 66.08
075

Укладачі: *Гулієнко Сергій Валерійович*, канд. техн. наук, доц.

Рецензент *Сокольський О. Л.*, докт. техн. наук., проф.

Відповідальний редактор *Степанюк А.Р.*, канд. техн. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 08.05.2025 р.)
за поданням вченої ради інженерно-хімічного факультету
(протокол № 3 від 24.03.2025 р.)*

075 **Основи мембранної технології** [Електронний ресурс] : лабораторний практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спец. 133 «Галузеве машинобудування» » (G11 Машинобудування (за спеціалізаціями)) / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.В. Гулієнко– Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 73 с.

В навчальному посібнику наведено рекомендації до виконання лабораторних робіт з освітнього компоненту «Основи мембранної технології». Наведено теоретичні основи досліджуваних процесів та обладнання, описи експериментальних установок, методики проведення досліджень та обробки результатів вимірювання. Також наведені рекомендації з техніки безпеки при роботі на експериментальних установках. Навчальний посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (G11 Машинобудування (за спеціалізаціями)).

УДК 66.08

Реєстр. № НП 24/25-422. Обсяг 3,2 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056

<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ В ПРОТОЧНОМУ РЕЖИМІ	7
1.1 Вступ	7
1.2 Мета та задачі дослідження	8
1.3 Теоретичні основи процесу зворотного осмосу.....	8
1.4 Опис експериментальної установки.....	15
1.5 Техніка безпеки	19
1.6 Методика проведення експериментів.....	20
1.7 Обробка результатів вимірювань	20
Контрольні запитання	24
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ В РЕЦИРКУЛЯЦІЙНОМУ РЕЖИМІ	25
2.1 Вступ.....	25
2.2 Мета та задачі дослідження.....	25
2.3 Теоретичні відомості щодо роботи мембранного обладнання в проточному режимі.....	26
2.3.1 Каскадні режими роботи	29
2.4 Опис експериментальної установки	30
2.5 Техніка безпеки.....	31
2.6 Методика проведення експериментів	32
2.7 Обробка результатів вимірювань	34
Контрольні запитання	36
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МЕМБРАННОГО ГАЗОРОЗДІЛЕННЯ....	37
3.1 Вступ.....	37

3.2 Мета та задачі дослідження.....	37
3.3 Теоретичні відомості	38
3.4 Опис експериментальної установки	45
3.5 Техніка безпеки.....	49
3.6 Головні вимірювання	50
3.7 Методика обробки експериментальних даних	51
3.8 Контрольні завдання.....	51
Контрольні запитання	52
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ	55
4.1 Вступ.....	55
4.2 Мета та задачі дослідження.....	55
4.3 Теоретичні відомості	56
4.4 Опис експериментальної установки	61
4.5 Техніка безпеки.....	64
4.6 Методика проведення експериментів	65
4.7 Обробка результатів досліджень.....	66
4.8 Аналіз отриманих результатів та основні висновки	69
Контрольні запитання	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	71

ВСТУП

Мембранні процеси складають основу великої кількості промислових процесів розділення та сфера їх застосування постійно розширяється. До найбільш поширених сфер застосування мембранних процесів належать процеси водоочищення, розділення і концентрування розбавлених розчинів, очищення та концентрування харчових продуктів, напоїв, лікарських препаратів, паливно-мастильних матеріалів, хімічних розчинників, розділення азеотропних сумішей, очищення стоків тощо [1-4]. Значення мембранних технологій в хімічній інженерії постійно зростає, тому при підготовці бакалаврів за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» пропонується вибірковий освітній компонент «Основи мембранної технології»¹.

Мембранні технології є надзвичайно наукоємними і вони інтенсивно розвиваються, а кількість досліджень в галузі щороку зростає. При цьому значна частина досліджень припадає на експериментальні роботи, в ході яких визначаються найважливіші дані про мембранні процеси. Тому для набуття досвіду проведення експериментальних досліджень в галузі мембранних технологій в курсі «Основи мембранної технології» згідно робочої навчальної програми дисципліни (силабусу) передбачено 18 годин лабораторних занять [5].

¹ На час написання даного посібника (січень-березень 2025 року) новий перелік спеціальностей вже був введений в дію, однак нові назви освітніх програм ще не були затверджені. На цей час освітній компонент «Основи мембранної технології» вивчали студенти 2021 року набору, які навчалися за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». Відповідно до нового переліку дана спеціальність відповідає спеціальності G11 Машинобудування (за спеціалізаціями), а запланована назва освітньої програми – «Інженерія промислових процесів та обладнання». Планується, що за цією освітньою програмою навчатимуться студенти 2025 року набору, а студенти набору 2022-2024 років продовжать навчання за попередньою освітньою програмою. Зміна назви освітньої програми не впливає на цикл лабораторних робіт з освітнього компоненту «Основи мембранної технології».

Основні завдання циклу лабораторних занять з освітнього компоненту «Основи мембранної технології» [5]:

- допомогти студентам систематизувати, закріпити і поглибити знання теоретичного характеру;
- навчити студентів прийомам вирішення практичних завдань, сприяти оволодінню навичками та вміннями виконання вимірів, розрахунків, графічних та інших видів завдань;
- навчити роботі з науковою та довідковою літературою, технічною документацією і схемами;
- формувати вміння вчитися та працювати самостійно.

Цикл лабораторних робіт включає 4 роботи, дві з яких присвячені мембранним процесам, а одна – питанням експлуатації мембранного обладнання.

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ В ПРОТОЧНОМУ РЕЖИМІ

1.1 Вступ

В хімічній промисловості процеси розділення сумішей на компоненти мають надзвичайно важливе значення. Для здійснення процесів розділення рідких сумішей застосовують традиційні методи – перегонку, ректифікацію, екстракцію, адсорбцію тощо. Проте найбільш універсальним методом є розділення з використанням напівпроникних мембран (мембранні методи), які здобули поширення не лише в хімічній промисловості [1-4, 6-8].

В хімічній і нафтохімічній промисловості мембранні методи застосовують для розділення азеотропних сумішей, очищенні і концентрування розчинів, очищення чи виділення високомолекулярних сполук з розчинів, що містять низькомолекулярні компоненти тощо. В біотехнології та медичній промисловості – для виділення і очищення біологічно активних речовин, вакцин, ферментів і т. д. В харчовій промисловості – для концентрування фруктових соків, молока, отримання високоякісного цукру тощо. Найбільш широкого застосування мембранні процеси знайшли при обробці води і водних розчинів, очищенню стічних вод [1, 8].

До найбільш поширених мембранних процесів належить зворотний осмос який широко застосовується для опріснення природних вод (у тому числі і морських), а також для очищення та опріснення промислових стічних вод. Про це свідчить світова динаміка зростання за останні 30 років продажу зворотно осмотичних мембран, випуску установок та

об'ємів води, що опріснюється методом зворотного осмосу. Найбільшими споживачами води, опрісненої методом зворотного осмосу, є країни близького та середнього сходу (Саудівська Аравія, Кувейт, Об'єднані Арабські Емірати) – 60-70% і Північна Америка – 20-17% [8].

1.2 Мета та задачі дослідження

Метою роботи є експериментальне дослідження процесу зворотного осмосу [6].

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі дослідження [6]:

1. Експериментально визначити продуктивність мембранного модуля.
2. Експериментально визначити селективність мембрани за загальним солемістом.
3. Зіставити отримані результати з теоретичними даними.

1.3 Теоретичні основи процесу зворотного осмосу

Зворотний осмос належить до групи мембранних процесів, рушійною силою яких є градієнт тиску, – баромембранних процесів [9].

В основі баромембранних процесів лежить явище осмосу – самовільного проникнення розчинника через мембрану до встановлення рівноваги. Рівновага в таких системах характеризується величиною осмотичного тиску. Він виникає при контакті двох розчинів різних концентрацій (або розчину і чистого розчиннику) через мембрану, яка здатна пропускати розчинник і затримувати розчинену речовину. Така ситуація схематично ілюструється на рисунку 1.1 [1, 9].

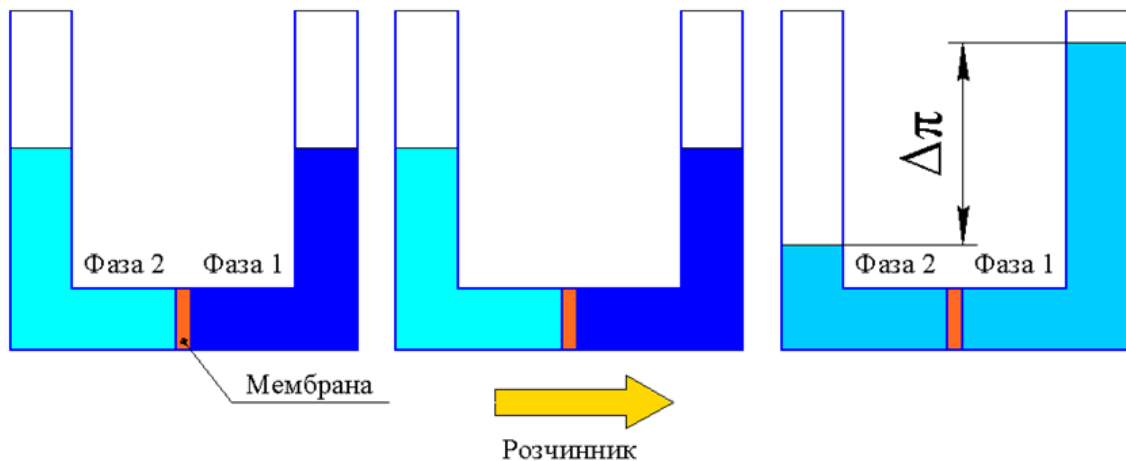


Рисунок 1.1 – Схема осмотичних процесів

Мембрана розділяє дві рідкі фази: концентровану фазу 1 і розбавлену – 2. При ізотермічних умовах хімічний потенціал розчинника в концентрованій розбавленій (фазі 2) буде перевищувати хімічний потенціал молекул розчинника в концентрованій фазі. Різниця хімічних потенціалів викликає потік молекул розчинника з розведеної фази (високий хімічний потенціал) в концентровану фазу (низький хімічний потенціал) як показано на рисунку 1.1. Цей процес триватиме доти, поки в системі не настане осмотична рівновага, тобто до досягнення рівності хімічних потенціалів молекул розчинника в обох фазах. Різниця гідродинамічного тиску в колінах посудини має назву осмотичного тиску [1, 6, 9].

Зворотній осмос застосовується, коли необхідно відділити від розчинника низькомолекулярні розчинені речовини, наприклад мінеральні солі чи органічні молекули, наприклад глюкозу. Для цього процесу необхідні щільні мембрани з більшим гідродинамічним опором. Мембрани для зворотного осмосу іноді розглядають, як проміжні між

мембранами з відкритими порами (мікрофільтраційними і ультрафільтраційними) і щільними непористими мембранами (для первапорації чи газорозділення) [9]. Загальним консенсусом є те, що механізм розчинення-дифузії описує фундаментальний механізм ЗО мембран, але меншість незгодна [10].

Внаслідок високого гідродинамічного опору необхідно прикладати більш високі тиски для проходження певної кількості розчинника. Крім того, розчини низькомолекулярних речовин мають більш високий осмотичний тиск, ніж у випадках високомолекулярних речовин. Наприклад осмотичний тиск морської води становить 25 бар [9].

На рисунку 1.2 представлена схема процесу зворотного осмосу. Мембрана проникна для розчинника (води) і непроникна для розчиненої речовини (солі). Як видно з рисунку 2 вода тече з розбавленого розчину в концентрований (J_f), якщо тиск концентрованого розчину менший за осмотичний, тобто відбувається явище осмосу. В тому випадку, якщо прикладений до концентрованого розчину тиск буде перевищувати осмотичний, то процес буде протікати в зворотному напрямку – розчинник буде переходити з концентрованого розчину в розведений (J_r). Тобто буде відбуватися відділення розчинника від розчиненої речовини (знесолювання). Такий процес отримав назву зворотний осмос [9].

Для описання процесу зворотного осмосу було запропоновано багато моделей та механізмів. Деякі з них дійсно або відносно просто описують ідею, тоді як інші набагато складніші і вимагають складних методів розрахунку. Моделі процесу зворотного осмосу традиційно можна розділити на 3 основні групи: моделі незворотної термодинаміки, непористі або гомогенні мембранні моделі та порові моделі. При цьому

розгляд процесу зосереджується на розгляді верхнього тонкого шару асиметричних та композиційних мембран, оскільки це визначає проникність і селективність більшості мембран. Оскільки в різних умовах різні моделі з різним успіхом описують процес, механізм зворотного осмосу, в тому числі структура зворотно осмотичних мембран, залишається остаточно не з'ясованим [1]. Також було опубліковано значна кількість оглядових робіт, де розглядалися питання моделювання процесу зворотного осмосу, наприклад [11-12].

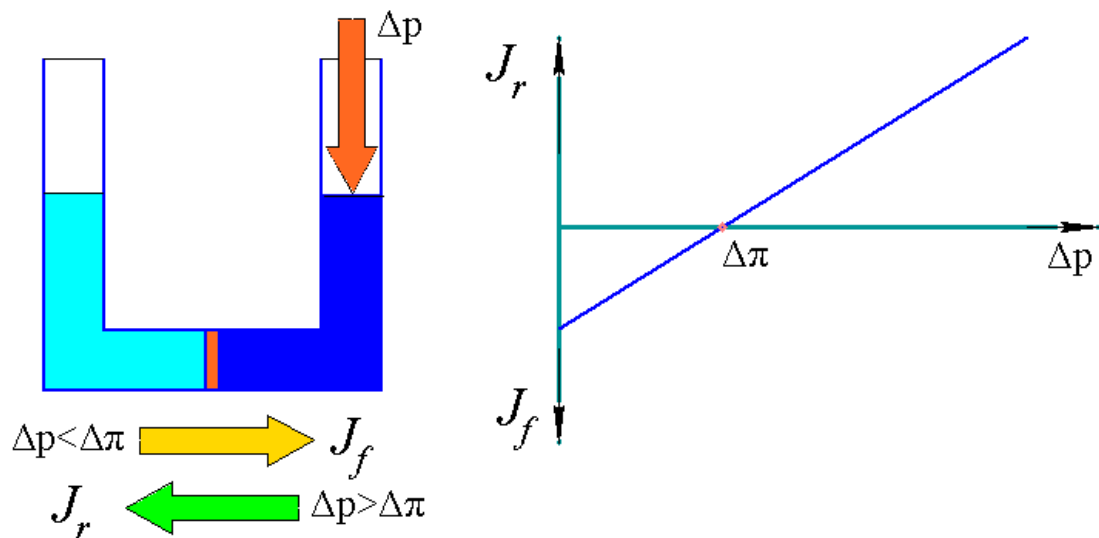


Рисунок 1.2 – Протікання процесу зворотного осмосу

В даній роботі буде використовуватися модель вибіркової сорбції та потоку в порах, зокрема, використані залежності описані в роботі [13].

Варто відзначити, що речовини, які проникають крізь мембрану називаються пенетрантами, а речовини, які не проходять крізь мембрану – ретантантами (рисунок 1.3). Потік пенетрантів, що залишає мембранний апарат має назву – пермеат, а потік ретантантів – ретантат (рисунок 1.4) [1].

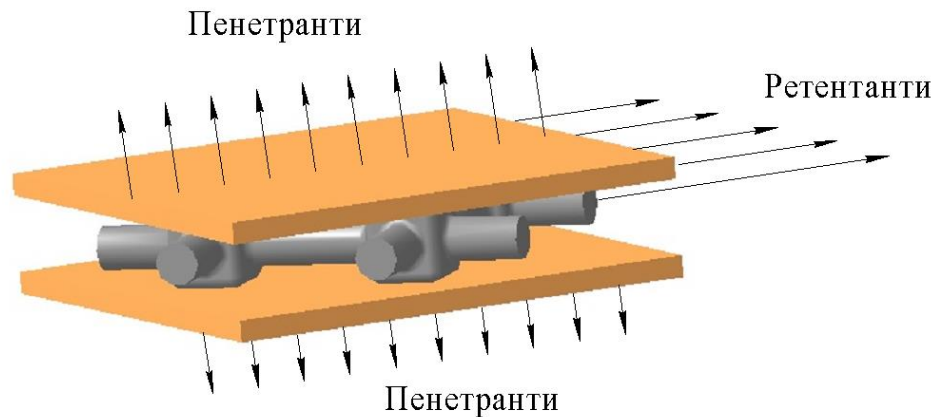


Рисунок 1.3 – Поток речовин в заданому перерізі (елементарному об'ємі) мембранного апарата

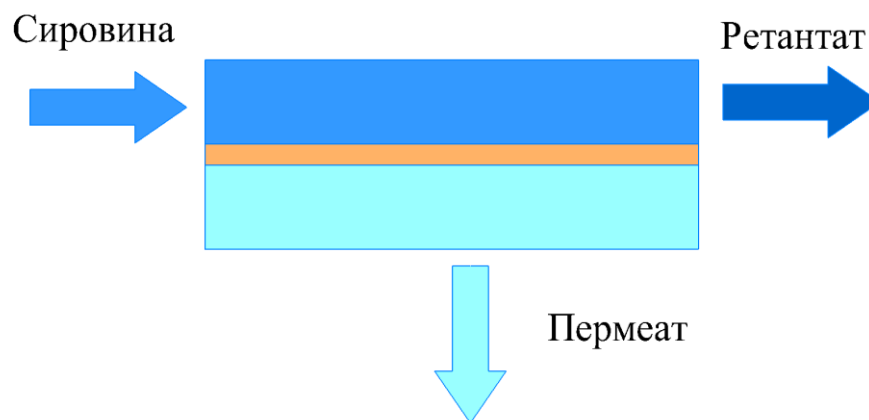


Рисунок 1.4 – Поток речовин в заданому в мембранному апараті

Мембранні процеси характеризуються селективністю та продуктивністю. Селективність процесу зворотного осмосу найчастіше характеризують величиною коефіцієнта розділення, який зазвичай визначається таким чином [13]:

$$R = \frac{x_1 - x_2}{x_1} = 1 - \frac{x_2}{x_1} \quad (1.1)$$

де x_1 та x_2 - концентрація речовини в початковій суміші і пермеаті

відповідно.

Питома продуктивність (проникність) мембран виражається об'ємом (або масою) пермеату, що отримується при даній рушійній силі за одиницю часу з одиниці площі робочої поверхні мембрани [6, 13].

Рівняння матеріального балансу за всіма компонентами і за розчиненою речовиною в цілому у випадку баромембранних процесів мають вигляд (рисунок 1.5) [6, 13].:

$$L_f = L_p + L_r \quad (1.2)$$

$$L_f x_{1f} = L_p x_2 + L_r x_{1r} \quad (1.3)$$

де L_f - масова витрата початкового розчину (сировини), кг/с;

L_p - масова витрата пермеату, кг/с;

L_r - масова витрата ретантату, кг/с;

x_{1f} - масова частка розчиненої речовини в початковому розчині (сировині);

x_2 - масова частка розчиненої речовини в пермеаті;

x_{1r} - масова частка розчиненої речовини в ретантаті.

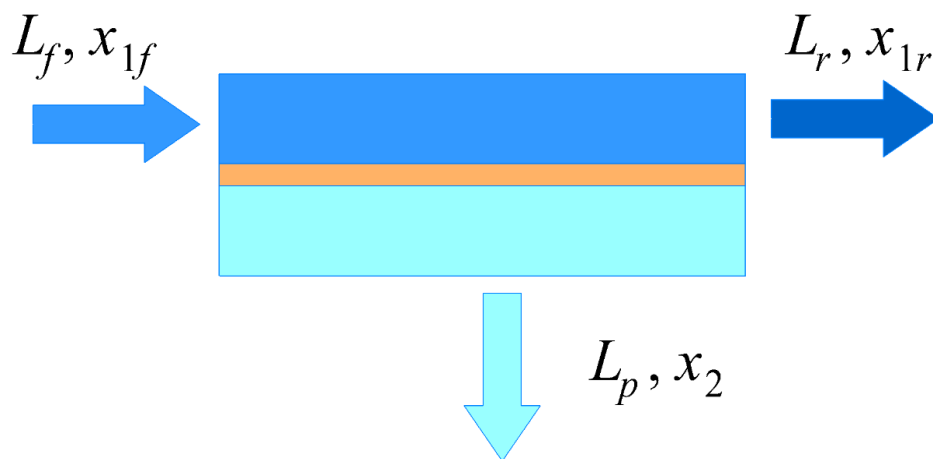


Рисунок 1.5 – Матеріальний баланс мембранних процесів

При розрахунку, як правило, відомі витрати початкового розчину та його концентрація. Концентрація розчиненої речовини в ретантаті також як правило відома – може бути задана або визначена з технологічних обмежень процесу розділення. Необхідно знайти витрати пермеату та ретанту, а також концентрацію розчиненої речовини в пермеаті. Отже, маємо три невідомі і два рівняння. Тому для отримання рівнянь матеріального балансу розглядають елементарний об'єм мембранного апарата. Таким чином отримуються рівняння для розрахунку витрат пермеату, ретантату та концентрації розчиненої речовини в пермеаті [6, 13]:

$$L_r = L_f \left(\frac{x_{1r}}{x_{1f}} \right)^{-\frac{1}{R}} \quad (1.4)$$

$$L_p = L_f - L_r = L_f \left(1 - \left(\frac{x_{1r}}{x_{1f}} \right)^{-\frac{1}{R}} \right) \quad (1.5)$$

$$x_2 = x_{1f} \frac{1 - \left(\frac{x_{1r}}{x_{1f}} \right)^{\frac{R-1}{R}}}{1 - \left(\frac{x_{1r}}{x_{1f}} \right)^{-\frac{1}{R}}} \quad (1.6)$$

Після введення ступеня концентрування:

$$K = \frac{x_{1r}}{x_{1f}} \quad (1.7)$$

рівняння (1.4)–(1.6) можна записати у спрощеному вигляді [6, 13]:

$$L_p = L_f \left(1 - K^{-\frac{1}{R}} \right) \quad (1.8)$$

$$L_r = L_f K^{\frac{1}{R}} \quad (1.9)$$

$$x_2 = x_{1f} \frac{1 - K^{\frac{R-1}{R}}}{1 - K^{\frac{-1}{R}}} \quad (1.10)$$

Основним використанням зворотного осмосу є очищення води, головним чином знесолювання солонуватих вод і особливо морської води з метою отримання питної води. Концентрація солі в солонуватих водах становить 1-5 г/дм³, а в морській воді приблизно 35 г/дм³. Іншою важливою галуззю застосування зворотного осмосу є виробництво ультрачистої води для напівпровідникової промисловості [1, 6].

Зворотній осмос використовується на стадії концентрування. Особливо в харчовій промисловості (концентрація фруктових соків, цукру, кави). В гальванічній технології для концентрування стічних вод і в молочній промисловості, наприклад концентрування молока в початкових стадіях виробництва сиру [1, 6].

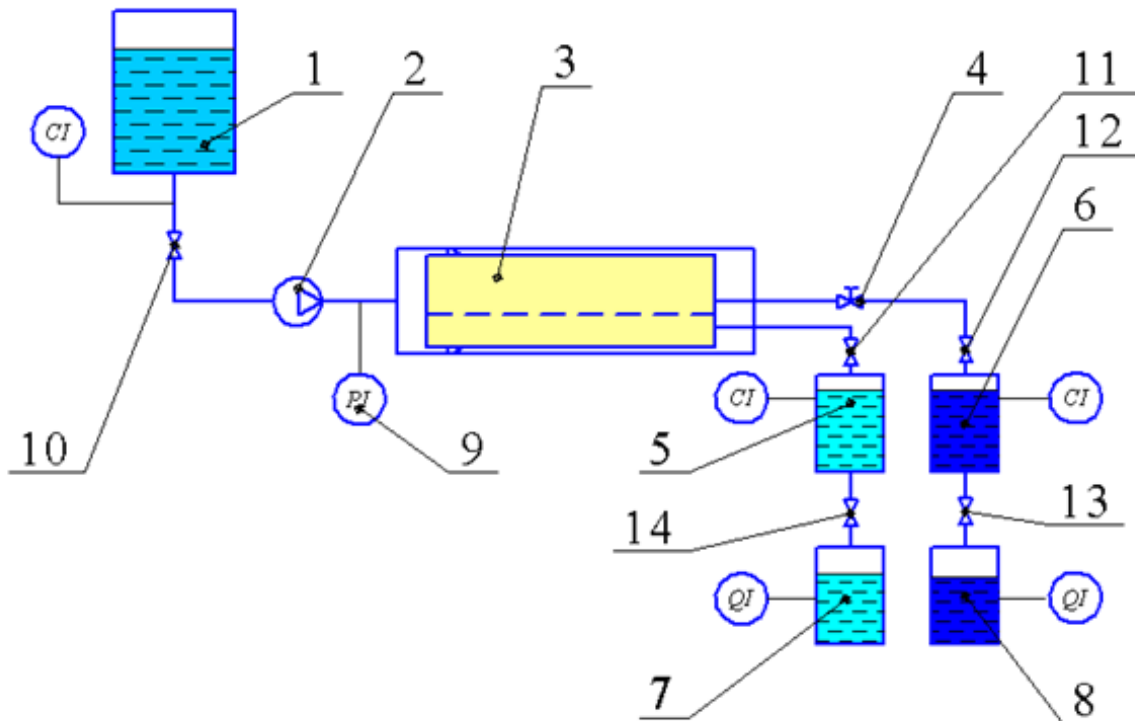
1.4 Опис експериментальної установки

Експериментальна установка, є модернізацією експериментальної установки описаною в роботі [14]. Схема установки показана на рисунку 1.6.

Початковий розчин з ємності 1 насосом 2 подається в мембранний апарат 3. Де відбувається розділення розчину. Утворений пермеат через ємність 5 подається до збірника 7, а утворений ретентат – через ємність 6, до збірника 8.

Для вимірювання концентрацій речовин передбачені проточні TDS-метри (на схемі позначені СІ), які вимірюють елетропровідність розчину. Показ приладу показує концентрацію NaCl ppm або мг/дм³, яка відповідає

електропровідності розчину, що проходить через прилад.



1 – ємність з початковим розчином; 2 – насос; 3 – мембранний апарат з рулонованим модулем; 4 – регулювальний кран; 5 – ємність вимірювання витрат пермеату; 6 – ємність для вимірювання витрат ретентату; 7 – збірник пермеату; 8 – збірник ретентату; 9 – манометр; 10–14 – крани;

Рисунок 1.6 – Схема експериментальної установки

Для вимірювання витрат пермеату та ретентату передбачені ротаметри (позначені QI). Враховуючи величину витрат, для цих потоків були встановлені різні конструкції ротаметрів, а також в одному випадку була змінена конструкція поплавка. Тому було проведене тарування ротаметрів з використанням об'ємного методу. Отримані тарувальні залежності показані на рисунках 1.7 (для пермеату) та 1.8 (для ретентату).

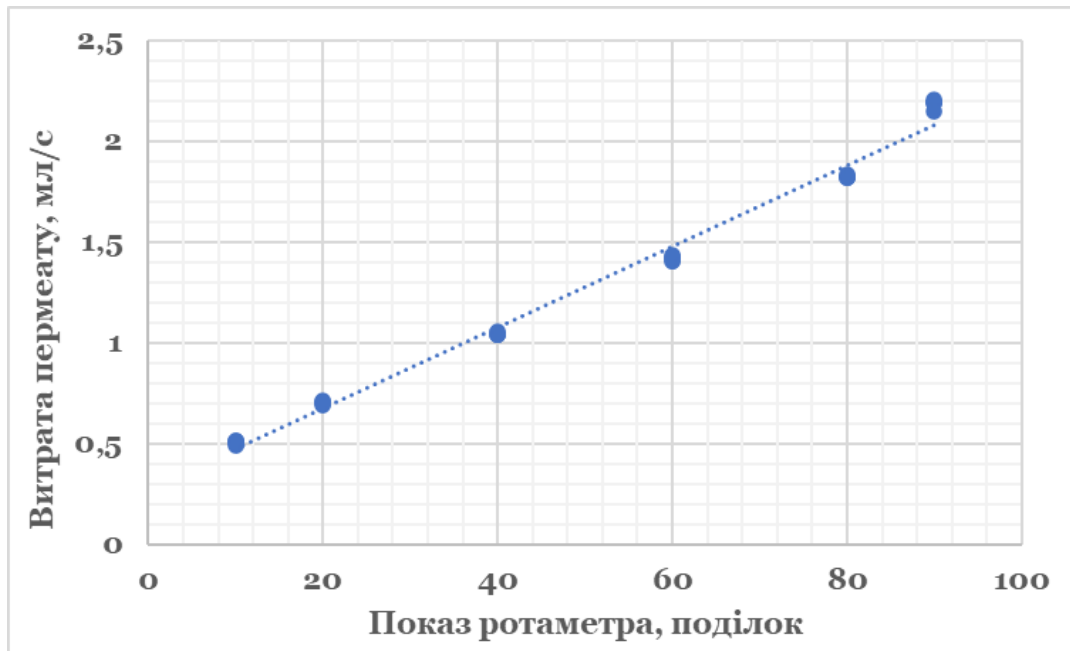


Рисунок 1.7 – Тарувальний графік ротаметра для визначення витрат пермеату

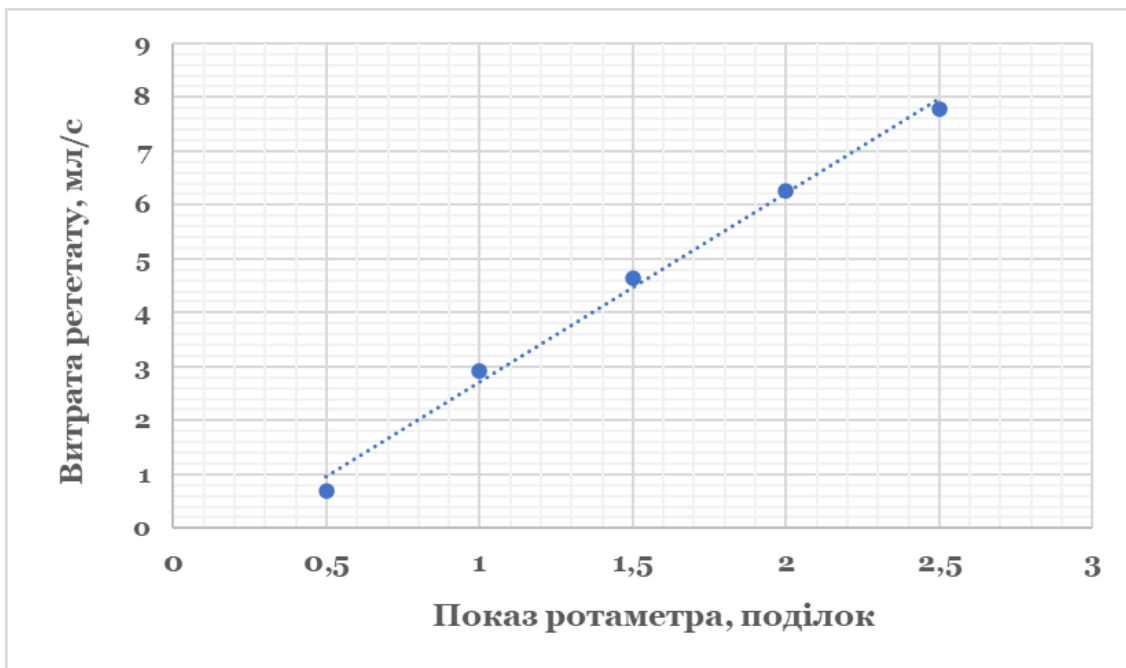


Рисунок 1.8 – Тарувальний графік ротаметра для визначення витрат ретентату

Враховуючи те, що тарувальні залежності можна апроксимувати лінійними залежностями з коефіцієнтом кореляції R^2 , більше 0,99, можна для визначення витрат можна скористатися рівняннями:

Для пермеату, мл/с:

$$L_p = 0,0201n_1 + 0,2724 \quad (1.11)$$

Для ретентату, мл/с:

$$L_r = 3,514n_2 + 0,8098 \quad (1.12)$$

де n_1, n_2 – кількість поділок ротаметра.

Основним елементом установки є мембранний апарат, в якому розташований мембранний модуль спіральної конструкції (рисунок 1.9) [6].

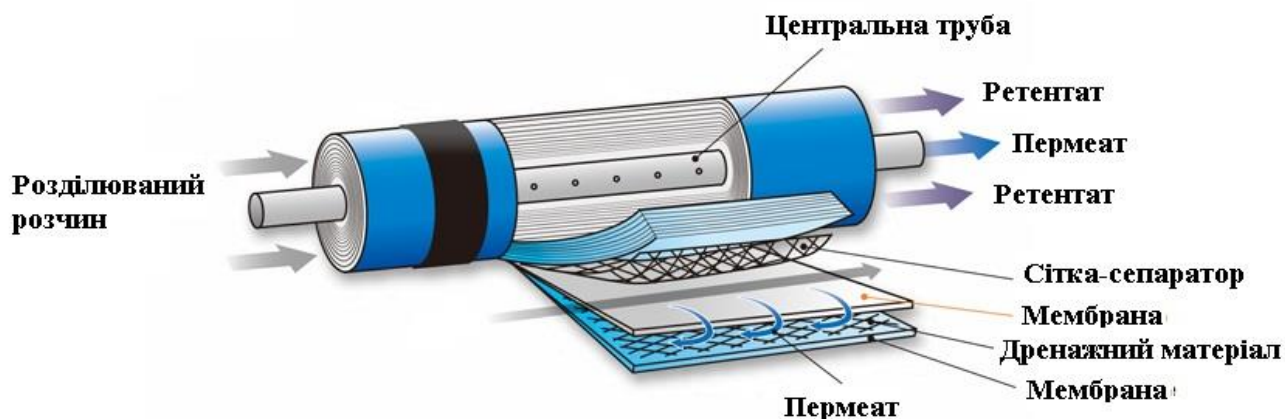


Рисунок 1.9 – Схема спірального мембранного модуля

Спіральні (або рулоновані, рулонні, сувійні) мембранні модулі (Spiral wound membrane modules) для зворотного осмосу набули найбільшого поширення в системах підготовки води через високу питому поверхню (300-1000 $\text{м}^2/\text{м}^3$), малу матеріалоемність, відносну простоту в експлуатації [6].

В робочих умовах, розділюваний розчин подається через торець в напірні канали рулонованого модуля, частина розчину проходить крізь мембрану, утворюючи пермеат, потрапляє в центральну трубу і відводиться з апарату. Інша частина розчину рухається вздовж мембрани і виводиться з іншого торця модуля, утворюючи ретентат. В процесі мембранного розділення концентрація розчинених речовин в пермеаті зменшується, а в ретентаті зростає. Канали мембранного модуля утворюються сіткою-сепаратора, яка знаходиться між витками рулону [6].

В даній роботі використовують побутові спіральні модулі типу 1812 TFC-75. Робоча поверхня мембранного модуля становить 0,46 м². Товщина сітки-сепаратора визначає висоту каналу, яка для побутових мембран становить 0,35 мм.

1.5 Техніка безпеки

Основними факторами небезпеки при виконанні роботи є електричний, динамічний (надлишковий тиск) та хімічний. Додаткову небезпеку становить можливий контакт розчинів електролітів з електрообладнанням. Тому при виконанні роботи необхідно дотримуватися таких правил техніки безпеки:

1. Перед початком роботи перевірити наявність заземлення установки, герметичність захисного кожуха на електрообладнанні насоса, відсутності рідин біля розеток.

2. Перед початком роботи перевірити справність кранів та герметичність з'єднань між шлангами та обладнанням, та роботу зливної системи.

3. Забороняється вмикати насос при незаповненій ємності 1 та закритому крані подачі початкового розчину 10.

4. Не допускається довготривала робота насосу при закритих кранах на лінії пермеату та ретентату 11 та 12.
5. Не дозволяється залишати працюючу установку без нагляду.

1.6 Методика проведення експериментів

Перед початком експерименту необхідно заповнити ємність 1 початковим розчином, при закритому крані подачі вихідного розчину. Склад вихідного розчину визначає викладач.

Експеримент слід проводити в такому порядку [6]:

1. Відкрити кран подачі вихідного розчину 10 та крани на лінії ретентату та пермеату 11 та 12. Регулювальний кран 4 знаходиться в проміжному положенні.
2. Увімкнути насос і дочекатися виходу на стабільний режим.
3. За допомогою регулювального крана 4 встановити необхідний робочий тиск і дочекатися стабілізації потоку (1-3 хв.).
4. Виміряти концентрації в розділюваному розчині, пермеаті та ретентаті за допомогою проточних TDS-метрів.
5. Виміряти витрати пермеату та ретентату за допомогою ротаметрів.
6. Встановити нове значення тиску і повторити виміри за пунктами 4–5. Кількість вимірів n та значення тиску визначає викладач.

Результати вимірювань занести в таблицю 1.1.

При вимірюванні концентрацій необхідно звернути увагу на одиниці вимірювання.

1.7 Обробка результатів вимірювань

За даними дослідів виконати розрахунки в такому порядку.

рисунку 1.8 або формулою (1.12).

4. Витрата початкової суміші, м³/с:

$$L_f = L_p + L_r \quad (1.14)$$

5. Ступінь концентрування:

$$K = \frac{x_{1r}}{x_{1f}} \quad (1.15)$$

6. Коефіцієнт розділення:

$$R = 1 - \frac{x_2}{x_1} \quad (1.16)$$

7. Теоретична витрата пермеату, м³/с:

$$L_p^T = L_f \left(1 - K^{-\frac{1}{R}} \right) \quad (1.17)$$

8. Теоретична витрата ретентату, м³/с:

$$L_r^T = L_f K^{-\frac{1}{R}} \quad (1.18)$$

9. Середня концентрація в пермеаті, мг/дм³:

$$\bar{x}_2 = x_{1f} \frac{1 - K^{\frac{R-1}{R}}}{1 - K^{\frac{-1}{R}}} \quad (1.19)$$

10. Проникність мембрани, м³/(м²·с):

$$J = \frac{L_p}{F} \quad (1.20)$$

де F – робоча площа поверхні мембранного модуля, $F=0,46$ м².

11. Теоретична проникність мембрани, м³/(м²·с):

$$J^T = \frac{L_p^T}{F} \quad (1.21)$$

Результати розрахунків звести в таблицю 2.

Таблиця 1.2 – Результати розрахунків

Параметр	Номер дослідю				
	1	2	3	...	<i>n</i>
Середня концентрація в напірному каналі, x_1 , мг/л					
Витрата пермеату, L_p , м ³ /с					
Витрата ретентату, L_r , м ³ /с:					
Витрата початкової суміші, L_f , м ³ /с,					
Ступінь концентрування, K					
Селективність мембрани, ϕ					
Теоретична витрата пермеату, L_p^T , м ³ /с					
Теоретична витрата ретентату, L_r^T , м ³ /с					
Середня концентрація в пермеаті, \bar{x}_2 , мг/дм ³					
Проникність мембрани, J , м ³ /(м ² ·с)					
Теоретична проникність мембрани, J^T , м ³ /(м ² ·с)					

За результати розрахунків побудувати графіки залежності дійсних та теоретичних витрат пермеату від тиску ($L_p = f(\Delta p)$ та $L_p^T = g(\Delta p)$), дійсної та теоретичної проникності мембрани від тиску ($J = f_1(\Delta p)$ та $J^T = g_2(\Delta p)$), а

також дійсної та середньої концентрації пермеату від тиску ($x_2 = f_2(\Delta p)$) та $\bar{x}_2 = g_2(\Delta p)$). Експериментальні та теоретичні залежності для кожної величини слід зображати в одній системі координат.

Проаналізувати результати роботи.

Контрольні запитання

1. Дати визначення баромембранних процесів.
2. Пояснити осмотичну рівновагу.
3. Пояснити явище осмосу.
4. Пояснити процес зворотного осмосу.
5. Проаналізувати підходи до моделювання зворотного осмосу.
6. Пояснити матеріальний баланс зворотного осмосу.
7. Охарактеризувати потоки речовин при зворотному осмосі.
8. Дати оцінку факторам впливу на процес зворотного осмосу.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ В РЕЦИРКУЛЯЦІЙНОМУ РЕЖИМІ

2.1 Вступ

Конструкція та структура систем мембранного розділення може бути найрізноманітнішою залежно від технічних задачі конфігурацій модулів. Центральною частиною мембранної установки є модуль, який часто являє собою власне розділювальний елемент. Декілька модулів або розділювальних елементів, з'єднаних між собою паралельно або послідовно, утворюють каскад. Задача інженера – зібрати модулі таким чином, щоб оптимізувати систему при мінімальній вартості продукту, чи за іншим критерієм оптимізації. Одним з варіантів оптимізації системи є рециркуляційна схема [1].

2.2 Мета та задачі дослідження

Метою роботи є експериментальне дослідження роботи установки зворотного осмосу в режимі рециркуляції.

Для досягнення такої мети необхідно виконати такі задачі дослідження:

1. Експериментально визначити збільшення концентрації в розділюваному розчині протягом концентрування в проточному режимі.
2. Експериментально визначити зміни селективності при роботі в проточному режимі
3. Експериментально визначити зміну ступеня концентрування в проточному режимі

2.3 Теоретичні відомості щодо роботи мембранного обладнання в проточному режимі

Для якомога більшого зниження концентраційної поляризації і утворення осадів на поверхні мембран зазвичай проводять процес в режимі поперечного потоку. При заданій конструкції модуля і складі сировини головним параметром, що визначає перенесення маси в модулі, стає швидкість потоку сировини. Можна таким чином класифікувати різні режими роботи при поперечному потоці [1]:

- Паралельний потік.
- Протиток.
- Поперечний потік (з ідеальним змішуванням у пермеаті).
- Ідеальне змішування.

В режимах прямого і протиток сировина і потік пермеату течуть вздовж мембрани в одному і тому ж або в протилежних напрямках. При цьому режим течії може бути апроксимований як режим ідеального витіснення. Умови такого режиму можна знайти, користуючись відомим числом Пекле (Pe), що є мірою відношення перенесення маси за рахунок конвекції і за рахунок дифузії. $Pe = w \cdot L / D$, де w – швидкість, L – визначальний розмір (довжина каналу чи трубки), D – коефіцієнт дифузії. При домінуючому вкладі конвекції число Пекле стає набагато більше одиниці, $Pe \gg 1$. При поперечному потоці з режимом ідеального змішування в пермеаті приймається, що в каналі потоку сировини реалізується режим ідеального витіснення. Іншими словами, з боку пермеату змішування відбувається настільки швидко, що склад не міняється по довжині каналу. Найкращі результати досягаються для режиму протиток, дещо гірші результати для випадку з

перпендикулярним потоком і паралельним потоком. Найгірші результати були отримані для випадку ідеального змішування по обидва боки мембрани. На практиці системи зазвичай працюють в режимі поперечного потоку з ідеальним змішуванням у пермеаті [1, 9].

Система потоків в модулі є одним з головних факторів, що визначають степінь досягнутого розділення. В принципі в одностадійному чи багатостадійному процесах використовуються дві базові конфігурації потоків: однопрохідна система і система з рециркуляцією. Для процесів невеликої потужності можна використовувати також мембранні системи періодичної дії. Приклад подібної установки показаний на рисунку 2.1, а на рисунку 2.2 – схеми однопрохідної і рециркуляційної системи [1, 9].

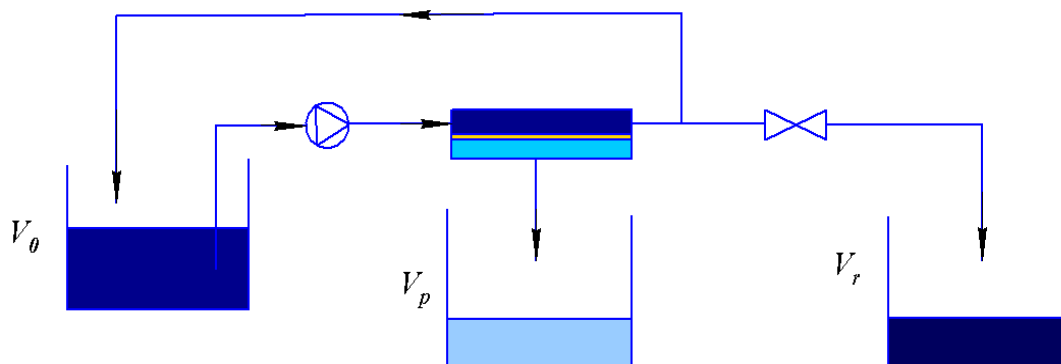


Рисунок 2.1 – Схема комбінації мембранної системи і апарата періодичної дії

В багатостадійних однопрохідних процесах це зниження компенсується певним складанням модулів, так званою кінечною каскадною схемою, як показано на рисунку 2.3. При такій конфігурації установка може бути спроектована так, щоб швидкість потоку залишалася фактично постійною. Для цієї системи характерно те, що загальна

довжина шляху і втрати тиску великі. Фактор зменшення об'єму, тобто відношення об'єму сировини до об'єму ретантату, визначається головним чином конфігурацією каскаду, а не прикладеним тиском [1, 9].

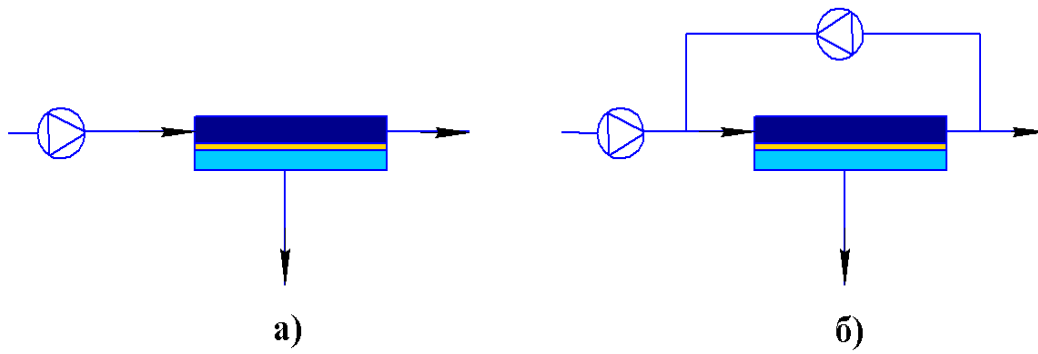


Рисунок 2.2 – Схема однопрохідної системи (а) і системи з рециркуляцією (б)

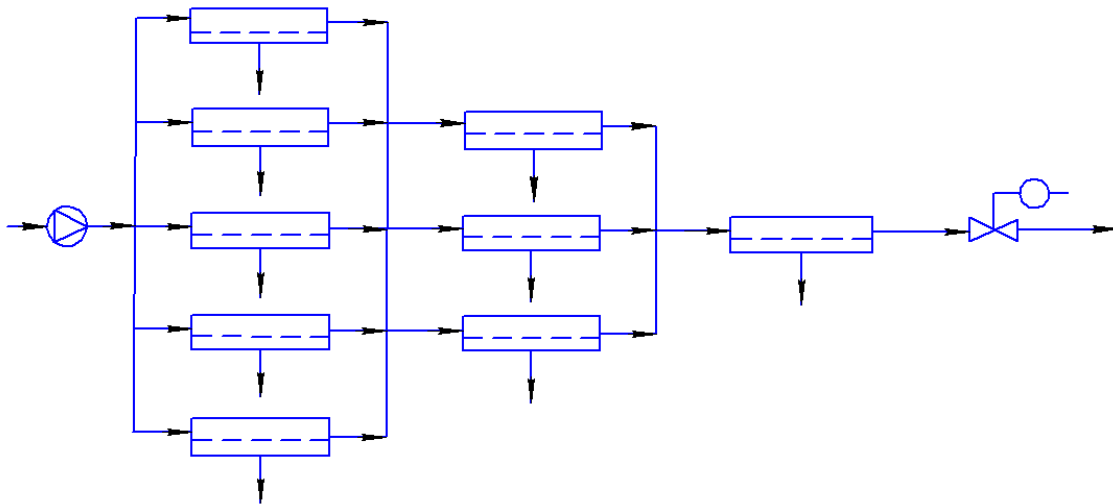


Рисунок 2.3 – Конічна каскадна однопрохідна схема

Інша конфігурація – це рециркуляційна схема, показана на рисунку 2.4.

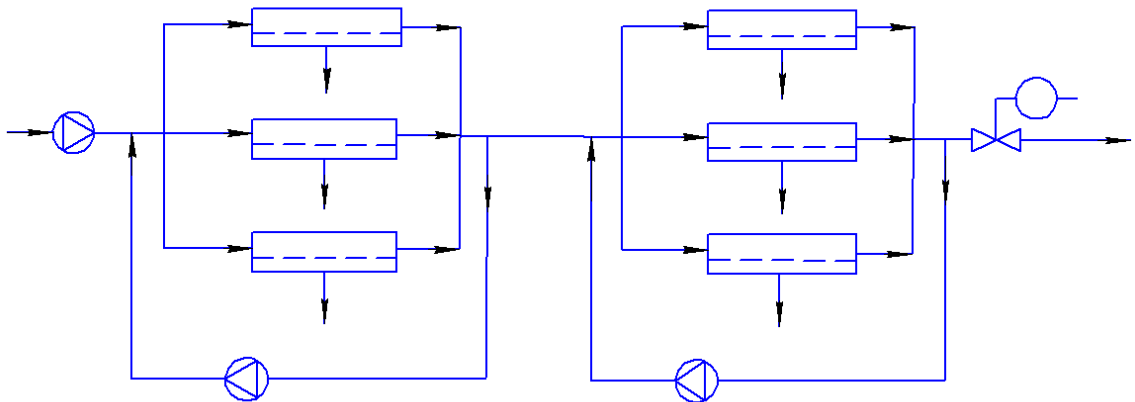


Рисунок 2.4 – Рециркуляційна система

В цьому випадку сировина прокачується декілька раз через одну і ту ж стадію, що складається з декількох модулів. Кожна ступінь оснащена рециркуляційним насосом, що дозволяє оптимізувати гідродинамічні умови. При цьому спостерігається лише незначне падіння тиску в кожній ступені, де можна регулювати швидкість потоку і тиск. Система рециркуляції сировини є більш гнучкою, ніж однопрохідна система, і їй слід віддавати перевагу в процесах мікрофільтрації і ультрафільтрації, коли можна очікувати сильної концентраційної поляризації і швидкого утворення осаду на мембранах. В той же час, для більш простих задач, наприклад знесолювання морської води, використання однопрохідної системи виявляється економічно виправданим [1, 9].

2.3.1 Каскадні режими роботи

Достатньо часто однопрохідна схема не дозволяє отримати продукт бажаної якості, через що потоки пермеату і ретантату повинні бути піддані розділенню в наступному ступені. Комбінація таких ступенів називається каскадом. При каскадному режимі роботи, що використовує велику

кількість блоків, де пермеат першої стадії стає сировиною для другої стадії і т. д., можна отримати продукт дуже високої чистоти. Приклад процесу з двостадійним режимом роботи наведений на рисунку 2.5 [1, 9].

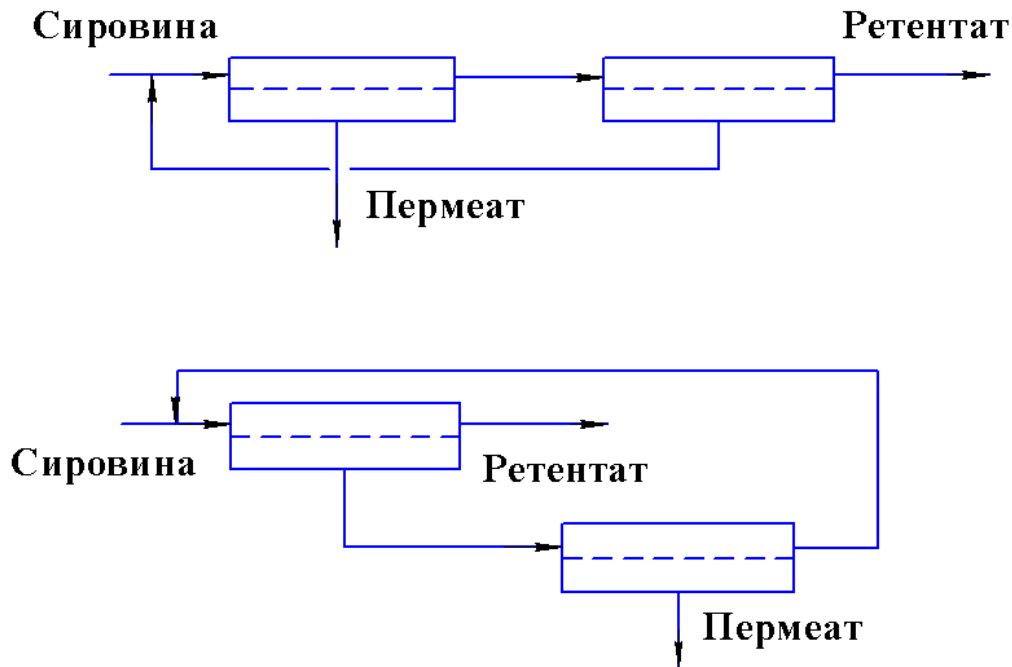
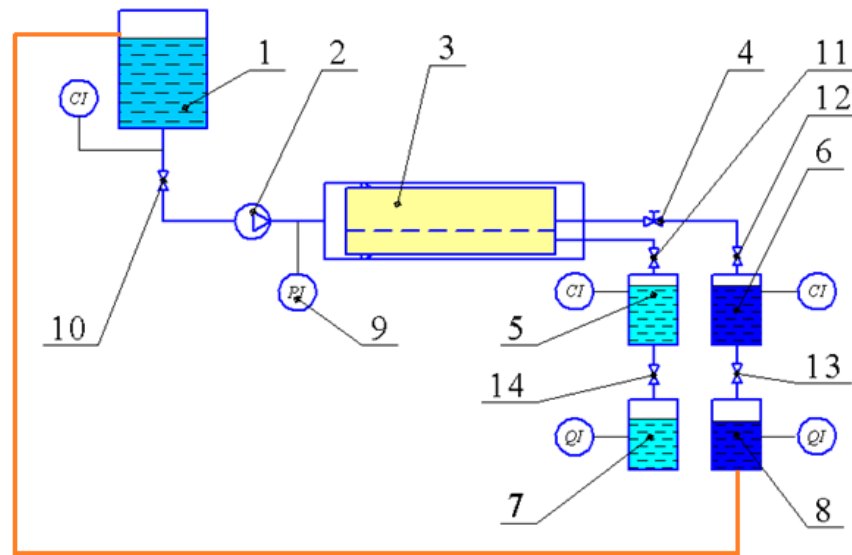


Рисунок 2.5 – Двостадійні мембранні процеси

Тип схеми залежить від того, що є цільовим продуктом – пермеат чи ретантат. При багатостадійних режимах роботи оптимізація процесу стає дуже складною задачею [1, 9].

2.4 Опис експериментальної установки

Експериментальна установка, описана в розділі 1.4 цього посібника (рисунок 1.6) може працювати в рециркуляційному режимі. В такому разі необхідно додати трубопровід, який з'єднає збірник ретентату зі збірником розділюваної суміші. Схема установки з таким трубопроводом (на схемі показаний помаранчевим кольором) показана на рисунку 2.6



1 – ємність з початковим розчином; 2 – насос; 3 – мембранний апарат з рулонованим модулем; 4 – регулювальний кран; 5 – ємність вимірювання витрат пермеату; 6 – ємність для вимірювання витрат ретентату; 7 – збірник пермеату; 8 – збірник ретентату; 9 – манометр; 10–14 – крани;

Рисунок 2.6 – Схема експериментальної установки

В такому випадку установка працює за періодичною рециркуляційною схемою (рисунок 2.1). Вимірювальні прилади при цьому такі ж самі, як і у випадку роботи установки проточному режимі. Тому методи вимірювання концентрації та витрат такі ж самі як і описані в пункті 1.4 цього посібника.

2.5 Техніка безпеки

Оскільки експерименти проводяться на установці, описаній в розділі 1.4, то правила техніки безпеки аналогічні. Враховуючи важливість безпеки в лабораторії, ці правила будуть описані повторно.

Основними факторами небезпеки при виконанні роботи є

електричний, динамічний (надлишковий тиск) та хімічний. Додаткову небезпеку становить можливий контакт розчинів електrolітів з електрообладнанням. Тому при виконанні роботи необхідно дотримуватися таких правил техніки безпеки:

1. Перед початком роботи перевірити наявність заземлення установки, герметичність захисного кожуха на електрообладнанні насоса, відсутності рідин біля розеток.

2. Перед початком роботи перевірити справність кранів та герметичність з'єднань між шлангами та обладнанням, та роботу зливної системи.

3. Забороняється вмикати насос при незаповненій ємності 1 та закритому крані подачі початкового розчину 10.

4. Не допускається довготривала робота насосу при закритих кранах на лінії пермеату та ренетату 11 та 12.

5. Не дозволяється залишати працюючу установку без нагляду.

2.6 Методика проведення експериментів

Перед початком експерименту необхідно заповнити ємність 1 початковим розчином, при закритому крані подачі вихідного розчину. Склад вихідного розчину визначає викладач.

Експеримент слід проводити в такому порядку:

1. Відкрити кран подачі вихідного розчину 10 та крани на лінії ретентату та пермеату 11 та 12. Регулювальний кран 4 знаходиться в проміжному положенні.
2. Увімкнути насос і дочекатися виходу на стабільний режим.
3. За допомогою регулювального крана 4 встановити необхідний робочий тиск і дочекатися стабілізації потоку (1-3 хв.).

4. Протягом 20 хвилин з інтервалом в 2 хвилини (120 секунд) виміряти значення концентарцій в в розділюваному розчині, пермеаті та ретентаті за допомогою проточних TDS-метрів та витрати пермеату та ретентату за допомогою ротаметрів.
5. Змінити робочий тиск, дочекатися стабілізації потоку та повторити досліди відповідно до пункту 4. Досліди проводити щонайменше на 3 значеннях робочого тиску.

Результати вимірювань занести в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань

№ п/п	Час заміру, τ, хв	Концентрація в розділюваному розчині, x_{1f} , мг/л	Концентрація в пермеаті, x_{1r} , мг/л	Концентрація в ретентаті, x_{2f} , мг/л	Витрати пермеату (показ ротаметра), поділок	Витрати ретентату (показ ротаметра), поділок
Робочий тиск $p = \underline{\hspace{2cm}}$ МПа						
1	0					
2	2					
3	4					
4	6					
5	8					
6	10					
7	12					
8	14					
9	16					
10	18					
11	20					
Робочий тиск $p = \underline{\hspace{2cm}}$ МПа						
1	0					
2	2					
...	...					
11	20					
Робочий тиск $p = \underline{\hspace{2cm}}$ МПа						
1	0					
2	2					
...	...					
11	20					

При вимірюванні концентрацій необхідно звернути увагу на одиниці вимірювання.

2.7 Обробка результатів вимірювань

Процес зворотного осмосу в рециркуляційному режимі протікає аналогічно до проточного режиму, тому в цілому формули для розрахунку аналогічні до описаних в розділах 1.3, 1.4 та 1.7.

Порядок розрахунку такий:

1. Середня концентрація в напірному каналі мг/л:

$$x_1 = \frac{x_{1f} + x_{1r}}{2} \quad (2.1)$$

2. Витрата пермеату переводиться в м³/с за графіком показаним на рисунку 1.7 або формулою (1.11).

3. Витрата ретентату переводиться в м³/с за графіком показаним на рисунку 1.8 або формулою (1.12).

4. Витрата початкової суміші, м³/с:

$$L_f = L_p + L_r \quad (2.2)$$

5. Ступінь концентрування:

$$K = \frac{x_{1r}}{x_{1f}} \quad (2.3)$$

6. Коефіцієнт розділення:

$$R = 1 - \frac{x_2}{x_1} \quad (2.3)$$

Результати всіх вимірювань занести в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунків

№ п/п	Час заміру, τ , хв	Середня концентрація в напірному каналі, x_1 , мг/л	Витрата пермеату, L_p , м ³ /с	Витрата ретентату, L_r , м ³ /с	Ступінь концентрування, K	Коефіцієнт розділення, R
Робочий тиск $p = \underline{\hspace{2cm}}$ МПа						
1	0					
2	2					
3	4					
4	6					
5	8					
6	10					
7	12					
8	14					
9	16					
10	18					
11	20					
Робочий тиск $p = \underline{\hspace{2cm}}$ МПа						
1	0					
2	2					
...	...					
11	20					
Робочий тиск $p = \underline{\hspace{2cm}}$ МПа						
1	0					
2	2					
...	...					
11	20					

За даними таблиці 2.2, а також таблиці 2.1, побудувати графіки залежності концентарції в розділюваній суміші, концентарції в пермеаті, концентарції в ретентаті, середньої концентарції в напірному каналі, витрат ретентату та пермеату, коефіцієнта розділення та ступеня концентрування від часу заміру для всіх робочих тисків. Іншими словами, мають бути побудовані графіки залежностей $x_{1f} = f(\tau)$; $x_{1r} = f(\tau)$; $x_{1f} = f(\tau)$; $x_1 = f(\tau)$; $L_p = f(\tau)$; $L_r = f(\tau)$; $K = f(\tau)$; $R = f(\tau)$. Доцільно в одній координатній системі розміщати графіки залежностей для всіх значень прикладеного тиску.

Проаналізувати результати роботи та яснити характер графіків.

Контрольні запитання

1. Пояснити ,які бувають режими при поперечному потоці.
2. Проаналізувати однопрохідну та рециркуляційну схеми роботи мембранних модулів.
3. Проаналізувати схему періодичної дії
4. Проаналізувати каскадні режими роботи

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ МЕМБРАННОГО ГАЗОРОЗДІЛЕННЯ

3.1 Вступ

Транспорт речовини в багатьох процесах, в тому числі природних, частіше за все природних, частіше за все здійснюється за рахунок дифузії, а не конвекції. Речовини самовільно дифундують з області з високим хімічним потенціалом в області з більш низьким хімічним потенціалом. До мембранних процесів, для яких рушійною силою є різниця концентрацій відносяться газорозділення, первапорація, діаліз, а також процеси за участі рідких мембран (слід пам'ятати, що в ряді випадків правильно говорити про різницю активностей, а не концентрацій). З урахуванням структурних і функціональних відмінностей процеси можна розділити за типом використовуваних в них мембран. В процесах газорозділення, первапорації і діалізу використовуються синтетичні, тверді (полімерні) мембрани [1].

Прикладом дифузійно-мембранного процесу є мембранне газорозділення.

3.2 Мета та задачі дослідження

Метою роботи є ознайомлення з науковими основами та експериментальне дослідження процесу мембранного газорозділення [15].

Основні завдання дослідження [15]:

1. Проаналізувати фізичні основи процесу мембранного газорозділення та основні властивості газороздільних мембран.

2. Вивчити конструкцію й принцип дії напівпромислової установки для розділення атмосферного повітря.

3. Оцінити інтенсивність та ефективність процесу мембранного газорозділення.

3.3 Теоретичні відомості

Газорозділення можна здійснити з використанням як пористих, так і непористих мембран. Однак механізм транспорту через мембрани цих типів є абсолютно різним [1, 9].

Якщо транспорт здійснюється в'язким потоком, розділення газів не відбувається, оскільки середня довжина пробігу молекул газу дуже мала, порівняно з діаметром пори. Зі зменшенням діаметра пор в мембрані середня довжина пробігу молекули може стати більше діаметра пор. Такий тип потоку газу називається Кнудсенівським. При цьому потік обернено пропорційний кореню молекулярної маси. Для заданих мембрани і перепаду тиску вона служить єдиним параметром, що визначає потік. Відповідно, розділення двох газів за механізмом кнудсенівського потоку залежить від відношення квадратних коренів їх молекулярних мас. Це означає, що зазвичай досягаються низькі степені розділення. Більш високих ступенів розділення можна досягти лише при використанні каскадів, що включають декілька зв'язаних між собою модулів, що часто буває економічно не виправдано, тому до сих пір цей спосіб використовують в промисловому масштабі лише для збагачення гексафосфориду урану ($^{235}\text{UF}_6$), котрий відноситься до дуже дорогих речовин [1, 9].

Розділення газів непористими мембранами визначається різною проникністю матеріалу мембрани для цих газів [1, 9]. Процес

проникнення компонентів газової суміші крізь такі мембрани розглядається як послідовність трьох процесів [15]:

сорбції компонентів газової суміші поверхнею мембрани;

дифузії в матеріалі мембрани;

десорбції на протилежному боці цієї мембрани.

Швидкості проникнення компонентів суміші крізь роздільну мембрану можуть суттєво різнитись, тобто мембрана може бути більш проникною для одного компонента і менш проникною для іншого. Це явище дозволяє здійснювати розділення такої суміші.

Застосування газорозділення [1, 9]:

- якщо не вимагається висока селективність, можна використовувати високопроникні матеріали, наприклад для збагачення повітря киснем для медичних потреб, процесів горіння, отримання стерильного повітря для аеробної ферментації. Інше використання – відділення органічних парів від газів, що не конденсуються, коли високих селективностей можна досягнути при використанні високопроникних матеріалів. Проникненість будь-якого високоеластичного матеріалу для азоту нижча, ніж для будь-яких органічних парів, що і визначає можливість вибору в таких випадках високопроникного високоеластичного полімеру;
- Якщо вимагаються забезпечити високу селективність, то необхідно використовувати низькопроникні мембрани на основі склоподібних полімерів. Практичне використання вимагає знаходження балансу між проникністю і селективністю. Для цієї групи можна навести велику кількість прикладів:

- Розділення метану і вуглекислого газу. Задача розділення цих газів виникає в багатьох технологічних процесах: очищення метану, що виникає при переробці відходів, виділення метану з природних газів, а також вилучення вуглекислого газу в процесах підвищення якості нафтопродуктів.
- Водень та гелій в суміші з іншими газами. Водень та гелій мають відносно малі, порівняно з іншими газами розміри молекул і проявляють високі фактори розділення у випадку склоподібних полімерів. Розділення застосовують при вилученні водню з відхідних газів синтезу аміаку, нафтопереробних установок і синтезу метанолу.
- Сірководень/метан. Крім вуглекислого газу природний газ може містити значну кількість сірководню. Цей газ надзвичайно токсичний, викликає корозію, тому його концентрація повинна бути знижена.
- Кисень/азот. Задача розділення в цьому випадку може диктуватися або необхідністю отримання повітря, збагаченого киснем, або повітрям, збагаченим азотом. Збагачене азотом повітря (95-99%) використовується як інертний газ для зберігання палив в резервуарах.
- Водяна пара в газових сумішах – всі випадки осушення газів.
- Діоксид сірки з димових газів – екологічно важливе очищення димових газів від сірки.

Сутність процесу мембранного газо-розділення полягає в наступному (рисунок 3.1). Газова суміш, що підлягає розділенню,

підводиться до непоруваної мембрани. Завдяки особливим властивостям останньої, різні компоненти суміші будуть сорбуватися її поверхнею, дифундувати крізь неї й десорбуватися на її протилежному боці з різною швидкістю. Внаслідок цього потік, що пройшов крізь мембрану, збагачується одними, а потік, який прямує далі, – іншими компонентами газової суміші. Можна підібрати мембрану таким чином, що в потоці, який виходитиме з мембранного апарата, майже зовсім не буде міститися тих компонентів суміші, які затримуються мембраною [15].

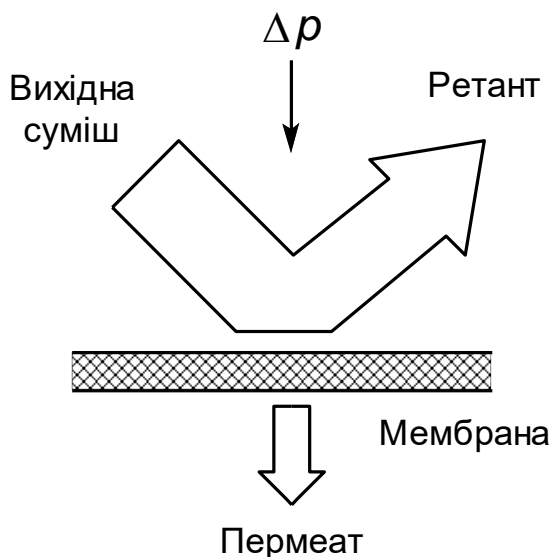


Рисунок 3.1 – Схема мембранного розділення газової суміші [15]

При оснащенні мембранних газороздільних установок найчастіше використовуються плівкові мембрани й порожнисті волокна. Найбільш широкого розповсюдження набули полісилоксанові, поліімідні та поліамідні мембрани. Для збагачення повітря киснем застосовують мембрани на основі полівінілтри-метилсилану, полідиметилсилоксану, поліфеніленоксиду, ацетату целюлози, полісилоксанарилату тощо [15].

Серед основних властивостей роздільних мембран виділяють

проникність і селективність [15]..

Проникністю називається властивість мембрани пропускати речовину. З метою кількісного оцінювання цього процесу введено поняття потоку, коефіцієнта й константи проникності [15].

Потік – це кількість речовини (у процесах розділення газів молярна або об'ємна), яка переноситься в процесі мембранного розділення за одиницю часу крізь поверхню мембрани одиничної площини, орієнтовану нормально до напрямку потоку [15]:

$$J = \frac{V}{F\tau}, \quad (3.1)$$

де V – кількість речовини, яка проходить крізь мембрану (кількість пермеату), моль або м³; F – площа поверхні мембрани, м²; τ – тривалість розділення, с.

Величина потоку характеризує інтенсивність процесу мембранного розділення [15].

Потік крізь мембрану певної товщини при одиничній рушійній силі має назву коефіцієнта проникності. У газорозділенні коефіцієнт проникності компонента i , моль·м/(м²·с·Па) або м³·м/(м²·с·Па), визначається за формулою [15]:

$$P_i = \frac{J_i l}{p'_i - p''_i}, \quad (3.2)$$

де J_i – потік компонента i , моль/(м²·с) або м³/(м²·с); l – товщина мембрани, м; p'_i і p''_i – парціальний тиск пари компонента i з боків вихідної суміші й пермеату, Па.

Потік крізь мембрану при одиничній рушійній силі має назву константи проникності. У процесах розділення газів константа

проникності компонента i , моль·м/(м²·с·Па) або м³/(м²·с·Па), визначається за формулою [15]:

$$K_i = \frac{J_i}{p'_i - p''_i}. \quad (3.3)$$

У випадку мембранного розділення суміші простих газів (до яких належать основні компоненти повітря – кисень та азот) проникнення кожного газу крізь мембрану відбувається незалежно від інших компонентів суміші. Тому потік будь-якого компонента такої суміші можна визначити за співвідношенням [15]:

$$J_i = K_i(p'_i - p''_i) = K_i(p'y_{i,r} - p''y_{i,p}). \quad (3.4)$$

де p' і p'' – тиски з боків вихідної суміші й пермеату, Па; $y_{i,r}$ і $y_{i,p}$ – молярні частки компонента i в ретанті (індекс r) і пермеаті (індекс p).

Селективність – це властивість мембрани мати різну проникність для різних компонентів суміші, що розділяється [15].

Кількісно селективність оцінюється за фактором і константою розділення та коефіцієнтом затримання, які характеризують зміну співвідношення компонентів суміші як результат мембранного розділення [15].

Для бінарної суміші, в якій компонент i проникає крізь мембрану швидше за компонент j , фактор розділення дорівнюватиме співвідношенню концентрацій компонентів i та j у пермеаті й ретанті. Для газової суміші найчастіше [15]:

$$S_{ij} = \frac{y_{i,p}}{y_{j,p}} \bigg/ \frac{y_{i,r}}{y_{j,r}}, \quad (3.5)$$

де $y_{i,p}/y_{j,p}$ і $y_{i,r}/y_{j,r}$ – співвідношення молярних часток компонентів i та

j у пермеаті й ретанті.

Для бінарної суміші, в якій компонент i проникає крізь мембрану швидше за компонент j , константа розділення дорівнюватиме співвідношенню констант проникності компонентів i та j [15]:

$$\alpha_{ij} = K_i / K_j. \quad (3.6)$$

Коефіцієнт затримання компонента j – параметр, що визначається як додаток до одиниці співвідношення концентрацій компонента j у пермеаті й ретанті. Для газової суміші [15]:

$$r_j = 1 - \frac{y_{j,p}}{y_{j,r}}. \quad (3.7)$$

Коефіцієнту затримання звичайно віддають перевагу тоді, коли цільовим продуктом є затримуваний компонент суміші [15].

Величини S , α , і r характеризують ефективність процесу мембранного розділення [15].

Також ефективність можна характеризувати за складом цільового продукту, наприклад пермеату. В роботі [10] показано, що можна отримати вираз для складу пермеату:

$$y_i = \left(\frac{\Phi}{2} \right) \left[x_i + \frac{1}{\Phi} + \frac{1}{\alpha - 1} - \sqrt{\left(x_i + \frac{1}{\Phi} + \frac{1}{\alpha - 1} \right)^2 - \frac{4\alpha x_i}{(\alpha - 1)\Phi}} \right] \quad (3.8)$$

де Φ – співвідношення тисків в сировині та пермеаті.

При цьому існують граничні випадки рівняння, зокрема коли $\Phi \gg \alpha$, відношення тисків втрачає свою важливість, та склад пермеату може визначатися за формулою [10]:

$$y_i \cong \frac{x_i \alpha}{1 + x_i (\alpha - 1)} \quad (3.9)$$

Рівняння (3.9) можна використовувати для оцінки максимального вмісту більш проникного компонента в пермеаті.

3.4 Опис експериментальної установки

Принципова схема мембранної установки для розділення повітря представлена на рисунку 3.2, а її технічна характеристика – в таблиці 3.1 [15].

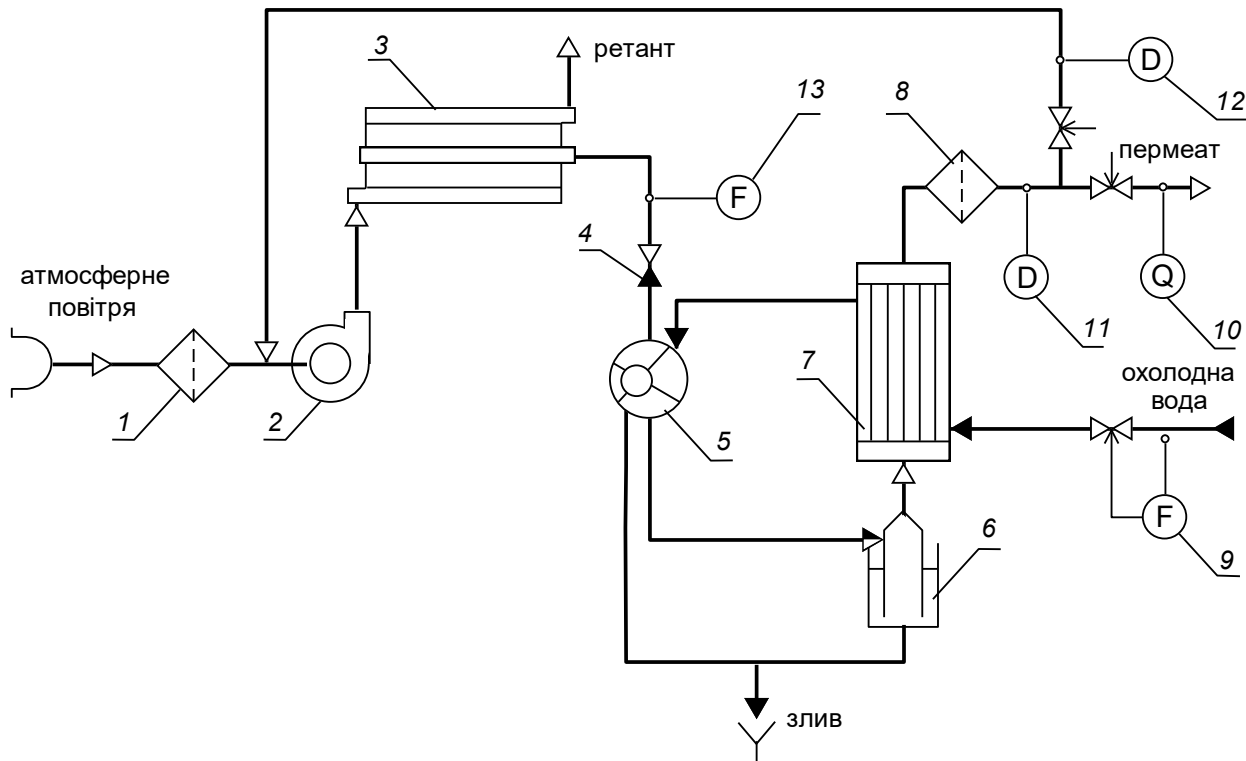


Рисунок 3.2 – Схема газороздільної мембранної установки [15]

Атмосферне повітря, очищене від механічних домішок на повітряному фільтрі 1, вентилятором 2, подається в мембранний апарат 3 [15].

Робота апарата заснована на принципі розділення газових сумішей, що полягає у використанні різної швидкості проникнення їх компонентів крізь по-лімерну мембрану за рахунок перепаду парціального тиску.

Внаслідок цього, повітря, яке пройшло крізь мембрану, збагачується киснем. Збагачене киснем повітря (пермеат) через зворотний клапан відкачується ротаційним водокільце-вим вакуум-насосом 5 [15].

Таблиця 3.1 - Технічна характеристика газороздільної мембранної установки[15]

Характеристика	Показник	Величина
Об'ємна витрата перероблюваного повітря, не менше	м ³ /год	250
Об'ємна частка кисню в пермеаті, не менше	–	0,35
Продуктивність установки за пермеатом	м ³ /год	14
Температура пермеату	°С	5–30
Абсолютний тиск з боку пермеату, не більше	МПа	0,03
Тип мембранних елементів	плоскопаралельний	
Кількість мембранних елементів	штук	240
Загальна площа поверхні мембранних елементів	м ²	90
Матеріал роздільної мембрани	полівінілтриметилсилан	
Товщина роздільної мембрани	мкм	0,2
Константа проникності роздільної мембрани при 25 °С	моль/(м ² ·с·Па)	
	за азотом	$1,98 \cdot 10^{-8}$
	за киснем	$7,07 \cdot 10^{-8}$
Потужність електрообладнання	кВт	3

Насос 5 (рисунок 3.2) складається з корпусу та ексцентрично встановленого в ньому ротора з лопатями. Перед пуском корпус наполовину заповнюється во-дою з водяної магістралі, яка при обертанні ротора відкидається до стінок кор-пуса, утворюючи біля них рідинне кільце, що обертається. Через ексцентрич-ність ротора простір, не заповнений рідиною, поділяється лопатями ротора на чарунки різного об'єму. Повітря засмоктується че-рез отвір у торцевій кришці, розширюється в чарунках, об'єм яких при обертанні ротора збільшується, а потім разом з певною кількістю води виштовхується через отвір у протилежній торцевій кришці [15].

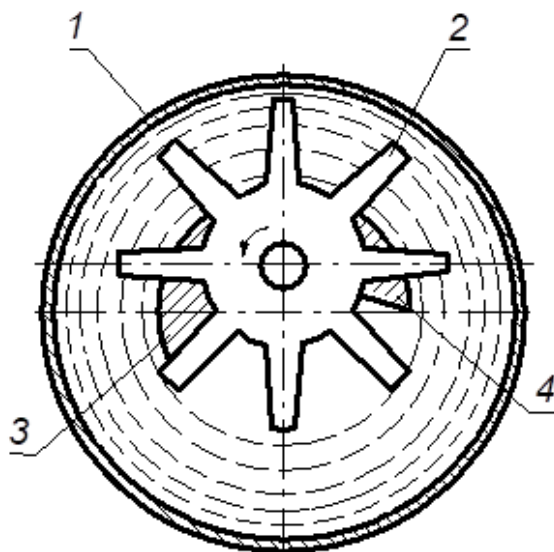


Рисунок 3.2. Схема ротаційного водокільцевого вакуум-насоса: 1 – корпус; 2 – ротор; 3 – усмо-ктувальний отвір; 4 – нагнітальний отвір [15]

Утворена в насосі 5 водно-повітряна суміш поділяється на гідрозатворі 6. Відпрацьована вода зливається в каналізацію, а збагачене киснем повітря над-ходить у кожухотрубний теплообмінник 7, виконаний в одному блоці з гідрозатвором 6, де осушується внаслідок конденсації вологи повітря на зовнішній поверхні трубок, які охолоджуються проточною водою. Після цього повітря проходить через заповнений активованим вугіллям фільтрдезодоратор 8, де очищається від неприємних запахів, і подається споживачеві [15].

З метою забезпечення безперебійної роботи обладнання на водяній магіс-тралі встановлено електроконтактний манометр 9, який забезпечує пуск насоса 5 і вентилятора 2 та їх автоматичне вимикання у випадку падіння напору води нижче 0,05 МПа. Зворотний клапан 4 запобігає надходженню води в мембран-ний апарат 3 і виходу з ладу останнього через раптову зупинку насоса 5 [15].

Для визначення концентрації кисню в пермеаті на виході з системи встановлено газоаналізатор 10. Якщо необхідно збільшити вміст кисню, частина пермеату може повертатися до мембранного апарата 3, тобто здійснюватиметься рециркуляція газової суміші. Кратність циркуляції при цьому можна визначити за показами диференційних манометрів 11 і 12. Об'ємна витрата пермеату визначається за допомогою ротаметра 13 [15].

Основним елементом газороздільної установки є мембранний апарат, принципову схему якого наведено на рисунку 3.4 [15].

На колекторі 1 набрано пакет, який складається з газороздільних мембранних елементів 2, розділової набивки з гофрованого поліетилену 3 і сіток-сепараторів 4. Пакет герметизується компаундом 5. Як роздільна мембрана ви-користовується асиметрична полівінілтриметилсиланова плівка [15].

Повітря через вхідний патрубок 6 потрапляє до колекторного простору 7 апарата і проходить знизу вгору між газороздільними мембранними елементами 2 (розріз А–А на рисунку 3.4). Внаслідок того, що швидкість проникнення кисню крізь мембрану з полівінілтриметилсилану більша за швидкість проникнення інших газів – складових повітря, частина повітря, проникаючи всередину мем-бранних елементів 2, збагачується киснем [15].

Потрапивши всередину мембранних елементів 2, збагачене киснем повітря (пермеат), рухаючись від периферії до центра, потрапляє в колектор 1, звід-ки відкачується через патрубок пермеату 8 (розріз Б–Б на рисунок 3.4). Збіднене за киснем (збагачене азотом) повітря (ретант) виводиться через патрубок ретанту 9 і скидається в атмосферу [15].

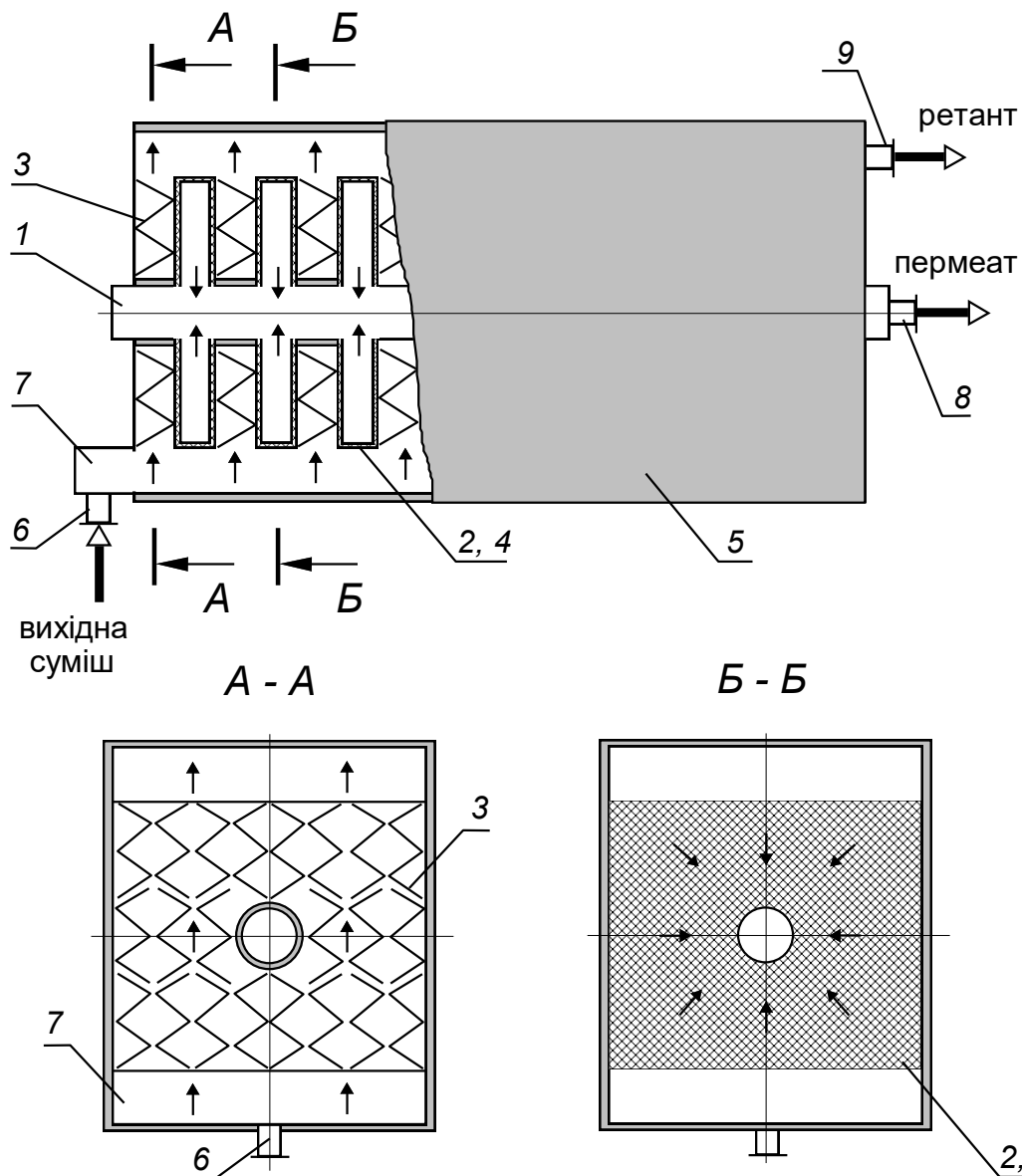


Рисунок 3.4 – Схема мембранного апарата: 1 – колектор; 2 – мембранний елемент; 3 – набивка; 4 – сітка-сепаратор; 5 – компаунд; 6 – вхідний патрубок; 7 – колекторний простір; 8 – патрубок пермеату; 9 – патрубок ретанту

3.5 Техніка безпеки

При роботі на установці необхідно дотримуватися таких правил безпеки [15]:

1. Знаходитися в робочій зоні установки дозволяється тільки в присутності особи, відповідальної за проведення роботи.
2. Перед пуском установки перевірити наявність заземлення і справність арматури.
3. Пуск установки й змінення будь-яких параметрів здійснювати тільки з дозволу викладача.
4. При будь-яких порушеннях у роботі установки звернути на них увагу навчально-допоміжного персоналу або викладача.
5. Особи, що вивчають роботу установки, повинні дотримуватися інших правил техніки безпеки, які поширюються на лабораторію, де виконується робота.

3.6 Головні вимірювання

1. За барометром і термометром, що знаходяться в лабораторії, визначити тиск p' і температуру t' перероблюваного повітря.
2. За вакуумметром визначити тиск p'' з боку пермеату.
3. За допомогою газоаналізатора заміряти молярну (об'ємну) частку кисню у вихідному повітрі y_f і пермеаті y_p .

Результати вимірювання занести в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати експериментів

Параметр	p' , Па	t' , °C	p'' , Па	y_f	y_p
Результат вимірювання					

3.7 Методика обробки експериментальних даних

1. Молярна частка кисню в ретанті [15]:

$$y_r = \frac{y_p \left[1 + (1 - y_p)(\alpha - 1) \frac{p''}{p'} \right]}{y_p + (1 - y_p)\alpha}. \quad (3.10)$$

2. Перевірка виконання умови, за якої можливо одностадійне розділення [15]:

$$p'y_r > p''y_p. \quad (3.11)$$

3. Молярна витрата пермеату, моль/с [15]:

$$L_p = \frac{G_p}{3,6 \cdot 22,4}, \quad (3.12)$$

де G_p – продуктивність установки за пермеатом, м³/год.

4. Молярна витрата вихідної суміші, моль/с:

$$L_f = L_p \frac{y_p - y_r}{y_f - y_r}. \quad (3.13)$$

5. Молярна витрата ретанту, моль/с:

$$L_r = L_f - L_p. \quad (3.14)$$

6. Площа робочої поверхні мембран в апараті, м²:

$$F = \frac{L_p y_p}{K_{O_2} (p'y_r - p''y_p)}. \quad (3.15)$$

3.8 Контрольні завдання

1. Складіть загальне рівняння матеріального балансу газороздільної установки й рівняння матеріального балансу за киснем.
2. Виведіть формулу (3.10).
3. Порівняйте результати розрахунку робочої поверхні мембран з

даними технічної характеристики та зробіть висновки.

4. Оцініть ефективність розділення повітря за допомогою мембрани з по-лівінілтриметилсилану, базуючись на результатах роботи. Запропонуйте спо-соби підвищення продуктивності установки за пермеатом.

5. Обґрунтуйте можливість розділення повітря на полімерній мембрані з полісилоксанарилату, якщо при 25 °С константи проникності кисню та азоту складають $2,98 \cdot 10^{-8}$ і $1,49 \cdot 10^{-8}$ моль/(м²·с·Па) відповідно.

6. Розрахуйте за умов експерименту площу робочої поверхні мембран на основі полісилоксанарилату, якщо потрібно одержати пермеат з молярною часткою кисню 0,35. Порівняйте результати розрахунку з даними технічної характеристики установки й зробіть висновки.

7. Визначте максимально можливий вміст кисню в пермеаті, який можна досягти за одну стадію мембранного розділення, використовуючи поліівінілтриметилсиланові мембрани.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення мембранному газорозділенню і поясніть його механізм.

2. Взаємодія між якими складовими системи «повітря – мембрана» має місце при мембранному розділенні? Якою взаємодією можна знехтувати?

3. Сформулюйте вимоги до газороздільних мембран. Чи можна використовувати для розділення газів ультрафільтраційні мембрани? Чому?

4. Дайте визначення інтенсивності та ефективності мембранного газорозділення. Якими величинами вони характеризуються?

5. Від яких параметрів, на Вашу думку, повинен залежати коефіцієнт проникності індивідуального газу?

6. Чому за робочу температуру процесу майже завжди обирають 25 °С, адже коефіцієнт проникності зростає із збільшенням температури?

7. Чи можна оцінити здатність мембрани до розділення за потоком певного компонента; коефіцієнтом проникності? Чому?

8. Чи має місце явище концентраційної поляризації при мембранному газорозділенні?

9. Що таке селективність мембрани?

10. У чому полягає основна відмінність фактора розділення від коефіцієнта затримання?

11. У сучасній мембранній термінології коефіцієнту затримання віддається перевага перед коефіцієнтом виходу, який визначається за співвідношенням концентрації проникаючої речовини біля обох боків мембрани. Чому?

12. Опишіть конструкцію, принцип дії і призначення елементів установки.

13. Які фізичні й фізико-хімічні процеси й де саме в установці мають місце під час газорозділення?

14. Опишіть конструкцію й принцип дії мембранного апарата. До якого типу мембранних апаратів він належить?

15. З якою метою в розрахунках газороздільних апаратів робиться припущення, що потоки пермеату й ретанту рухаються в режимі ідеального перемішування?

16. З яких міркувань обирається величина тисків з боку вихідної суміші й пермеату?

17. Сформулюйте й поясніть умову, виражену формулою (9).

18. Яку роль у мембранному апараті відіграє поліетиленова набивка? Якими матеріалами можна замінити поліетилен? Сформулюйте вимоги до цього елемента апарата.

19. Опишіть конструкцію й принцип дії ротаційного водокільцевого вакуум-насоса. Чому в установці не встановлено звичайний відцентровий вакуум-насос?

20. Визначте основні фактори, що становлять небезпеку під час роботи установки. Які технічні засоби та організаційні заходи дозволяють запобігти негативного впливу кожного з цих факторів?

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ

4.1 Вступ

Для баромембранних процесів рушійною силою є різниця тисків в напірному і дренажному каналах мембранного модуля (трансмембранний тиск). Величина робочого визначається опором мембрани, осмотичним тиском розчину, а також явищем концентраційної поляризації та її наслідками, зокрема у вигляді осадів. Однак напірні канали мембранних модулів мають невелику товщину (0,3-1 мм) і в них присутня сітка-сепаратор, що обумовлює суттєвий опір руху розділюваного розчину через мембранний модуль. Враховуючи, що довжина промислових мембранних модулів може досягати 1-1,5 м, а в одному апараті може групуватися декілька модулів, втрати тиску по довжині апарата можуть суттєво впливати на процес і для їх врахування необхідно мати надійні залежності [16].

4.2 Мета та задачі дослідження

Метою роботи є експериментальне дослідження опору мембранного модуля [16].

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі дослідження [16]:

1. Експериментально визначити витрати рідини, що проходить через модуль.
2. Експериментально визначити перепад тиску на мембранному модулі.

3. Отримати артеріальне рівняння для визначення втрат тиску на мембранному модулі.

4.3 Теоретичні відомості

Основним елементом кожної мембранної установки є мембранний апарат, в якому розташований мембранний модуль. Найчастіше використовуються модулі спіральної конструкції (рисунок 4.1) [16].

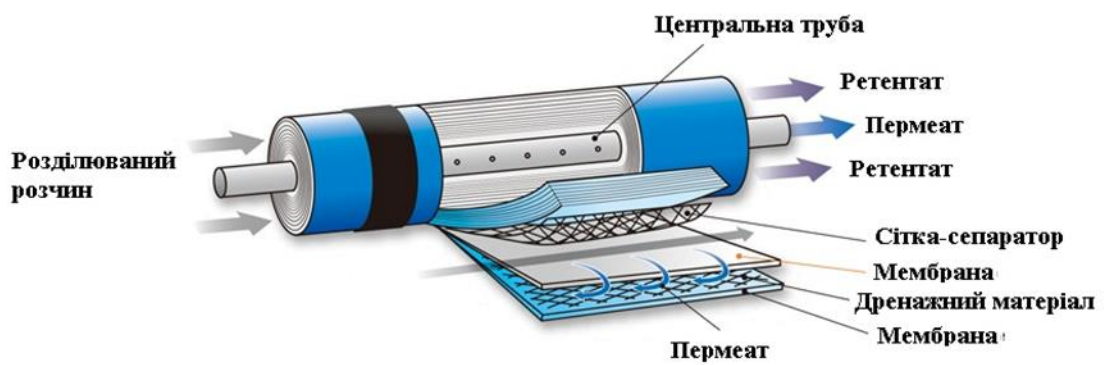


Рисунок 4.1 – Схема спірального мембранного модуля

Спіральні (або рулоновані, рулонні, сувійні) мембранні модулі (Spiral wound membrane modules) для зворотного осмосу набули найбільшого поширення в системах підготовки води через високу питому поверхню (300-1000 м²/м³), малу матеріаломісткість, відносну простоту в експлуатації [3, 9].

В робочих умовах, розділюваний розчин подається через торець в напірні канали рулонованого модуля, частина розчину проходить крізь мембрану, утворюючи пермеат, потрапляє в центральну трубу і відводиться з апарату. Інша частина розчину рухається вздовж мембрани і виводиться з іншого торця модуля, утворюючи ретентат. В процесі

мембранного розділення концентрація розчинених речовин в пермеаті зменшується, а в ретентаті зростає. Канали мембранного модуля утворюються сіткою-сепаратора, яка знаходиться між витками рулону [16].

Малі лабораторні спіральні модулі містять одиничний мембранний пакет, як показано на рисунку 1. Площа поверхні в таких модулях зазвичай становить 0,2–1,0 м². Промислові модулі містять декілька мембранних пакетів, кожен з площею в 1-2 м², загорнутих навколо центральної труби-колектора (рисунок 4.2) [3].

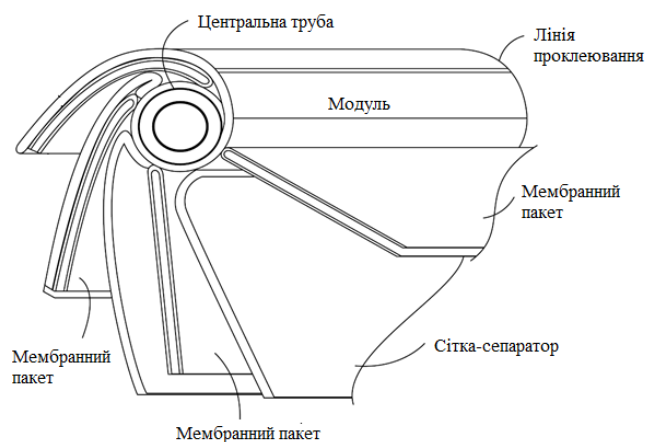


Рисунок 4.2 – Мультипакетний спіральний модуль

Мультипакетна конструкція мінімізує гідравлічний опір потоку пермеату, що рухається до центральної труби. Якщо одиничний пакет використовувати в мембранному модулі з великою поверхнею, то шлях, пермеат проходить до центральної труби становитиме декілька метрів, залежно від діаметра модуля. Такий довгий шлях пермеату буде причиняти значний гідравлічний опір в дренажному каналі. Використанням багатьох коротких пакетів гідравлічний опір в кожному пакеті підтримується на контрольованому рівні. Стандартні промислові спіральні модулі мають діаметр 8 дюймів (203,2 мм) і довжиною 40

дюймів (1016 мм). 12-дюймові модулі (діаметр 304,8 мм) довжиною до 60 дюймів (1524 мм) були виготовлені і служать для економії масштабу. Існує тенденція до зростання діаметрів модулів для більших установок. Приблизні площі поверхні мембран та кількості мембранних пакетів, що використовуються в промислових спіральних модулях довжиною 40 дюймів наведені в таблиці 4.1 [3].

Таблиця 4.1 – Типові параметри стандартних спіральних модулів

Діаметр модуля, дюйм	4	6	8	12
Кількість мембранних пакетів	4-6	6-10	15-30	30-40
Площа поверхні мембрани, м ²	3-6	6-12	20-40	30-60

Від чотирьох до шести мембранних модулів послідовно з'єднуються в одному корпусі. Зазвичай 8 дюймовий корпус, що містить 6 модулів має площу поверхні мембран 100-200 м². Корпус мембранного апарату з двома модулями показаний у розрізі на рисунку 4.3 [3].

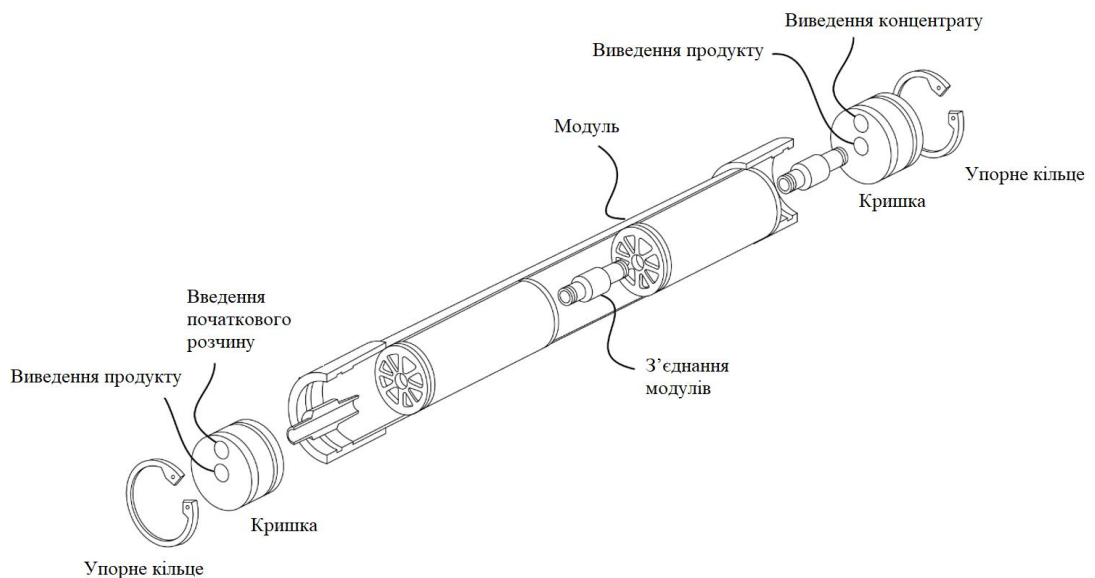


Рисунок 4.3 – Корпус зі спіральними мембранними модулями

На кінці кожного модуля закріплений антителескопічний пристрій (АТП), який сконструйований для уникнення пересування частин модуля під дією прикладеного тиску. АТП також приєднаний з гумовим ущільненням для формування вузького з'єднання між модулем та корпусом. Це ущільнення усуває байпас рідини в зазор між модулем і корпусом [3].

В даній роботі використовують побутові спіральні модулі типу TFC-75. Робоча поверхня мембранного модуля становить $F=0,46 \text{ м}^2$. Товщина сітки-сепаратора визначає висоту каналу, яка для розглядуваного типу мембран становить $\delta=0,35 \text{ мм}$. Довжина мембранного полотна становить $l=1,05 \text{ м}$ [16].

В даній роботі розглядається опір руху рідини в напірному каналі мембранного модуля, а проникнення речовини через мембрану не враховується. Розділюваний розчин заходить в апарат через вхідний штуцер, потрапляє на торець модуля, проходить через модуль, виходить з іншого боку модуля, і далі поступає в наступний модуль апарата. Після виходу з останнього модуля сконцентрований розчин видаляється через відповідний штуцер. Для простоти в даній роботі буде використовуватися один модуль [16].

Опір руху рідини в модулі можна представити у вигляді [16]:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho w^2}{2} \quad (4.1)$$

де w – швидкість руху рідини в каналі мембранного модуля, м/с; ρ – густина рідини, кг/м³; ξ – коефіцієнт гідравлічного опору.

Величина ξ , як правило, визначається експериментально. Однак визначене експериментальне значення для конкретного модуля не може бути використане не лише для модулів інших конструкцій, а й

геометричних розмірів. Тому доцільно скористатися методами теорії подібності. Величина втрат тиску може визначитися з критерію Ейлера [16]:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} \quad (4.2)$$

Ця величина може бути представлена у вигляді залежності від критерію Рейнольдса [16]:

$$Eu = f(Re) \quad (4.3)$$

де Re – критерій Рейнольдса, який визначається за формулою [16]:

$$Re = \frac{w d_e}{\nu} \quad (4.4)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, m^2/s ; d_e – визначальний розмір (еквівалентний діаметр), м.

Визначальним геометричним розміром в усіх критеріях подібності є той геометричний розмір, який найбільше впливає на процес. Для спіральних мембранних модулів за правилом гідравлічного діаметру еквівалентний діаметр прийнято визначати у вигляді [16]:

$$d_e = 2 \cdot \delta \quad (4.5)$$

де δ – товщина мембранного каналу, мм.

Товщина мембранного каналу визначається товщиною сітки сепаратора.

Функціональні залежності між критеріями подібності (формула (4.3)) називаються критеріальними рівняннями. Найчастіше такі рівняння представляються у вигляді степеневих залежностей виду [16]:

$$Eu = C Re^n \quad (4.6)$$

Коефіцієнти C та n знаходять апроксимацією експериментальних даних. Для цього зручно використовувати логарифмічну систему координат (рисунок 4.4) [16].

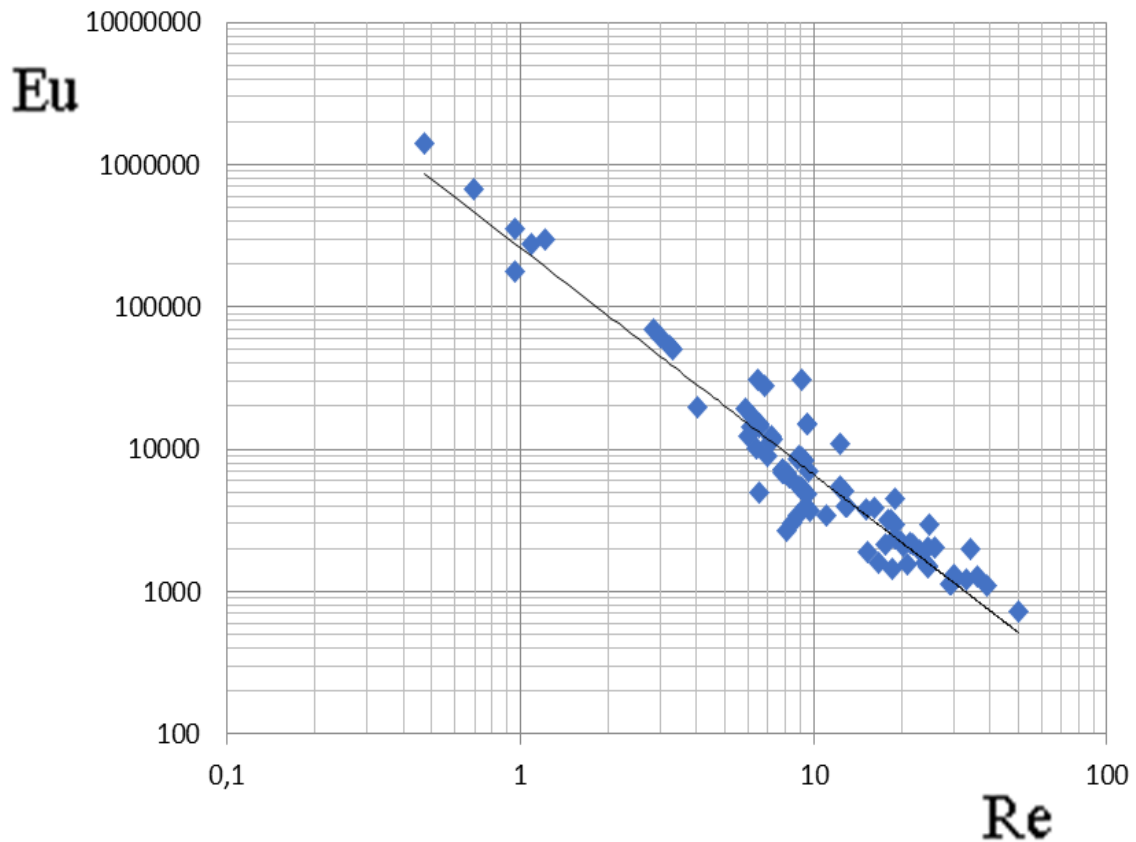


Рисунок 4.4 – Приклад графічної залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса в логарифмічній системі координат

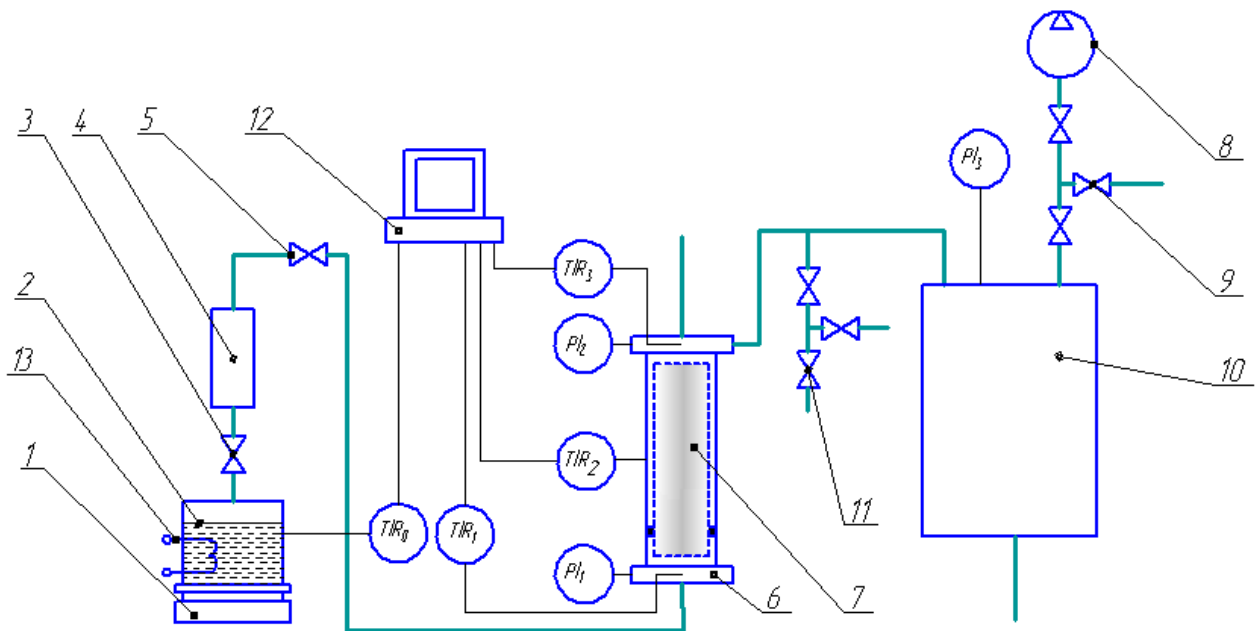
Використання логарифмічної системи координат дозволяє лінеаризувати залежність (4.6) і використати для знаходження коефіцієнтів C та n методів лінійної апроксимації, які набагато простіші, ніж у випадку степеневі апроксимації [16].

4.4 Опис експериментальної установки

Схема експериментальної установки наведена на рисунку 4.5, а її загальний вигляд установки показаний на рисунку 4.6 [16].

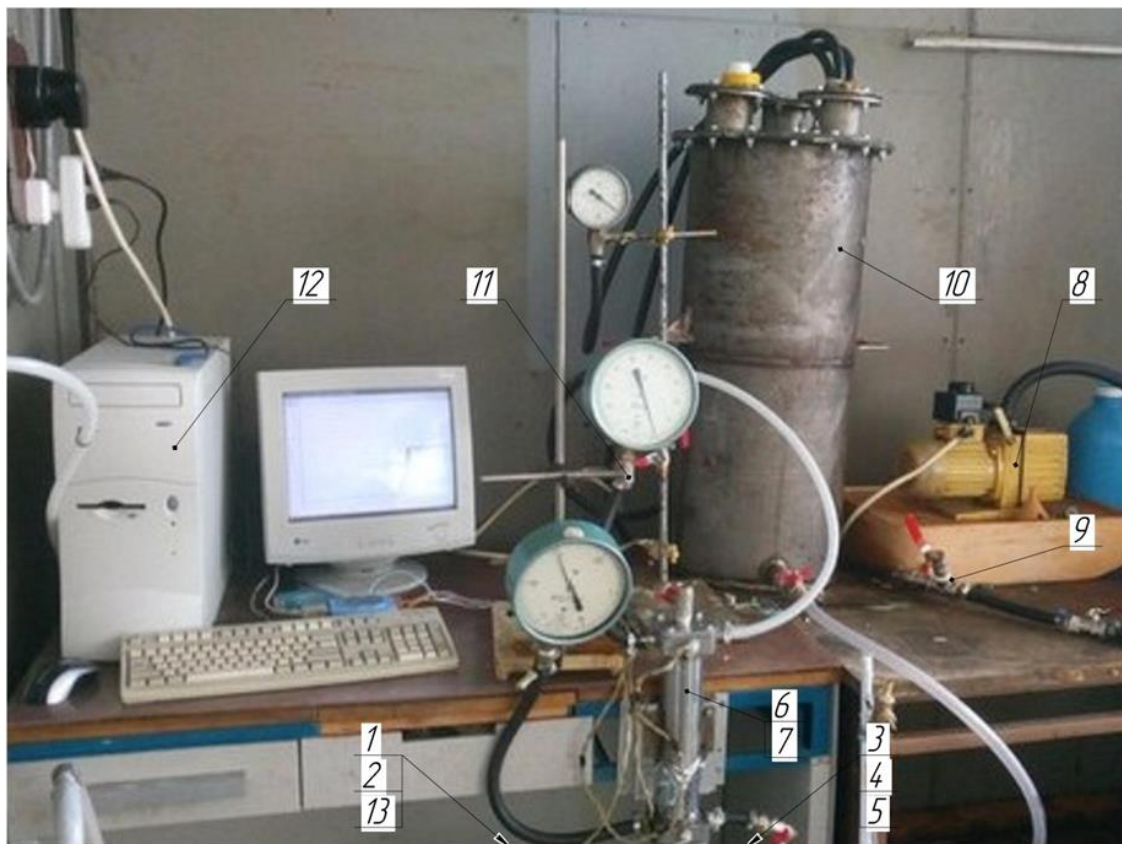
Установка дозволяє вимірювати витрату ваговим методом, для чого

передбачені електронні ваги 1, які неперервно вимірюють масу промивного розчину в ємності 2 підігрітого до заданої температури з точністю 5 гр. Зміна маси за заданий проміжок часу вимірювалася за допомогою електронного секундоміра. Температура вимірюється блоком хромель-копелевих термопар, при чому температура вимірюється на вході в мембранний модуль 7 (TIR_1) та на виході з нього (TIR_3) [16].



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

Рисунок 4.5 – Схема експериментальної установки



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

Рисунок 4.6 – Загальний вигляд експериментальної установки

Додатково передбачено вимірювання температури промивного розчину в ємності 1 (TIR_0) та зовнішньої поверхні експериментальної ємності 6 (TIR_2). Показники термопар реєструвалися на персональному комп'ютері 12 за допомогою програмного модуля IndexTem з частотою 1 вимір в секунду з точністю до 0,2 °С. Вимірювання тиску проводилося за допомогою вакуумметрів на вході в мембранний модуль 7 (PI_1), на виході з

нього (PI₂) та в проміжній ємності 10 (PI₃) [16].

Рух промивного розчину забезпечується перепадом тиску між ємністю 2 та ємністю 10, що створюється вакуум насосом 8. Також вакуум-насос 8 забезпечує розрідження, необхідне для реалізації можливості регенерації забруднених модулів, яке може здійснюватися на даній установці [16].

Регулювання витрат промивного розчину здійснюється регулювальними кранами 3 та 5. Температура промивного розчину збільшувалася за допомогою електричного нагрівача 13 [16].

4.5 Техніка безпеки

Основними факторами небезпеки при виконанні роботи є електричний, динамічний (надлишковий тиск) та хімічний. Додаткову небезпеку становить можливий контакт розчинів електролітів з електрообладнанням. Тому при виконанні роботи необхідно дотримуватися таких правил техніки безпеки [16]:

1. Перед початком роботи перевірити наявність заземлення установки, герметичність захисного кожуха на електрообладнанні, відсутності рідин біля розеток.
2. Перед початком роботи перевірити справність кранів та герметичність з'єднань між шлангами та обладнанням, та роботу зливної системи.
3. Забороняється вмикати вакуум-насос при одночасному відкритті кранів 3, 9 та 11.
4. Не допускається перегрів вакуум-насоса.
5. Не дозволяється залишати працюючу установку без нагляду.

4.6 Методика проведення експериментів

Перед початком досліджень необхідно обнулити показники вагів 1, після чого встановити на них ємність 2, заповнено тестовою рідиною (водою). Вакуум-насос вмикається при закритих кранах 3, 9 та 11, до досягнення необхідного розрідження в ємності 10 (контролюється манометром PI_3). Після встановлення необхідних умов в системі, можна переходити до вимірювань опору [16].

Проводити експерименти необхідно проводити в такому порядку [16]:

1. За допомогою крана 3 встановити необхідну витрату тестової рідини.

2. Виміряти витрату тестової рідини ваговим методом. Для цього необхідно зафіксувати показ вагів 1 в момент ввімкнення секундоміру (m_0) та після закінчення заданого проміжку часу Δt (m_1). Варто звернути увагу, що в процесі роботи маса тестової рідини в ємності 2 зменшується, тобто, по суті, фіксується зменшення маси рідини в ємності 2 за заданий проміжок часу.

3. Виміряти тиск на вході в мембранний модуль p_1 за допомогою манометра PI_1 та на виході з мембранного модуля p_2 за допомогою манометра PI_2 .

4. За допомогою вимірювального комплексу IndexTem виміряти температуру на вході в мембранний модуль t_1 та на виході з нього t_2 .

5. За допомогою крана 3 встановити інше значення витрат тестового розчину і повторити вимірювання згідно пунктів 2-4. Вимірювання провести на 6-10 різних значень витрат.

6. По закінченні роботи вимкнути вакуум-насос і відкрити кран 9.

експериментів, Па (звернути увагу на розмірність) [16]:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (4.9)$$

4. Визначити теоретичне значення гідравлічного опору мембранного модуля, Па [16]:

$$\Delta p^T = \xi \frac{\rho w^2}{2} \quad (4.10)$$

Коефіцієнт опору прийняти в межах $\xi=5-10$.

5. Визначити критерій Рейнольдса [16]:

$$Re = \frac{w d_e}{\nu} \quad (4.11)$$

6. Визначається критерій Ейлера [16]:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} \quad (4.12)$$

Результати розрахунків звести в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунків

№ дослідів	G , кг/с	w , м/с	Δp , Па	Δp^T , Па	Re	Eu

7. Визначити коефіцієнти в рівнянні (4.6) за методом найменших квадратів [16].

Для цього, спершу, необхідно прологарифмувати формулу (4.6) [16]:

$$\lg(Eu) = \lg(C) + n \cdot \lg(Re) \quad (4.13)$$

Неважко бачити, що рівняння (4.13) є рівнянням прямої в логарифмічних координатах з кутовим коефіцієнтом n та вільним членом $B = \lg(C)$ [16].

Для знаходження коефіцієнтів найбільш доцільним є метод найменших квадратів, якій полягає в такому. Розраховуються значення логарифмів модифікованого критерію Рейнольдса, $x_i = \lg(Re)$, та модифікованого критерію Ейлера, $y_i = \lg(Eu)$, а також значення x_i^2 та $x_i \cdot y_i$ і суми всіх величин – $\sum x_i$, $\sum y_i$, $\sum x_i^2$ та $\sum x_i \cdot y_i$. Всі результати зводяться в таблицю 4.4 [16].

Таблиця 4.4 – Знаходження коефіцієнтів в критеріальному рівнянні аналітичним методом

№ пп	Re	Eu	$x_i = \lg(Re)$,	$y_i = \lg(Eu)$,	x_i^2	$x_i \cdot y_i$
Сума:						

Коефіцієнти регресії розраховуються за формулами [16]:

$$m = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \right) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.14)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.15)$$

Тоді значення константи C у рівнянні (4.6) буде дорівнювати [16]:

$$C = 10^B \quad (4.16)$$

Знайшовши ці величини, можна записати рівняння (4.6) з числовими значеннями коефіцієнтів і використати його для розрахунку гідравлічного опору спіральних мембранних модулів.

4.8 Аналіз отриманих результатів та основні висновки

За результатами роботи побудувати графіки залежностей $\Delta p = f(w)$ та $\Delta p^T = f(w)$ в декартовій системі координат (доцільно зобразити два графіки в одній координатній системі), та графік залежності $Eu = f(Re)$ в логарифмічній системі координат.

Пояснити характер графіків.

Порівняти отримані експериментально значення гідравлічного опору мембранного модуля з результатами розрахунків та пояснити причини розбіжностей.

Контрольні запитання

1. Проаналізувати практичне значення мембранних процесів.
2. Пояснити конструкцію спірального мембранного модуля.
3. Проаналізувати фактори, що впливають на величину гідравлічного опору мембранного модуля.

4. Пояснити причини застосування теорії подібності.
5. Проаналізувати фізичний зміст критерію Ейлера
6. Проаналізувати фізичний зміст критерію Рейнольдса
7. Пояснити сутність еквівалентного діаметра.
8. Пояснити метод найменших квадратів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Моделювання процесів мембранного розділення [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. С. В. Гулієнко. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,25 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 166 с. – Назва з екрана. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22235>
2. Гулієнко, С. В. Регенерація рулонованих мембранних модулів систем підготовки води [Електронний ресурс] : монографія / С. В. Гулієнко, Я. М. Корнієнко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 207 с. – Назва з екрана. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22080>
3. Baker R. W. Membrane technology and applications. – 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2004. – 2004.
4. Porter M. Handbook of industrial membrane technology. – Wastwood, New Jersey: Noyes publications. – 619 p.
5. [CE067] Основи мембранної технології my.kpi.ua. URL: https://my.kpi.ua/coursesandbox/syllabusresult?hash=rtf_6213d489a2b4
(дата звернення 15.02.2024)
6. Дослідження процесу зворотного осмосу [Електронний ресурс] : методичні вказівки для проведення науково-дослідної роботи студентів з кредитного модуля «Моделювання процесів мембранного розділення» спеціальності 133 Галузеве машинобудування, спеціалізація Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування хімічних і нафтопереробних

виробництв / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. С. В. Гулієнко. – Електронні текстові дані (1 файл: 686,53 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 14 с. – Назва з екрана. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19158>

7. Vrouwenvelder H. Biofouling of spiral wound membrane systems. PhD thesis Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2009.

8. Запольський А.К. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод /А.К. Запольський, Н.А. Мішкова-Кліменко, І.М. Астрелін. – К.: Лібра, 2000. – 552 с

9. Mulder M. (1996). Basic Principles of Membrane Technology. Springer. Dordrecht.

10. Perry's Chemical Engineers' Handbook. New York: McGraw-Hill, 1997.

11. Huliienko S. V., Korniienko Y. M., Gatilov K. O. (2020). Modern trends in the mathematical simulation of pressure-driven membrane processes. Journal of Engineering Sciences, Vol. 7(1), pp. F1–F21, doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2020.7\(1\).f1](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(1).f1)

12. Huliienko S. V., Korniyenko Y. M., Muzyka S. M., Holubka K. (2022). Simulation of reverse osmosis process: Novel approaches and development trends. Journal of Engineering Sciences, Vol. 9(2), pp. F6-F36, doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(2\).f2](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(2).f2)

13. Моделювання процесів мембранного розділення. Практикум з навчальної дисципліни [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв» / КПІ ім. Ігоря Сікорського;

уклад. С. В. Гулієнко. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,27 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 104 с. – Назва з екрана. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25280>

14. Hulienko, S. V., & Yasenchuk, V. V. (2023). Evaluation of commercial RO membrane for BACL₂ separation. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, 27(1), 35–45. <https://doi.org/10.11113/amst.v27n1.261>

15. Дослідження процесу мембранного газорозділення : метод. вказівки до виконання лабораторних робіт : [для студ. спец. 7(8).090220] / укл. Г. Л. Рябцев, Т. А. Вознюк. – К. : ВКФ "Тріада", 2009. – 12 с. : іл.

16. Процеси та обладнання хімічних технологій – 1. Базові принципи теорії тепломасообміну. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. А. Р. Степанюк, С. В. Гулієнко. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,76 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 69 с. – Назва з екрана. URI <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25282>