МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З КУРСУ «ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ХІМІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВОДИ» ДЛЯ СТУДЕНТІВ НАПРЯМКУ ПІДГОТОВКИ: 6.040106 «ЕКОЛОГІЯ,ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ» ТА 6.051301 «ХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ НЕОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН»

(Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр)

Розроблені у рамках
Міжнародного проекту
Water Harmony
Eurasia - II
http://waterh.wpengine.com

Дніпропетровськ УДХТУ 2016

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторного практикуму
з курсу «Теоретичні основи хімії та технології води»
для студентів напрямку підготовки: 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» та 6.051301 «Хімічна технологія неорганічних речовин»
(Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр)

Затверджено на засіданні
кафедри технології неорганічних
речовин та екології.
Протокол № 9 від 25.02.2015.

Дніпропетровськ УДХТУ 2016

Методичні вказівки до лабораторного практикуму з курсу теоретичні основи хімії та технології води для студентів напрямку підготовки: 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» і 6.051301 «Хімічна технологія неорганічних речовин» (Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр) / Укладачі: В.С. Гевод, Н.Г. Борисова. – Дніпропетровськ: ДНВЗ УДХТУ, 2016. – 68 с.

Укладачі: В.С. Гевод, д-р хім. наук
Н.Г. Борисова

Відповідальний за випуск О.А. Півоваров, д-р техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки до лабораторного практикуму з курсу «Теоретичні основи хімії та технології води» для студентів напрямку підготовки: 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування» і 6.051301 «Хімічна технологія неорганічних речовин» (Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр)

Укладачі: ГЕВОД Віктор Сергійович
БОРИСОВА Ніна Григорівна

Редактор Л.М. Тонкошкур
Коректор Л.Я. Гоцуцова

Підписано до друку 24.02.16. Формат 60×84 1/16. Папір ксерокс. Друк різограф. Умов.-друк. арк. 3,05. Облік.-вид. арк. 3,09. Тираж 100 прим. Зам. № 133. Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015.

ДВНЗ УДХТУ, 49005, м. Дніпропетровськ-5, просп. Гагаріна, 8.

Редакційно-видавничий комплекс

СУТНІСТЬ І ЗАСТОСУВАННЯ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ

Зміст

1	Загальна характеристика фільтраційних процесів……..	6
2	Фізико - хімічні основи методу зворотного осмосу……	8
3	Вплив тиску, температури і концентрації розчинів на процес зворотного осмосу …….	12
3.1	Вплив тиску…….	12
3.2	Вплив температури ……	12
3.3	Вплив концентрації розчину…….	13
4	Утворення осадів на мембранах……	14
5	Технологічні параметри зворотноосмотичної фільтрації…….	15
6	Типи і властивості розділових мембран……...	16
6.1	Полімерні мембрани……...	16
6.2	Рідкі мембрани……	17
6.3	Керамічні мембрани……	17
6.4	Переваги керамічних мембран……...	17
7	Облаштування мембранних модулів……	18
7.1	Площинорамний модуль……	18
7.2	Рулонний модуль……	19
7.3	Модулі з порожнистих волокон…….	20
8	Типові схеми з'єднання мембранних модулів…….	21
8.1	Паралельне з'єднання модулів …….	21
8.2	Послідовне з'єднання модулів……...	22
8.3	Каскадні схеми ……...	22
8.4	Функціонування зворотноосмотичного модуля в режимі наскрізного протоку ……	23
8.5	Функціонування зворотноосмотичного модуля в системі з повторним обробленням концентрату, що утворюється…….....	23
8.6	Вибір оптимального способу рішення задачі…….	24
9	Підготовка води для зворотноосмотичного оброблення…….	26
9.1	Нормативні вимоги до початкової води……...	26
9.2	Конкретизація ефектів дії негативних домішок на роботу мембранних систем …….	27
9.3	Урахування температури поживного розчину …….	28
9.4	Сучасні напрями підготовки води перед зворотним осмосом ……	29
9.5	Відмивання і санітарне оброблення мембран зворотного осмосу і нанофільтрації……..	29
	Лабораторна робота №1 Вивчення процесу демінералізації водного розчину кухарської солі методом зворотного осмосу…..	31
1.1	Загальні положення……..	31
1.2	Експериментальна частина……..	34
1.2.1	Необхідне обладнання і контрольно-вимірювальні прилади……..	34

1.2.2	Блок-схема установки «Екософт 2500 МО-F3A» і принцип її дії…..	34
1.2.3	Технічні характеристики установки……..	35
1.2.4	Вимоги до оброблюваної воді……	35
1.2.5	Робота установки …….	35
1.2.6	Режими функціонування установки та їх перемикання……	36
1.2.7	Принципова схема модуля накопичувальних ємкостей і його стикування з установкою «Екософт 2500 МО-F3A»……...	37
1.2.8	Включення зворотноосмотичної системи …….	37
1.2.9	Порядок виконання лабораторної роботи…….	41
	Лабораторна робота № 2. Вплив робочого тиску на відношення потоків пермеату та концентрату, що утворюються при зворотноосмотичному знесоленні розчину NaCl в установці «Екософт 2500 МО-F3A»……..	42
2.1	Базова інформація……	43
2.2	Експериментальна частина…….	45
2.2.1	Необхідне обладнання і контрольно-вимірювальні прилади……..	45
2.2.2	Порядок виконання лабораторної роботи…….	45
	Лабораторна робота № 3. Освоєння технології зворотноосмотичного опріснення заданого об'єму сольового розчину до бажаного залишкового солевмісту за двома стадіями……	48
3.1	Введення……	48
3.2	Завдання……	48
3.3	Принципова схема обладнання для двостадійного зворотноосмотичного опріснення сольових розчинів……..	49
3.4	Функціонування системи……..……..	49
3.5	Початкові і кінцеві умови в системі……..	50
3.6	Математична модель процесу знесолення розчину в накопичувальній ємкості (1) при його відкачуванні з цієї ємкості на зворотноосмотичне оброблення і повернення в цю ж ємкість пермеату, що продукується……..……..	50
3.7	Солевміст у концентраті, що накопичується в ємкості (2) при зворотно-осмотичному обробленні розчину із ємності (1)……..	53
3.8	Експериментальна частина……..	54
3.8.1	Необхідне обладнання і контрольно-вимірювальні прилади…….	54
3.8.2	Порядок виконання лабораторної роботи……	54
	Лабораторна робота №4. Освоєння технології зворотноосмотичного опріснення заданого об'єму сольового розчину до бажаного залишкового солевмісту в дві стадії, тобто коли мінімізується кількість зворотно-осмотичного концентрату, що підлягає утилізації……	57
4.1	Мета роботи…….	57
4.2	Загальна частина……..	57

4.2.1 Математична модель зміни концентрації розчиненої солі в купажі ємкості (1) на другій стадії зворотноосмотичного процесу……. 57
4.2.2 Зміна солевмісту в концентраті в ємкості (2) на другій стадії зворотноосмотичного процесу..……..…….. 59
4.3 Експериментальна частина……. 61
4.3.1 Необхідне обладнання і контрольно-вимірювальні прилади…….. 61
4.3.2 Порядок виконання лабораторної роботи…… 61
Контрольні питання……. 66
Список літератури…… 68

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Способи фільтрування мають різні назви залежно від розмірів часток, які видаляються з фільтрованої рідини. Перелік цих способів наступний:

– звичайна фільтрація;
– мікрофільтрація;
– ультрафільтрація;
– нанофільтрація;
– зворотний осмос.

Звичайну фільтрацію застосовують для видалення з рідини часток з розмірами більш ніж 1 мкм (1.10^{-6} м). При цьому використовують будь-який відповідний фільтруючий матеріал, який затримує частинки дисперсної фази, а рідину дисперсійного середовища пропускає крізь себе, перетворюючи її в фільтрат.

Об'єм рідини, що подається на звичайну фільтрацію та обсяг одержуваного фільтрату відрізняються лише на величину сукупного обсягу частинок дисперсної фази, затриманих фільтром.

Для видалення частинок з розміром менш ніж 1 мкм, і в тому числі для видалення розчинених солей, використовують адсорбційну фільтрацію, іонообмінну фільтрацію, і мембранні методи: мікрофільтрацію, ультрафільтрацію, нанофільтрацію і зворотний осмос. Принцип дії типового мембранного пристрою (модуля) показаний на рис. 1.1

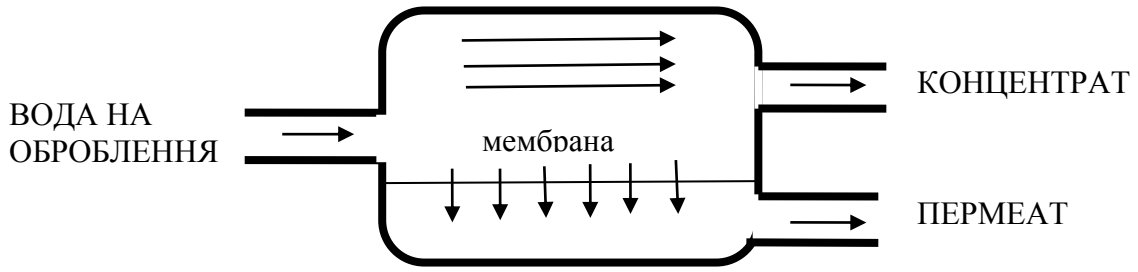


Рис. 1.1. Схематичне зображення типового мембранного модуля

В мембранному модулі рух рідини відбувається під тиском уздовж поверхні мембрани і крізь мембрану, як зазначено горизонтальними і вертикальними стрілками на рис.1. Частина потоку проникає крізь мембрану, утворюючи пермеат. Пермеат являє собою, переважно, розчинник (воду). Він також містить домішки тих речовин, які разом з молекулами розчинника (води) частково проникають крізь мембрану. Пермеат потрапляє в свій колектор. А частина потоку, збіднена розчинником, перетворюється в більш насичений розчин, який має назву концентрат.

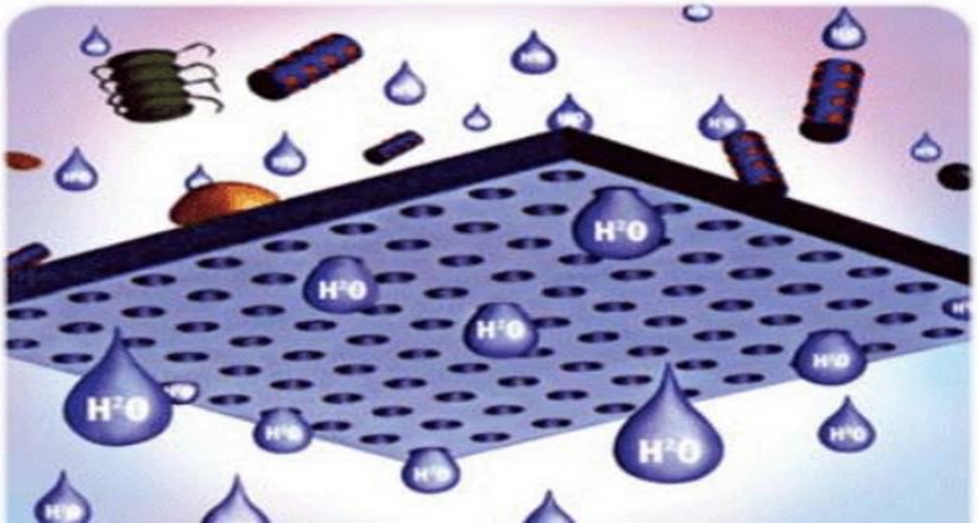


Рис. 1.2. Робота ідеальної напівпроникної мембрани

Концентрат відводиться з мембранного модуля як побічний продукт через інший колектор.

Обсяг пермеату становить від 50 до 20% об'єму рідини, що надходить на ультрафільтрацію і нанофільтрацію, і зменшується до 10% при реалізації зворотно-осмотичної фільтрації. Таким чином, вхідний потік в мембранному модулі ділиться на два вихідних потоки, один з них – пермеат, а інший – концентрат.

За допомогою мікрофільтрації з рідини видаляють домішки в діапазоні розмірів частинок від 0,1 до 1,0 мкм. При цьому процесі суспензії, великі колоїдні частинки та бактерії залишаються в концентраті, а макромолекули та інші розчинені речовини проникають крізь мембрану.

Для здійснення мікрофільтрації необхідні значення робочого тиску становлять приблизно 0.7 бар. (≈0,7 атм.)

Ультрафільтрація забезпечує видалення домішок з розмірами частинок до 0,1 мкм. Вона затримує бактерії, віруси і великі органічні молекули, але розчинені солі та органічні речовини з середньою молекулярною масою вільно проникають крізь ультрафільтруючу мембрану. Робочий тиск, що необхідний для забезпечення ультрафільтрації становить 1–5 бар (≈1–5 атм.)

Нанофільтрація застосовується для видалення домішок з розмірами частинок до 1 нм (1.10^{-9} м). При цьому відбувається видалення від 20 до 98% розчинених солей. Солі, які складаються з 1-1 валентних іонів, затримуються на 20 - 80%, а солі, що мають у своєму складі двовалентні іони, затримуються на 90 - 98%. Робочі значення тиску при здійсненні нанофільтрації варіюють у межах від 3,5 до 16 бар.(≈ від 3,5 до 16 атм.)

Зворотноосмотична фільтрація застосовується для максимально глибокого очищення та демінералізації води. Зворотноосмотичні мембрани створюють найвищий потенційний бар'єр для гідратованих іонів розчинених солей, а також для всіх органічних і неорганічних речовин з молекулярною

масою понад 100 дальтон. Робочий тиск, необхідний для здійснення зворотноосмотичної фільтрації, варіює від 14 бар (≈14 атм.) при обробленні солонуватої води, до 69 бар (≈69 атм.) при обробленні морської води.

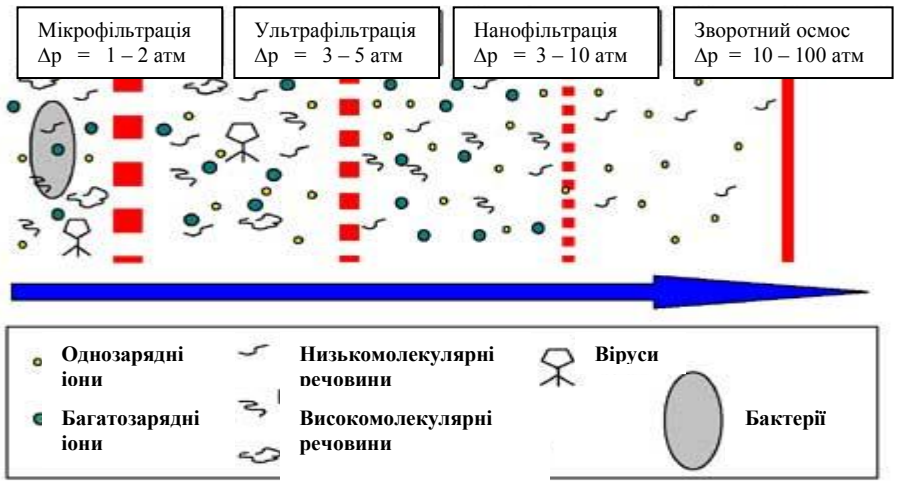


Рис. 1.3. Ілюстрація можливостей різних видів фільтрації

2. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ МЕТОДУ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ

Метод зворотного осмосу, заснований на явищі, протилежному осмотичному перенесенні молекул води (або іншого розчинника) під дією градієнта їх активності крізь тіло напівпроникної мембрани в системі, що розділяє розчини з різними концентраціями, як зображено на рисунку, наведеному нижче. При цьому ліва половина рисунка відображає явище осмосу, а права – зворотного осмосу.

Тиск, при якому в системі розчин-розчинник досягається рівність швидкостей прямого і зворотного перенесення молекул розчинника (води) крізь тіло напівпроникної мембрани називається осмотичним.



Рис. 2.I. Люстрація явищ осмосу і зворотного осмосу

Осмотичний тиск в розбавлених сольових розчинах визначають за рівнянням Вант-Гоффа:

$$p_{осм} = \frac{i \cdot R \cdot T \cdot C}{M}, \qquad (2.1)$$

де i – кількість грам - іонів, що утворюються за рахунок дисоціації грам - молекули розчиненої солі;

T – абсолютна температура розчину, ^{o}К;

R – універсальна газова постійна (8,310 Дж/ моль. град);

C – концентрація розчиненої солі (г/м^3);

M – молекулярна вага солі (г/моль).

Кількість грам-іонів, що утворюються при дисоціації розчиненої солі визначається за формулою:

$$i = 1 + \alpha(n-1), \qquad (2.2)$$

де α – ступінь дисоціації молекул розчиненої солі;

n – число іонів, на яке дисоціює кожна молекула розчиненої солі.

Якщо з боку більш концентрованого розчину прикладено тиск, що перевищує величину осмотичного тиску, то перенесення розчинника (води) крізь мембрану відбувається з боку більш концентрованого розчину до менш концентрованого розчину, тобто він здійснюється проти градієнта активності розчинника (води). Це і є явище зворотного осмосу.

Розділення розчинів на розчинник і сольовий концентрат методом зворотного осмосу відбувається без фазових перетворень. Енергія витрачається тільки на створення рушійної сили (тиску) для забезпечення потоку розчинника (води) крізь функціональні пори в напівпроникній мембрані. Тому при зворотному осмосі енергетичні витрати наближаються до величини термодинамічної роботи поділу. Такі витрати істотно менші, ніж витрати енергії при дистиляції.

Процес зворотного осмосу за своїм змістом кардинально відрізняється від звичайної фільтрації.

Звичайною фільтрацією з розчинів видаляють домішки дисперсної фази. Іншими словами, цим способом поділяють гетерогенні рідкі суміші на розчин і осад коли фільтруюча перегородка (мембрана) не є напівпроникною, і розчинені речовини разом з розчинником (водою) вільно проникають крізь неї.

При звичайній фільтрації часточки нерозчинних домішок затримуються на поверхні мембрани або усередині неї за механізмами гравітаційного осадження, механічної закупорки фільтруючих отворів (пір), інерційної і безінерційної гетерокоагуляції.

Зворотним осмосом звільняють від розчинених речовин гомогенні (однорідні) водні системи – істинні розчини. Це зумовлює відповідні вимоги до

підтримуючих матеріалів і вентильних шарів у мембранах, а також до тиску, під дією яких реалізується процес.

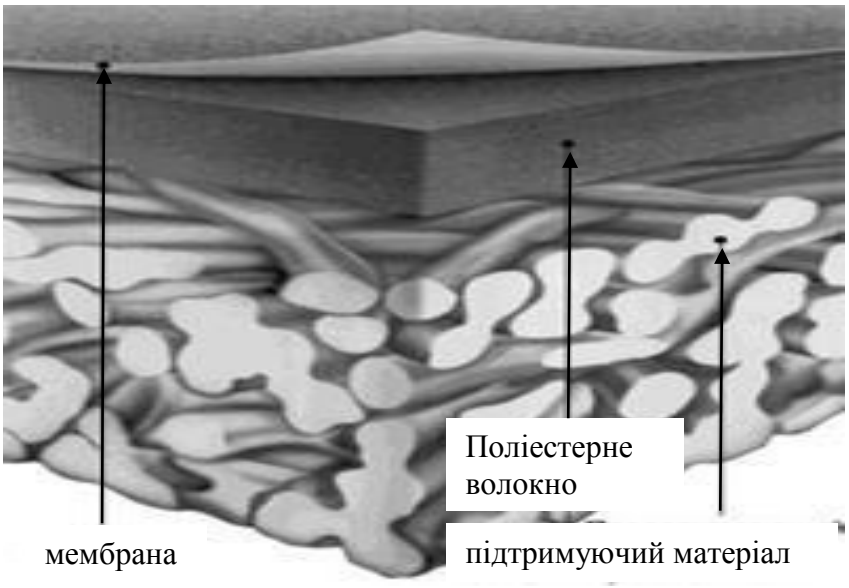


Рис. 2.2. Будова зворотноосмотичної мембрани

При зворотному осмосі крізь мембрану в ідеалі проникають тільки молекули води, (їх усереднений діаметр становить ≈ 2,8 ^{o}A, або $2{,}8.10^{-10}$ м), а розчинені солі та інші хімічні сполуки затримуються біля мембранної поверхні. У зв'язку з такою вибірковою проникністю, зворотноосмотичні мембрани мають високий гідравлічний опір (Rm). Це викликає необхідність реалізовувати процес фільтрування при тисках, які істотно перевищують теоретично розраховану величину осмотичного тиску.

При зворотноосмотичному розділенні розчинів виникають також сили, що додатково протидіють фільтруванню за рахунок виникнення градієнта концентрації розчинених речовин в дифузійному шарі у напрямку, перпендикулярному до поверхні мембрани з боку розчину, що фільтрується, як показано на рисунку, наведеному нижче. Це явище називається концентраційною поляризацією (Rcp).

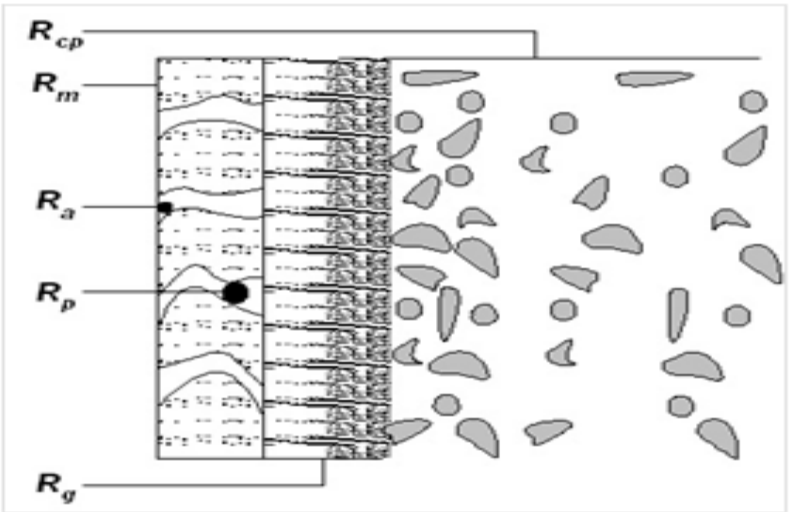


Рис. 2.3. Виникнення концентраційної поляризації в навколо мембранному шарі. Пояснення в тексті

Поляризаційні явища спостерігаються у всіх мембранних процесах. З часом концентрація розчинених речовин, що накопичуються біля поверхні мембрани, може стати дуже високою і викликати утворення гелевого шару. Такий шар (навіть дуже тонкий) створює великий додатковий опір (Rg), який з часом призводить до повного припинення процесу поділу. Гель утворюється з високомолекулярних органічних речовин (наприклад, з молекул білків, присутніх у воді) і при випаданні в осад на поверхні мембрани деяких малорозчинних солей.

У разі застосування пористих мембран, компоненти розчину можуть кристалізуватися всередині мембран і блокувати їх пори. Цей додатковий опір називають опором блокованих пір (Rp). І, нарешті, до виникнення додаткового опору може призводити адсорбційна здатність матеріалу мембрани (Ra). Адсорбція різних речовин може відбуватися як на поверхні мембрани, так і на стінках пір.

Концентраційна поляризація завжди зменшує швидкість масоперенесення розчинника (води) крізь напівпроникну мембрану. При цьому встановлюється компромісна величина градієнта концентрації, що забезпечує динамічну рівновагу між підведенням розчинених речовин до поверхні мембрани та їх видаленням від неї за рахунок конвективної та молекулярної дифузії.

Концентраційна поляризація стає критично значущою при високому вмісті розчинених речовин у фільтрованому розчині. Тому при зворотному осмосі необхідно безперервно відводити затримувані речовини від поверхні мембрани. Накопичення їх у поверхні мембрани уповільнює, або зовсім зупиняє процес зворотноосмотичного поділу.

Якщо речовина, що затримується, не відводиться від поверхні зворотноосмотичної мембрани (наприклад, у разі здійснення, так званої, тупикової фільтрації), то за мірою її накопичення неминуче знижується ефективна швидкість фільтрування. Це відбувається тому, що збільшення концентрації розчинених речовин біля поверхні мембрани викликає підвищення осмотичного тиску. При досягненні останнім значення, що дорівнює прикладеному гідростатичному тиску, рушійна сила процесу стає рівною нулю, а, отже, і швидкість фільтрування води крізь мембрану також звертається у нуль.

Поряд з концентраційною поляризацією в апаратах зворотного осмосу виникає і градієнт концентрації, спрямований уздовж поверхні мембрани. Це пов'язано з тим, що при русі розчину уздовж мембрани, частина молекул води фільтрується на її протилежну сторону і концентрація розчинених речовин в потоці зростає. Це явище має назву навколомембранного концентрування розчинів.

Таким чином, в зворотноосмотичних апаратах завжди встановлюються поперечний і поздовжній перепади концентрацій розчинених речовин. Поряд з робочим тиском, вони керують кінетикою зворотноосмотичного розділення розчинів на пермеат (зворотно осмотичний фільтрат) і концентрат.

3. ВПЛИВ ТИСКУ, ТЕМПЕРАТУРИ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ РОЗЧИНІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ

3.1. Вплив тиску

Основним фактором, що впливає на процес зворотного осмосу, є робочий тиск, який забезпечує зворотноосмотичну фільтрацію.

Із збільшенням робочого тиску збільшується рушійна сила процесу і, відповідно, зростає величина ефективної проникності мембрани по відношенню до розчинника (пермеату).

У тих випадках, коли мембрана не змінює своєї структури під дією тиску, то її проникність лінійно зростає із збільшенням тиску, і, оскільки проникність мембрани для розчиненої речовини мала порівняно з її проникністю для розчинника (води), то загальна проникність зворотноосмотичної мембрани добре описується рівнянням:

$$G = A\left(P - \Delta\pi\right), \tag{3.1}$$

де G – проникність мембрани для води;

A – константа для системи мембрана – розчин при певних зовнішніх умовах;

P – робочий тиск, що реалізується;

$\Delta\pi$ – різниця осмотичних тисків розчинів по обидва боки мембрани.

Але при підвищених тисках полімерні мембрани не зберігають своєї первісної структури і ущільнюються. Це відбивається на величині константи «A» у рівнянні (3.1). Тобто, по досягненні деякої величини робочого тиску, проникність зворотноосмотичної мембрани може почати знижуватися і при певних тисках досягти мінімуму.

Аналогічно виглядає і залежність селективності розділення від тиску. Селективність зворотноосмотичних мембран в області малих тисків лінійно зростає зі збільшенням тиску, потім швидкість зростання знижується і селективність досягає максимальної величини, що визначається типом мембрани і природою розчиненої речовини. Такий характер залежності обумовлений тим, що в області невисоких тисків зі збільшенням рушійної сили зростає потік розчинника (води) крізь мембрану, в той час як потік розчиненої речовини практично не змінюється. Те, що селективність залишається постійною навіть після досягнення мінімуму проникності, пояснюється зниженням потоку розчиненої речовини крізь мембрану при ii значному ущільненні.

3.2. Вплив температури

Вплив температури розчину на процес поділу його на компоненти методом зворотного осмосу має складний характер. Збільшення температури

зменшує в'язкість і щільність розчину і, одночасно, збільшує його осмотичний тиск, як показує рівняння (2.1) у розділі 2.

Зменшення в'язкості і щільності розчину приводить до збільшення проникності мембрани, а збільшення осмотичного тиску знижує рушійну силу і, відповідно, зменшує мембранну проникність.

Вплив цих факторів залежить від природи розчиненої речовини і від концентрації розчину. Дослідження, проведені на чистій воді і водних розчинах NaCl, показали, що в діапазоні температур 10 - 40 ^{o}C проникність і селективність зворотноосмотичних мембран зростають. При цьому вплив температури на селективність зворотноосмотичної мембрани стає все більш відчутним з підвищенням концентрації розчину, що розділяється.

Вплив температури на проникність зворотноосмотичних мембран при розподілі розчинів з невисокою концентрацією практично повністю визначається зміною в'язкості розчинів та добре описується формулою

$$G \cdot \mu = const, \tag{3.2}$$

де G – проникність мембрани для розчинника;

μ – в'язкість розчину.

Для концентрованих розчинів величина добутку G зменшується зі збільшенням температури.

У багатьох випадках підвищення температури сприяє розмиванню на мембрані блокуючого шару мінеральних і органічних осадів. Тому в межах термостійкості мембрани використання підвищених температур може бути виправданим.

3.3. Вплив концентрації розчину

Збільшення концентрації розчину призводить до зменшення рушійної сили процесу зворотного осмосу через зростання величини концентраційної поляризації, а також супроводжується збільшенням в'язкості і щільності розчину, що додатково знижує величину ефективної проникності мембрани.

Для урахування зміни проникності зворотноосмотичних мембран, у зв'язку зі зміною концентрації оброблюваних розчинів, запропоновано використовувати наступне емпіричне рівняння:

$$G = \Delta P \cdot \rho / \mu \cdot k_1 / \left(k_2 + x^n\right), \tag{3.3}$$

де k_1, k_2, n – константи, що характеризують конкретну систему «мембрана – розчин»;

x – концентрація вихідного розчину;

ρ – щільність розчину;

μ – в'язкість розчину.

Залежність селективності зворотноосмотичних мембран від концентрації поділюваних розчинів носить більш складний характер. У разі мембранного розділення розчинів з невисокою концентрацією селективність зворотноосмотичної мембрани практично не змінюється із зміною концентрації, а в зоні висококонцентрованих розчинів падіння селективності зворотноосмотичних мембран у міру наростання концентрації оброблюваного розчину виявляється лінійним.

4. УТВОРЕННЯ ОСАДІВ НА МЕМБРАНАХ

Вітчизняний і закордонний досвід експлуатації зворотноосмотичних систем показав, що на тривалість і надійність їх роботи великий вплив має процес осадоутворення. Мінеральні та органічні осади, які утворюються на поверхні зворотноосмотичних мембран у процесі їх експлуатації, з плином часу блокують (закупорюють) пори в мембранному матеріалі, і тим самим створюють додатковий опір масоперенесення. В наслідок цього на мембранах збільшується концентраційна поляризація і знижується їх продуктивність та селективність.

Хімічний склад осадів, що утворюються при обробленні води різного типу, досить різноманітний. На процеси зворотного осмосу негативно впливає утворення відкладень малорозчинних солей кальцію, гідрооксиду заліза і марганцю, а також суспензійних речовин і високомолекулярних сполук (колоїдних поверхнево-активних речовин), як показано на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Блокування мембранної поверхні дисперсними домішками і осадом малорозчинних солей

У підземних мінералізованих водах і в морських водах катіони кальцію знаходяться в рівновазі з бікарбонатними і сульфатними аніонами. Їх вміст коливається від 100-120 до 300-400 мг/дм^3. Але оскільки в процесі зворотноосмотичного оброблення мінералізованої води відбувається переважне перенесення молекул H_2O крізь мембрану, то це викликає порушення вихідного рівноважного стану розчинів, що супроводжується випаданням на мембранах осадів сульфату і карбонату кальцію за рахунок перевищення меж їх розчинності (близько 2-3 г/дм^3 при 200С).

Швидкість утворення сульфатних і карбонатних відкладень залежить від вмісту цих солей жорсткості у воді що входить і від величини її pH. Чим вища початкова концентрація солей жорсткості і pH води, тим швидше відбувається утворення осадів. Карбонатні відкладення утворюють щільну, міцно скріплену з поверхнею мембрани плівку; для сульфатних відкладень характерні пухкість структури та нерівномірність їх розподілу в просторі фільтраційної камери.

Осади гідроокису заліза (див. рис. 4.2) і оксидів марганцю також знижують ефективність роботи напівпроникних мембран.



Рис. 4.2. Блокування мембранної поверхні сполуками заліза

5. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ЗВОРОТНООСМОТИЧНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

Процес зворотного осмосу характеризується питомою продуктивністю мембран, їх затримуючою здатністю і концентраційною поляризацією.

Питома продуктивність мембрани визначається величиною q (м^3/м^2.добу). Вона пов'язана з об'ємною швидкістю фільтрування u (м^3/добу) співвідношенням:

$$q = \frac{u}{k}, \qquad (5.1)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від типу використовуваної мембрани і має розмірність площі (м^2).

Затримуючу здатність (селективність) мембрани визначають величиною R. Затримуюча здатність R описується формулою

$$R = 1 - C_Ф / C_М \,, \tag{5.2}$$

де $C_ф$ – концентрація речовини в пермеаті;

$C_м$ – концентрація речовини в об'ємі оброблюваного розчину.

Концентраційна поляризація визначається величиною *Г*. Вона знаходиться як відношення концентрації розчинених речовин біля поверхні мембрани $C_м$ до концентрації цих речовин у об'ємі оброблюваного розчину:

$$Г = C_М / C \,. \tag{5.3}$$

Величина концентраційної поляризації *Г* залежить від гідродинамічних умов, що реалізуються в зворотноосмотичному апараті.

6. ТИПИ І ВЛАСТИВОСТІ РОЗДІЛОВИХ МЕМБРАН

Напівпроникні мембрани, за допомогою яких здійснюється процес поділу водних розчинів на пермеат і концентрат, є основною частиною будь-якого зворотноосмотичного апарата. Вони визначають не тільки технологічні показники процесу, а також технічні та експлуатаційні характеристики апаратів. Напівпроникні мембрани виробляють з полімерних матеріалів, пористого скла, графіту, металевої фольги та ін. Від матеріалу мембрани залежать її властивості : хімічна стійкість, механічна міцність, селективність та ін.

6.1. Полімерні мембрани

Їх створюють пористими і непористими (поняття "непористі" – умовне). За типами структури полімерні мембрани поділяють на симетричні і асиметричні. Всі вони мають високу механічну міцність в широкому діапазоні температур. Щоб забезпечити достатньо велику продуктивність полімерних мембран та необхідну чистоту одержуваного пермеату (фільтрату), розділовий (вентильний) шар у них створюють максимально тонким і, в той же час, високо селективним.

В сучасних гомогенних мембранах мікропористий шар (99,5% товщини мембрани) є несучою основою для дуже тонкого селективного непористого робочого (вентильного) шару, який не створює великого опору масоперенесенню води. Але виробництво таких мембран пов'язане з певними технологічними труднощами.

Практикують також нанесення селективного шару на пористу основу (підкладку) з більш дешевого і доступного неселективного матеріалу.

Полімерні композитні мембрани істотно менш схильні до деформацій під тиском, ніж гомогенні мембрани. Для створення селективного шару в композитних мембранах використовують спеціальні полімери. Застосування асиметричних напівпроникних мембран є основним сучасним напрямом в мембранній технології.

6.2. Рідкі мембрани

Під рідкими мембранами мають на увазі мембрани з рідиною, що іммобілізована всередині порового простору мікропористої підкладки. Якщо мембранний матеріал змочується рідиною, то ця рідина може утримуватися в порах мембрани за рахунок капілярних сил. Тиск, необхідний для витіснення рідини з порового простору, називається капілярним тиском і змінюється обернено пропорційно радіусу пор. При досить малих радіусах пор рідина утримується на підкладці при різниці тисків під і над мембраною у декілька атмосфер.

На практиці використовують рідкі мембрани двох типів. До першого типу належать «пасивні» рідкі мембрани. В них працюють відповідні чисті рідини, що мають більшу проникність за цільовим компонентом. Другий тип рідких мембран – мембрани з активним транспортом цільового компонента. В цьому випадку в якості рідини використовуються специфічні переносники цільового компоненту, розчинені у відповідному розчиннику.

6.3. Керамічні мембрани

В останні роки успішно розвивається напрям з використанням керамічних мембран (рис. 6.1).

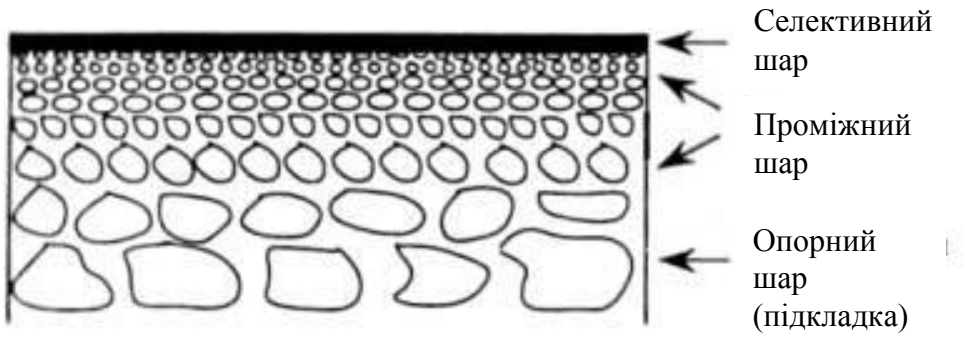


Рис. 6.1. Схематичне зображення керамічної мембрани

Керамічні мембрани складаються з пористої підкладки на основі оксидів алюмінію з розмірами пор 10-15 мкм і загальною пористістю приблизно 45%, а також безпористого селективного поверхневого шару.

6.4. Переваги керамічних мембран:

– висока робоча температура – 1000^{0}С і вище;
– висока механічна міцність та довговічність;
– стійкість до хімічно агресивних середовищ;
– зручність регенерації.

7. ОБЛАШТУВАННЯ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ

За для ефективного здійснення розподілових процесів у мембранних системах, відповідним чином організовують потоки вхідної суміші, пермеату (фільтрату) та концентрату. В наш час конструкції промислових опріснювальних установок компонують стандартними модулями, які компактні і взаємозамінні.

Великі розділові апарати і установки споруджують з модулів, сукупність яких забезпечує розділення вхідного потоку суміші з необхідною продуктивністю і селективністю. Модулі відрізняються за конструкцією фільтруючих вузлів. Основними конструкціями є: плоско рамні, рулонні і порожньо волоконні мембранні вузли.

7.1. Плоско рамний модуль

Організація потоків в плоско рамному модулі і типова конструкція модуля з плоскими мембранними елементами показана нижче:

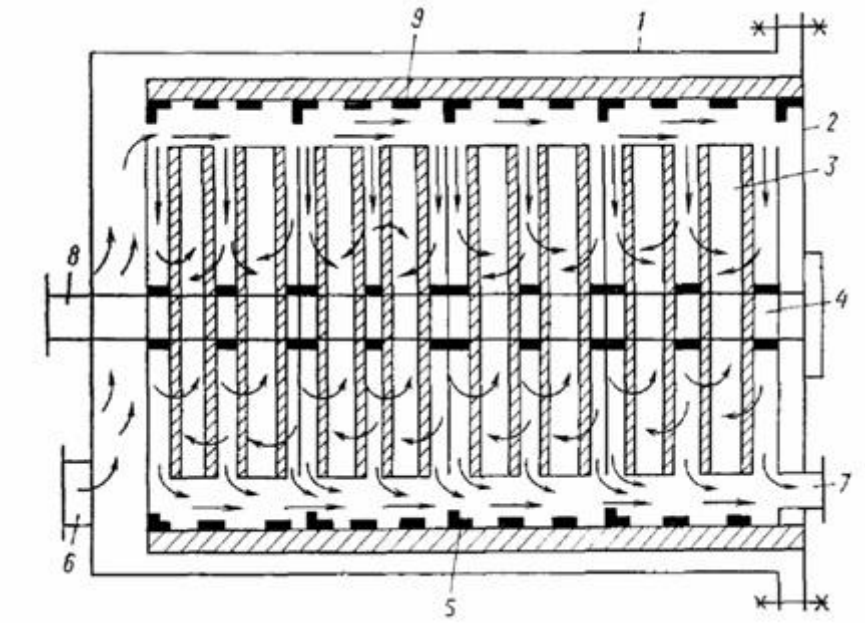


Рис. 7.1. Схематичне зображення плоско рамного зворотноосмотичного модуля

В корпусі апарата на трубчастому колекторі герметично закріплені плоскі мембранні елементи. У фланцях знаходяться отвори для введення вхідної

суміші і відведення концентрату. Між елементами розташовані розділові вставки. Кінці елементів втоплені в стінку з кремнієрганічної смоли, поліуретану, або епоксидної смоли.

Мембранний елемент складається з пористої опори з напівпроникною мембраною на її поверхні. В центрі елемента є отвір під колектор. По периферії мембранного елемента нанесено герметизуючу масу. Це дозволяє ще на стадії складання, тобто до введення елемента в корпус, перевірити характеристики мембранної конструкції і упевнитися в її герметичності. Робоча поверхня мембранного елемента в зборі становить приблизно 70% від його габаритної поверхні, а інша частина покрита герметиком.

Модуль працює наступним чином: живляча вода вводиться через впускний отвір і далі послідовно проходить по секціях мембранного елемента у напрямах, вказаних стрілками. При цьому частина потоку проникає крізь мембрани і відводиться з модуля через колектор (пермеат), а інша частина (концентрат) виводиться з модуля через випускний отвір. Таку конструкцію модуля з плоскими мембранними елементами вважають базовою.

7.2. Рулонний модуль

Мембранна упаковка розділового модуля рулонного типу складається з гнучких стрічкових елементів.

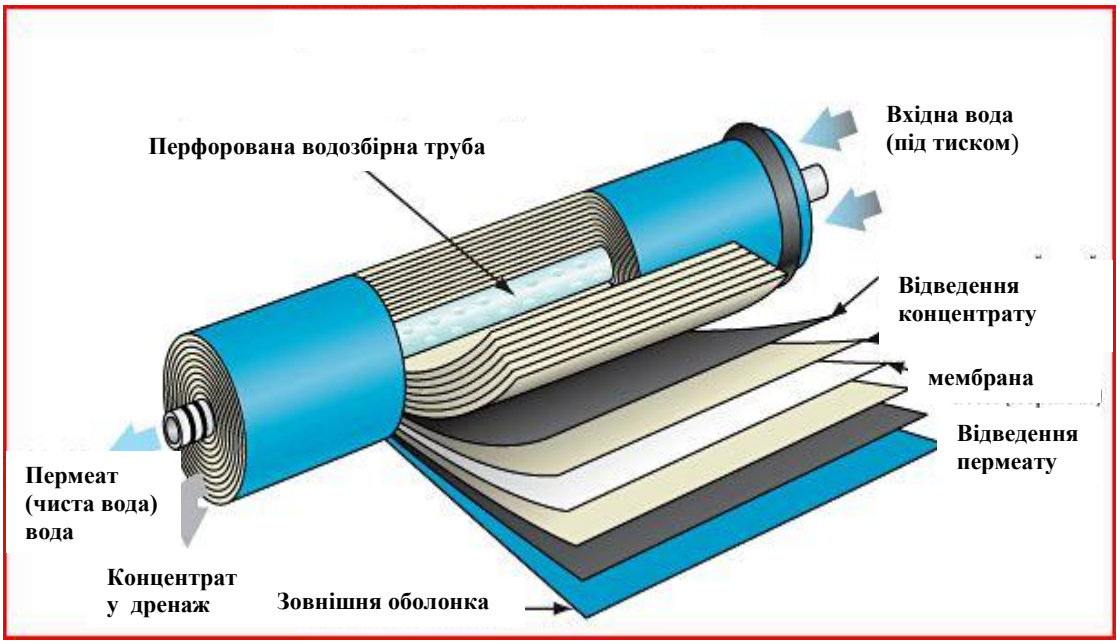


Рис. 7.2. Схематичне зображення розділового мембранного модуля рулонного типу

Основною функціональною частиною рулонного модуля є безперервна стрічка напівпроникної мембрани. Елемент, який є опорою для мембрани, і слугує для розподілу потоків, виконаний у вигляді гнучкої профільованої пластмасової стрічки. У цій стрічці поздовжні канали призначені для підведення розчину, а поперечні – для відводу пермеату (фільтрату).

Напівпроникна мембрана разом з гнучкою опорою намотується на перфоровану трубу.

Мембранорулонна упаковка розташовується в корпусі з патрубками для подачі води та відводу одержаних пермеату і концентрату.

Модулі рулонного типу відрізняються простотою виготовлення. Але їх загальним недоліком є складність комутації потоків.

7.3. Модулі з порожнистих волокон

Модулі з порожнистими волокнами становлять найбільший інтерес в порівнянні з мембранними модулями інших видів. За їх допомогою можна створювати розділяючі поверхні до 30.10^3 $м^2/м^3$ волоконної упаковки. Застосування в якості мембранних елементів порожнистих волокон забезпечує найбільшу питому поверхню мембран в одиниці об'єму модуля. Це сприяє створенню компактних і високопродуктивних апаратів.

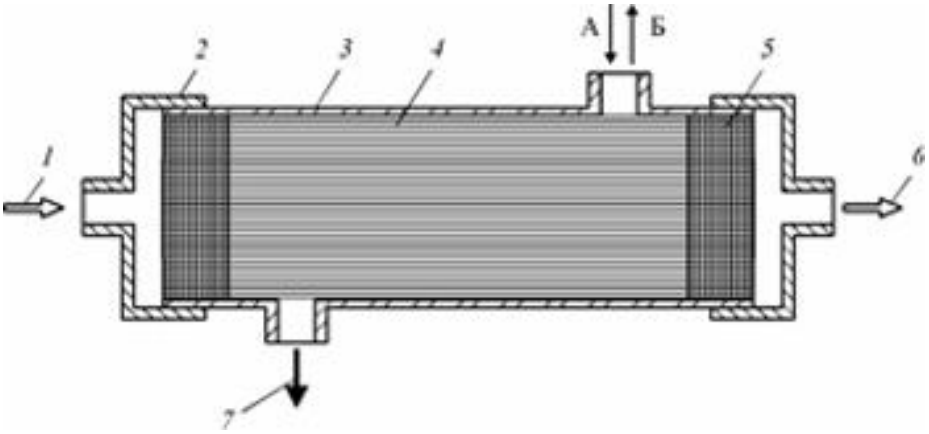


Рис. 7.3. Схематичне зображення порожнистоволоконного зворотноосмотичного модуля: 1 – потік вхідного розчину; 2 – кришка модуля; 3 – корпус модуля; 4 – порожнисті волокна; 5 – блок-колектора; 6 – потік концентру; 7 – потік фільтрату, А і Б – варіанти подачі і відведення компонентів суміші, що розподіляється

Конструкція порожнистоволоконних розділових модулів розвивається у двох напрямках: безопорне укладання волокон в корпусі і укладання волокон на опорну трубу, яка є також розподільником потоків суміші.

Вертикальний варіант модуля з безопорним укладанням порожнистих волокон може містити до 1 млн. волокон залежно від їх товщини і необхідної продуктивності. Один кінець кожного волокна в пучку закладено в трубчастій решітці, і канали порожнистих волокон з’єднуються з нижнім (вхідним) штуцером. Трубчаста решітка пучка порожнистих волокон може формуватися заливанням герметизуючого матеріалу навколо пучка, або шляхом просочення кінців волокон герметизуючим матеріалом у процесі компонування волокон в пучок.

В якості герметизуючих матеріалів використовують рідкі суміші полімерів (епоксидні смоли, поліуретан тощо), а також припої, клеї.

Зовнішній діаметр фільтруючих волокон становить 150–800 мкм, а товщина волоконних стінок залежить від міцності матеріалу і може складати від 50 до 300 мкм. Довжина волокон може варіюватися в межах від 0,2 до 20 м.

Введення вхідного потоку високого тиску здійснюється через штуцер поблизу днища модуля з зовнішньої сторони волокон, так як порожнисте полімерне волокно краще протистоїть тиску стиснення, ніж внутрішнього розширення. Потік живлючої суміші розподіляється радіально у об'ємі модуля і піднімається уздовж його осі, обтікаючи порожнисті волокна. Компоненти розчину, що проникли крізь мембрану (пермеат), проходять вниз за порожнини всередині волокон, протитечією до вхідної суміші. Потік концентрату, який не проникає крізь мембрани, виходить з модуля зверху при тиску, що майже дорівнює тиску у живлючому потоці.

8. ТИПОВІ СХЕМИ З'ЄДНАННЯ МЕМБРАННИХ МОДУЛІВ

Мембранні модулі, що випускаються промисловістю, мають низку типорозмірів і установки для мембранного поділу можуть включати в себе декілька модулів. Вибір оптимальної схеми з'єднання модулів є важливим завданням при проектуванні зворотноосмотичних систем. Спосіб з'єднання модулів залежить від вимог до кінцевого продукту, від характеристик вхідної суміші, тиску в її потоці і від інших факторів.

8.1. Паралельне з'єднання модулів

Такий спосіб з'єднання модулів (рис. 8.1) дозволяє створювати зворотноосмотичні установки з будь якою продуктивністю. Обсяги пермеату та концентрату, що продукуються, є кратними числу задіяних модулів.

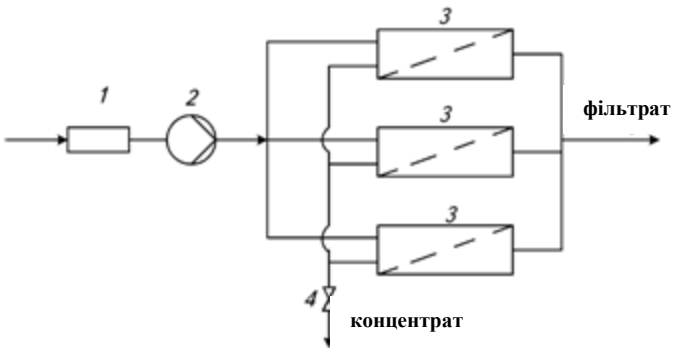


Рис. 8.1. Паралельне з'єднання мембранних модулів

При паралельному з'єднанні мембранних модулів легко робити відключення будь-якого з них без зміни умов роботи для інших модулів, так як суміш на оброблення поступає із загального колектора і всі модулі знаходяться

в однакових умовах. Але при цьому слід враховувати, що при роботі батареї з паралельним з'єднанням модулів, навіть невеличка відміна їх за гідравлічним опором, викликає зниження ступеня вилучення та чистоти цільового продукту (пермеату).

8.2. Послідовне з'єднання модулів

При послідовному з'єднанні модулів одержують декілька продуктів різної чистоти, відбираючи їх на відповідних рівнях (ступенях) технологічного ланцюжка. При цьому модулі, встановлені в кінці технологічної лінії, завжди працюють з нижчим коефіцієнтом корисної дії, ніж модулі, що передують їм.

8.3. Каскадні схеми

Застосування паралельно-послідовних (каскадних) схем з'єднання мембранних модулів, як показано на рис. 8.2, дозволяє забезпечити високу ступінь вилучення і чистоту цільового продукту в широкому інтервалі навантажень устаткування, що експлуатується.

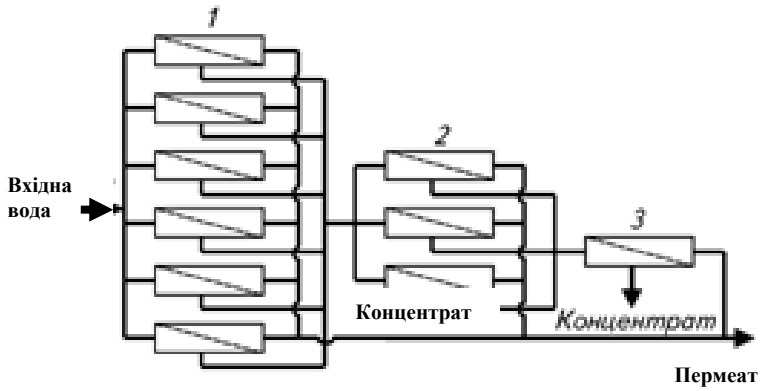


Рис. 8.2. Каскадна схема з'єднання мембранних модулів

Практика показала, що найбільш ефективними є каскадні схеми з рециркуляцією потоків, збіднених цільовим компонентом. В таких схемах (рис. 8.3) загальна ефективність роботи системи залежить не тільки від коефіцієнта корисної дії (ККД) окремих ступенів, який визначається матеріалом мембрани і способом організації потоків у модулі, але і від напряму матеріальних потоків між розділовими ступенями. Нижче розглянуті деякі ключові моменти функціонування мембранних модулів в залежності від режимів їх експлуатації.

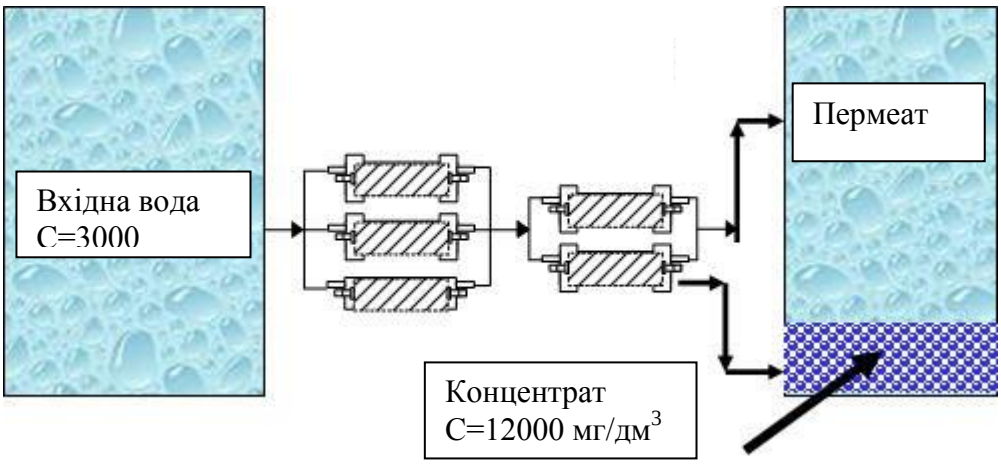


Рис. 8.3. Знесолення води з допомогою каскадної схеми з'єднання мембранних модулів

8.4. Функціонування зворотноосмотичного модуля в режимі наскрізної протоки

При здійсненні прямоточної зворотноосмотичної фільтрації потік пермеату у першу чергу залежить від робочого тиску, пов'язаного з концентрацією оброблюваного розчину. Він також залежить від швидкості прокачування розчину вздовж мембранних поверхонь у фільтруючому пристрої. Узагальненим математичним рівнянням, що описує проникність зворотноосмотичної мембрани для пермеату (води) є рівняння (3.1), надане в розділі 3. При використанні вказаного рівняння передбачається, що в інтервалі заданих робочих тисків і концентрацій оброблюваних розчинів зберігається ідеальна селективність мембран за відношенням до пермеату, так, що концентрація розчинених солей і інших домішок у пермеаті завжди залишається зневажено малою порівняно з їх концентрацією у вихідному розчині. Для виконання цієї умови зворотноосмотичний процес на практиці здійснюють так, що в мембранному модулі до 90% потоку вихідного розчину трансформується в концентрат (забезпечуючи мінімізацію впливу концентраційної поляризації), а частина потоку утворює пермеат.

8.5 Функціонування зворотноосмотичного модуля в системі з повторною обробленням концентрату, що утворюється

Якщо при експлуатації зворотноосмотичної системи необхідно збільшити об’єм пермеату і мінімізувати об’єм концентрату, що продукується, то концентрат повторно направляють на зворотноосмотичне оброблення, вилучаючи з нього додаткову кількість пермеату. При цьому отримують більш насичений розчин концентрату. Таку процедуру можна повторювати до тих пір, поки буде зберігатися селективність мембрани за відношенням до пермеату, і поки осмотичний тиск у навколомембранному дифузійному шарі не

врівноважить величини робочого тиску, як це витікає з рівняння (3.3) в розділі 3.

Апаратурне оформлення ступінчастого процесу може бути реалізовано ланцюжком, що складається з декількох послідовно з'єднаних зворотноосмотичних модулів, які функціонують в режимі наскрізного протоку.

Процес може бути здійснений за схемою, в якій зворотноосмотичний модуль, з'єднаний з накопичувальними ємкостями, спочатку обробляє вхідний розчин, а потім – концентрат, накопичений в резервній ємкості, виділяючи з нього додаткову кількість пермеату. Тим самим збільшується ККД зворотного осмосу по пермеату з відповідним зменшенням об'єму концентрату, що продукується.

При ідеальній селективності зворотноосмотичної мембрани солевміст у концентраті від повторного зворотноосмотичного оброблення підпорядковується рівнянню:

$$C = C_o \cdot \frac{V_o}{V}, \qquad (8.1)$$

де С – кінцевий солевміст у концентраті (в його останньому об'ємі у накопичувальній ємкості);

C_o – початковий солевміст в концентраті (у його початковому об'ємі у накопичувальній ємкості);

V_o – початковий об'єм концентрату в накопичувальній ємкості;

V – кінцевий об'єм концентрату в накопичувальній ємкості.

8.6. Вибір оптимального способу рішення задачі

Розуміючи сутність мембранної технології, можливості різних напівпроникних мембран з розділення колоїдних та істинних розчинів на пермеат (розчинник, воду) і концентрат (транзит домішок), не являє особливих труднощів визначитися з вибором тих мембранних пристроїв, які забезпечать розподільчий процес оптимальним чином. Наприклад, щоб досягти часткового знесолення води, краще за всього застосовувати метод нанофільтрації. За його допомогою при низьких робочих тисках видаляються з води катіони солей жорсткості разом з двозарядними аніонами і, певною мірою, однозарядні катіони натрію, калію і аніони хлору.

Більш глибоке знесолення цілком забезпечує низьконапірний зворотний осмос.

Максимальну селективність по всьому спектру компонентів забезпечують мембрани зворотного осмосу, що працюють при високому тиску.

Сумарна ступінь знесолення води залежить від її катіонного та аніонного складу і орієнтовно становить:

50-70% – для нанофільтрації;

80-95% – для низьконапірного зворотного осмосу;

98-99% – для високонапірного зворотного осмосу.

Методом зворотного осмосу можна знесолити воду з різним складом і концентрацією розчинених солей. При цьому розрізняють знесолення прісної води й опріснення морських і солонуватих вод.

Прісна вода з вхідним загальним солевмістом 0,3-1,0 г/л, у принципі, може бути знесолена до рівня 5-10 мг/л, тобто приблизно в сто разів, за допомогою одноступінчастого зворотного осмосу.

Такий ступінь зниження солевмісту забезпечується селективністю більшості високо напірних зворотноосмотичних мембран. А в тих випадках, коли не потрібна вказана глибина знесолення, то застосовують низьконапірний зворотний осмос, оснащений менш селективними, але більш продуктивними зворотноосмотичними мембранами.

При обробленні солоних і морських вод (С >> 1 кг/м^3) домінуюче значення при зворотноосмотичній фільтрації починає мати осмотичний тиск разом з концентраційною поляризацією, які зростають зі збільшенням концентрації солей в живлючому розчині. Відповідно, для проведення процесу знесолення сильно мінералізованої води потрібно створювати великий робочий тиск. Зокрема, для одержання питної води з солевмістом 300-500 мг/л із води з вмістом солей до 40 г/л (солоність води світового океану), зворотноосмотичний процес здійснюють при робочих тисках від 50 до 150 атмосфер, що супроводжується збільшенням необхідних енергетичних витрат.

Конверсія, або вихід пермеату, при використанні одного зворотноосмотичного модуля зазвичай становить близько 10% від оброблюваної кількості води, а в установці, що складається з декількох модулів – 45-50%, тому що із-за високої концентрації солей в оброблюваному розчині (сильно мінералізованої води) доводиться інтенсивно боротися з концентраційною поляризацією і з утворенням осадів на мембранах, збільшуючи швидкість наскрізного протоку розчину вздовж поверхонь мембран.

При порівнянні зворотноосмотичних систем з різними типами мембран, що використовуються, можна переконатися: найбільша поверхня фільтрації в одиниці об'єму забезпечується в апаратах з рулонними елементами зворотного осмосу. Такі апарати мають мінімальну матеріалоємність і займають мінімальну площу.

Прогрес у розвитку мембранних технологій, досягнутий за останні десятиріччя, призвів до того, що в даний час для реалізації процесів зворотного осмосу найчастіше застосовують апарати з рулонними мембранами. Друге місце посідають апарати з плоскими мембранами зворотного осмосу і третє – апарати з розділовими модулями на порожнистих волокнах. При цьому зворотноосмотичні установки найчастіше створюють за схемою послідовного включення модулів по концентрату, що збільшує конверсію, тобто вихід пермеату.

При необхідності отримання максимально чистого пермеату, зворотноосмотичні модулі з'єднують послідовно, як показано на рис. 8.4. При цьому концентрат другого блоку виявляється менш засоленим, ніж вихідна

вода, і тому його подають на вхід зворотноосмотичної установки, як показано нижче.

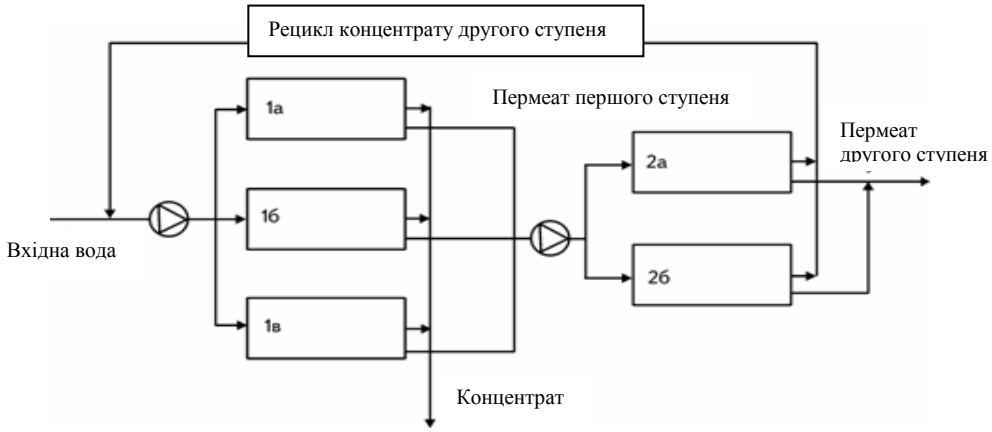


Рис. 8.4. Установка зворотного осмосу з двома ступенями знесолення води:
1 – мембранні елементи першого ступеня; 2 – мембранні елементи другого ступеня

Слід зазначити, що при зниженні солевмісту оброблюваних розчинів селективність зворотноосмотичних мембран падає, і ступінь знесолення на другому блоці поділу виявляється нижчою, ніж на першому. Домогтися отримання надчистої води власне методом зворотного осмосу практично неможливо.

9. ПІДГОТОВКА ВОДИ ДЛЯ ЗВОРОТНООСМОТИЧНОЇ ОБРОБКИ

9.1 Нормативні вимоги до початкової води

Для забезпечення нормальної експлуатації зворотноосмотичних і нанофільтраційних установок необхідно, щоб вода, що надходить на розділові мембрани, відповідала певним нормам. Крім того, необхідно здійснювати подачу вхідної води та відведення концентрату в межах допустимих умов (робочих тисків) експлуатації обладнання. Нормативні вимоги до початкової води:

– менше 0,56 мг/л суспензійних часток (0,56 мг/л =1 NTU);

– менше 2 мг/л колоїдних часток;

– менш 0,1 мг/л вільного хлору для композиційних поліамідних мембран і менше 0,6-1,0 мг/л для ацетатцелюлозних мембран;

– малорозчинні солі (заліза, кальцію, магнію, стронцію) не повинні перевищувати концентрацій, що викликають їх відкладення на зворотноосмотичних мембранах;

– мікробіологічні забруднення повинні бути відсутніми;

– температура води, що подається, не повинна перевищувати 35-45°С;

– pH вхідної води повинен бути в межах 3,5-7,2 для ацетатцелюлозних мембран і 2,5-11,0 – для поліамідних мембран.

Для забезпечення зазначених вимог обов'язковою є попередня підготовка води перед її подачею у нанофільтруючий пристрій і в установку зворотного осмосу.

Попередня підготовка нормує якість води за вмістом в ній суспензійних часток і колоїдних часток, сполук заліза і марганцю, хлору та інших сильних окиснювачів, а також мікроорганізмів.

Типова схема попередньої підготовки води для її подальшого оброблення нанофільтрацією і зворотним осмосом практично не відрізняється від схем підготовки води для багатьох технологічних процесів. Отже, при наявності на будь-якому підприємстві системи водопідготовки, що забезпечує параметри якості води, зазначені вище, можна використовувати воду з цієї системи для живлення мембранної установки зворотного осмосу, або для нанофільтрації.

9.2. Конкретизація ефектів дії негативних домішок на роботу мембранних систем

Суспензійні речовини відкладаються (осідають) на поверхні мембран зворотного осмосу і нанофільтрації та блокують їх селективний шар. Тому встановлені жорсткі вимоги щодо вмісту таких речовин у вхідній воді. Задача вирішується тим, що в будь-якому випадку невід'ємним елементом для зворотноосмотичної установки повинен бути вхідний мікропористий фільтр з фільтруючим матеріалом, що має пори 5 мкм. і менше. Він має з запасом забезпечувати витрату води, що живить зворотноосмотичну установку.

Мікропористий фільтр гарантує збереження мембран зворотного осмосу при порушенні роботи системи попередньої підготовки води.

Колоїдні домішки, в тому числі поверхнево – активні речовини, блокують поверхню зворотноосмотичних і нанофільтраційних мембран шляхом утворення гелевих плівок. Колоїдні домішки та істинно розчинні поверхнево-активні речовини повинні вилучатися з води при її попередній підготовці для зворотного осмосу.

Сильні окиснювачі – активний хлор, озон і ін. руйнують структуру розділового і підтримуючого шарів у зворотноосмотичних мембранах. Це призводить до незворотного зниження їх селективності і міцності.

Видалення вільного хлору з води здійснюються шляхом її дехлорування на фільтрах насипного або картриджного типів з активованим вугіллям. Іноді практикують дозування у воду сильного відновника, наприклад, метабісульфіту натрію. Але таку процедуру складно організовувати і не бажано використовувати для харчових виробництв через погіршення органолептичних показників води.

Вміст солей в концентраті визначається конверсією, тобто відношенням потоку пермеату до потоку вхідної води. При конверсії потоків в мембранній установці, що становить 60-75%, вміст солей в концентраті збільшується в 2,5-4,0 рази і над поверхнею мембрани виникає тонкий шар рідини, у якому концентрація солей істотно вище, ніж у підживлюючій воді, або в концентраті.

При перевищенні над поверхнею мембрани концентрації солей понад межі їх розчинності, починається випадання осадів, які блокують роботу зворотноосмотичної системи.

Найбільш ефективним способом, який забезпечує запобігання утворенню осадів солей жорсткості на нанофільтраційних і зворотноосмотичних мембранах, є живлення мембранної установки зм'якшеною водою. Але це є і найдорожчий спосіб.

Також широко застосовується підкислення живильної води. Доза кислоти, зазвичай соляної, підбирається з таким розрахунком, щоб індекс Ланжелье, який характеризує ступінь насиченості розчину карбонатом кальцію, був негативним навіть в концентраті, що виходить з установки зворотного осмосу.

В залежності від складу вхідної води кількість дозованої кислоти може змінюватися від 5 до 200 мг/л. Кількість введеної кислоти не повинна зменшувати pH вхідної води нижче рівня, встановленого для мембран, що застосовуються. Підкислення призводить до зниження pH як вхідної води, так і пермеату. Для багатьох процесів висока кислотність знесоленої води є перешкодою до її використання.

9.3. Урахування температури живильного розчину

Важливим аспектом при розробленні та експлуатації установок зворотного осмосу є урахування температури живильного розчину (води). Паспортна продуктивність зворотноосмотичних мембран гарантована тільки для температури 25°C. В реальних умовах температура може бути істотно нижчою.

Залежність продуктивності зворотноосмотичних мембран від температури показана в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1. Коефіцієнти температурної корекції продуктивності зворотноосмотичних мембран (типу Desal фірми Osmonics).

Таблиця 9.1

Матеріал	Температура, °C (°F)						
	4 (40)	10 (50)	16 (60)	21 (70)	25 (77)	27 (80)	32 (90)
Ацетатцелюлоза	0,55	0,66	0,77	0,90	1,0	1,04	1,20
Поліамід	0,48	0,60	0,73	0,88	1,0	1,06	1,26

При проектуванні зворотноосмотичних установок слід передбачати таку кількість зворотноосмотичних елементів у системі, яка забезпечить їм необхідну продуктивність при зниженні температури. При експлуатації зворотноосмотичної системи в умовах зниженої температури потрібна кількість мембранних елементів практично в 2 рази більша, ніж при

стандартній температурі, яка дорівнює 25°С. Це впливає на капітальні витрати зі створення установок зворотного осмосу.

У ряді випадків, при наявності дешевого тепла, вигідніше здійснювати попередній підігрів живильної води.

9.4. Сучасні напрями підготовки води перед зворотним осмосом

Одним із сучасних напрямів в організації підготовки води перед зворотним осмосом і нанофільтрацією є використання стадії ультрафільтрації. Вона дозволяє виключити потрапляння на нанофільтраційні і зворотноосмотичні мембрани суспензій, великих органічних молекул і мікробіологічних об'єктів.

Додавання ультрафільтраційної ступені, як елемента попередньої підготовки води перед її зворотноосмотичним обробленням, суттєво покращує роботу зворотного осмосу і подовжує межрегенераційний період при експлуатації устаткування.

Параметри роботи установки зворотного осмосу повинні перебувати в певних межах. Змінюючи в цих межах тиск і температуру вихідного розчину, витрати пермеату і концентрату, можна коригувати якість очищеної води.

Збільшення робочого тиску призводить до зростання потоку пермеату, а також за рахунок деякого ущільнення мембран – до підвищення їх селективності і, відповідно, до зниження проскакування солей.

Збільшення температури знижує в'язкість води і підвищує рухливість іонів солей, що призводить до зростання як продуктивності мембранної установки, так і до проскакування солей.

Підвищення концентрації солей у живильній воді, при незмінній її витраті і ступеня конверсії, призводить до зниження продуктивності зворотноосмотичної установки і до підвищення проскакування солей у пермеат внаслідок наростання концентраційної поляризації біля поверхні мембрани.

При збільшенні ступеня конверсії зворотноосмотичної установки, обсяг концентрату зменшується, але проскакування солей у пермеат зростає.

9.5. Відмивання і санітарне оброблення мембран зворотного осмосу і нанофільтрації

При роботі мембранних установок нанофільтрації та зворотного осмосу відбувається поступове зниження їх продуктивності. Воно викликається забрудненням мембран відкладеннями малорозчинних солей і суспензій, а також утворенням колоїдних плівок і біообростань.

Ці процеси прискорюються при порушеннях розрахункового режиму експлуатації мембранних установок і систем очищення води.

Для видалення відкладень кристалічних забруднень і колоїдних плівок з поверхонь зворотноосмотичних або нанофільтраційних мембран здійснюють їх

регенераційні промивання. Про необхідність промивання судять за такими ознаками:

– зниження продуктивності мембранної установки на 10-15% з урахуванням температурної корекції при постійному тиску;

– збільшення опору мембранного блока на 10-15% при збереженні незмінної продуктивності;

– зниження селективності зворотноосмотичних або нанофільтраційних мембран на 10-15%; через заданий інтервал часу експлуатації установки зворотного осмосу, який визначається дослідним шляхом.

Зараз широко застосовуються поліамідні композиційні зворотноосмотичні мембрани. Вони стійкі при pH 2-12. Це дозволяє здійснювати їх відмивання як кислотними, так і лужними розчинами.

Рецептури кислотних розчинів використовують для видалення з мембран неорганічних осадів, таких як карбонати і сульфати кальцію і магнію, гідроокису заліза і алюмінію.

Рецептури лужних розчинів призначені для видалення органічних забруднень, що містять гумінові кислоти та фульвокислоти, а також глинисті речовини, сполуки кремнію і біомасу.

Основними компонентами рецептур, за допомогою яких відмивають мембрани є неорганічні (соляна, фосфорна) і органічні (лимонна, щавлева) кислоти, луги, окисники та відновники. Їх концентрація вибирається такою, щоб значення pH мийного розчину не виходило за межі, що обумовлюють стійкість мембран.

Цикл регенерації мембрани складається з її циркуляційного промивання регенеруючим розчином і подальшого відмивання від залишків цього розчину.

Зворотноосмотичні і нанофільтраційні мембрани є не проникними для будь-яких мікроорганізмів. Тому вода після оброблення на установках зворотного осмосу і нанофільтрації, при їх правильної експлуатації, є стерильною. Але велика поверхня мембран, над якою концентруються органічні забруднення і солі є ідеальним місцем для розмноження мікроорганізмів. Розмножуючись, мікроби блокують поверхню мембран зворотного осмосу і нанофільтрації, погіршуючи їх продуктивність. Мікроби також пошкоджують розділовий шар на поверхні мембрани, що призводить до зниження її селективності. Особливо це характерно для ацетатцелюлозних мембран.

Для запобігання біозабрудненню мембранних установок зворотного осмосу і нанофільтрації необхідно забезпечувати біологічну чистоту всього ланцюга попереднього очищення води – механічних та іонообмінних фільтрів, буферних ємкостей т. ін.

Особливо інтенсивне обсіменіння мембранного обладнання відбувається при його роботі з тривалими зупинками.

Видалення біообрастань, що утворилися, виконують шляхом санітарного оброблення мембранних модулів. Для дезінфекції застосовують окиснювачі:

перекис водню і надоцтову кислоту, і не окиснювачі: формальдегід, глютеральдегід, четвертинні амонієві основи, а також мідний купорос.

Через високу токсичність дезінфікуючих речовин, необхідне ретельне відмивання мембранних установок після їх санітарного оброблення.

Санітарну обробку слід поєднувати з регенераційним промиванням мембранних модулів.

Здійснюючи регулярні регенераційні промивання мембран зворотного осмосу і нанофільтрації, вдається підтримувати паспортну продуктивність і селективність мембранних установок протягом трьох і більше років.

Лабораторна робота № 1

Тема. Вивчення процесу демінералізації водного розчину кухонної солі методом зворотного осмосу.

Мета роботи. Визначити вплив робочого тиску на проникність і затримуючу здатність зворотноосмотичної мембрани в установці «Екософт 2500 МО-F3A».

1.1. Загальні положення

Зворотний осмос – це баромембранна технологія розділення розчинів на концентрат розчинених речовин і розчинник (пермеат).

Основу зворотного осмосу становить явище осмосу, сутність якого полягає в довільному (під дією градієнта концентрації) проникненні молекул води, або іншого розчинника, через тіло напівпроникної мембрани з розчину з меншою концентрацією в розчин з більшою концентрацією, коли розчинена речовина не проходить крізь мембрану. При цьому трансмембранний потік розчинника (води) розріджує більш концентрований розчин і об'єм цього розчину зростає.

Трансмембранний потік розчинника (води) сповільнюється за мірою наближення системи до осмотичної рівноваги. У стані осмотичної рівноваги різниця гідростатичних тисків (рівнів) розчинів по обидва боки напівпроникної мембрани компенсується різницею їх осмотичних тисків.

Якщо з одного боку напівпроникної мембрани знаходиться чиста вода, а з іншого боку – водний розчин будь-якої солі, то при рівновазі різниця гідростатичних тисків між водою і розчином солі дорівнює осмотичному тиску в розчині солі.

Осмотичний тиск в сольових розчинах визначають за рівнянням Вант-Гоффа:

$$p_{осм} = \frac{i \cdot R \cdot T \cdot C}{M}, \qquad (1.1)$$

де і – кількість грам-частинок, що утворюються з грам-молекули розчиненої речовини;

T – абсолютна температура розчину, ^{o}К;

R – універсальна газова постійна (8,310 Дж/ моль. град);

C – концентрація розчиненої речовини (г/м^3)

M – молекулярна вага розчиненої речовини (г/моль).

Кількість грам-частинок (і), що утворюються з грам-молекули розчиненої речовини (солі та ін.), визначається за формулою:

$$i = 1 + \alpha(n-1), \qquad (1.2)$$

де α – ступінь дисоціації молекул розчиненої речовини;

n – число іонів, на яке дисоціює кожна молекула розчиненої речовини;

Якщо з боку більш концентрованого розчину прикладено тиск, що перевищує величину осмотичного тиску, то перенесення розчинника (води) через напівпроникну мембрану відбувається з боку більш концентрованого розчину до менш концентрованого розчину. Тобто він здійснюється проти градієнта концентрації розчинника в мембранній системі. Це і є явище зворотного осмосу.

Розділення розчинів на розчинник і сольовий концентрат методом зворотного осмосу відбувається без фазових перетворень. Енергія витрачається тільки на створення тиску, що забезпечує потік розчинника крізь вентильний шар напівпроникної мембрани. Тому при зворотному осмосі енергетичні витрати теоретично наближаються до величини термодинамічної роботи поділу. Такі витрати істотно менші, ніж витрати енергії при дистиляції.

Залежність осмотичного тиску від концентрації розчиненої речовини (на прикладі розчину хлориду натрію при 20^{o}С) надано в табл. 1.1. Видно, що чим більша концентрація сольового розчину, тим більший і осмотичний тиск у ньому.

Табл. 11

Концентрація солі, мг/дм^3	Осмотичний тиск, атм.
100	0,082
3000	2,465
30000	24,65

^

Тиск, який забезпечує зворотноосмотичну фільтрацію, долає як опір, пов'язаний з осмотичним ефектом в навколомембранному шарі розчину, що фільтрується, так і суму опорів, що виникають всередині самої мембрани.

Напівпроникні мембрани, що застосовуються в даний час, мають шарувату будову. В них тонкий суцільний селективний шар хімічно створений на поверхні пористої основи (підкладки). Товщина селективного шару становить 0,1-1,0 мкм, а товщина підкладки варіює від 50 до 150 мкм.

Підкладка практично не створює відчутного опору масоперенесення внаслідок її високої пористості, а опір суцільного селективного шару є прийнятним завдяки його малій товщині.

Методом зворотного осмосу на стандартних зворотноосмотичних мембранах можна вилучати з води переважну більшість розчинених у ній солей при концентраціях цих солей до 5 г/л і робочому тиску 15 бар.

Робочий тиск є рушійною силою процесу зворотноосмотичного поділу і від нього залежить пропускна здатність (проникність) зворотноосмотичної мембрани до відношення до пермеату.

Якщо зворотноосмотична мембрана не змінює своєї структури під дією тиску, то її пропускна здатність (проникність) лінійно зростає із збільшенням тиску. Це відбувається тому, що опір зворотноосмотичної мембрани для розчинника істотно нижче, ніж для розчиненої речовини, і в результаті масоперенос крізь мембрану добре описується рівнянням:

$$G = A\left(P - \Delta\pi\right), \tag{1.3}$$

де G – проникність зворотноосмотичної мембрани за відношенням до пермеату ($м^3/м^2$ добу);

А – константа для системи «мембрана – розчин» при певних зовнішніх умовах ($м^3/Н{\cdot}добу$);

Р – робочий тиск, що реалізується ($Н/м^2$);

$\Delta\pi$ – різниця осмотичних тисків розчинів по обидва боки мембрани ($Н/м^2$).

При високих робочих тисках полімерні мембрани змінюють свою структуру і ущільнюються. Це позначається на величині константи «А» у рівнянні (3). Тобто, по досягненню певної величини робочого тиску проникність «G» зворотноосмотичної мембрани може почати знижуватися і, в підсумку, виявитися значно меншою, ніж в області низьких тисків (константа «А» істотно зменшується).

Що стосується затримуючої здатності зворотноосмотичної мембрани, яку визначають як величину, що залежить від співвідношення концентрації домішки в зворотноосмотичному фільтраті (пермеаті), до її концентрації в розчині, що подається на зворотноосмотичне оброблення, то в області малих тисків вона, також як і проникність, лінійно зростає зі збільшенням тиску. Але потім швидкість зростання знижується, і затримуюча здатність досягає максимуму. Це пов'язано з тим, що при невисоких робочих тисках зі збільшенням рушійної сили зростає потік розчинника (води) крізь мембрану, а потік розчиненої речовини практично не змінюється.

Але при високих тисках знижуються як потоки розчинника, так і потоки розчинених речовин. Тобто, при високих робочих тисках затримуюча здатність зворотноосмотичних мембран виходить на плато.

В даній роботі пропонується дослідити, як залежать проникність і затримуюча здатність зворотноосмотичної мембрани в установці «Екософт 2500 МО-F3A» від робочих тисків в інтервалі 0,4-0,8 МПа.

1.2. Експериментальна частина

1.2.1. Необхідне обладнання і контрольно-вимірювальні прилади

1. Установка зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-F3A»
2. Модуль накопичувальних ємкостей.
3. Кондуктометрічний солемір (TDS - метр).
4. Скляні ємності (пробовідбірники).

1.2.2. Блок-схема установки «Екософт 2500 МО-F3A» і принцип її дії

Блок-схема установки зображена на рис. 1.1.

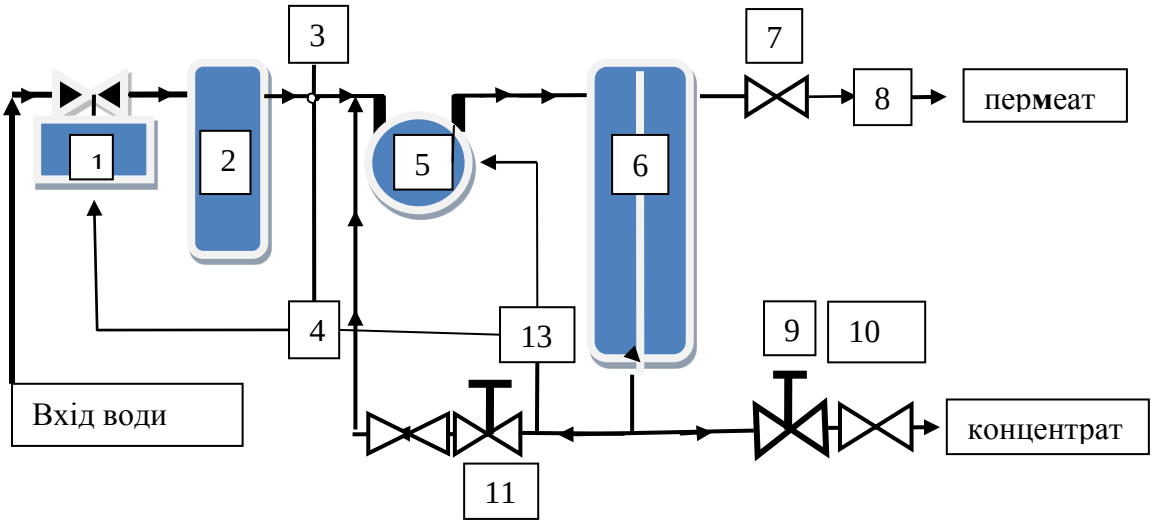


Рис.1.1. Блок-схема установки зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-F3A».
Специфікація: 1 – вхідний електрохлипак; 2 – вхідний мікропористий поліпропіленовий фільтр; 3 – манометр на виході поліпропіленового фільтра; 4 – датчик тиску на виході поліпропіленового фільтра; 5 – насос високого тиску; 6 – модуль зворотноосмотичної фільтрації; 7 – ротаметр на магістралі відведення пермеату; 8 – лічильник витрати пермеату; 9 – вентиль регулювання витрати концентрату; 10 – ротаметр витрати концентрату; 11 – вентиль рециклінгу; 12 – ротаметр рециклінгу; 13 – манометр робочого тиску і керуючий датчик аварійного відключення

1.2.3. Технічні характеристики установки

Технічні характеристики установки наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Номінальна продуктивність з пермеату при робочому тиску 0,8 МПа і температурі 20 °С: – літри на добу; – літри у хвилину	 2500±10 % 1,74±10 %
Рекомендований об'єм скидання концентрату в каналізацію, л/хв	0,83±10 %
Робочий тиск в зворотноосмотичному модулі, не більше	1,2 МПа
Тиск води на вході в установку, не менше	0,2 МПа
Температура вхідної води, °С	20±10 %
Електроживлення установки, струм Напруга, В Частота, Гц	Змінний 220 50
Споживана потужність, КВт	0,55
Габарити установки, мм	500·1300·400
Маса установки, кг	60

1.2.4. Вимоги до оброблюваної води

Таблиця 1.3

Жорсткість (карбонатна): Без дозування антискаланту (пом'якшувача води) З дозуванням антискаланту	 ≤ 3 мг-екв /л ≤ 30 мг-екв /л
Залізо	≤ 0,1 мг /л
Марганець	≤ 0,05 мг /л
Окиснюваність (ГПК)	≤ 4 мг /л
Сухий залишок	≤ 2000 мг /л
Силікати	≤ 20 мг /л
Залишковий хлор	≤ 0,1 мг /л

1.2.5. Робота установки

Вхідна вода, яка повинна відповідати вимогам, наведеним у таблиці 3, при тиску в живильній магістралі не менше ніж 0,2 МПа, надходить через електромагнітний хлипак (1) на вхідний мікропористий поліпропіленовий фільтр (2). Фільтр забезпечує доочищення живильної води від механічних домішок з розмірами частинок більше 5 мкм. Роботоздатність (гідравлічний опір) фільтра (2) контролюється манометром (3) і датчиком тиску (4), який

вимикає фільтруючу систему при зменшенні тиску на виході поліпропіленового фільтра нижче заданого рівня (0,1 МПа). Це відбувається в тому випадку, коли фільтр виявляється сильно забрудненим домішками, що вилучаються .

Якщо тиск на виході поліпропіленового фільтра відповідає допустимим значенням, (що перевищує 0,1 МПа), то відфільтрована вода через насос (5), (який збільшує тиск до 1,2 МПа), надходить на вхід мембранного модуля зворотноосмотичної фільтрації (6).

У модулі зворотноосмотичної фільтрації відбувається поділ потоку води (розчину) на пермеат (зворотноосмотичний фільтрат – демінералізована вода) і концентрат (вода з підвищеним солевмістом). Вихід пермеату залежить від вмісту солей у воді, що фільтрується, а також від температури і робочого тиску в мембранному модулі.

Робочий тиск в мембранному модулі регулюється голчастим хлипаком (11) і контролюється манометром (13). Вихід пермеату контролюється ротаметром (7) і витратоміром води (8). Вихід концентрату контролюється ротаметром (10). При цьому є можливість спрямовувати частину концентрату через вентиль (11) і ротаметр (12) на вхід насоса (5) для зменшення обсягу концентрату, що скидається у відходи.

Датчик тиску на манометрі (13) відключає живлення насоса (5) і електромагнітного хлипака (1), коли тиск в мембранному модулі перевищує допустиму межу, що дорівнює 1,2 МПа. При цьому на дисплеї контролера висвічується попередження: «Аварія».

1.2.6. Режими функціонування установки і їх перемикання

Установка може перебувати в одному з наступних режимів:

– Робочий режим;
– Режим промивання;
– Режим очікування;
– Режим «Аварія»;
– Режим стоп.

У робочому режимі установка здійснює зворотноосмотичний розподіл живильної води на пермеат і концентрат в межах допустимих значень вхідного та робочого тиску.

Режим промивання активується у випадку подачі електричного сигналу від окремого вимикача на керуючий контролер. При цьому вся вода, що надходить в мембранний модуль, швидкісним потоком проходить уздовж зворотноосмотичної мембрани, відмиваючи її поверхню. Режим промивання автоматично відключається через одну хвилину після його активації.

Режим очікування включається, якщо на контролер установки надходить сигнал від поплавцевого вимикача в накопичувальній ємкості для пермеату, або від вимикача, встановленого на панелі контролера.

Режим «Аварія» активується при тиску на вхідному фільтрі нижче допустимого рівня (0,1 МПа) і при тиску в зворотноосмотичному модулі вище допустимого рівня (1,2 МПа).

1.2.7. Принципова схема модуля накопичувальних ємкостей і його стикування з установкою «Екософт 2500 МО-F3А»

Модуль накопичувальних ємностей забезпечує подачу досліджуваної води на зворотноосмотичну установку і акумулює продукти зворотного осмосу – пермеат і концентрат. Принципова схема цього модуля і з'єднання його трубопроводів з зворотноосмотичною установкою показано на рис. 1.2.

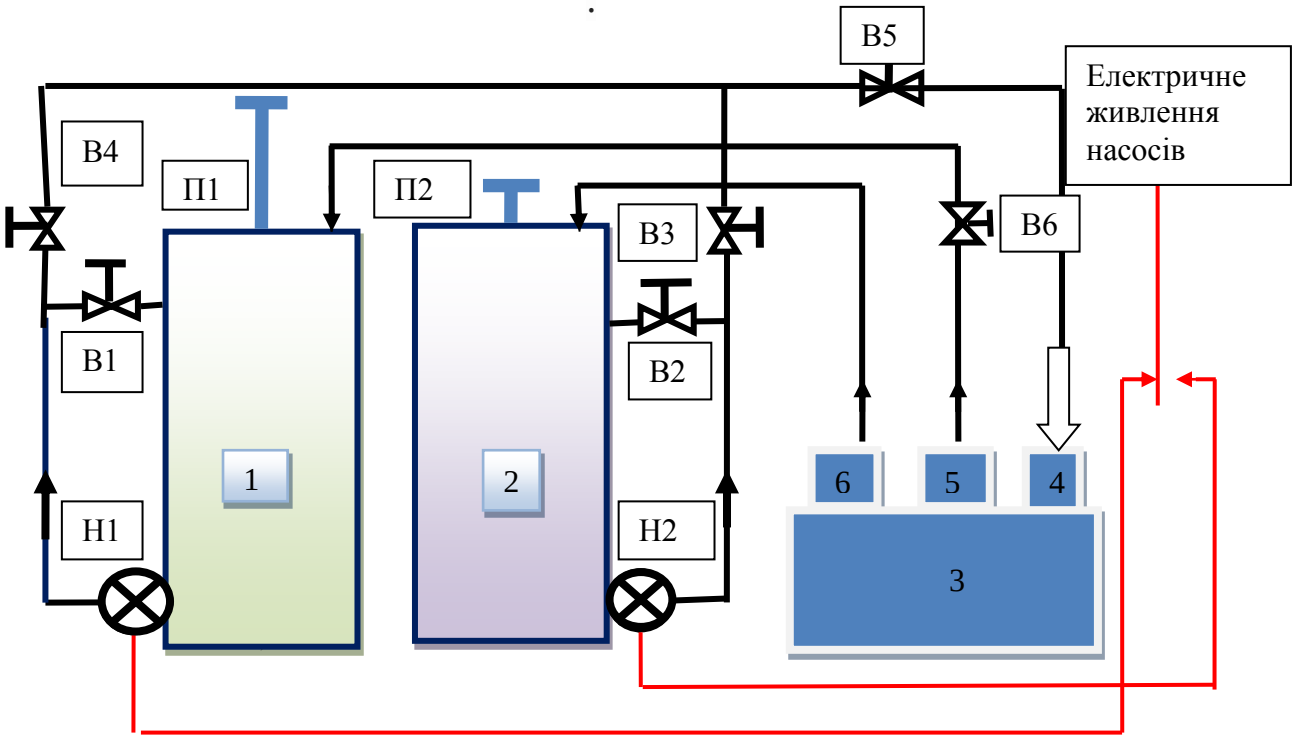


Рис. 1.2. Принципова схема модуля накопичувальних ємкостей і його підключення до установки зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-F3А»: 1 – ємкість для вхідного розчину і акумулювання пермеату; 2 – ємність для акумулювання концентрату; 3 – установка зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-F3А»; 4 – вхід розчину (води) на оброблення; 5 – вихід пермеату; 6 – вихід концентрату; Н1, Н2 – відцентрові насоси; В1-В6 – кульові вентилі; П1, П2 – поплавцеві рівнеміри

1.2.8. Включення зворотноосмотичної системи

Перед включенням зворотноосмотичної системи необхідно переконатися, що ємкість (1) у модулі накопичувальних ємностей заповнена достатньою кількістю розчину, який буде піддаватися зворотноосмотичної обробці, а ємкість (2) практично порожня. Якщо це так, то штанга поплавцевого рівнеміра в ємкості (1) виштовхнута з неї приблизно на 0,5 метра, а фланець штанги

поплавцевого рівнеміра в ємкості (2) виступає не більше ніж на 10 сантиметрів за площину її горловини, як показано на рис. 1.3а.



Рис. 1.3а. Фотографія модуля накопичувальних ємностей Початковий стан. Ємкість (1) заповнена достатньою кількістю розчину, а ємкість (2) практично порожня

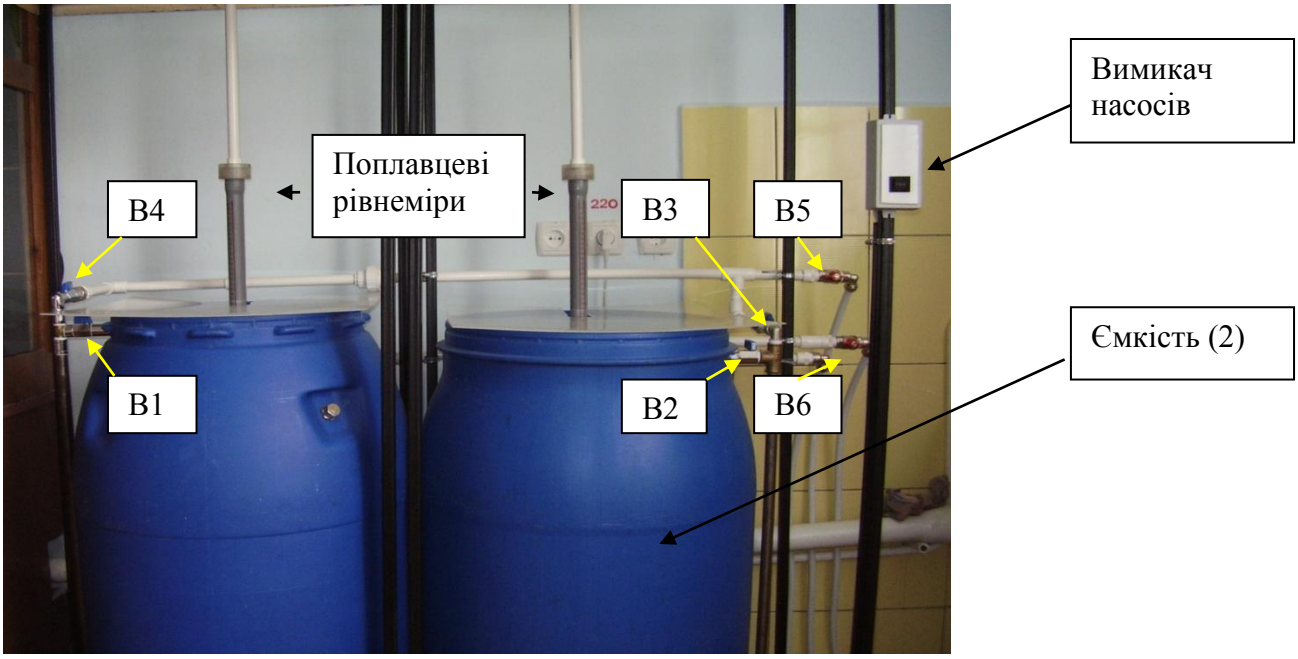


Рис. 1.3б. Фотографія модуля накопичувальних ємкостей. Робочий стан. Ємність (1) видає розчин на зворотноосмотичне оброблення, а ємкість (2) приймає розчин концентрату. Зміну об'ємів води вказують рівнеміри

На трубопроводах модуля накопичувальних ємкостей кульові вентилі B1, B2 і B3 повинні бути закриті, а вентилі B4, B5 і B6 – відкриті.

Клавіша вимикача насосів, який встановлений на правій стійці модуля накопичувальних ємкостей, повинна знаходитися у нейтральному положенні, а мережевий вимикач на передній панелі зворотноосмотичної установки «ЕКОСОФТ МО-F3А» повинен бути вимкненим.

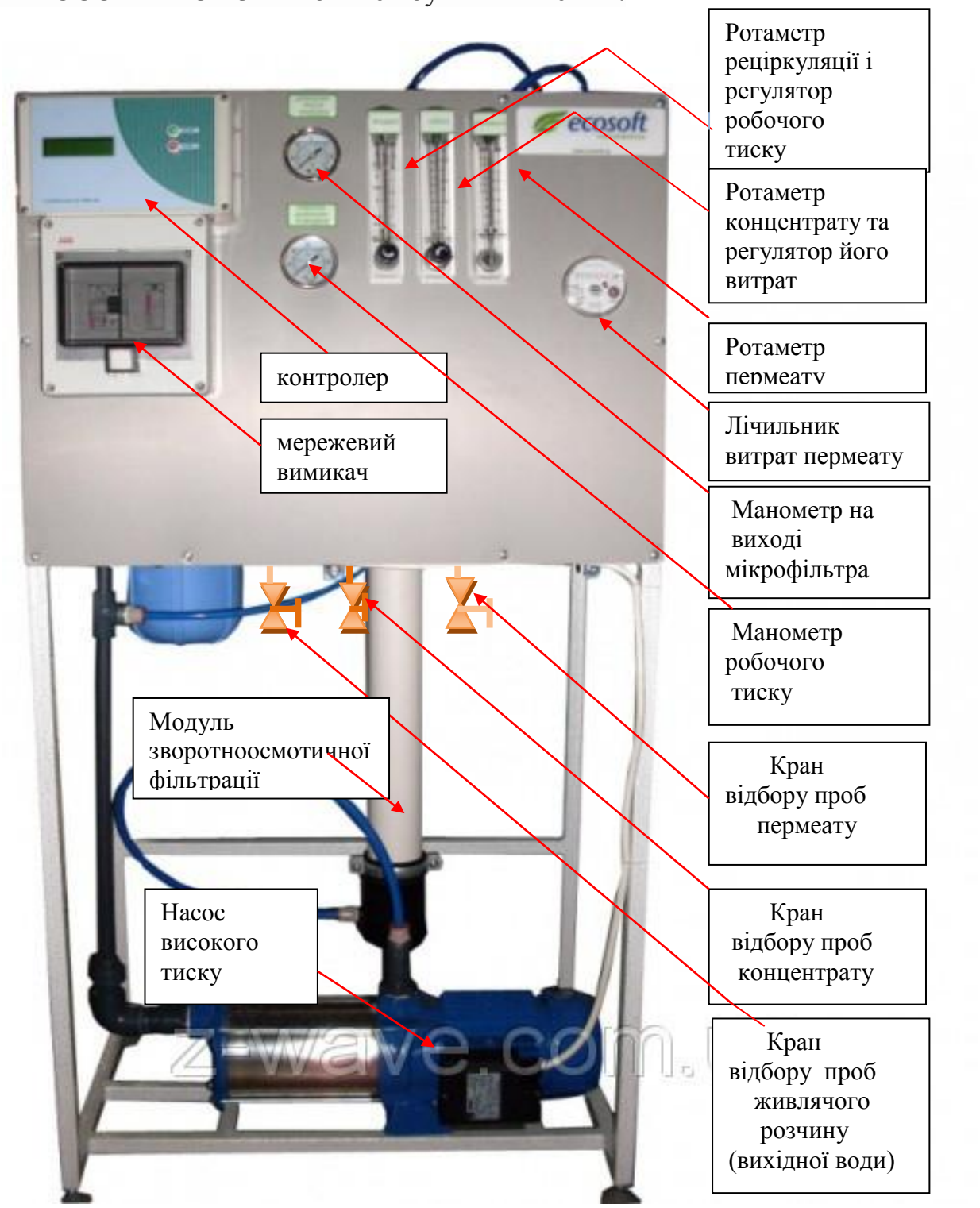


Рис. 1.4. Загальний вигляд установки зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-F3А

Вентилі ротаметрів «рецикл» і «скидання концентрату», що знаходяться на передній панелі установки «ЕКОСОФТ МО-F3А» повинні бути відкриті, а три крани на лінії відбору проб вихідної води, пермеату і концентрату повинні бути закриті.

Після завершення зазначеної перевірки, шнури живлення зворотноосмотичної установки «ЕКОСОФТ МО-F3А» і насосів модуля накопичувальних ємкостей необхідно включити в електричну мережу і натисканням на ліву половину клавіші вимикача насосів, встановленого на правій стійці модуля накопичувальних ємностей, привести в дію насос Н1, підключений до ємкості (1). В результаті розчин з цієї ємкості під тиском ≈ 0,2 МПа надійде на вхід зворотноосмотичної установки. Тепер слід включити електроживлення установки зворотного осмосу. Фотографія цієї установки показана на рис 4.

Включення електроживлення зворотноосмотичної установки здійснюється мережевим вимикачем, розташованим на її лицьовій панелі (рис. 1.4). В результаті електрична напруга подається на контролер установки і, якщо тиск в магістралі живильної води виявляється не меншим ніж 0,2 МПа, а на виході попереднього поліпропіленового фільтра перевищує 0,1 МПа, що свідчить про стан не забрудненості фільтра, то спрацьовує реле, яке включає насос високого тиску (5). Цей насос направляє досліджуваний розчин у мембранний модуль. В результаті на дисплеї контролера зворотноосмотичної установки висвічується повідомлення «Виробництво» («Production»).

Якщо насос (5) не включається, то причина полягає в низькому тиску живильної води. При цьому на контролері висвічується попередження «Аварія».

Якщо насос (5) вмикається і через кілька секунд вимикається за сигналом контролера, то це свідчить що попередній поліпропіленовий фільтр засмічений. При цьому на дисплеї контролера також висвітлюється слово «Аварія».

Якщо насос високого тиску ввімкнувся і продовжує працювати, то на дисплеї контролера висвічується повідомлення «Виробництво», і установка починає справно виконувати свою функцію в штатному режимі. При цьому регулюючим вентилем (11) на витратомірі (11) (рецикл/скидання) слід встановити в зворотноосмотичному модулі бажане значення робочого тиску в допустимих межах.

В залежності від робочого тиску змінюється інтенсивність потоків пермеату (зворотноосмотичного фільтрату) і концентрату (транзиту) на виході з установки. Об'ємні витрати в цих потоках визначаються за показаннями ротаметрів пермеату (пермеат) і концентру (скидання), які градуйовані в літрах за хвилину і в літрах за годину, відповідно. В процесі експлуатації зворотноосмотичної установки її вимкнення на нетривалий час і наступний пуск здійснюють кнопки ▲ «пуск» ▼ «стоп», що знаходяться на передній панелі контролера.

1.2.9. Порядок виконання лабораторної роботи

1. Здійсніть запуск зворотноосмотичної установки у відповідності з вказівками розділу 1.2.7.

2. Переконайтеся, що установка вийшла на робочий режим функціонування (на дисплеї контролера висвічується слово «ВИРОБНИЦТВО») і плавним обертанням рукоятки голчастого вентиля ротаметра рецикл / скидання (рис. 1.4) встановіть початковий рівень робочого тиску 0.4 МПа. Його відображає манометр робочого тиску, з'єднаний з модулем зворотноосмотичної фільтрації.

3. Через три хвилини роботи установки при заданому робочому тиску відберіть для аналізу проби пермеату, концентрату і вихідної води.

4. За допомогою ТДС-метра, відповідно інструкції, що додається до цього приладу, визначте вміст солі у відібраних пробах в одиницях ppm (мг/дм^3) і запишіть показання приладу в робочому зошиті, створивши в ньому таблицю, як показано нижче.

5. Зніміть з центрального та правого ротаметрів показники витрат пермеату і концентрату в літрах за хвилину, і запишіть їх у таблицю в робочому зошиті.

Таблиця 1.4

Робочий тиск, (МПа)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Потік пермеату, (л/хв)					
Концентрація солі у пермеаті, (мг /дм^3)					
Потік концентрату (л/хв)					
Вміст солі в концентраті (мг / дм^3)					
Потік вихідної води (л/хв)					
Концентрація солі в потоці вихідної води (мг / дм^3)					

6. Повторіть операції за пунктами 2-5, встановлюючи рівні робочого тиску 0,5; 0,6; 0,7 і 0,8 МПа і запишіть отримані результати в таблицю.

Побудуйте графік залежності потоку пермеату (л/хв) від робочого тиску (МПа) і графік залежності солевмісту в пермеаті (мг/дм^3) від робочого тиску (МПа).

8. Побудуйте графік залежності потоку концентрату (л/хв), від робочого тиску (МПа) і графік залежності солевмісту в концентраті (мг/дм^3) від робочого тиску (МПа).

9. Обчисліть величини потоків вхідної води при різних робочих тисках, використовуючи формулу

$$I_{вих} = I_{перм} + I_{конц},$$

де $I_{вих}$ – потік вихідної води (л/хв);

$I_{перм}$ – потік пермеату (л/хв);

$I_{конц}$ – потік концентрату(л/хв).

10. Побудуйте графік залежності величини вхідного потоку води від робочого тиску

11. Визначте затримуючу здатність мембрани при досліджених робочих тисках за формулою

$$R = (1 - C_п / C_i) \cdot 100\%,$$

де R – затримуюча здатність мембрани;

$C_п$ – концентрація затримуваної речовини (NaCl) в пермеаті;

C_i – концентрація затримуваної речовини (NaCl) у вхідному розчині (воді).

12. Побудуйте графік залежності затримуючої здатності зворотноосмотичної мембрани від робочого тиску.

13. Опишіть форму отриманих кривих і сформулюйте висновки.

Оцініть результати, отримані вами.

Поясніть, якою мірою ці результати узгоджуються з теоретичними уявленнями про проникність і затримуючу здатність зворотноосмотичних мембран.

Вкажіть, як можна зменшити об'єм рідких відходів, що утворюються при зворотноосмотичному обробленні сольового розчину.

Лабораторна робота № 2

Тема:

Вплив робочого тиску на співвідношення потоків пермеату та концентрату, що утворюються при зворотноосмотичному знесоленні розчину NaCl в установці «Екософт 2500 MO-F3A».

Мета роботи:

Простежити за абсолютними величинами і співввідношеннями потоків пермеату та концентрату, що утворюються при зворотноосмотичному

знесоленні розчину NaCl в установці «Екософт 2500 MO-F3A» при робочих тисках 0,4; 0,6 і 0,8 МПа, та розрахувати обсяги концентрату і вихідного розчину, які при зазначених тисках супроводжують одержання одного кубічного метра пермеату.

2.1. Базова інформація

При зворотному осмосі розчинник під дією високого тиску проникає («фільтрується») крізь мембрану, а розчинені речовини (солі) концентруються в тонкому шарі рідини біля поверхні мембрани.

В ідеалі крізь зворотноосмотичну мембрану проникають тільки молекули води (їх усереднений діаметр становить ≈ 2,8 Å, або $2{,}8.10^{-10}$ м), а розчинені солі та інші хімічні сполуки затримуються біля мембранної поверхні.

У зв'язку з вибірковою проникністю зворотноосмотичні мембрани мають великий гідравлічний опір (Rm). Це викликає необхідність реалізовувати процес зворотноосмотичного фільтрування при тисках, що істотно перевищують теоретично розраховану величину осмотичного тиску в оброблюваному розчині.

При зворотноосмотичному процесі розділення розчинів виникають також і сили, додатково протидіючі фільтруванню за рахунок виникнення градієнта концентрації розчинених речовин в дифузійному шарі у напрямку, перпендикулярному до поверхні мембрани з боку розчину, що фільтрується, як показано на рис. 2.1, наведеному нижче. Це явище називається концентраційною поляризацією (Rcp).

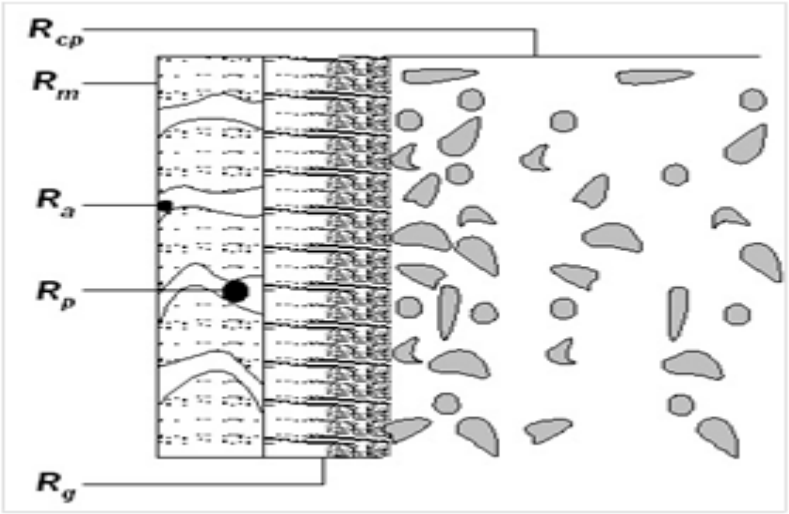


Рис. 2.1. Виникнення концентраційної поляризації в навколо мембранному шарі і додаткових опорів усередині мембрани. (Пояснення в тексті)

Поляризаційні явища виявляють себе у всіх мембранних процесах. При цьому концентрація деяких речовин, що накопичуються біля поверхні мембрани, часто досягає межі їх розчинності і викликає утворення там гелевого шару. Гелевий шар, навіть якщо він дуже тонкий, створює додатковий опір (Rg)

потоку пермеату. Цей опір з плином часу наростає і призводить до повного припинення процесу мембранного розділення.

Найчастіше гелевий шар утворюється з високомолекулярних органічних речовин (наприклад, з молекул білків, присутніх у воді), а також з деяких малорозчинних солей при їх випаданні в осад на поверхні мембрани. У разі застосування пористих мембран, малорозчинні компоненти можуть кристалізуватися всередині мембранних каналів, блокуючи їх проникність. Цей додатковий опір називають опором блокованих пір (Rp).

І, нарешті, до виникнення ще одного додаткового опору може призводити адсорбційна здатність матеріалу мембрани (Ra). Адсорбція домішок води може відбуватися як на поверхні мембрани, так і всередині її порового простору.

Концентраційна поляризація завжди зменшує швидкість масоперенесення розчинника (води) крізь мембрану. При цьому біля поверхні мембрани встановлюється така величина градієнта концентрації, що забезпечує динамічну рівновагу між підведенням розчинених речовин до мембрани та їх видаленням від неї за рахунок конвективної та молекулярної дифузії.

Концентраційна поляризація стає критично значущою при високому вмісті розчинених речовин у фільтрованому розчині. Тому при зворотному осмосі необхідно безперервно відводити затримувані речовини (концентрат) від поверхні мембрани. Накопичення їх в оброблюваному потоці біля поверхні мембрани уповільнює, або зовсім зупиняє процес зворотноосмотичного поділу.

Якщо затримувана речовина не відводиться від поверхні зворотноосмотичної мембрани (наприклад, у разі здійснення, так званої, тупикової фільтрації), то за мірою її накопичення в дифузному шарі неминуче знижується ефективна швидкість фільтрування. Це відбувається тому, що збільшення концентрації розчинених речовин біля поверхні мембрани викликає підвищення там осмотичного тиску, і при досягненні останнім величини, що дорівнює прикладеній величині гідростатичного тиску, рушійна сила процесу стає рівною нулю, а, отже, і швидкість фільтрування води крізь мембрану також обертається в нуль.

Поряд з концентраційною поляризацією в апаратах зворотного осмосу виникає і градієнт концентрації, спрямований уздовж поверхні мембрани. Це обумовлено тим, що при русі розчину уздовж мембрани частина молекул води фільтрується на її протилежну сторону і концентрація розчинених речовин в потоці зростає. Це явище називається навколомембранним концентруванням розчинів.

Таким чином, в зворотноосмотичних апаратах завжди встановлюються поперечний і поздовжній перепади концентрацій розчинених речовин на мембранах. Поряд з робочим тиском, вони впливають на кінетику зворотноосмотичного розділення розчинів на пермеат (зворотноосмотичний фільтрат) і концентрат.

2.2. Експериментальна частина

2.2.1. Необхідне обладнання і контрольно-вимірювальні прилади

1. Установка зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-F3A».
2. Модуль накопичувальних ємкостей.
3. Кондуктометричний солемір (TDS - метр).
4. Скляні ємкості (пробовідбірники).

2.2.2. Порядок виконання лабораторної роботи

1. Здійсніть запуск зворотноосмотичної установки у відповідності з вказівками розділу 1.2.7 інструкції до лабораторної роботи № 1.

2. Переконайтеся, що установка вийшла на робочий режим (на дисплеї контролера висвітилося слово «ВИРОБНИЦТВО») і плавним обертанням рукоятки голчастого вентиля на ротаметрі «рецикл / скидання» (рис. 1.4 в інструкції до лабораторної роботи № 1.), встановіть початковий рівень робочого тиску 0.4 МПа. Тиск відображає манометр робочого тиску, з'єднаний з модулем зворотноосмотичної фільтрації.

3. Через три хвилини роботи установки при заданому робочому тиску відберіть для аналізу проби пермеату, концентрату і вхідної води.

4. За допомогою ТДС-метра, за інструкцією, що додається до цього приладу, визначте вміст солі у відібраних пробах в одиницях ppm (мг/дм^3) і запишіть показання приладу в робочому зошиті, попередньо підготувавши табл. 1, як показано нижче.

5. Зніміть з ротаметрів показники витрат пермеату і концентрату в літрах за хвилину, і запишіть їх у таблицю в робочому зошиті.

6. Повторіть операції за пунктами 2-5, встановлюючи значення робочого тиску 0,6 і 0,8 МПа і запишіть отримані результати в табл. 2.1.

7. Обчисліть величини вхідних потоків розчину при робочих тисках 0,4; 0.6 і 0,8 МПа, використовуючи формулу

$$I_{вих} = I_{перм} + I_{конц},$$

де $I_{вих}$ – потік вихідної води (л/хв);
$I_{перм}$ – потік пермеату (л/хв);
$I_{конц}$ – потік концентрату (л/хв).

8. Занесіть отримані результати в табл. 2.1.

9. Розрахуйте час, необхідний для одержання 1000 літрів пермеату зворотноосмотичною установкою «Екософт 2500 МО-F3A» при робочих тисках 0,4; 0,6 і 0,8 МПа. Для цього скористайтеся формулою

$$\tau = V / F,$$

де τ – час, необхідний для накопичення 1000 літрів пермеату;

V – об’єм пермеату, що продукується (1000 л);

F – потік пермеату з виходу зворотноосмотичної установки (л/год).

Таблиця 2.1

Робочий тиск, (МПа)	0,4	0,6	0,8
Потік пермеату (л/хв)			
Концентрація солі у пермеаті, (мг /дм^3)			
Потік концентрату, (л/хв)			
Вміст солі в концентраті (мг/дм^3)			
Потік вхідної води (л/хв)			
Концентрація солі в потоці вхідної води (мг/дм^3)			

10. Розрахуйте, яка кількість концентрату буде виділятися, і яку кількість вихідного розчину (води) буде спожито для одержання 1000 літрів пермеату при вибраних робочих тисках. Для цього скористайтеся формулою

$$V_i = F_i \cdot \tau,$$

де V_i – об’єм отриманого концентрату, або споживаної вхідної води, що супроводжують одержання 1000 літрів пермеату;

F_i – потік концентрату з виходу зворотноосмотичної установки (л/год), або потік вхідної води в зворотноосмотичну установку;

τ – час, необхідний для одержання 1000 літрів пермеату при його потоці з виходу зворотноосмотичної установки, що дорівнює F.

11. За результатами вимірювання солевмісту у вхідному розчині, концентраті і пермеаті розрахуйте величини їх осмотичних тисків за рівнянням

Вант-Гоффа і запишіть отримані результати в заздалегідь підготовлену табл. 2.2, як показано нижче:

Таблиця 2.2

Робочий тиск МПа	0,4	0,6	0,8
Осмотичний тиск у пермеаті (МПа)			
Осмотичний тиск у концентраті (МПа)			
Осмотичний тиск у вхідному розчині (МПа)			

12. Порівняйте розрахункові величини осмотичних тисків з дослідженими значеннями робочих тисків. Поясніть куди витрачаються надлишки тисків.

13. Визначте вихід пермеату у відсотках відносно об'єму води, витраченої на зворотноосмотичну фільтрацію.

14. Побудуйте діаграму за прикладом, наведеним нижче, де ряд 1 позначає витрачений об'єм вихідної води, ряд 2 позначає об'єм концентрату, що виділився, а ряд 3 – об'єм одержаного пермеату, рівний 1000 літрів. Цифри по осі ординат – об'єми спожитої вхідної води і концентрату, що виділився відповідно при отриманні 1000 літрів пермеату. Цифри по осі абсцис – експерименти, виконані при різних робочих тисках.

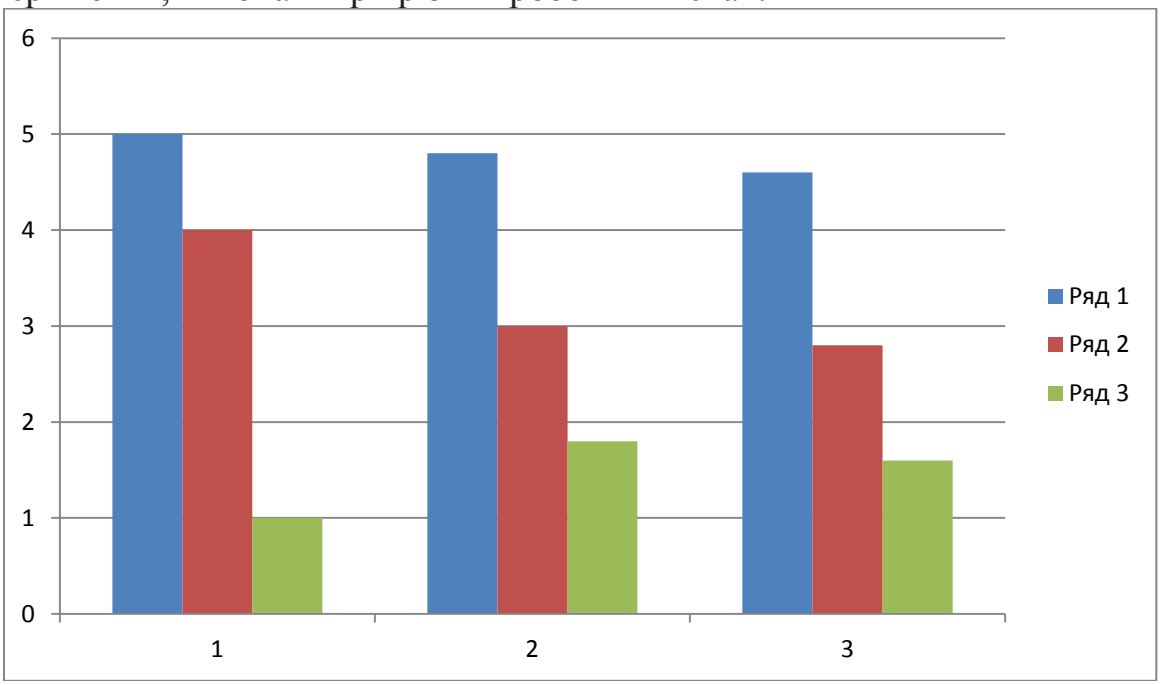


Рис. 2.2

15. Сформулюйте висновки з виконаної роботи і викладіть їх у робочому зошиті.

Лабораторна робота № 3

Тема. Освоєння технології зворотноосмотичного опріснення заданого об’єму сольового розчину до бажаного залишкового солевмісту у дві стадії з мінімізацією кількості зворотноосмотичного концентрату, що продукується і підлягає утилізації.

Мета роботи

Вивчення динаміки зворотноосмотичної демінералізації водного розчину кухонної солі (підсоленої води) в системі з двома накопичувальними ємностями (1) і (2). Опановування першої стадії процесу, коли пермеат розріджує вихідний розчин в ємності (1), а концентрат акумулюється в ємності (2).

3.1. Вступ

У системі, що складається із зворотноосмотичної установки і двох накопичувальних ємкостей, технологічний процес опріснення заданого об’єму сольового розчину можна здійснити так, що необхідний ступінь знесолення розчину (мінералізованої води) буде досягнутий з мінімальним об'ємом концентрату (транзиту), що продукується.

Сутність технології полягає в тому, що спочатку розчин (мінералізована вода) з першої ємкості подається на зворотноосмотичне оброблення і пермеат, що утворюється, повертається в цю ж ємкість, розріджуючи вхідний розчин у ній, а концентрат збирається у другій ємкості. Потім концентрат з другої ємкості також подається на зворотноосмотичне оброблення і вторинний пермеат, що утворюється, спрямовується в першу ємкість, а концентрат в другу ємкість. З першої ємкості одержаний продукт використовується споживачем за призначенням, а концентрат, що залишився в другій ємкості, спрямовується на утилізацію.

3.2. Завдання

За допомогою зворотноосмотичної системи з двома накопичувальними ємкостями опанувати процедуру опріснення заданого об’єму сольового розчину до бажаного рівня. Досягти двократного зниження концентрації сольового розчину в накопичувальній ємкості (1) при його відкачуванні з цієї ємності на зворотноосмотичне оброблення і поверненні в цю ж ємкість пермеату (зворотноосмотичного фільтрату), що продукується.

3.3. Принципова схема обладнання для двостадійного зворотноосмотичного опріснення сольових розчинів

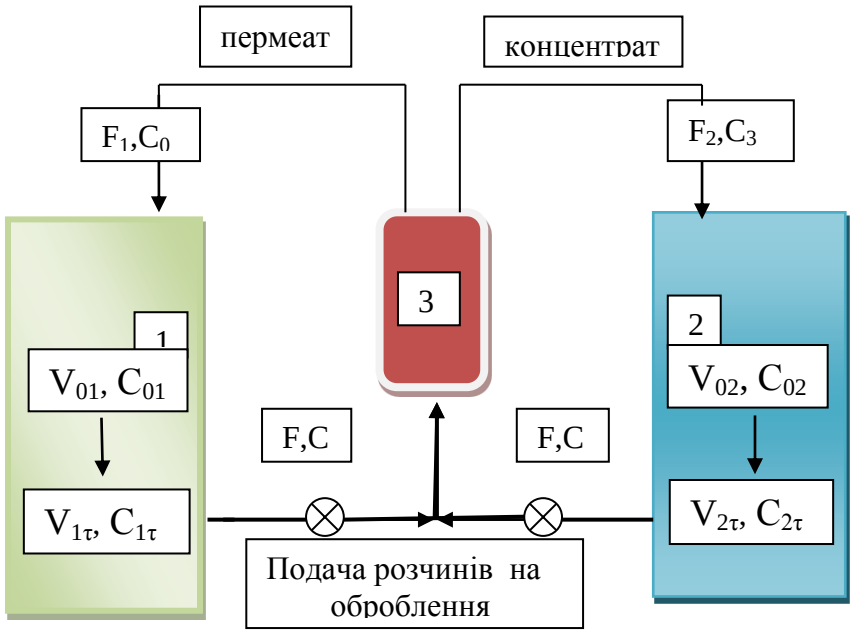


Рис. 3.1. Принципова схема обладнання для двостадійного зворотноосмотичного опріснення сольових розчинів

1 – накопичувальна ємність для вхідного розчину і зворотноосмотичного фільтрату (пермеату);

2 – накопичувальна ємкість для концентрату;

3 – установка зворотного осмосу;

⊗ – насоси для подачі розчинів з ємкостей (1) і (2) на зворотноосмотичне оброблення.

3.4. Функціонування системи

Робота зворотноосмотичної установки в комплекті з модулем накопичувальних ємкостей забезпечується двома відцентровими вихровими насосами. З ємкостями (1) і (2) насоси з'єднані, як показано на рис. 3.1.

Кожен насос живить установку зворотного осмосу зі своєї ємкості. У зворотноосмотичній установці відбувається поділ потоку рідини (сольового розчину) на пермеат (зворотноосмотичний фільтрат) і концентрат (транзит). З виходу установки пермеат і концентрат повертаються в ємкості (1) і (2), відповідно. Якщо включений насос, що обслуговує ємкість (1), то розчин з цієї ємкості з витратою F ($дм^3/с$) подається на зворотноосмотичне оброблення і пермеат з вмістом солей у ньому, що дорівнює C_0 ($мг/дм^3$) і з витратою F_1 ($дм^3/сек$) повертається в ємкість (1), розбавляючи її солевміст, а концентрат (транзит) з вмістом солей у ньому C_3 ($мг/дм^3$) і з витратою F_2 ($дм^3/сек$) направляється в ємкість (2) і накопичується там.

Коли включений насос, обслуговуючий ємкість (2), то розчин з цієї ємкості з концентрацією С і з витратою F надходить на вхід зворотноосмотичної установки, а пермеат і концентрат з параметрами витрат і концентрації F_1, C_0 і F_2, C_3, як і раніше, повертаються в ємкості (1) і (2), відповідно.

Оснащення зворотноосмотичної установки двома ємкостями, одна з яких початково заповнена сольовим розчином, що спрямовується на демінералізацію, і одночасно служить для прийому зворотноосмотичного фільтрату (пермеату), а друга є проміжним збірником для концентрату (транзиту), який піддається обробці на другій стадії технологічного процессу, надає можливість мінімізувати об'єм рідких відходів при знесоленні заданого обсягу води. Час і енергетичні витрати, необхідні для обробки води за вказаною схемою, залежать від початкової концентрації солей, розчинених у воді, якості використовуваної зворотноосмотичної мембрани та потужності насосів, що забезпечують подачу води на зворотноосмотичне оброблення і створюють необхідний робочий тиск для отримання пермеату.

3.5. Початкові і кінцеві умови в системі

Початковий об'єм сольового розчину в ємності (1) дорівнює V_{01} і його вихідна концентрація дорівнює C_{01}. Початковий обсяг концентрату в ємності (2) дорівнює V_{02} та його солевміст дорівнює C_{02}.

По закінченні процесу зворотноосмотичної фільтрації об’єм розчину в ємкості (1) становить величину $V_{1\tau}$ і концентрація солі в ньому дорівнює $C_{1\tau}$, а об’єм вмісту ємкості (2) досягає величини $V_{2\tau}$ і концентрація солі в ньому становить $C_{2\tau}$.

3.6. Математична модель процесу знесолення розчину в накопичувальній ємкості (1) при його відкачуванні з цієї ємкості на зворотноосмотичне оброблення і поверненні в цю ж єкність продукованого пермеату

За зміною концентрації сольового розчину в ємкості (1) при його зворотноосмотичному обробленні можна простежити на математичній моделі, так як потоки пермеату (F_1) і концентрату (F_2) взаємопов'язані, і в сумі дорівнюють потоку (F). Цей потік переносить таку ж кількість розчинених речовин (солей), що і сума потоків (F_1) і (F_2).

Диференціальне рівняння, що описує зміну солевмісту ($dG/d\tau$) у розчині в ємкості (1) при його споживанні з цієї ємкості на зворотноосмотичне оброблення з інтенсивністю (F) і одночасному розведенні пермеатом з інтенсивністю (F_1), має наступний вигляд:

$$\frac{dG}{d\tau} = F_1 C_0 - FC \qquad (3.1)$$

або:

$$\frac{dG}{d\tau} = \frac{d(V \cdot C)}{d\tau} = F_1 C_0 - FC \ , \qquad (3.2)$$

де V – змінний об'єм розчину ємності (1);

C – концентрація солей, що змінюється в розчині, в ємності (1) і в його відтіку F з ємності (1);

C_0 – солевміст в притоці пермеату в ємкість (1);

F_1 – приплив пермеату в ємкість (1) ;

F – відтік розчину із ємкості (1).

Похідна у лівій частині рівняння (3.2), тобто $d(VC)/d\tau$ є функцією двох змінних, залежних від часу (τ). Тому в розгорнутій диференціальній формі це рівняння має вигляд:

$$C\frac{dV}{d\tau} + V\frac{dC}{d\tau} = F_1 C_0 - FC \ . \qquad (3.3)$$

Але, оскільки для даної системи $dV/d\tau$ є не що інше, як різниця потоків F_1 і F, то отримуємо:

$$C(F_1 - F) + V\frac{dC}{d\tau} = F_1 C_0 - FC \qquad (3.4)$$

або:

$$V\frac{dC}{d\tau} = F_1(C_0 - C). \qquad (3.5)$$

В рівнянні (3.5) величина V складається з початкового об'єму V_{01} і з алгебраїчної суми потоків F_1 і F на час τ їх існування в процесі зворотноосмотичного оброблення розчину із ємності (1), тобто $V = V_{01} + (F_1 - F)\tau$.

Звідси:

$$V_{01} + (F_1 - F)\tau\frac{dC}{d\tau} = F_1(C_0 - C). \qquad (3.6)$$

Рівняння (3.6) моделює процес зміни концентрації солі в змінному об'ємі розчину в ємності (1), коли потік F з цієї ємності спрямовуйте на зворотноосмотичну обробку, а потік пермеату F_1 повертається назад. При цьому за час (τ) здійснення процесу, обсяг і концентрація розчину в ємкості (1) поступово зменшуються.

В інтегральній формі з розділеними змінними рівняння (6) записується наступним чином:

$$\int_{C_{01}}^{C_{1\tau}} \frac{dC}{F(C_0 - C)} = \int_0^{\tau} \frac{d\tau}{V_{01} + (F_1 - F)\tau}. \qquad (3.7)$$

Нижня межа інтегрування в лівій частині рівняння (3.7), тобто C_{01}, відповідає вхідному солевмісту у вхідному об'ємі розчину в ємкості (1), а верхня межа, тобто $C_{1\tau}$ відповідає концентрації солі у об'ємі ємкості (1) на момент часу τ.

Ліва і права частини рівняння (3.7) є табличними інтегралами. Інтегруючи (3.7) у зазначених межах і виконуючи необхідні подальші перетворення, отримуємо:

$$\frac{C_{1\tau}}{C_0} = 1 + \left(\frac{C_{01}}{C_0} - 1\right)\cdot\left[1 + \frac{F_1 - F}{V_{01}}\tau\right]^{F1/(F-F_1)}, \qquad (3.8)$$

де $C_{1\tau}$ – солевміст в об'ємі розчину в ємності (1), що досягнутий до часу τ;

C_0 – солевміст в потоці пермеату;

C_{01} – початковий солевміст в початковому об'ємі розчину в ємності (1);

τ – тривалість часу зворотноосмотичного оброблення;

F – потік сольового розчину, з ємкості (1) на зворотноосмотичне оброблення;

F_1 – потік пермеату, що повертається в ємкість (1);

V_{01} – початковий об'єм розчину в ємкості (1).

Рівняння (3.8) спрощується, якщо потік фільтрованого розчину у просторі зворотноосмотичної установки поділяється на пермеат і концентрат у відношенні 1:1. В такому випадку $F_1 = 0{,}5\ F$ і (3.8) набуває вигляд:

$$C_{1\tau} = C_{01} + \frac{V_\tau}{V_{01}}(C_0 - C_{01}), \qquad (3.9)$$

де $V\tau = (F - F_1)\cdot\tau = F_1\cdot\tau$, – спад об'єму сольового розчину в ємкості (1) за час τ. При цьому залишковий об'єм розчину в ємкості (1) стає рівним різниці між V_{01} і $F_1 \cdot \tau$. Цю різницю позначимо як V_{01}^{x}. Тоді:

$$V_{01}^{x} = V_{01} - F_1\cdot\tau. \qquad (3.10)$$

З рівнянь (8) і (9) випливає, що при $\tau = 0$, $C = C_{01}$. Тобто на час включення насоса в ємкості (1) , концентрація солі у вхідному розчині з об'ємом V_{01}, який починає піддаватися зворотноосмотичному обробленню, дорівнює C_{01}. А коли величина $(F - F_1)\cdot\tau$ наростає, то концентрація солі ($C_{1\tau}$), що залишається в об'ємі розчину (V_{01}^{x}) в ємкості (1) все більше і більше наближається до концентрації солі в пермеаті.

Таким чином, рівняння (3.8) і (3.9) відображають зміну солевмісту в розчині, що спрямовується з ємкості (1) на зворотноосмотичне оброблення при його одночасному (синхронному) розведенні пермеатом в цієї ємності, і відведенні концентрату (транзиту) в ємність (2) для його накопичення там і подальшого зворотноосмотичного оброблення.

3.7.Солевміст в концентраті, що накопичується в ємності (2) при зворотноосмотичному обробленні розчину із ємкості 1

Математичний висновок рівняння, яке описує динаміку зміни солевмісту в концентраті, що утворюється при зворотноосмотичної обробці розчину із ємкості (1) і спрямовується в накопичувальну ємкість (2), є більш складним і тому не наводиться.

Що стосується фінішного солевмісту в концентраті, який накопичується в ємності (2) при зворотноосмотичному обробленні розчину із ємності (1), то в залежності від вхідного солевмісту (C_{01}), і початкового об'єму, (V_{01}) цього розчину в ємкості (1), а також в залежності від об’єму V_{01}^{x} і солевмісту (C_{01}^{x}) купажу тобто суміші, з вхідного розчину і пермеату що утворюється в ємності (1), кінцеве значення солевмісту в концентраті, який накопичився в ємкості (2), описується рівнянням:

$$C_{02}^{x} = (\boldsymbol{V_{01}} \cdot \boldsymbol{C_{01}} - V_{01}^{x} C_{01}^{x}) / (\boldsymbol{V_{01}} - V_{01}^{x}), \qquad (3.11)$$

де $\boldsymbol{V_{01}} - V_{01}^{x}$ – об’єм концентрату, рівний (V_{02}^{x}), який накопичився в ємності (2) при зворотноосмотичної обробці сольового розчину із ємності (1).

Таким чином:

$$C_{02}^{x} = (\boldsymbol{V_{01}} \cdot \boldsymbol{C_{01}} - V_{01}^{x} C_{01}^{x}) / (V_{02}^{x}), \qquad (3.12)$$

де $\boldsymbol{V_{01}} \cdot \boldsymbol{C_{01}}$ – маса солі, що містилася в початковому об’ємі розчину в ємкості (1);

$\boldsymbol{V_{01}^{x} C_{01}^{x}}$ – маса солі, що залишилася в кінцевому об'ємі розчину в ємкості (1).

3.8. Експериментальна частина

3.8.1. Необхідне обладнання і контрольно-вимірювальні прилади

1. Установка зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-F3A».
2. Модуль накопичувальних ємкостей.
3. Кондуктометричний солемір (TDS - метр).
4. Скляні ємкості (пробовідбірники).

3.8.2. Порядок виконання лабораторної роботи

1. Визначте вихідні об’єми розчинів V_{01} і V_{02} в накопичувальних ємкостях (1) і (2), що підключені до зворотноосмотичної установки, і запишіть їх значення в таблицю, підготовлену у робочому зошиті.

Для визначення вхідних об’ємів розчинів зніміть показання з сантиметрових шкал на поплавцевих рівнемірах в ємкостях (1) і (2) і обчисліть об'єми розчинів, що знаходяться в ємкостях (1) і (2) за формулою

$$V = n \cdot h + H,$$

де V – об'єм розчину, який необхідно визначити;

n – відмітка на сантиметрової шкалі поплавцевого рівнеміра, що спостерігається відносно кромки прозорої пластини, яка перекриває горловину ємності, в якій визначається об’єм розчину:

h – еквівалентний об'єм розчину, який відповідає одному поділу на сантиметрової шкалі поплавцевого рівнеміра (h = 2 л/см);

H – резервні, що не перекачуються, об’єми розчинів в ємгостях (1) і (2). (H = 40 л)/

2. Здійсніть запуск зворотноосмотичної установки, як описано в розділі 1.2.7. опису до лабораторної роботи № 1.

3. Переконайтеся, що установка вийшла на робочий режим (у цьому випадку на дисплеї контролера висвічується слово «ВИРОБНИЦТВО») і плавним обертанням рукоятки голчастого вентиля на ротаметрі «рецикл/скидання» (див. рис. 1.4 в керівництві для виконання лабораторної роботи №1), встановіть тиск розчину в зворотноосмотичному модулі, що дорівнює 0,6 МПа, контролюючи його по манометру робочого тиску.

4. Через три хвилини функціонування зворотноосмотичної системи при заданому робочому тиску 0,6 МПа відберіть проби пермеату, концентрату і вхідної води для їх аналізу.

5. За допомогою ТДС-метра визначте концентрації солей у відібраних пробах в мг/дм^3 і запишіть їх у підготовлену таблицю в робочому зошиті, як показано нижче.

Таблиця

1	Початковий об'єм розчину V_{01} в ємкості (1), $дм^3$	
2	Початковий об'єм розчину V02 в ємкості (2) $дм^3$	
3	Робочий тиск, МПа	
4	Концентрація солі C_{01} у вхідній воді, $мг/дм^3$	
5	Концентрація солі C_0 в пермеаті, $мг/дм^3$	
6	Концентрація солі C_{02}^x в концентраті (транзиті), $мг/дм^3$	
7	Потік пермеату F_1 в ємкість (1), $дм^3/хв$	
8	Потік концентрату F_2 в ємкість (2), $дм^3/хв$	
9	Потік розчину (F) з ємкості (1), $дм^3/хв$	
10	Об'єм розчину $V_{1\tau}$ в ємкості (1) до часу (τ), $дм^3$	
11	Об'єм концентрату $V_{2\tau}$ в ємкості (2) до часу (τ), $дм^3$	

6. Зніміть при заданому робочому тиску показання з ротаметрів, які відображають потоки пермеату (F_1) і концентрату (F_2) на виході з зворотноосмотичного модуля (в літрах за хвилину) і запишіть їх у таблицю в робочому зошиті.

7. Визначте потік розчину (F), що живить зворотноосмотичну установку і запишіть його значення в таблицю у робочому зошиті Для цього скористайтеся формулою:

$$F = F_1 + F_2,$$

де F_1 – потік пермеату, (л/хв);

F_2 – потік концентрату, (л/хв).

8. За допомогою рівняння (3.8) , підставляючи в нього значення початкового об'єму розчину (V_{01}) в ємності (1), вихідного солевмісту цього розчину (C_{01}), і солевмісту (C_0) зворотноосмотичного фільтрату (пермеату), а також значення потоків (F) і (F_1), розрахуйте концентрацію солі ($C_{1\tau}$) в розчині, що буде знаходиться в ємкості (1) через 10, 20, 30, 40, 50, і 60 хвилин з моменту запуску зворотноосмотичної фільтрації. Побудуйте графік залежності $C_{1\tau}$ від τ і визначте на ньому час, при якому $C_{1\tau} = 0{,}5\ C_{01}$.

9. За результатами виконаних розрахунків побудуйте графік залежності $C_{1\tau}$ від V_τ / V_{01} для інтервалу відносин V_τ / V_{01} від 0 до 0,6, як показано на рис. 3.2, і вкажіть яким технологічним параметрам зворотноосмотичної фільтрації він задовольняє.

10. Побудуйте графіки зміни об’ємів купажу і концентрату в ємкостях (1) і (2) за одну годину роботи зворотноосмотичної установки, коли потік розчину із ємкості (1) дорівнює (F), потік пермеату в цю ємкість дорівнює (F_1), а потік концентрату в ємкість (2) дорівнює (F_2). Зразки графіків показані на рисунках 3.3 і 3.4.

11. Сформулюйте висновки з виконаної роботи. Зверніть увагу на зміну об’ємів розчинів в ємкостях (1) і (2), що досягається в процесі опріснення розчину при заданому робочому тиску (0,6 МПа).

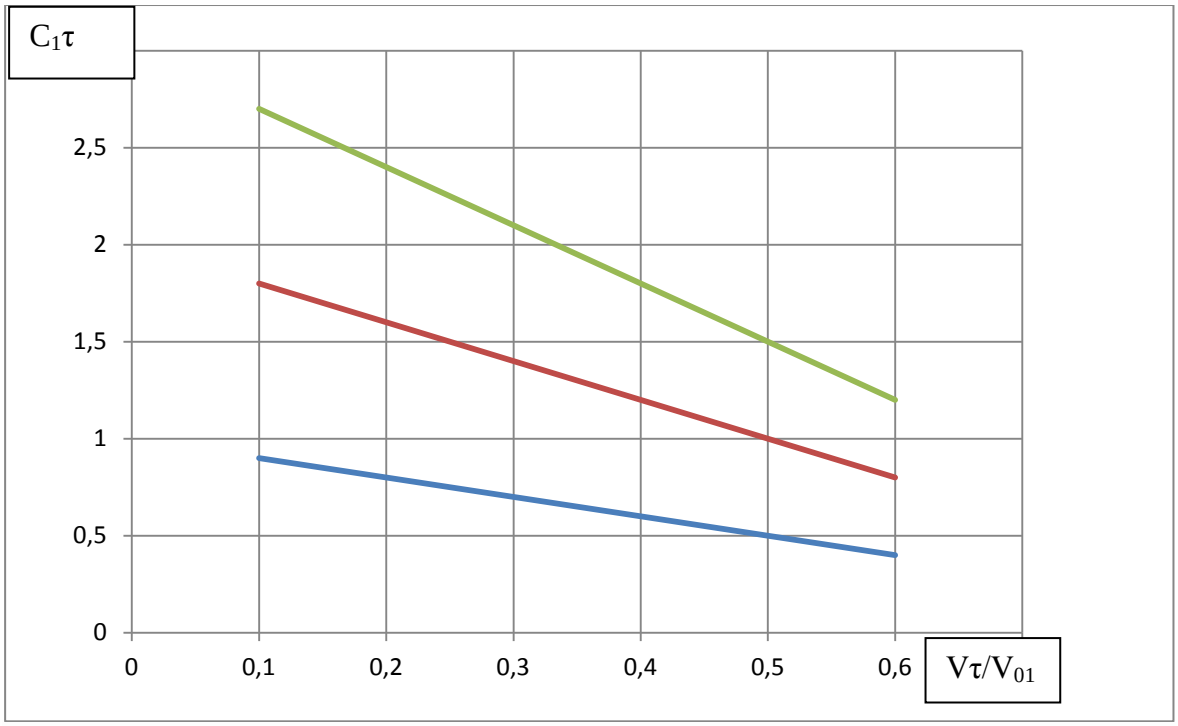


Рис. 3.2. Очікувана зміна концентрації солі $C_{1\tau}$ в об'ємі розчину ємкості (1) на першому етапі його зворотноосмотичного оброблення в залежності від V_τ/V_{01} при різних початкових значеннях (C_{01}). $C_{1\tau}$ – поточні значення концентрації солі

Початкові концентрації солі в ємності (1):

1 – C_{01} = 1 г/ дм^3; 2 – C_{01} = 2 г/дм^3; 3 – C_{01} = 3 г/дм^3.

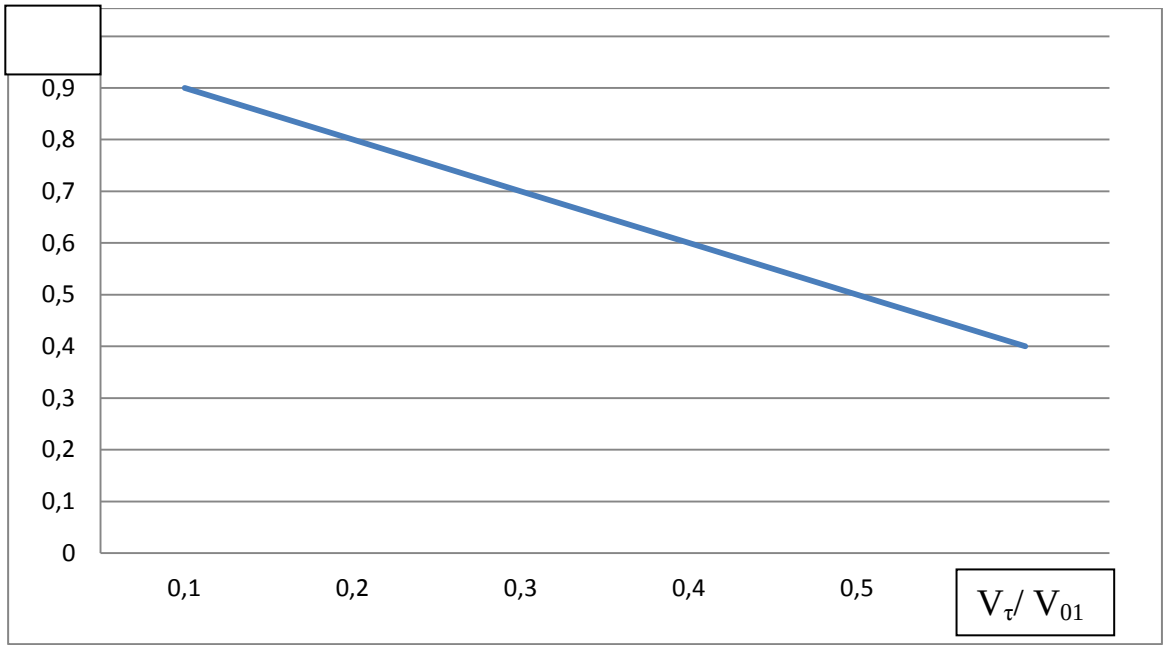


Рис. 3.3. Очікувана зміна об’єму купажу V_{01}^{x} в ємності (1) залежно від відношення V_τ/ V_{01}, яке досягається на першому етапі зворотноосмотичного оброблення води з ємності (1)

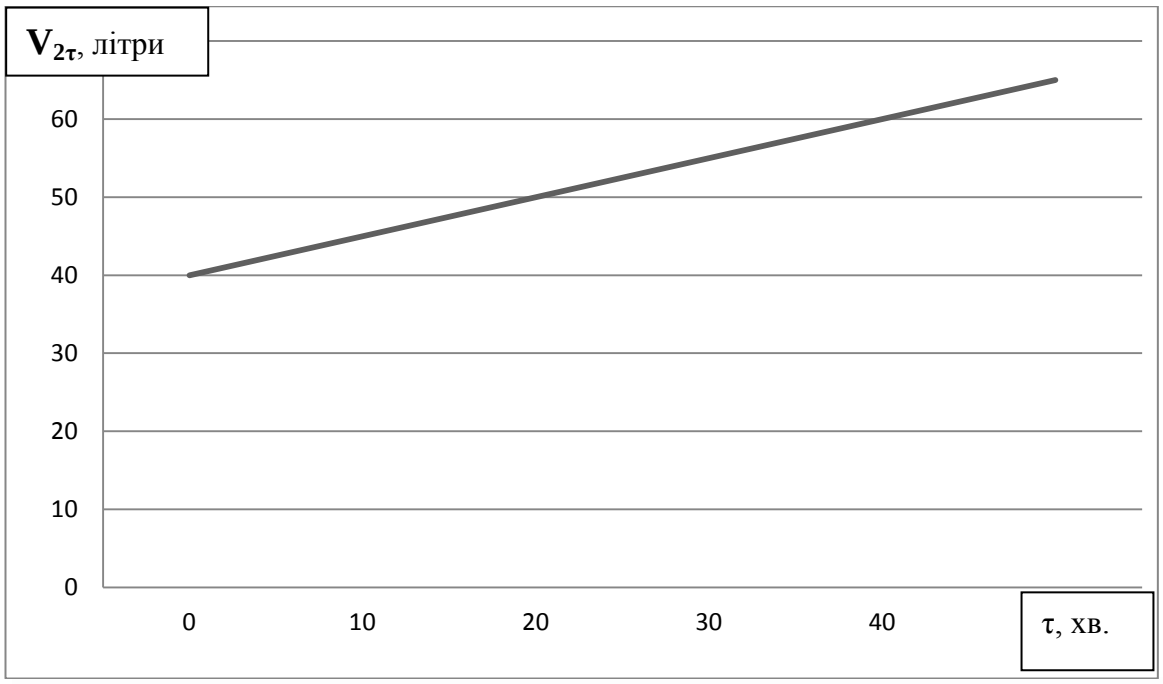


Рис. 3.4. Очікуване збільшення об'єму розчину в ємкості (2) при потоці F_2 концентрату в цю ємкість

Лабораторна робота № 4

Тема:

Освоєння технології зворотноосмотичного опріснення заданого об’єму сольового розчину до бажаного залишкового солевмісту в дві стадії, щодо мінімізації кількості зворотноосмотичного концентрату, який підлягає утилізації.

4.1. Мета роботи

Вивчення динаміки демінералізації розчину кухарської солі (підсоленої води) в системі з двома накопичувальними ємкостями (1) і (2), коли по завершенні процесу зворотноосмотичного оброблення сольового розчину із ємкості (1), здійснюють оброблення концентрату, накопиченого в ємності (2) і направляють продукований пермеат в ємкість (1), а вторинний концентрат повертають у ємкість (2).

4.2. Загальна частина

4.2.1.Математична модель зміни концентрації розчиненої солі в купажу ємкості (1) на другій стадії зворотноосмотичного процесу.

На другій стадії зворотноосмотичного процесу, тобто при обробленні концентрату з ємності (2) з подачею одержаного пермеату в ємкість (1), а концентрату – знову в ємкість (2), рівняння, що описує зміну солевмісту ($dG/d\tau$), тепер вже у зростаючому об’ємі знесольованого розчину в ємкості (1), має вигляд:

$$\frac{dG}{d\tau} = F_1 C_0, \tag{4.1}$$

або:

$$\frac{dG}{d\tau} = \frac{d(V \cdot C)}{d\tau} = F_1 C_0 \ . \tag{4.2}$$

Тоді за аналогією перетворень, здійсненних з рівнянням (3) у розділі 2.4 керівництва до лабораторної роботи №3, отримуємо:

$$C\frac{dV}{d\tau} + V\frac{dC}{d\tau} = F_1 C_0 \tag{4.3}$$

і:

$$CF_1 + V\frac{dC}{d\tau} = F_1 C_0 \tag{4.4}$$

або:

$$CF_1 + (V_{01}^{x} + F_1\tau)\frac{dC}{d\tau} = F_1 C_0 \tag{4.5}$$

і

$$\int_{C_{01}^{x}}^{c_{1\tau}} \frac{dC}{(C_0 - C)F_1} = \int_0^{\tau} \frac{d\tau}{V_{01}^{x} + F_1\tau} \tag{4.6}$$

де V_{01}^{x} – обсяг купажу (суміші вхідного розчину і зворотноосмотичного фільтрату), який залишився в ємкості (1) після завершення першого етапу зворотноосмотичної обробки, як це було показано у розділі 3.4 керівництва до лабораторної роботи № 3;

C_{01}^{x} – концентрація солі в купажі, який залишився в ємкості (1) після завершення першого етапу зворотноосмотичного оброблення розчину із ємкості (1);

$C_{1\tau}$ – концентрація солі у водному об'ємі купажу в ємкості (1), повторно розрідженному пермеатом у результаті здійснення другого етапу зворотноосмотичного оброблення.

Інтегрування рівняння (6) у зазначених межах приводить до наступного результату:

$$\frac{C_{1\tau}}{C_0} = 1 + \left(\frac{C_{01}^{x}}{C_0} - 1\right) \cdot \left[1 + \frac{F_1 \cdot \tau}{V_{01}^{x}}\right]^{-1} \ . \tag{4.7}$$

З рівняння (7) випливає, що на момент старту другого етапу зворотноосмотичного оброблення, тобто при $\tau = 0$, концентрація солі $C_{1\tau}$ в купажі з об'ємом V_{01}^{x}, що знаходиться в ємкості (1) дорівнює концентрації C_{01}^{x}, яка була досягнута в об'ємі розчину (купажу) у цій ємкості в результаті реалізації першого етапу зворотноосмотичного оброблення.

А коли τ збільшується і стає таким, що $F_{1\cdot\tau}$ перевищує V_{01}^{x}, то поточна концентрація солі $C_{1\tau}$ в купажі ємкості (1) прямує до значення C_0, яке

характеризує солевміст власне у пермеаті. При цьому обсяг $V_{1\tau}$ може в декілька разів перевищити обсяг $V_{2\tau}$ вторинного концентрату (транзиту), що залишається в ємкості (2).

4.2.2. Зміна солевмісту в концентраті в ємкості (2) на другій стадії технологічного процесу

Концентрацію солі в розчині, який залишається в ємкості (2) після закінчення другого етапу зворотноосмотичного оброблення, можна розрахувати вважаючи, що пермеат на виході із зворотноосмотичної установки практично не містить розчинених солей у своєму складі, а вторинний концентрат (транзит), характеризується подвійним солевмістом порівняно з солевмістом розчину, з якого він утворюється. Така умова виконується при 100% селективності зворотноосмотичної мембрани за відношенням до пермеату.

Диференціальне рівняння, що описує процес зміни маси розчиненої солі в об'ємі концентрату, в ємкості (2) при його відкачуванні з витратою F при концентрації C на зворотноосмотичне оброблення і відповідному поверненні вторинного концентрату в ємкість (2) з дебетом потоку F_2 і з солевмістом в ньому $C_3 = 2C$, має наступний вигляд:

$$\frac{dG}{d\tau} = \frac{d(V \cdot C)}{d\tau} = F2C - 2FC \ , \qquad (4.8)$$

де 2FC – елементарне перенесення солі з потоком розчину, що виходить з ємкості (2) на зворотно осмотичне оброблення;

2CF – елементарне перенесення солі з потоком вторинного концентрату, що повертається в ємкість (2).

Але оскільки 2FC = 2CF, то рівняння (4.8) спрощується, тобто:

$$\frac{d(V \cdot C)}{d\tau} = 0 \qquad (4.9)$$

або

$$C\frac{dV}{d\tau} + V\frac{dC}{d\tau} = 0 . \qquad (4.10)$$

В інтегральній формі з розділеними змінними це рівняння виглядає так:

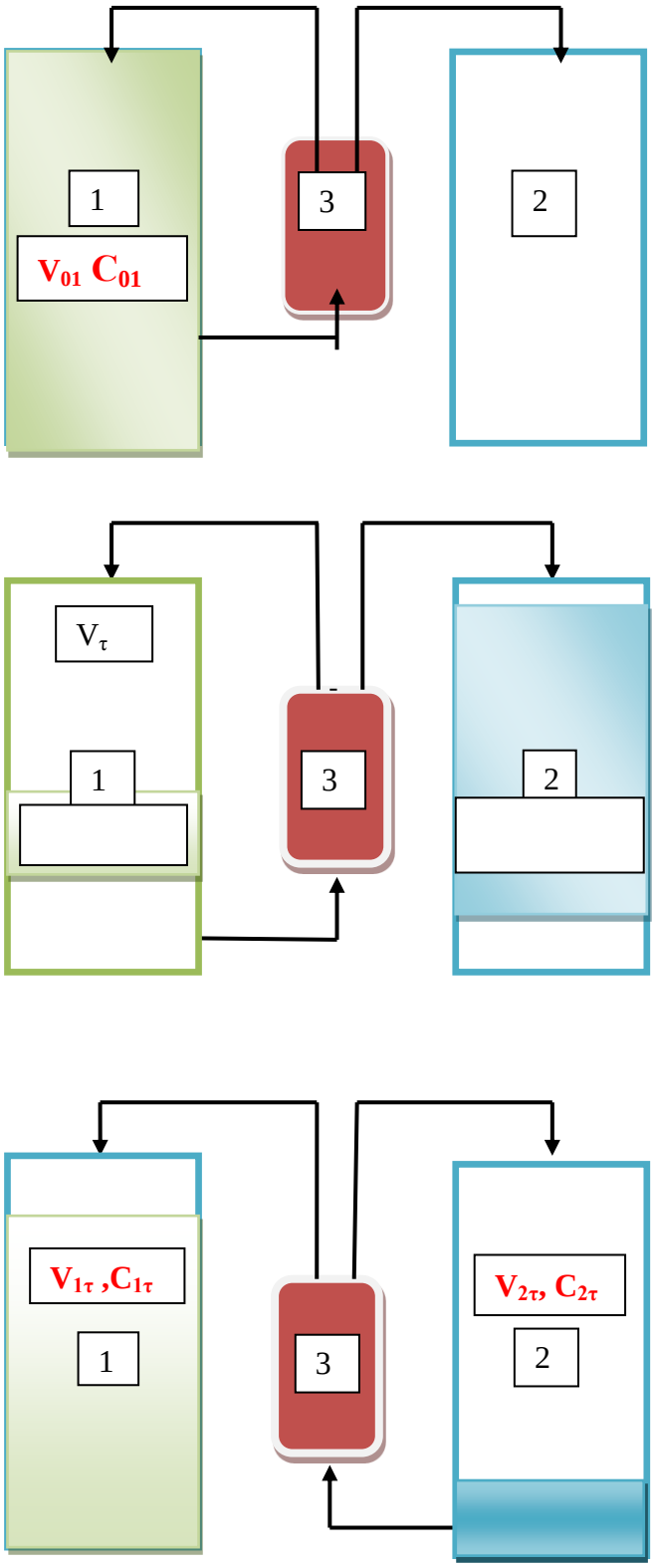
$$\int_{V_{02}}^{V_{2\tau}} \frac{dV}{V} = -\int_{C_{02}}^{C_{2\tau}} \frac{dC}{C} . \qquad (4.11)$$

Інтегрування (11) у зазначених межах дає:

$$\boldsymbol{C_{2\tau} = C_{02} \cdot \frac{V_{02}}{V_{2\tau}}} . \qquad (4.12)$$

Рівняння (4.12) показує, що концентрат в ємкості (2) після другої стадії (ступеня) зворотноосмотичного оброблення має солевміст зворотнопропорційний його об'єму в цій ємкості.

Схематично процедура двостадійного зворотноосмотичного оброблення розчинів з ємкостей (1) і (2) показана на рис. 4.1.



Початковий стан: ємкість (1) заповнена розчином,що підлягає зворотноосмотичному обробленню, а ємкість (2) – порожня.
Перша стадія:починається процес зворотноосмотичної фільтрації з ємкості (1) із поверненням пермеату в ємкість (1) і з накопиченням концентрату в ємкості (2)

Робота установки триває. При цьому завершується процес зворотноосмотичної фільтрації розчину із ємкості (1) з поверненням пермеату в її об'єм і накопиченням концентрату в ємкості (2). На рисунку показано досягнуті рівні купажу, (зворотноосмотичного фільтрату в суміші з вихідним розчином) і концентрату (транзиту) в ємкостях (1) і (2), відповідно

Друга стадія: починається і завершується процес зворотноосмотичної фільтрації концентрату (транзиту), накопиченого в ємкості (2). Пермеат направляється в ємкість (1), а вторинний концентрат повертається в ємкість (2). Показано фінішні рівні вторинного купажу і вторинного концентрату в ємкостях (1) і (2).

Рис. 4.1. Схема двостадійного зворотноосмотичного оброблення розчинів з ємкостей (1) та (2)

4.3. Експериментальна частина

4.3.1. Необхідне обладнання і контрольно-вимірювальні прилади

1. Установка зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-F3A».
2. Модуль накопичувальних ємкостей.
3. Кондуктометричний солемір (TDS - метр).
4. Скляні ємкості (пробовідбірники).

4.3.2. Порядок виконання лабораторної роботи

1. Визначте вхідні об’єми розчинів V_{01} і V_{02} в накопичувальних ємностях (1) і (2), підключених до зворотноосмотичної установки, і запишіть їх значення в таблицю, підготовлену у робочому зошиті. Для визначення вхідних об’ємів зніміть показання з сантиметрових шкал на поплавцевих рівнемірах в ємностях (1) і (2) і обчисліть об'єми розчинів, що знаходяться в ємностях (1) і (2) за формулою

$$V = n \cdot h + H,$$

де V – об'єм розчину, який необхідно визначити;

n·– відмітка на сантиметровой шкалі поплавцевого рівнеміра, що спостерігається відносно кромки прозорої пластини, яка перекриває горловину ємкості, в якій визначається об’єм розчину:

h – еквівалентний об'єм розчину, який відповідає одному поділу на сантиметрової шкалі поплавцевого рівнеміра (h = 2 літра/ см);

H – об'єми розчинів в ємкостях (1) і (2), що не перекачуються насосами (резервні), H = 40 літрів.

2. Перевірте і в разі необхідності змініть положення керуючих ручок на кульових кранах (вентилях) модуля накопичувальних ємкостей (рис 4.2), бо при зворотноосмотичному обробленні концентрату з ємкості (2) вентилі В1, В2 і В4 повинні бути закриті, а вентилі В3, В5 і В6 повинні бути відкриті, як показано на рис. 4.2.і 4.3 а,б.

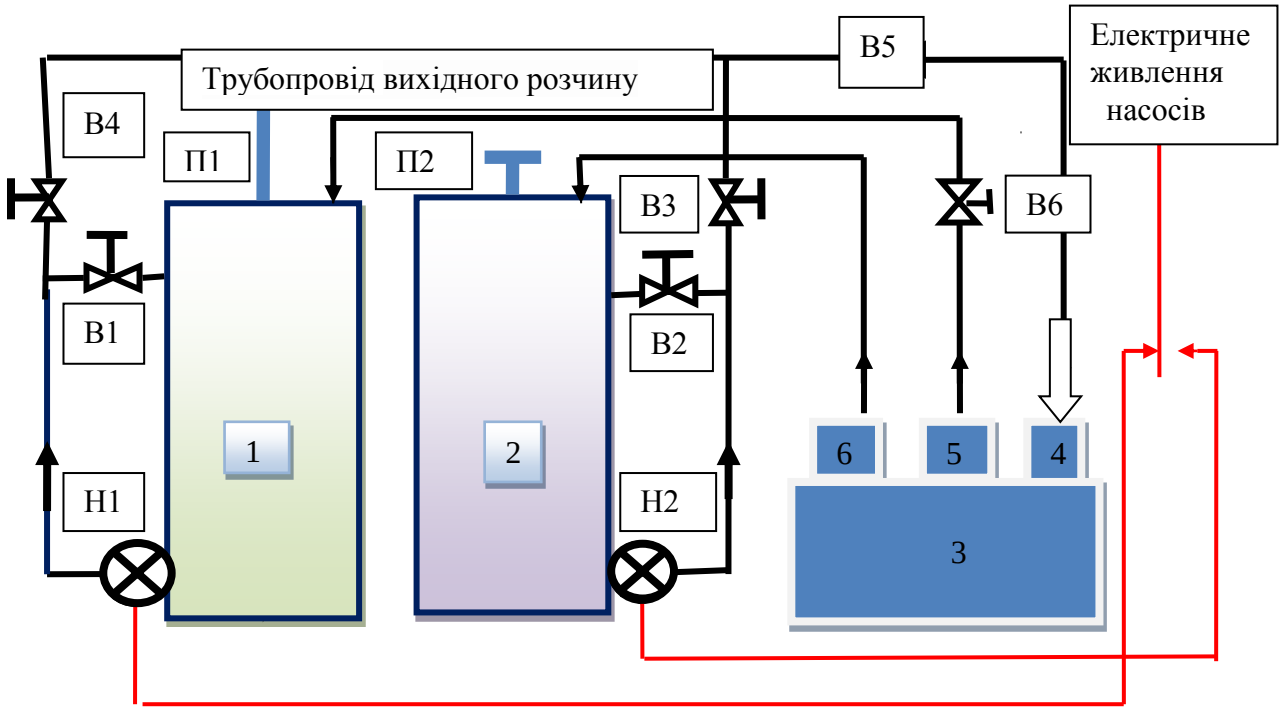


Рис. 4.2.Принципова схема модуля накопичувальних ємностей і його підключення до установки зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-F3A»:
1 – ємність для вхідного розчину і накопичення пермеату; 2 – ємність для накопичення концентрату; 3 – установка зворотного осмосу «Екософт 2500 МО-F3A».
4 – вхід розчину (води) на обробку; 5 – вихід пермеату; 6 – вихід концентрату;
Н1,Н2 – відцентрові насоси; В1-В5 – кульові вентилі; П1,П2 – поплавцеві рівнеміри



Рис. 4.3а. Початкове положення рівнемірів перед здійсненням другого ступеня зворотноосмотичного оброблення розчину із ємкості (2)



Рис. 4.3б. Кінцеве положення рівнемірів при здійсненні другого ступеня зворотноосмотичного оброблення розчину із ємкості (2)

3. Здійсніть запуск зворотноосмотичної установки, як описано в розділі 1.2.7. лабораторної роботи № 1.

4. Переконайтеся, що установка вийшла на робочий режим (у цьому випадку на дисплеї контролера висвічується слово «ВИРОБНИЦТВО») і плавним обертанням рукоятки голчастого вентиля на ротаметрі «рецикл/скидання» (рис. 4 в керівництві для виконання лабораторної роботи № 1), встановіть тиск розчину в зворотноосмотичному модулі, що дорівнює т 0,6 МПа, контролюючи його за манометром робочого тиску.

5. Через три хвилини функціонування зворотноосмотичної системи при заданому робочому тиску 0,6 МПа відберіть проби пермеату, концентрату і вхідної води для їх аналізу.

6. За допомогою ТДС-метра визначте концентрації солей у відібраних пробах в мг/дм^3 і запишіть їх у підготовлену таблицю.

7. Зніміть при заданому робочому тиску показання з ротаметрів, які відображають потоки пермеату (F_1) і концентрату (F_2) на виході з зворотноосмотичного модуля (в літрах за хвилину) і запишіть їх у таблицю в робочому зошиті.

Таблиця

1	Початковий об'єм розчину V_{01} в ємкості (1), дм^3	
2	Початковий об'єм розчину $\boldsymbol{V_{02}}$ в ємкості (2) дм^3	
3	Робочий тиск, МПа,	
4	Концентрація солі C_{01} у вхідній воді, мг/дм^3	
5	Концентрація солі C_0 в пермеаті, мг/дм^3	
6	Концентрація соли C_{02}^{x} в концентраті (транзиті), мг/дм^3	
7	Потік пермеату F_1 в ємкість (1), дм^3/хв	
8	Потік концентрату F_2 в ємкість (2), дм^3/хв	
9	Потік розчину (F) з ємкості (1), дм^3/хв	
10	Об'єм розчину $V_{1\tau}$ в ємкості (1) до часу (τ), дм^3	
11	Об'єм розчину $V_{2\tau}$ в ємкості (2) до часу (τ), дм^3	

8. Визначте потік розчину (F), що живить зворотноосмотичну установку і запишіть його значення в таблицю у робочому зошиті Для цього скористайтеся формулою:

$$F = F_1 + F_2 ,$$

де F_1 – потік пермеату, (л/хв);
F_2 – потік концентрату,(л/хв).

9. За рівнянням (7) , підставляючи в нього значення початкового об'єму розчину (V_{01}) в ємності (1), вихідного солевмісту в цьому розчині (C_{01}), і солевмісту (C_0) в зворотноосмотичному фільтраті (пермеаті), а також значення потоку (F_1), розрахуйте концентрацію солі ($C_{1\tau}$) в розчині в ємкості (1) через 10, 20, 30, 40, 50, і 60 хвилин з моменту запуску другої стадії зворотноосмотичної фільтрації. Побудуйте графік залежності $C_{1\tau}$ від τ і визначте на ньому час, при якому $C_{1\tau} = 0{,}5\ C_{01}$.

10. За результатами виконаних розрахунків побудуйте графік залежності $C_{1\tau}$ від V_τ / V_{01} для інтервалу відносин $V\tau$ / V_{01} від 0 до 0,6 як показано на рис.4.4 і вкажіть яким технологічним параметрам зворотноосмотичної фільтрації він задовольняє.

11. Побудуйте графіки зміни обсягів купажу і концентрату в ємкостях (1) і (2) за одну годину роботи зворотноосмотичної установки, коли потік розчину із ємкості (2) дорівнює (F), потік пермеату в ємкість (1) дорівнює (F_1) а потік концентрату в ємкість (2) дорівнює (F_2) Зразки графіків показані на рисунках 4.5 і 4.6.

11. Сформулюйте висновки за виконаною роботою. Зверніть увагу на зміну обсягів розчинів в ємкостях (1) і (2), що буде досягатися в процесі опріснення розчину при заданому робочому тиску (0,6 МПа).

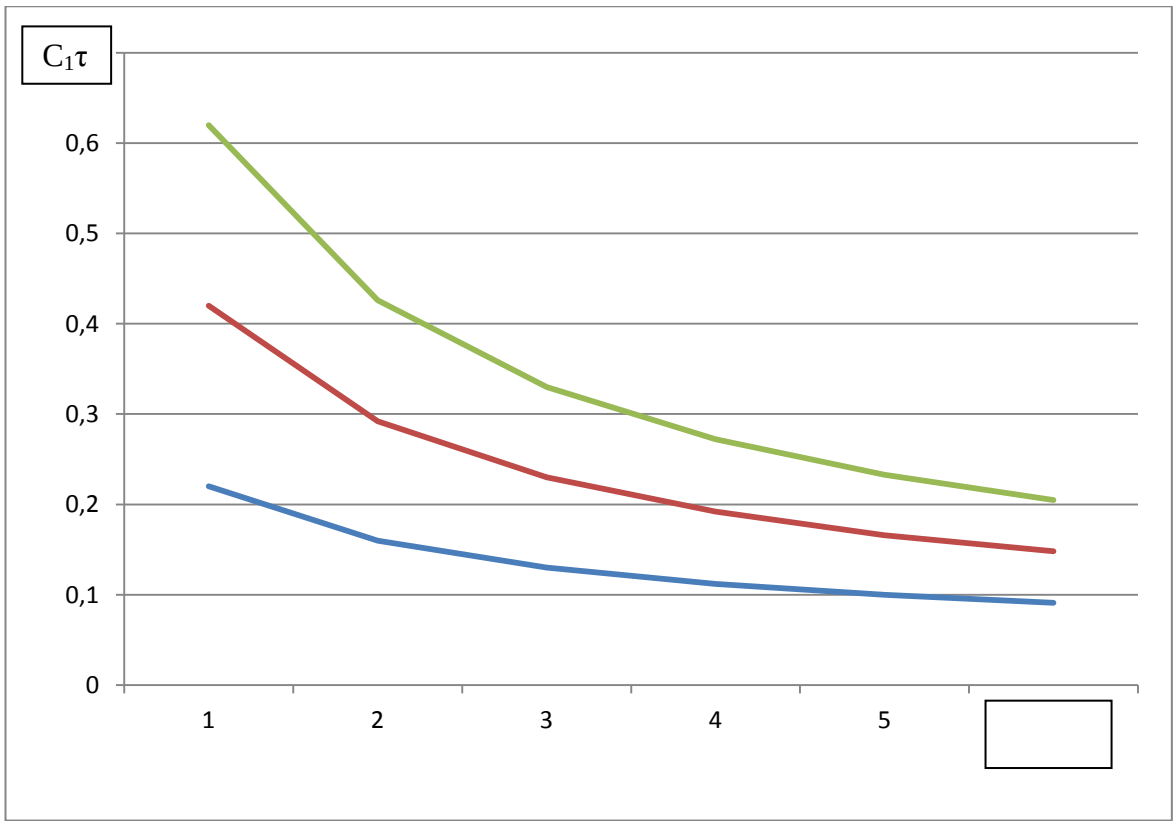


Рис. 4.4. Можлива зміна концентрації солі $C_{1\tau}$ в розчині в ємкості (1) залежно від V_τ/V_{01}^x відповідно до другого етапу його зворотноосмотичного оброблення

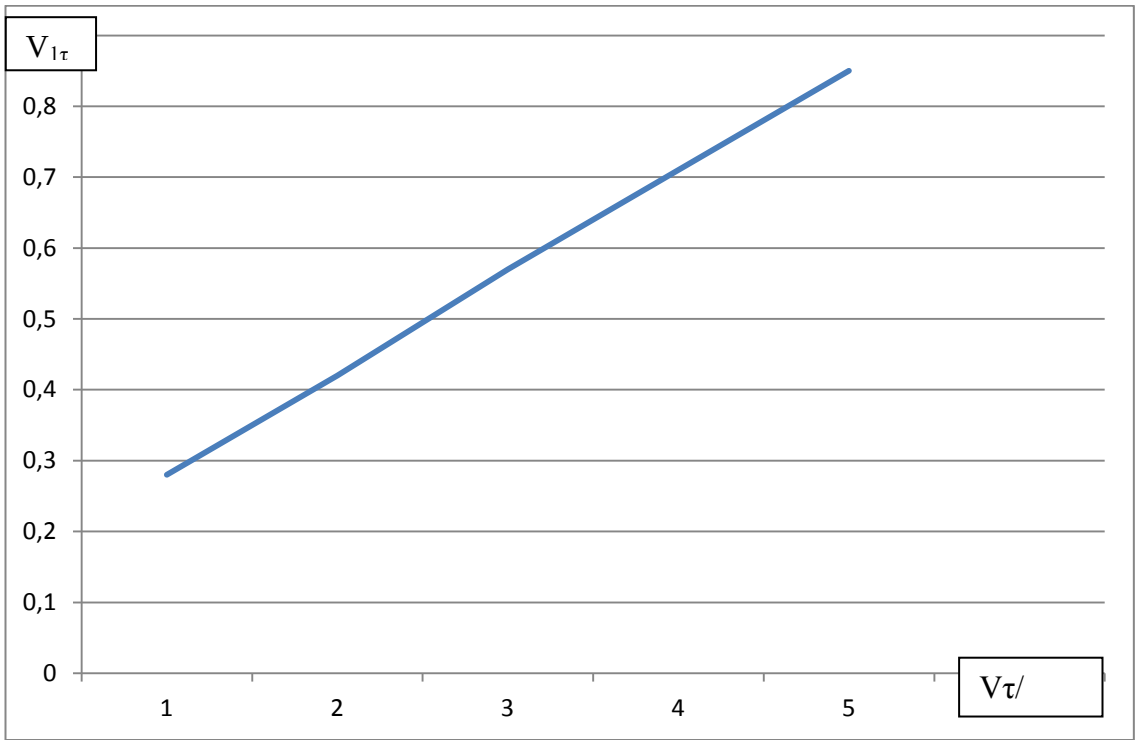


Рис. 4.5. Збільшення обсягу купажу в ємкості (1) залежно від $V\tau$ / V_{01}^x при реалізації другого етапу зворотноосмотичного оброблення сольового розчину,що початкове знаходився в ємкості (1)

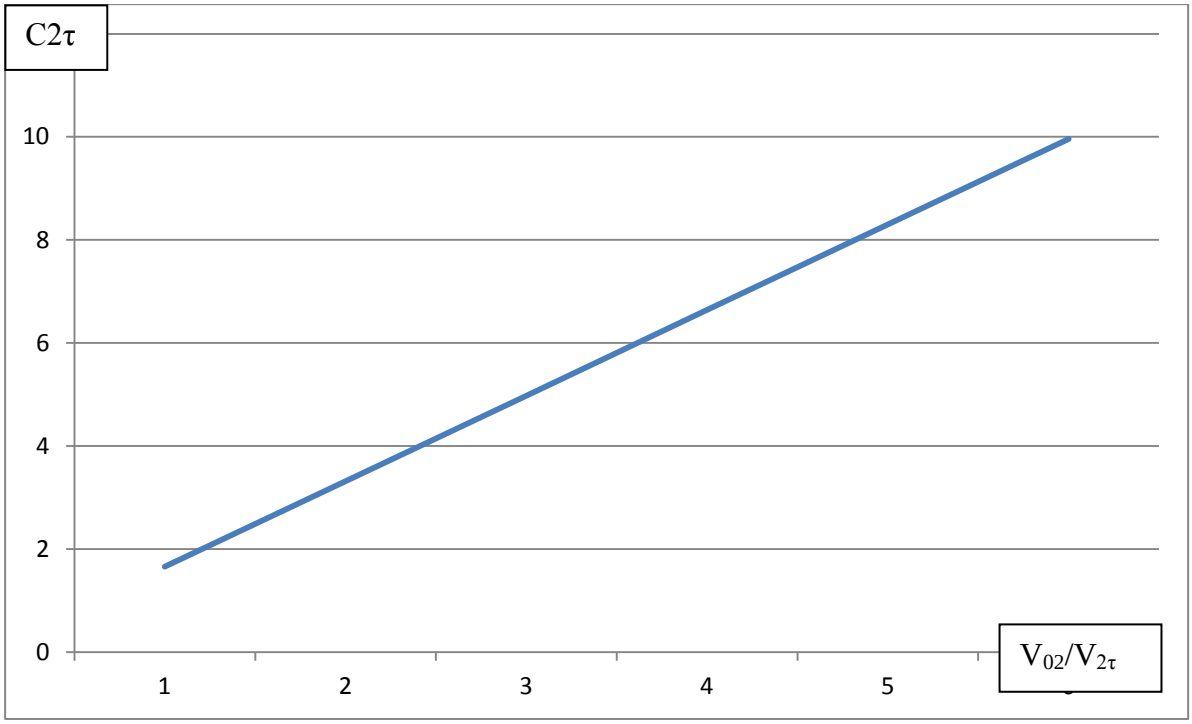


Рис. 4.6. Зміна солевмісту в концентраті, що знаходиться в ємкості (2) при його повторному зворотноосмотичному обробленні

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Класифікація видів фільтрації.
2. Сутність методу звичайної фільтрації та її можливості.
3. Баромембранні методи і принцип їх дії.
4. Що таке ультрафільтрація і які її можливості?
5. Що таке мікрофільтрація і які її можливості?
6. Що таке нанофільтрація і які її можливості?
7. Яка фізична сутність явища осмосу?
8. Що таке зворотний осмос і які умови його реалізації?
9. Як обчислити осмотичний тиск в будь-якому розчині?
10. Як експериментально перевірити осмотичний тиск у розчині?
11. Яка будова синтетичної напівпроникної мембрани?
12. Які опори виникають в матеріалі напівпроникної мембрани?
13. Що таке концентраційна поляризація?
14. Що таке навколо мембранне концентрування розчину.
15. Як робочий тиск впливає на проникність зворотноосмотичної мембрани?
16. Як робочий тиск впливає на селективність зворотноосмотичної мембрани?
17. Як температура впливає на проникність зворотноосмотичної мембрани?
18. Як температура впливає на селективність зворотноосмотичної мембрани?
19. Як концентрація розчину впливає на проникність зворотноосмотичної

мембрани?
20. Як концентрація розчину впливає на селективність зворотноосмотичної мембрани?
21. Які причини появи осадів на поверхні зворотноосмотичних мембран?
22. Які види осадів особливо небезпечні для зворотноосмотичних мембран?
23. Що таке питома продуктивність мембрани?
24. Що таке затримуюча здатність мембрани?
25. Типи і властивості розділових мембран.
26. Що таке рідка мембрана і як вона утворюється?
27. Що таке керамічна мембрана і які її переваги?
28. Як влаштовані мембранні модулі?
29. Що таке плоскорамний модуль?
30. Що таке зворотноосмотичний рулонний модуль?
31. Як влаштований зворотноосмотичний модуль з порожнистими волокнами?
32. Схема паралельного з'єднання мембранних модулів її переваги та недоліки.
33. Схема послідовного з'єднання мембранних модулів та її особливості.
34. Каскадна схема з'єднання мембранних модулів та її особливості.
36. Порівняльні можливості нанофільтрації, низьконапірного зворотного осмосу і високо напірного зворотного осмосу по знесоленню води.
37. Нормативні вимоги до води, що піддається зворотноосмотичної обробці.
38. Конкретизація ефектів дії негативних домішок на роботу зворотноосмотичних і нанофільтраційних систем.
39. Облік температури живильних розчинів на роботу зворотноосмотичних мембран.
40. Відмивка і санітарна обробка мембран зворотного осмосу і нанофільтрації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Аширов А. Ионообменная очистка сточных вод, растворов и газов / А.А. Аширов. – Л.: Химия, 1983. – 295 с., ил.

2. Клячко В.А. Подготовка воды для промышленного и городского водоснабжения / В.А. Клячко, И.Э. Апельцин. – М.: Госстройиздат, 1962. – 819 с.

3. Кожевников А.В.. Водоподготовка. Теоретические основы типовых процессов. Учебное пособие / А.В. Кожевников. – Л.: СЗПИ, 1986. – 92 с.

4. Кульский Л.А. Очистка вод атомных электростанций / [Л.А. Кульский, Э.Б. Страхов, А.М. Ворошилова, В.А. Близнюкова]; под ред. акад АН УССР Л.А. Кульского. – К.: “Наукова Думка”, 1979. – 209 с.

5. Гамер П. Очистка воды для промышленных предприятий / П. Гамер, Д. Джексон, И. Серстон: пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1968. – 416 с.

6. Химия окружающей среды / Под ред. О.М. Бокриса: пер. с англ. Под ред. А.П. Циганкова. – М.: Химия,1982. – 672 с., ил.

7. Клячко В.А. Очистка воды для промышленного водоснабжения / В.А. Клячко, А.А. Кастальский. – М.: Стройиздат, 1950. – 335 с.

8. Брок Т. Мембранная фильтация / Т. Брок: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 464 с.

9. Дытнерский Ю.И. Баромемранные процессы. Теория и расчет / Ю.И. Дытнерский – М.: Химия, Серия: Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. 1986. – 272 с.

10. Дубяга В.П. Полимерные мембраны / В.П. Дубяга, Л.П. Перепечкин, Е.Е. Каталевский. – М.: Химия, 1981. – 232 с., ил.