

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

І. М. Чуб, В. О. Ткачов

**ВОДОПІДГОТОВКА В СИСТЕМАХ ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ
І ВЕНТИЛЯЦІЇ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності
192 – Будівництво та цивільна інженерія усіх форм навчання)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2022**

Чуб І. М. Водопідготовка в системах теплогазопостачання і вентиляції : конспект лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія усіх форм навчання / І. М. Чуб, В. О. Ткачов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 115 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. І. М. Чуб,
канд. техн. наук, доц. В. О. Ткачов

Рецензенти:

С. С. Душкін, професор, доктор технічних наук, професор кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова);

І. І. Капцов, доктор технічних наук, професор, заслужений працівник промисловості України, академік Української нафтогазової академії, завідувач кафедри експлуатації газових і теплових мереж (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення та очищення вод, протокол від № 1 від 01.09.2021.

Конспект лекцій складено з метою допомоги студентам будівельних спеціальностей ЗВО під час підготовки до занять, заліків та іспитів із дисципліни «Водопідготовка в системах теплогазопостачання і вентиляції».

© І. М. Чуб, В. О. Ткачов, 2022

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Значення водопідготовки у житті людини та процесах ТТП і В.....	5
1.1. Показники якості води.....	5
1.2 Вимоги до якості води різних споживачів.....	12
1.3 Характеристика основних процесів обробки води.....	13
1.4 Класифікація процесів обробки води залежно від домішок, які містяться у природній воді.....	14
2 Процеси та апарати для видалення з води завислих речовин.....	20
2.1 Коагуляція.....	21
2.2 Коагуляція з вапнуванням.....	22
2.3 Схеми та апарати.....	23
3 Методи зм'якшення води і їхній вибір.....	28
3.1 Термічний метод зм'якшення води.....	28
3.2 Реагентні методи зм'якшення води.....	29
3.3 Катіоніти, аніоніти і їхні властивості.....	36
3.3.1 Фізико-хімічні властивості іонітів. Обмінна ємність.....	39
3.4 Зм'якшення іонним обміном.....	43
3.4.1 Водень-катіонування води.....	46
3.4.2 Водень-натрій-катіонування води.....	48
4 Принципові схеми знесолення води іонним обміном.....	50
4.1 Апарати з нерухливим шаром іоніту.....	50
4.2 Динаміка іонного обміну.....	51
4.3 Основні іонообмінні процеси і технології.....	54
5 Видалення з води розчинних газів.....	62
5.1 Фізичні методи дегазації.....	63
5.2 Хімічні та біохімічні методи видалення газів.....	73
6 Опріснення води методом дистиляції. Загальні поняття й визначення.....	78
7 Накипоутворення види накипу, його властивості.....	82
8 Мембранні процеси.....	86
8.1 Фізична сутність процесу.....	86
8.2 Мембрани й мембранні елементи.....	89
8.3 Мікрофільтрація та ультрафільтрація.....	95
8.4 Дифузійномембранні процеси. Діаліз.....	107
8.5 Електромембранні процеси. Електродіаліз.....	108
Список рекомендованої літератури.....	114

ВСТУП

Водопідготовка в системах ТГП і В вивчає сучасні методи обробки води, новітні технологічні та апаратурні рішення, устрій, принцип дії, засоби розрахунку установок та схем водопідготовки.

Вода в енергетиці використовується в процесі виробництва електроенергії як теплоносій робочого тіла, сповільнювача нейтронів, розчинника, транспортера твердих продуктів і таке ін. Обсяги води, що використовуються в енергетиці величезні – більше 50 % промислового споживання води в Україні. На виріб 1 кВт·год використовується до 0,18 т води. На охолодження використовується до 98 % води, що застосовується в енергетиці, остання частина використовується у якості робочого тіла, уповільнювача та ін.; 1 % втрачається безповоротно. В залежності від призначення води вибирається відповідна технологічна схема її обробки або очистки.

У цей час нові електростанції проєктують із замкнутою системою оборотного охолодження конденсаторів з нормованою продувкою, що впливає на навколишнє середовище хімічним і тепловим впливом. Зовсім природньо, що в найближчі роки в Україні будуть прийняті більше тверді норми на скидання рідких відходів зі станцій і в перспективі скидання води будуть повністю заборонені.

Вивчення дисципліни водопідготовки передбачає ознайомлення з технологічними схемами підготовки води для технологічних потреб, спеціальною обробкою води: пом'якшенню, опрісненню, знесоленню та інше, які поширені в галузях водопостачання, водопідготовки.

1 ЗНАЧЕННЯ ВОДОПІДГОТОВКИ У ЖИТТІ ЛЮДИНИ ТА ПРОЦЕСАХ ТГП і В

Довгі роки та сторіччя водопідготовка не виділялась як галузь техніки, і тим більше – як галузь хімічної технології. Використовувалися емпірично знайдені прийоми та способи очищення води, головним чином, протиінфекційні. Тому історія водопідготовки – це історія пристосування для підготовки та очищення води відомих хімічних процесів і технологій, що знайшли або знаходять своє застосування.

Склад води по макро- і мікрокомпонентах для питного або промислового застосування повинен задовольняти певним нормам, які розглянуті нижче.

Для водопостачання об'єктів ТГВ використовуються в більшості випадків природні води: як поверхневі так і підземні. Також, останнім часом, у зв'язку з дефіцитом води, використовують воду циркуляційних систем підприємств і малозабруднені стічні води. Всі води містять різноманітні домішки, що попадають у воду в процесі її природного коловороту у природі. Крім того, можливе забруднення водних джерел побутовими та промисловими стоками.

1.1 Показники якості води

У цей час на підприємствах теплоенергетики залежно від якості вихідної та вимог до додаткової води застосовуються різні схеми установок водопідготовки (ВПУ). У загальному вигляді всі вони містять у собі попередню очистку води (очищення від механічних домішок) і іонний обмін [1].

Відповідно до правил технічної експлуатації електричних станцій і мереж (ПТЕ), режим експлуатації установок водопідготовки і водно-хімічний режим повинні забезпечити роботу електростанцій і підприємств теплових мереж без ушкоджень і зниження економічності, викликуваних корозією внутрішніх поверхонь і утворенням накипу.

Устаткування сучасних ТЕЦ експлуатується при високих теплових навантаженнях, що вимагає твердого обмеження товщини відкладень на

поверхні нагрівання за умовами температурного режиму їхнього металу протягом робочої кампанії [2]. Такі відкладення утворюються з домішок, що надходять у цикли електростанцій, у тому числі й з додатковою водою, тому забезпечення високої якості водних теплоносіїв ТЕС, ТЕЦ і АЕС є найважливішим завданням [3]. Використання водного теплоносія високої якості спрощує також рішення завдань одержання чистої пари, мінімізації швидкостей корозії конструктивних матеріалів казанів, турбін і встаткування конденсатно-випарного тракту.

Вода є вихідною сировиною, що після належної обробки (очищення) використовується для наступних цілей: а) як вихідна речовина для одержання пари в казанах, парогенераторах, ядерних реакторах киплячого типу, випарниках, пароперетворювачах; б) для конденсації пари, що була використана в парових турбінах; в) для охолодження різних апаратів і агрегатів ТЕС і АЕС; г) як теплоносій у теплових мережах і системах гарячого водопостачання. Для задоволення різноманітних вимог до якості води, споживаної при виробітку електричної й теплової енергії, виникає необхідність спеціальної фізико-хімічної обробки її [4].

Найважливішими показниками якості води, що визначають придатність її при використанні для питва, у промисловості та енергетиці, є:

- 1 зміст завислих речовин (прозорість);
- 2 солевміст (сухий залишок, загальна мінералізація);
- 3 загальна твердість і її тридцятилітні;
- 4 окиснюваність (вміст органічних речовин);
- 5 лужність;
- 6 концентрація водневих іонів – рН;
- 7 вміст корозійно-активних газів (CO_2 і O_2).

Під якістю природної води в цілому розуміється характеристика її состава та властивостей, що визначає її придатність для конкретних видів водокористування, при цьому критерії якості являють собою признаки, по яких виробляється оцінка якості води.

Завислі тверді домішки, що є придобним у природних водах, складаються із часток глини, піску, мулу, суспендованих органічних і неорганічних речовин, планктонів і різних мікроорганізмів. Завислі частки впливають на прозорість води. Зміст у воді завислих домішок, вимірюване в мг/л, дає подання про забруднення води частками в основному умовним діаметром більше $1 \cdot 10^{-4}$ мм (див. табл. 1.4) [4]. При наявності у воді завислих речовин менш 2–3 мг/дм³ чи більш визначених значень, або умовний діаметр частинок менш 1×10^{-4} мм, визначення забрудненості води роблять опосередковано за каламутністю води.

Мінералізація (солевміст, сухий залишок) – сумарний зміст всіх знайдених при хімічному аналізі води мінеральних речовин. Мінералізація природних вод, що визначає їхній питому електропровідність, змінюється в широких межах. Більшість рік має мінералізацію від декількох десятків міліграмів у літрі до декількох сотень. Мінералізація підземних вод і солоних озер змінюється в інтервалі від 40–50 мг/дм³ до сотень г/дм³ (щільність у цьому випадку вже значно відрізняється від одиниці). Питома електропровідність атмосферних опадів з мінералізацією від 3 мг/дм³ до 60 мг/дм³ становить значення 10–120 мкСм/см.

За класифікацією [1] природні води по мінералізації розділені на групи (табл. 1.1). Межа прісних вод – 1 г/кг – установлений у зв'язку з тим, що при мінералізації більше цього значення смак води неприємний – солоний або гірко-солоний.

Твердість води (жорсткість) обумовлюється наявністю у воді катіонів кальцію (Ca^{2+}), магнію (Mg^{2+}), стронцію (Sr^{2+}), барію (Ba^{2+}), заліза (Fe^{3+}), марганцю (Mn^{2+}). Але загальний вміст у природних водах іонів кальцію і магнію незрівнянно більше вмісту всіх інших перерахованих іонів – і навіть їхньої суми. Тому під твердістю розуміють суму кількостей іонів кальцію та магнію – загальна твердість, що складається зі значень карбонатної (тимчасовий, що усувається кип'ятінням) і не карбонатної (постійної) твердості. Перша викликана присутністю у воді гідрокарбонатів кальцію й

магнію, друга наявністю сульфатів, хлоридів, силікатів, нітратів і фосфатів цих металів. Однак при значенні твердості води більше 9 ммоль/дм³ потрібно враховувати вміст у воді стронцію й інших лужноземельних металів. За значенням загальної твердості природні води ділять на групи (табл. 1.1) [1].

Таблиця 1.1 – Класифікація води по твердості, одиниця виміру, мг-екв/дм³

Група води	Одиниця виміру
Дуже м'яка	до 1,5
М'яка	Більше 1,5 до 4,0
Середньої твердості	Більше 4 до 8
Тверда	Більше 8 до 12
Дуже тверда	Більше 12

Лужністю води називається сумарна концентрація аніонів, що втримуються у воді, слабких кислот і гідроксильних іонів (виражена в ммоль/л), що вступають у реакцію при лабораторних дослідженнях із соляною або серною кислотами з утворенням хлористих або сірчаноокислих солей лужних і лужноземельних металів. Розрізняють наступні форми лужності води: бікарбонатна (гідрокарбонатна), карбонатна, гідратна, фосфатна, силікатна, гуматна – залежно від аніонів слабких кислот, якими обумовлюється лужність. Лужність природних вод, рН яким звичайно < 8,35, залежить від присутності у воді бікарбонатів, карбонатів, іноді та гуматів. Лужність інших форм з'являється в процесах обробки води. Тому що в природних водах майже завжди лужність визначається бікарбонатами, то для таких вод загальну лужність приймають рівної карбонатної твердості.

Концентрація **органічних речовин** у воді оцінюється по методиках визначення окиснюваності води, змісту органічного вуглецю, біохімічної потреби в кисні, а також поглинання в ультрафіолетовій області. Величина, що характеризує вміст у воді органічних і мінеральних речовин, що окиснюються одним із сильних хімічних окиснювачів за певних умов, називається **окиснюваністю**. Існує кілька видів окиснюваності води: перманганатна,

біхроматна, і йодатна (методики визначення двох останніх застосовуються рідко). Окиснюваність позначається в міліграмах кисню, еквівалентного кількості реагенту, що пішов на окиснення органічних речовин, що містяться в 1 л води. Для природних малозабруднених вод рекомендовано визначати перманганатну окиснюваність (перманганатний індекс); у більш забруднених водах визначають, як правило, біхроматну окиснюваність (ХПК).

Окиснюваність перманганатна вимірюється мгО/дм^3 , якщо враховується маса іона кисню в складі перманганату калію, що пішла на окиснення «органіки», або $\text{мг KMnO}_4/\text{дм}^3$, якщо оцінюється кількість перманганату калію, що пішла на окиснення «органіки».

Окиснюваність біхроматна, мгО/дм^3 , називається також хімічною потребою в кисні (ХПК), – показник, що дає більш правильне подання про зміст у воді органічних речовин, тому що при визначенні ХПК окисляється близько 90 % органічних домішок, а при визначенні перманганатна окиснюваність – 30–50 %. В англійській літературі ХПК позначають терміном COD (Chemical Oxygen Demand), у німецькій літературі – CSB (Chemischer Sauerstoffbedarf).

При аналізі ХПК найбільш надійні результати виходять при ХПК = 300–600 мгО/дм^3 . При цьому аналізі окиснюються іони Br^- , I^- , NO_2^- , деякі сполуки сірки та ін.

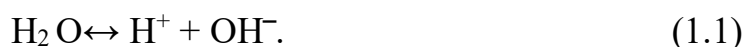
Біохімічна потреба в кисні (БПК₅, БПК_n), мгО/дм^3 . Біохімічна потреба у кисні (БПК) – показник, обумовлений при окислюванні «органіки» природних вод не хімічними речовинами, а біохімічними впливами в аеробних умовах. Частіше визначають біохімічне споживання кисню за п'ять діб – БПК₅, і, як правило, цей показник у поверхневих водах перебуває в межах 0,5–4,0 $\text{мгО}_2/\text{дм}^3$. При визначенні БПК₅ (температура води 20 °С, рН = 6–8, забезпечений достатній доступ кисню до проби води) окислюється приблизно 70 % органічних речовин, за 10–20 діб – відповідно 90 % і 99 % (як правило, але не завжди). Тому, коли визначають БПК_n, мають на увазі, що процес окислювання триває 15 – 20, у рідких випадках – до 35 діб.

Загальний органічний вуглець

Концентрація загального органічного вуглецю (ЗОВ, по закордонних джерелах – ТОС, Total Organic Carbon) – досить надійний показник вмісту у воді органічних речовин, у середньому чисельно рівний 50 % маси органічних речовин. У природних поверхневих водах значення органічного вуглецю можуть коливатися від 1 мг/дм³ до 20 мг/дм³ і навіть до декількох сотень мг/л (у болотистих водах).

Водневий показник (рН)

Величина рН – один з найважливіших показників якості води для визначення її стабільності, накопуютьовуючих і корозійних властивостей, прогнозування хімічних і біологічних процесів, що відбуваються в природних водах. Якщо розглядати воду без домішок, то фізична сутність рН може бути описана в такий спосіб. Вода, хоча і досить незначно, – приблизно одна мільйонна частина молекул – дисоціює (розпадається) на іони водню Н⁺ і гідроксилу ОН⁻ по рівнянню:



Але така ж кількість молекул води одночасно знову утвориться. Отже, склад води при певній температурі не змінюється.

$$K_w = (\text{H}^+) (\text{OH}^-) = 10^{-14}. \quad (1.2)$$

Добуток концентрацій цих іонів є величина постійна і називається іонним добутком води – K_w . Тому що розпадається незначна кількість молекул води, то концентрація іонів Н⁺ і ОН⁻ малі, тим більше малий їхній добуток. При температурі 24,8 °С $K_w = 10^{-14}$.

Збільшення концентрації водневих іонів викликає відповідне зменшення гідроксид-іонів і навпаки. Для нейтрального середовища

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7} \text{ г} \cdot \text{іон/дм}^3. \quad (1.3)$$

Для оцінки кислотності та лужності середовища зручно користуватися не концентрацією водневих іонів, а водневим показником рН. Він дорівнює десятковому логарифму концентрацій водневих іонів, узятому зі зворотним знаком.

$$pH = -\lg [H^+]. \quad (1.4)$$

Якщо у воді розчинена будь яка речовина, що є джерелом іонів H^+ і OH^- (кислоти: HCl , H_2SO_4 , HNO_3 або луги: $NaOH$, KOH , $Ca(OH)_2$), то концентрації іонів H^+ і OH^- не будуть рівні, але їхній добуток K_w буде постійним. Воду залежно від pH раціонально ділити на сім груп, таблиця 1.2 [5].

Таблиця 1.2 – Класифікація води за pH

Група води	Значення pH
Сильнокисла	до 3,0
Кисла	Більше 3,0 до 5,0
Слабокисла	Більше 5,0 до 6,5
Нейтральна	Більше 6,5 до 7,5
Слаболужна	Більше 7,5 до 8,5
Лужна	Більше 8,5 до 9,5
Сильнолужна	Більше 9,5

Розчинений кисень і діоксид вуглецю

Надходження кисню у водойму відбувається шляхом розчинення його при контакті з повітрям (абсорбції), а також у результаті фотосинтезу водяними рослинами. Концентрація розчинного кисню залежить від температури, атмосферного тиску, ступеня турбулізації води, мінералізації води та ін. Видаляється кип'ятінням, як правило в деаераторах що встановлюються перед казанами.

У поверхневих водах концентрація розчиненого кисню може коливатися від 0 до 14 мг/дм³. В артезіанській воді кисень практично відсутній. Вуглекислий газ CO_2 є присутнім у підземних водах і видаляється шляхом аерації.

1.2 Вимоги до якості води різних споживачів

Вимоги до води, використовуваної в різних галузях промисловості та у конкретних виробництвах, істотно відрізняються. Вони відображені у відповідних технічних умовах (ТУ) і інших нормативних документах.

Всі промислові підприємства є споживачами води. Вона витрачається для таких основних цілей, як:

- господарсько-побутове водопостачання;
- відвід тепла від встаткування, що може нагріватися під час роботи;
- основні технологічні потреби – готування реагентів, напівпродуктів, відмивання деталей.

Вимоги до води для господарсько-побутових потреб це, як правило, водопровідна вода.

Води 2 категорії найбільше часто використовуються в оберті, основні вимоги до них – мінімальні корозійна активність і відкладення солей. Це досягається комплексом заходів щодо підтримки в них певного сольового складу та рН.

Вимоги до води для технологічних потреб визначені у відповідних нормативних документах. Ці вимоги для різних виробництв дуже відрізняються один від одного як за концентрацією різних хімічних і механічних забруднень, так і по спеціальних вимогах, наприклад, біологічній стерильності й т. п.

У енергетиці вимоги залежать від застосованого встаткування та режиму його роботи і коливаються від простого видалення суспензій і солей твердості для тепломереж і парових котелень до глибокого знесолення з видаленням органічних забруднень і розчинених газів (ТЕС, АЕС).

Розчинені у воді речовини можуть викликати неполадки в роботі енергетичного встаткування. В основному це пов'язане з накипними відкладеннями в теплових агрегатах і корозією. У теплообмінній апаратурі, що працює при 25 °С – 50 °С, виникають низькотемпературні відкладення, основним компонентом яких є карбонат кальцію CaCO_3 . Накип, що утворюється, знижує теплопродуктивність і збільшує втрати натиску в трубах.

1.3 Характеристика основних процесів обробки води

При обробці води використовуються багато комбінацій іонообмінних фільтрів. Вони включають попередню обробку, зм'якшення, демінералізацію (первинна система) і фінішне очищення.

Попередня обробка. Перед фільтрацією через іонообмінну колонку вихідний розчин повинен бути ретельно відфільтрований для очищення від грубо дисперсних домішок (ГДД). Органічні речовини можуть бути частково вилучені за допомогою коагуляції (флокуляції) використанням хлориду заліза, сульфату заліза або сульфату алюмінію з можливою добавкою поліелектролітів [2, 4, 6].

Для високолувної сирової води з метою видалення карбонату кальцію може бути використаний класичний процес вапнування. Для повного зм'якшення води застосовують процес содопом'якшення. Для вод з підвищеною концентрацією силікатів доцільно використовувати процес магnezіального знекремнення. Ці процеси значно зменшують іонне навантаження на наступні іонообмінні фільтри.

Вибір схеми водопідготовчої (ВПУ) системи тепlopостачання. При виборі схеми ВПУ необхідно враховувати сезонність роботи теплового та водопідготовчого обладнання. Найбільш доцільне застосування комбінованих схем ВПУ, що представляють ряд різних способів обробки води, об'єднаних у загальну технологічну схему, окремі елементи якої підключають для часткової або повної обробки вихідної води відповідно до теплового графіка.

Використання комбінованих схем розширює можливості застосування вапнування підкислення Н-Н- або Н-Na-катіонування; забезпечує маневреність і економічність системи водопідготовки для теплових мереж у цілому.

При проєктуванні схем ВПУ і складанні режимних карт, що враховують сезонність роботи системи тепlopостачання, варто визначити необхідну частку зм'якшення за правилами.

1.4 Класифікація процесів обробки води залежно від домішок, які містяться у природній воді

Дисперсні системи

Природна вода – складна дисперсна система, що містить безліч різноманітних мінеральних і органічних домішок. Дисперсна система складається із дрібних часток речовини, розподіленого в іншій речовині (середовищу). Система називається *гомогенної*, якщо усередині її немає поверхонь роздязнула, що відокремлюють друг від друга частини системи, що різняться по властивостях. *Гетерогенні* системи – системи, усередині яких є такі поверхні роздязнула. Гомогенна система – однофазна, гетерогенна – складається з не менш двох фаз. При розмірі часток домішок води менше 10–3 напівтемних – це гомогенна система (однофазна із двох або більше індивідуальних речовин). Якщо розмір часток $\geq 10^{-3}$ мкм, то домішки утворюють із водою гетерогенну (неоднорідну багатофазну) систему. Істинні розчини, де домішки перебувають у молекулярно – розчиненому виді або у вигляді іонів, – це гомогенні системи. Гетерогенні системи – колоїди (розмір часток: 10⁻²-10⁻¹ мкм) або суспензії (частки >10⁻¹ мкм). Суспензії можуть бути представлені суспензіями, емульсіями, пінами (окремий випадок емульсій).

Вода – один із кращих розчинників. Споконвічно у Світовому океані були – у тім або іншому ступені – розчинені всі речовини Землі. І це розчинення триває. Вже кілька сторіч розробляються системи класифікації природних вод і способи як можна більше короткої характеристики якості води (індекс якості води). Виділено 625 і навіть більше класів, груп, типів і різновидів вод. В. І. Вернадський вважав, що число видів природних вод більше 1 500 одиниць. Однак чим більш детально розроблялася класифікація вод, тим більше дослідники віддалялися від бажаної стислості і ясності у визначенні якості води. Виявилось неможливим оцінити придатність води для питних, технічних, інших цілей тільки на основі запропонованих універсальних індексів води. Як і раніше якість води, придатність її для використання оцінюється з

комплексу показників, і потрібно визнати, що такий підхід дає лише приблизне знання про якість води. Цим, зокрема, можна пояснити велику (до декількох десятків) кількість нормованих показників для кожного з можливих застосувань. Говорити про якість води має сенс лише у зв'язку з конкретною областю її подальшого використання. До теперішнього часу створено кілька десятків класифікаційних систем, що розглядають здебільшого підземні води. Ці класифікаційні системи є основою для розуміння поглядів авторів на генезис підземних вод, на те, які складові підземних вод і взагалі природних вод головні або більше важливі. Майже всі вони створювалися гідрогеологами й відбивають їхньої пристрасті. Для водопідготовки ці системи мають опосередковане значення – для порівняльного аналізу різних вод в основному в навчальних і статистичних цілях [6].

Сьогодні найбільш уживані класифікаційні системи С. А. Щукарева, О. А. Алекіна та Л. А. Кульського [1–3].

Найбільш характерними та загальними ознаками домішок води є форми їхнього знаходження в ній, тобто фазовий стан, що характеризується дисперсністю речовин. По Л. А. Кульському фазово-дисперсний стан домішок води обумовлює їхнє поведіння в процесі водообробки. Кожному фазово-дисперсному стану домішок відповідає сукупність методів впливу, що дозволяє досягти необхідних, якісних показників води зміною цього стану або без його зміни.

На цій основі все різноманіття забруднень (домішок) природних і промислових вод розділено на чотири групи із загальним для кожної групи набором методів водоочищення, зумовленим формою знаходження домішок у воді.

Класифікація Л. А. Кульського

Практичний інтерес представляє фазово-дисперсна класифікація домішок води, розроблена Л. А. Кульським (табл. 1.3) [3]. Для завдань, пов'язаних з очищенням води, ця класифікація корисна тим, що, визначивши фазоводисперсний стан домішок у воді та встановив її приналежність до якоїсь групи, можна попередньо вибрати комплекс методів і стадій очищення води. При цьому фазово-дисперсний стан домішок повинен встановлюватися після кожної стадії обробки води та зараховуватися при проєктуванні всієї схеми водопідготовки. Методи обробки води, визначені Л. А. Кульським на основі фазово-дисперсного аналізу домішок води, описані нижче (пропозиції Кульського доповнені А. Ашировим – V і VI групи). Частина перерахованих методів застосовується в спеціальних промислових системах і не застосовується в комунальному та енергетичному водопостачанні.

Група I. Вплив на суспензії (наприклад, седиментація, прояснення у зваженому шарі, осаджувальне центрифугування, відцентрова сепарація в гідроциклонах, флотація, фільтрування на повільних фільтрах і на швидких фільтрах за безнапірною схемою та ін.).

Група II. Вплив на колоїдні домішки, у тому числі високомолекулярні з'єднання та віруси: коагуляція, флокуляція, електрокоагуляція, електроіскровий (розрядний) метод, біохімічний розпад, адсорбція на високодисперсних матеріалах, у тому числі глинистих мінералах, іонітах, окиснення (хлорування, озонування), вплив ультрафіолетовим та випромінюванням потоками нейтронів і ін., ультразвукова обробка, обробка іонами важких металів (міді, срібла й ін.).

Група III. Вплив на розчинені органічні речовини та гази: десорбція газів і легколетючих органічних сполук шляхом аерації, термічного та вакуумного відгону, адсорбція на активних вугіллях, природних і синтетичних іонітах та інших високопористих матеріалах, екстракція неорганічними розчинниками, що не змішуються з водою, евапорація (азеотропний відгін, пароциркуляція),

пінна флотація, ректифікація, окиснення (електро-хімічне, біологічне, хлором, озоном, діоксидом хлору та ін.).

Група IV. Вплив на домішки іоногенних неорганічних речовин: іонний обмін, електродіаліз, реагентна обробка, кристалізація.

Група V. Вплив на воду: дистиляція, виморожуванів, екстракція кристалогідратами або органічними розчинниками, що не змішуються з водою, магнітна обробка, зворотній осмос, напірна фільтрація.

Група VI. Вплив на водну систему в цілому: закачування в підземні шари, у глибини морів, поховання, спалювання. Ці методи застосовуються тільки в тому випадку, якщо методи перших п'яти груп економічно неприйнятні.

Таблиця 1.3 – Класифікація вод за фазово-дисперсним станом домішок

Група	Домішки	Розмір часток, мкм	Характеристика домішок
Гетерогенна система			
I	Завислі речовини	$> 10^{-1}$	Суспензії та емульсії, які обумовлюють каламутність води: мікроорганізми і планктон
II	Колоїдно-розчинні речовини	$10^{-1} - 10^{-2}$	Колоїди і високомолекулярні сполуки, які обумовлюють окиснюваність та кольоровість води; віруси.
Гомогенна система			
III	Молекулярно-розчинні речовини	$10^{-2} - 10^{-3}$	Гази, які розчиняються у воді, органічні речовини, які додають воді запах та присмак.
IV	Речовини, які дисоціюють на іони (електроліти)	$< 10^{-3}$	Солі, кислоти, луги, які додають воді жорсткості, лужність та мінералізацію.

В основу технології очищення води від домішок кожної групи покладені процеси, що протікають під впливом сил, що найбільш ефективно впливають на дану дисперсну систему. Так, для видалення суспензій, що є кінетично нестійкими системами, використовують гравітаційні та сили адгезії, для видалення колоїдних і високомолекулярних речовин, агрегативно нестійких у водних розчинниках – адгезійні та адсорбційні. Домішки, що перебувають у

вигляді молекулярних розчинів, видаляють шляхом асоціації молекул під впливом сил міжмолекулярної взаємодії. І, нарешті, для видалення з води електролітів використовують сили хімічних зв'язків, характерні для іонних процесів.

Всі домішки, що забруднюють водойми, повністю охоплюються чотирма групами пропонованої класифікації. Використовуючи особливості, що характеризують кожну групу домішок, можна знаходити ефективні методи видалення всього комплексу домішок, що перебувають у воді.

У таблиці 1.4 [2, 4] містяться методи очищення води залежно від її фазово-дисперсної характеристики.

Процеси очищення води можна поділити на дві групи: до першої групи (пов'язаної з коригуванням фізичних і хімічних властивостей води) відносяться процеси, які дозволяють провести прояснення, усунути з води небажані присмаки і запахи, агресивні гази, залізо, марганець, кремнієву кислоту тощо. Друга група об'єднує процеси знезараження води, які є обов'язковими за умови санітарної ненадійності джерела, що використовується для господарських цілей.

Запитання до розділу 1

1. Загальна характеристика дисперсних систем.
2. Характеристика дисперсної фази, дисперсійного середовища.
3. Розмір частинок дисперсної фази. Оптичні властивості дисперсних систем.
4. Охарактеризуйте показники якості води.
5. Які вимоги до якості води у різних споживачів.
6. Охарактеризуйте основні процеси обробки води.
7. Порівняти ефективність різних способів очищення води і зробити висновок щодо основних переваг та недоліків.

Таблиця 1.4 – Класифікація домішок води та методи їх видалення

Фазова характеристика група	Гетерогенні системи		Гомогенні системи		
	I	II	III	IV	
Фізико-хімічна характеристика	Грубодисперсні домішки: суспензії, емульсії, планктон, патогенні мікроорганізми	Домішки колоїдної ступені дисперсності: органічні та не органічні речовини, віруси, бактерії	Домішки молекулярної ступені дисперсності: гази, органічні речовини, солі, кислоти, луги, які не перейшли у іонне становище	Домішки іонної ступені дисперсності: солі, кислоти, луги	
Поперечний розмір	$>10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^{-3}$	$<10^{-3}$	
Методи видалення домішок із води	Фільтрація (механічне видалення)	Ультрафільтрація	Зворотній осмос, нанофільтрація		
		Коагуляція	Перехід іонів у малорозчинні сполуки		
		Окислення хлором, озonom, перманганатом			
		Адсорбція на гідроксидах, дисперсних матеріалах	Адсорбція на активному вугіллі та інших матеріалах	Вилучення методом іонного обміну	
	Агрегація за допомогою флокулянтів (аніонних та катіонних)		Асоціація молекул	Комплексоутворення	
	Флотація	Електрофоретичні методи	Екстракція органічними розчинниками	Сепарація іонів у різному фазовому стані води	
	Електроліз синє-зелених водоростей				
Бактерицидний вплив, біохімічний розпад					
Сили, що утримують домішки у воді	Гідродинамічні	Електростатичні	Вандерваальсові	Іонні сили розчинів	

2 ПРОЦЕСИ ТА АПАРАТИ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ З ВОДИ ЗАВИСЛИХ РЕЧОВИН

Обробка води методом осадження дозволяє видалити з води більшу частину речовин, що знаходиться в ній у грубодисперсному або колоїдному стані, а також знизити залишкові величини твердості та бікарбонатної лужності за рахунок переведу їх у важкорозчинний осад.

Коливання концентрації вуглекислоти в природній воді навколо рівноважного стану приводить до розчинення або кристалізації двовалентних металів (в основному кальцію й магнію) у воді. Це коливання може відбуватися під впливом температури або тиску системи вода – домішки. У практиці експлуатації при обробці води порушення вуглекислотної рівноваги досягається уведенням у воду хімічних реагентів, наприклад розчину або суміші розчину із суспензією гідроксиду кальцію – $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Вуглекислотна рівновага. Концентрація в природних водах недисоційованих молекул H_2CO_3 становить звичайно лише частки відсотка від загальної кількості вільної вуглекислоти, під яким розуміють суму $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2$.

Для поліпшення посвітління обробленим вапном води застосовуються коагулянти або флокулянти (спільно або роздільно)

Обробка води коагулянтном (залізним купоросом) збільшує кальцієву некарбонатну твердість води, для усунення якої потрібен додаткова витрата соди.

При проясненні вод з карбонатною твердістю < 2 мг-екв/дм³ як коагулянт використовується сірчаноокислий алюміній $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

Залежно від якості вихідної води: концентрації грубодисперсних домішок, мг/дм³; окиснюваності, мгО/дм³, карбонатній твердості та твердості некарбонатної, мг-екв/дм³, концентрації завислих речовин, мг/дм³ –

вибирається один з нижчеперелічених технологічних процесів попередньої обробки з наступною фільтрацією через механічні фільтри Ф:

- коагуляція, К + Ф;
- коагуляція з вапнуванням (гідратний режим), К + Иг + Ф (бікарбонатний режим), К + Иб + Ф;
- коагуляція з вапнуванням і содуванням, К + Иг + С + Ф;
- коагуляція з вапнуванням і магнезіальним знекремнюванням, К + Иг + М + Ф; . коагуляція з вапнуванням і содуванням, фільтрація через Н-Катіонітовий фільтр, К + И + С + МН.

Залежно від необхідного ступеня знесолення води проєктують одно-, двох- і триступінчасті установки обробки води.

Примітка. К – коагуляція, Иг – вапнування (гідратний режим), Иб – вапнування (бікарбонатний режим), С – содування, М – магнезіальне знекремнювання, Ф – механічна фільтрація, МН – фільтрація через Н-катіоніт.

2.1 Коагуляція

Коагуляція води в хімічних цехах теплових і атомних електростанцій призначена для її очищення від ГДД, колоїдних речовин, а також для знебарвлення. Коагуляція проводиться у прояснювачі, у нижню частину якого в певній послідовності подають на обробку воду, коагулянт, флокулянт і інші реагенти. За час перебування води у прояснювачі здійснюються всі хімічні реакції та осадження ГДД і колоїдних домішок. Осад через шламоушільнювач виводиться у дренаж. Прояснена вода зі збірного короба подається для більш глибокого прояснення на механічні фільтри.

Доза коагулянту залежить в основному від якості вихідної води та визначається лабораторним шляхом для кожного джерела водопостачання, а також при сезонній зміні її якості. Звичайно доза коагулянту становить 0,5–1,5 мг-екв/дм³. Значення величини рН середовища при коагуляції впливає на швидкість і повноту гідролізу, зрушуючи протікання реакції в ту або іншу сторону. Точне значення рН для конкретного хімічного складу води

встановлюється лабораторно, а в експлуатаційному режимі корегується уведенням кислоти або лугу.

При високій лужності вихідної води необхідне значення рН досягається підвищенням дози коагулянту та введенням в оброблювану воду сірчаної кислоти, що нейтралізує еквівалентну кількість залишкової бікарбонатної лужності.

При низькій лужності вихідної води або при зниженні її в паводковий період передбачається підлужування вихідної води їдким натром.

Оптимальне значення рН при коагуляції із сірчаноокислим алюмінієм перебуває в інтервалі 5,5–7,5.

2.2 Коагуляція з вапнуванням

При вапнуванні досягається зниження лужності (і, як правило, зниження твердості та сухого залишку), видалення грубодисперсних домішок (ГДД), зниження концентрації заліза, кремнієвий кислоти та органічних сполук.

Вапнування проводиться в прояснювачі, куди подають воду та реагенти – вапно, коагулянт, по необхідності флокулянт. Домішки віддаляються з води в складі осаду, що виводять із освітлювача в дренаж або на зневоднення із продувною водою. Вода після зневоднення шлам повертається у прояснювач. Концентрація ГДД після прояснювача менш 10 мг/дм³. При необхідності більше глибокого прояснення води її подають на фільтри. Вапно дозують у вигляді суспензії (вапняного молока) або у вигляді розчину.

При вапнуванні протікає процес декарбонізації, тобто зниження бікарбонатної лужності оброблюваної води. Природна вода в основному містить бікарбонати HCO_3^- , що перебувають у рівновазі з вугільною кислотою ($\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2$) і карбонат-іонами CO_3^{2-} , рисунок 2.1.

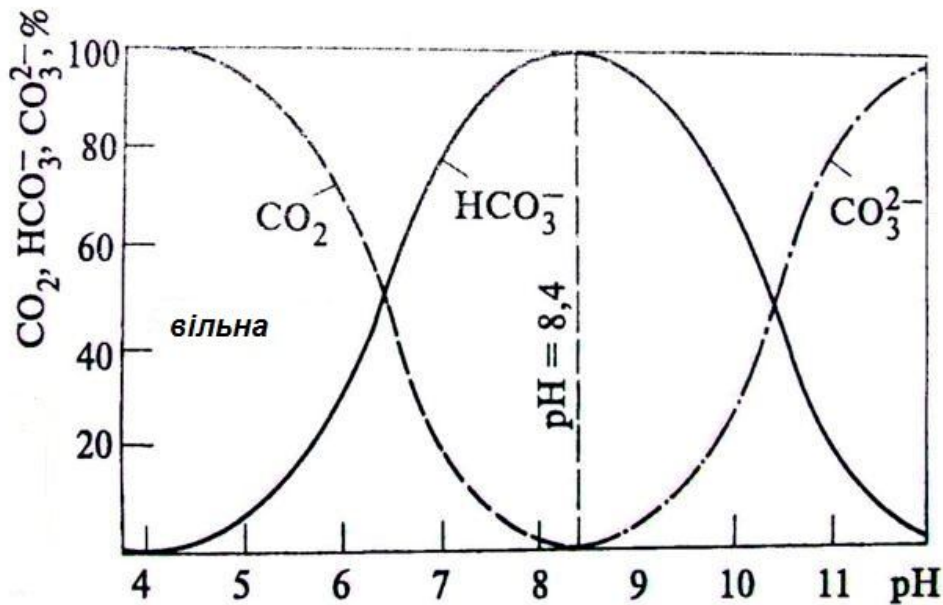


Рисунок 2.1 – Графік відносин CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} залежно від рН

Внаслідок підвищення концентрації CO_3^{2-} досягається межа розчинності CaCO_3 (оцінюваний добутком розчинності ПР CaCO_3) і відбувається виділення в осад іонів CO_3^{2-} і Ca^{2+} у вигляді CaCO_3 .

2.3 Схеми та апарати

Для вапнування застосовуються прояснювачі нормального ряду, розроблені ВКВ ВТИ. Технологічна схема вапнування представлена на рисунку 2.2. Конструктивні схеми прояснювачів показані на рисунку 2.3 для апаратів продуктивністю до $250 \text{ м}^3/\text{год}$.

Вихідна вода подається по системі *a* у повітровіддільник, де звільняється від пухирців повітря. З повітровіддільник по опускній трубі через тангенційно спрямоване уведення з регулюючим пристроєм *б* вода надходить у змішувач води та реагентів *в*. Туди ж по трубопроводу *г* надходить промивна вода фільтрів. Вапняне молоко *д*, розчин коагулянту *е* та ПАА *ж* надходять у змішувач по радіально спрямованих трубопроводах. Вапняне молоко вводиться вище вихідної води, розчин коагулянту вводиться вище патрубку вапняного молока, а ПАА значно вище коагулянту – у верхню частину змішувальної камери.

Розміри змішувальної камери та швидкість руху води дозволяють завершити хімічна взаємодія реагентів з розчиненими у воді реагентами до виходу з камери.

При виході із зони змішувача починається активне виділення продуктів хімічної взаємодії, формування центрів кристалізації, наростання на останніх пластівців важкорозчинних з'єднань (контактного середовища). Для попередження руйнування пластівців, що утворилися, обертовий рух води в міру її підйому гаситься вертикальними перегородками з отворами 100–150 мм. Шлакоприймальні вікна визначають верхню границю зваженого шламу [4–6].

Швидкість потоку та об'єм прояснювача від змішувальної камери до верхньої крайки шламоприймальних вікон (зона контактного середовища) розраховані на повне завершення процесів кристалізації та коагуляції в оброблюваній воді.

Шлам, що утворився в зоні контактного середовища, безупинно видаляється разом з водою в шламоущільнювач через шламоприймальні вікна по шламоприймальним трубопроводам.

Після зони контактного середовища основний потік проходить зону прояснення, де швидкість оброблюваної води знижується за рахунок дренавання її частини в шламоущільнювач.

Далі потік проясненої води проходить через розподільні ґрати та зливається через отвори в приймальну камеру, звідки вода надходить у розподільний пристрій, змішується із проясненою водою, що надходить зі шламоущільнювача, і по трубопроводу подається в бак вапнованої води.

Шлам осідає в нижній частині шламоущільнювача та по трубопроводах видаляється з нього при продувці. Прояснена вода збирається колектором і подається по трубопроводу у розподільчий пристрій.

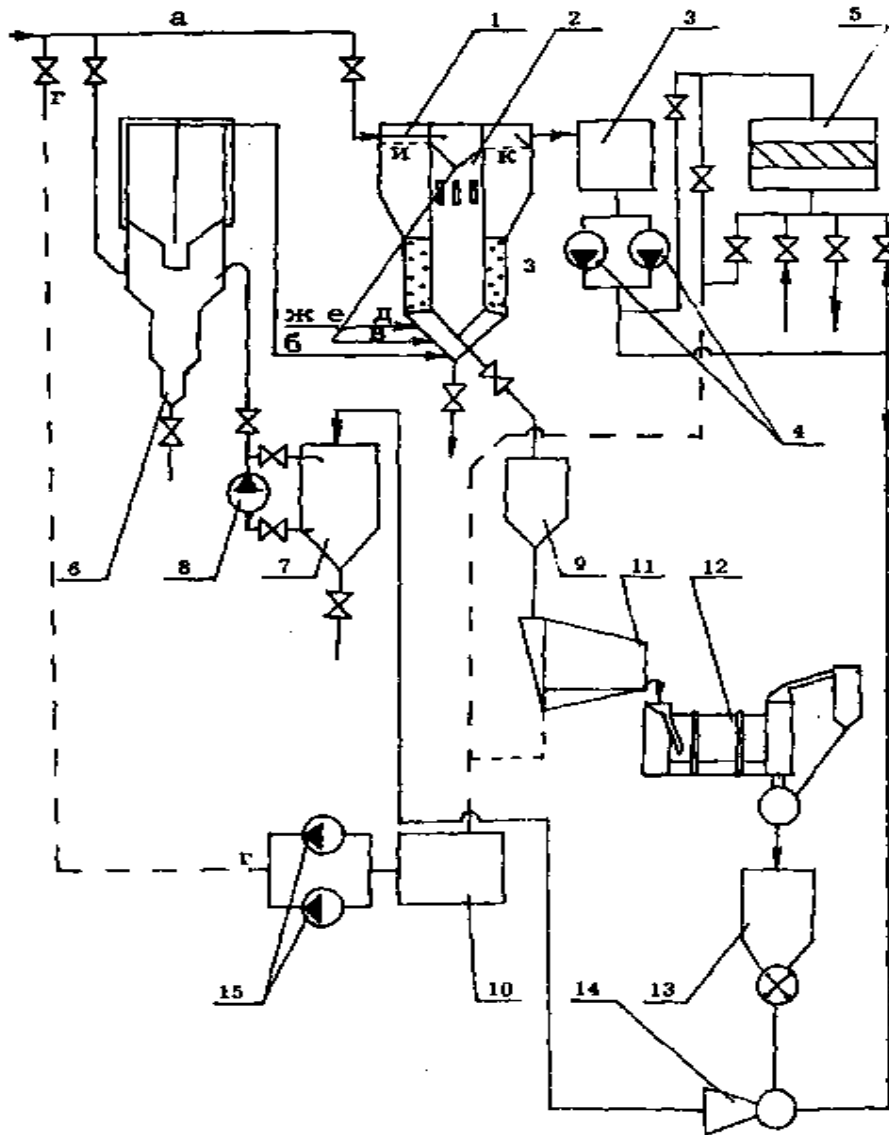


Рисунок 2.2 – Схема обробки води вапнуванням:

1 – прояснювач; 2 – шламущільнювач; 3 – бак вапнованої води; 4 – насоси вапнованої води; 5 – фільтр; 6 – двокамерний сатуратор; 7 – мішалка для готування вапняного молока; 8 – насос вапняного молока; 9, 10 – ємності; 11 – центрифуга; 12 – сушарка; 13 – піч випалу шламу; 14 – ежектор; 15 – насоси фугату та відмивальної води фільтра

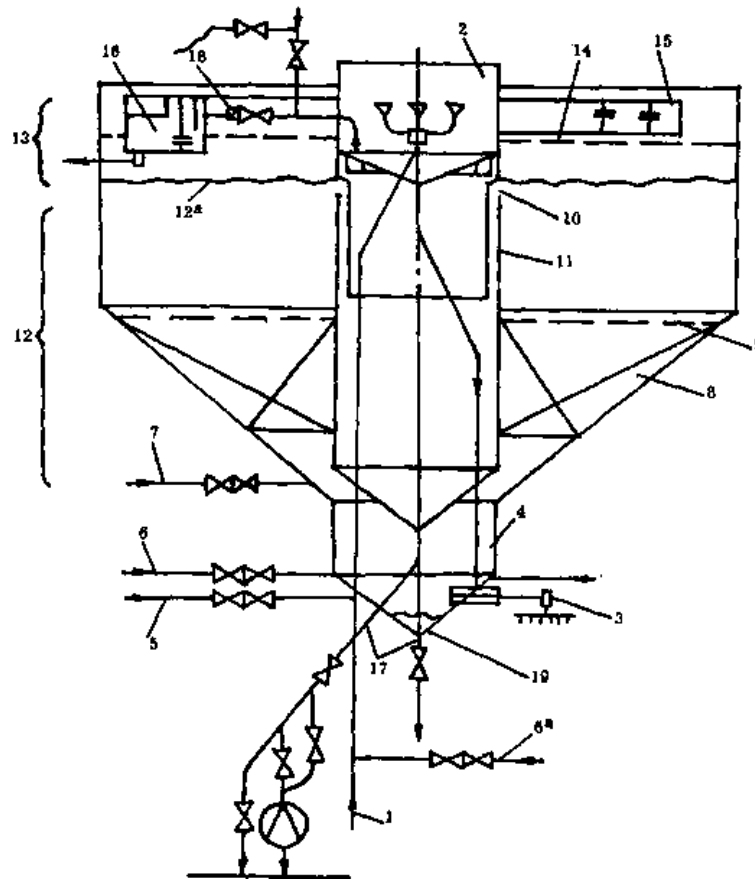


Рисунок 2.3 – Схема прояснювача ВКВ ВТИ для вапнування води продуктивністю 100, 160, 250 м³/год:

1 – вихідна вода; 2 – воздуховідділювач; 3 – тангенціально спрямований вхід; 4 – змішувач води та реагентів; 5 – підведення вапняного молока; 6, 6а – підведення розчину коагулянту; 7 – підведення ПАА; 8 – вертикальні перегородки; 9 – горизонтальна перегородка з отворами; 10 – шламоприймальні вікна; 11 – шламоущільнювач; 12 – зона контактного середовища; 13 – зона прояснення; 14 – розподільчі ґрати; 15 – кільцевий жолоб; 16 – розподільний пристрій; 17 – безперервна і періодична продувки; 18 – дросельна заслінка, 19 – грязьовик

Поряд з вапном $\text{Ca}(\text{OH})_2$, для зниження концентрації грубодисперсних домішок вводиться коагулянт, що повинен забезпечувати глибоке видалення органічних забруднень, з'єднань заліза та нерекційних з'єднань кремнію.

Видалення грубодисперсних домішок. Вода, що надходить на обробку в освітлювачах, може містити досить високі концентрації грубодисперсних домішок.

Одним з переваг вапнування є те, що грубодисперсні домішки від природної води практично повністю затримуються в прояснювачі, а потім при продувці разом зі шламом, що утворився в самому прояснювачі, виводяться та в оброблену воду не надходять.

Шлам складається в основному з мелкодисперсних часток CaCO_3 . Кількість шламу, виведеного з прояснювача, становить менше 10 мг/дм^3 , а при фільтрації проясненої води після прояснювача може скласти менш 2 мг/дм^3 .

Запитання до розділу 2

1. У чому полягає значення водопідготовки?
2. Усі речовини, що утримуються у воді можна розділити на
3. До показників якості води відносять
4. Що являє собою жорсткість?
5. Що розуміють під лужністю?
6. Що представляє собою показник якості води – сухий залишок?
7. Який процес називається проясненням води?
8. Що розуміють під процесом фільтрування?

3 МЕТОДИ ЗМ'ЯКШЕННЯ ВОДИ І ЇХНІЙ ВИБІР

Процеси водопідготовки для потреб теплоенергетики в більшості випадків передбачають коректування сольового складу води. Підготовку води для видалення з її солей твердості ведуть методами зм'якшення, для видалення розчинених солей застосовують методи знесолення.

Зм'якшенням води називають процеси, що приводять до зниження концентрацій кальцієвих і магнієвих солей. У практиці водопідготовки найбільше поширення отримали наступні методи зм'якшення води [5–6]:

1. Реагентні, при яких іони, що перебувають у воді: Ca^{2+} і Mg^{2+} зв'язуються різними реагентами в практично нерозчинні та з'єднання, що видаляються легко, з наступним їхнім відділенням в прояснювачах, відстійниках і прояснювальних фільтрах;

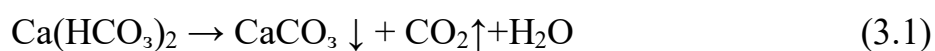
2. Термічні, що засновані на осадженні іонів кальцію та магнію у вигляді нерозчинних з'єднань, що утворюються в результаті нагрівання води до температури води вище $100\text{ }^{\circ}\text{C}$;

3. Іонообмінні, засновані на фільтруванні пом'якшеної води через спеціальні матеріали, що обмінюють власні іони Na^{+} , H^{+} на іони Ca^{2+} або Mg^{2+} , що містяться у воді.

Вибір того або іншого методу зниження солей твердості визначається якістю вихідної води, необхідною глибиною зм'якшення і техніко-економічних міркувань.

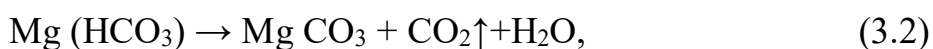
3.1 Термічний метод зм'якшення води

Термічний метод зм'якшення води доцільно застосовувати при використанні карбонатних вод, що йдуть на живлення казанів низького тиску, а також у сполученні з реагентними методами зм'якшення води. Він заснований на зсуві вуглекислотної рівноваги при її нагріванні у бік утворення карбонату кальцію, що описується реакцією [6]

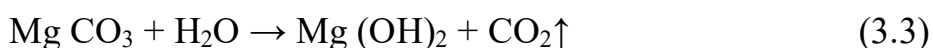


Рівновага зміщається за рахунок зниження розчинності оксиду вуглецю (IV), викликаного підвищенням температури й тиску. Кип'ятінням можна повністю видалити оксид вуглецю (IV) і тим самим значно знизити карбонатну кальцієву твердість. Однак, повністю усунути зазначену твердість не вдається, оскільки карбонат кальцію хоч і незначно (13 мг/дм^3 при температурі $18 \text{ }^\circ\text{C}$), але все-таки розчинний у воді.

При наявності у воді гідрокарбонату магнію процес його осадження відбувається в такий спосіб: спочатку утворюється порівняно добре розчинний (110 мг/дм^3 при температурі $18 \text{ }^\circ\text{C}$) карбонат магнію



який при тривалому кип'ятінні гідролізується, у результаті чого випадає осад малорозчинного ($8,4 \text{ мг/дм}^3$) гідроксиду магнію



Отже, при кип'ятінні води твердість, що обумовлюється гідрокарбонатами кальцію і магнію, знижується. При кип'ятінні води знижується також твердість, обумовлена сульфатом кальцію, розчинність якого падає до $0,65 \text{ г/дм}^3$.

3.2 Реагентні методи зм'якшення води

Зм'якшення води *реагентними методами* засновано на обробці її реагентами, що утворюють із кальцієм і магнієм малорозчинні з'єднання: $\text{Mg}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ і інші з наступним їхнім відділенням в прояснювачах, тонкошарових відстійниках і фільтрах. Як реагенти використовують вапно, кальциновану соду, гідроксиди натрію і барію та інші речовини.

Зм'якшення води вапнуванням застосовують при її високої карбонатній і низкою некарбонатної твердості, а також у випадку, коли не потрібно видаляти з води солі некарбонатної твердості. Як реагент використовують вапно, що вводять у вигляді розчину або суспензії (молока) у попередньо підігріту оброблювану воду. Вапно, що розчиняється, збагачує воду іонами OH^- і Ca^{2+} ,

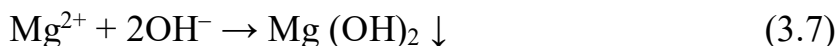
що приводить до зв'язування розчиненого у воді вільного оксиду вуглецю (IV) з утворенням карбонатних іонів і переходу гідрокарбонатних іонів у карбонатні:



Підвищення в оброблюваній воді концентрації іонів CO_3^{2-} і присутність у ній іонів Ca^{2+} з врахуванням уведених з вапном приводить до підвищення добутку розчинності та осадженню малорозчинного карбонату кальцію:

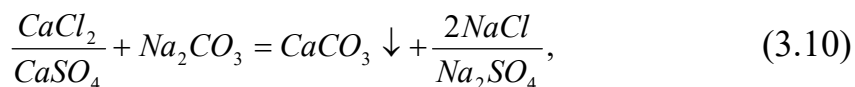
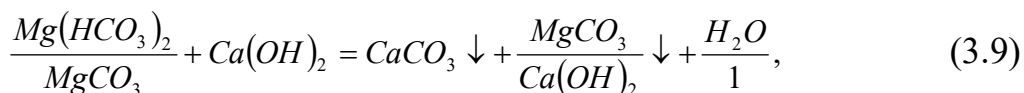
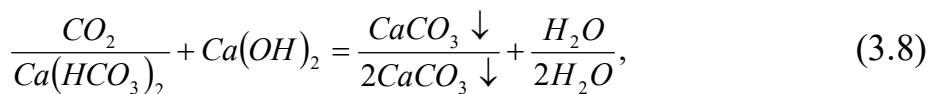


При надлишку перевелися в осад випадає та гідроксид магію



Для прискорення видалення дисперсних й колоїдних домішок, зниження лужності води одночасно з вапнуванням застосовують коагуляцію цих домішок сульфатом заліза (II) тобто $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Залишкова жорсткість зм'якшеної води при декарбонізації може бути отримана на 0,4...0,8 мг-екв/дм³ більше не карбонатної жорсткості, а лужність 0,8...1,2 мг-екв/дм³.

Вапняно-содовий метод зм'якшення води описується наступними основними реакціями:



По цьому методі залишкова жорсткість (твердість) може бути доведена до 0,5...1, а лужність із 7 до 0,8...1,2 мг-екв/дм³.

При вапняно-содовому методі зм'якшення води карбонат кальцію та гідроксид маганію, що утворюються, можуть пересичувати розчини і довго

залишатися в колоїднодисперсному стані. Їхній перехід у грубодисперсний шлам тривалий, особливо при низьких температурах і наявності у воді органічних домішок, які діють як захисні колоїди. При великій їхній кількості твердість води при реагентному зм'якшенні води може знижуватися всього на 15...20 %. У подібних випадках перед зм'якшенням або в процесі його з води видаляють органічні домішки окислювачами та коагулянтами. При вапняно-содовому методі часто процес проводять у дві стадії. Спочатку з води видаляють органічні домішки і значну частину карбонатної твердості, використовуючи солі алюмінію або заліза з вапном, проводячи процес при оптимальних умовах коагуляції. Після цього вводять соду та іншу частину вапна і допом'якшують воду. При видаленні органічних домішок одночасно зі зм'якшенням води, як коагулянти застосовують тільки солі заліза, оскільки при високому значенні рН води, необхідному для видалення магнієвої твердості, солі алюмінію не утворюють сорбційно-активного гідроксиду.

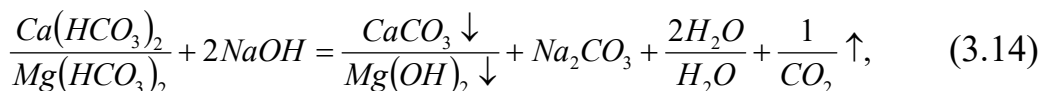
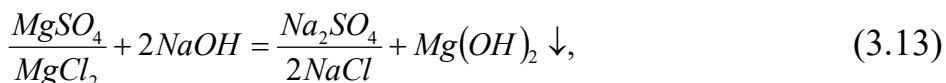
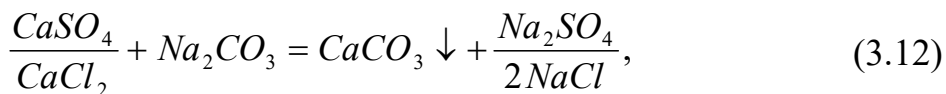
При вапняно-содовому методі також не рекомендується застосовувати більші залишки вапна, однак, у цьому випадку вони не викликають збільшення залишкової твердості, оскільки знімаються содою



але надлишок вапна приводить до нераціональній витраті соди, підвищенню вартості зм'якшення води та підвищеною гідратної лужності. Тому надлишок соди приймають близько 1 мг-екв/дм³. твердість води в результаті контакту з раніше, що випав осадом, знижується на 0,3...0,5 мг-екв/дм³ у порівнянні із процесом без контакту з осадом.

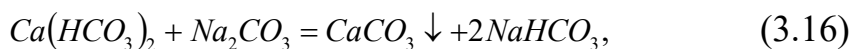
Контроль процесу зм'якшення води треба виконати корекцією рН зм'якшеної води. Коли це неможливо, її контролюють за значенням гідратної лужності, що при декарбонізації підтримують у межах 0,1...0,2 мг-екв/дм³, при вапняно-содовому зм'якшенні – 0,3...0,5 мг-екв/дм³.

При содово-натрієвому методі зм'якшення води її обробляють содою та гідроксидом натрію:



Через те, що сода утворюється при реакції гідроксиду натрію з гідрокарбонатом, необхідна для добавки у воду доза її значно зменшується.

Содово-натрієвий метод звичайно застосовують для зм'якшення води, карбонатна твердість якої трохи більше некарбонатної. Якщо карбонатна твердість приблизно дорівнює некарбонатній, соду можна зовсім не додавати, оскільки необхідна її кількість для зм'якшення такої води утворюється в результаті взаємодії гідрокарбонатів з їдким натром. Доза кальцинованої соди збільшується в міру підвищення некарбонатної твердості води. Содовий метод, заснований на поновленні соди в процесі зм'якшення, застосовують при підготовці води, для живлення парових казанів низького тиску:



Гідрокарбонат натрію, потрапляючи в казан зі зм'якшеною водою, розкладається під впливом високої температури:



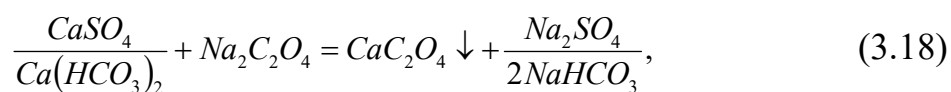
сода, що утворюється при цьому, разом з надлишковою, яку уведено спочатку, відразу в казані гідролізується з утворенням гідроксиду натрію та оксиду вуглецю (IV), що із продувною водою надходить у водопом'якшувач, що використовується для видалення з пом'якшеної води гідрокарбонатів кальцію та магнію. Недолік цього методу полягає в тому, що утворення значної

кількості CO₂ у процесі зм'якшення викликає корозію металу і підвищення сухого залишку в котловій воді.

Барієвий метод зм'якшення води застосовують у сполученні з іншими методами. Спочатку вводять барієвий реагенти у воду (Ba(OH)₂, BaCO₃, BaAl₂O₄) для усунення сульфатної твердості, потім після прояснення води її обробляють вапном і содою для поглибленого зм'якшення.

Через високу вартість реагентів барієвий метод застосовують дуже рідко. Для підготовки питної води через токсичність барієвих реагентів він непридатний. Сульфат барію, що утворюється, осаджується дуже повільно, тому необхідні відстійники або прояснювачі більших розмірів. Для введення BaCO₃ варто використовувати флокулятори з механічними мішалками, оскільки BaCO₃ утворює досить важку, що швидко осаджується, суспензію.

Оксалатний метод зм'якшення води заснований на застосуванні оксалату натрію та на малій розчинності у воді оксалату кальцію, що утворюється, (6,8 мг/дм³ при 18 °С)

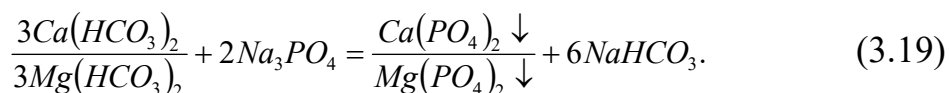


Метод відрізняється простотою технологічного та апаратного оформлення, однак через високу вартість реагенту його застосовують для зм'якшення невеликих кількостей води.

Фосфатування застосовують для попереднього зм'якшення води. Після реагентного зм'якшення вапняно-содовим методом неминуча наявність залишкової жорсткості (близько 2 мг-екв/дм³), що фосфатним методом можна знизити до 0,02–0,03 мг-екв/дм³. Таке глибоке доочищення дозволяє в деяких випадках не застосовувати іонообмінні методи пом'якшення.

Фосфатуванням досягається також більша стабільність води, зниження її корозійної дії на металеві трубопроводи та попередження відкладення карбонатів на внутрішній поверхні стінок труб. Як фосфатні реагенти використовують гексаметафосфат, триполіфосфат (ортофосфат) натрію та ін. Фосфатний метод зм'якшення води при використанні тринатрійфосфата є

найбільш ефективним реагентним методом. Хімізм процесу зм'якшення води тринатрійфосфатом описується реакціями



Як видно з наведених реакцій, сутність методу полягає в утворенні кальцієвих і магнієвих солей фосфорної кислоти, які мають малу розчинність у воді і тому досить повно випадають в осад.

Фосфатне зм'якшення звичайно здійснюють при підігріві води до 105...150 °С, досягаючи її зм'якшення до 0,02...0,03 мг-екв/дм³. Через високу вартість тринатрійфосфата фосфатний метод звичайно використовується для доум'якшення води, попередньо зм'якшеною вапном і содою. Доза безводного тринатрійфосфата (D_{ϕ} , мг/дм³) для доз'якшення може бути визначена з виразу

$$D_{\phi} = 54,67 (J_{\text{ост}} + 0,18), \quad (3.20)$$

де $J_{\text{ост}}$ – залишкова твердість зм'якшеної води перед фосфатним зм'якшенням, мг-екв/дм³. Осадки, що утворюються при фосфатному зм'якшенні, $Ca_3(PO_4)_2$ і $Mg_3(PO_4)_2$ добре адсорбують зі зм'якшеної води органічні колоїди і кремнієву кислоту, що дозволяє виявити доцільність застосування цього методу для підготовки живильної води для казанів середнього та високого тиску (58,8...98,0 МПа).

Розчин для дозування гексаметафосфату або ортофосфату натрію з концентрацією 0,5–3 % готують у баках, кількість яких повинна бути не менш двох. Внутрішні поверхні стінок і дна баків повинні бути покриті корозійно-стійким матеріалом. Час готування 3 %-го розчину становить 3 години при обов'язковому перемішуванні мішалками або барботажем (за допомогою стисненого повітря).

Установка для реагентного зм'якшення води з вихровими реакторами. Вихровий реактор являє собою резервуар у вигляді конуса з верхньою циліндричною частиною (рис. 3.1) [5–8]. На відміну від вихрової камери пластівцеутворення він має невеликий кут нахилу (15–20 °С) і приблизно наполовину своєї висоти заповнений так званою, контактною масою, тобто

дрібним кварцовим піском або мармуровою крихтою діаметром 0,2–0,3 мм, що перебуває у завислому стані під час роботи реактора. Обсяг контактної маси повинен становити 10 кг на 1 м³ обсягу реактора.

Необхідне для реагентного зм'якшення води вапно у вигляді розчину або вапняного молока вводиться в нижню частину реактора. Зерна контактної маси служать центрами кристалізації карбонату кальцію, що виходить при зм'якшенні води, і поступово обволікаються CaCO₃, збільшуючись у діаметрі до 1,5–2 мм. Установка з вихровими реакторами доцільна тільки при мутності вихідної води не вище 8–2 мг/дм³ і при зміні магнію не більше 15 мг/дм³. Реактори застосовують для зм'якшення підземних або поверхневих вод.

У більшості випадків, тобто коли зміст магнію у вихідній воді не перевищує 15 мг/дм³, до складу установки входять пристрою для підготовки та дозування реагентів.

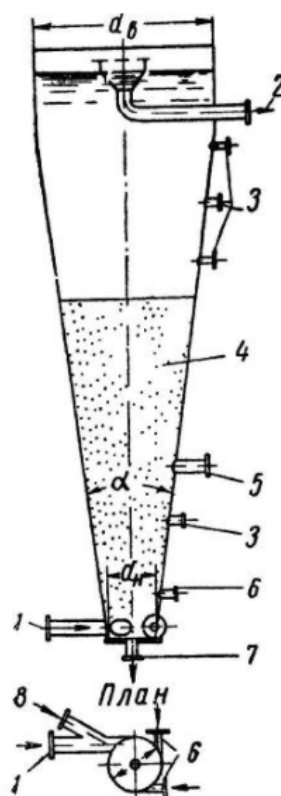


Рисунок 3.1 – Вихровий реактор:

1 – подача води; 2 – відвід води; 3 – штуцери для відбору проб;
4 – завантаження; 5 – випуск надлишку завантаження; 6 – уведення вапна;
7 – скид; 8 – промивна вода від напірної лінії

Не виключається можливість застосування вихрових реакторів і при зміні у вихідній воді магнію більше 15 мг/дм³, однак у таких умовах схема установки повинна бути доповнена просвітлювачем, що розміщується між вихровим реактором і фільтром. Просвітлювач потрібний для виділення гідроксиду магнію.

3.3 Катіоніти і аніоніти та їхні властивості

Іонообмінні синтетичні смоли широко використовуються у різних галузях діяльності людини. Більша частина вироблених на сьогоднішній день іонітів застосовується у різноманітних технологічних процесах (технологія неорганічних і органічних речовин, очищення стічних вод і газових середовищ, підготовка води в різних технологічних процесах, каталіз, радіохімія, медицина та біологія). Також іоніти знайшли застосування і у невеликих побутових системах для доочищення питної води.

Іонообмінними смолами називаються штучні органічні високомолекулярні сполуки, що володіють іонообмінними властивостями. Існує кілька типів класифікації іонообмінних смол [5–7].

1. По «пористості» можна розділити на *гелеві (непористі)* і *макропористі*. У *гелевих* іонітах пори, як такі, відсутні. Доступність іонообмінних груп забезпечується набряканням іоніту, у результаті чого в матеріалі утвориться пористість. *Макропористі* іоніти одержують введенням у масу поро утворювача – інертного розчинника в процесі синтезу (наприклад, вищих вуглеводнів і спиртів). Частина розчинника затримується в матриці та після його видалення із гранул виходять смоли з розвинутою внутрішньою поверхнею в не набряклому стані і більшому обсязі пор. Макропористі іоніти мало набухають, але завдяки розвиненій пористій поверхні, дуже активні в обмінних процесах. Питома поверхня таких іонітів становить від 20 м²/м до 130 м²/м. Діаметр пор макропористих іонітів варіює від 200 А до 1 000 А.

2. По природі протіона (Н⁺ – кислотна форма, К⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ сольова форма, ОН⁻ – гідроксильна форма).

3. Більшість виробників дотримуються класифікації за знаком заряду протиіона. Наприклад:

– катіоніти – полімери, здатні поглинати з розчинів електролітів позитивно заряджені іони (катіони) і обмінювати їх в еквівалентних кількостях на інші катіони;

– аніоніти – полімери, здатні поглинати з розчинів електролітів негативно заряджені іони (аніони) і обмінювати їх в еквівалентних кількостях на інші аніони.

Катіоніти проявляють властивості полікислот. Також виділяють групу смол під загальною назвою *амфотерні іоніти* або *поліамфоліти*. Вони містять рухливі кислотні та основні групи і залежно від умов можуть проявляти себе як катіоніти або аніоніти.

Іоніт складається з *матриці (каркаса)* – високомолекулярна, практично нерозчинна у воді або інших розчинниках частина іонообмінного матеріалу, що володіє певним зарядом (у катіонітів – негативний, в аніонітів – позитивний). З матрицею зв'язані рухливі іони – *протиіони*. Протиіони мають заряд, протилежний заряду іоногенної групи матриці. У цілому зерно іонообмінного матеріалу нейтрально. Протиіони рухливі та здатні обмінюватися на іони того ж знака. Для наочності іоніт можна зрівняти з губкою, у порах якої циркулюють протиіони. Якщо занурити губку в розчин, протиіони перемістяться в розчин, а їхнє місце займуть іони того ж знака з розчину, щоб зберегти електронейтральність зерна.

Якщо іоніт, що містить тільки протиіони одного типу (на рис. 3.2 вони зображені синім кольором), помістити в розчин із протиіонами іншого типу (на рис. 3.2 вони зображені червоним кольором), то іони першого типу почнуть заміщатися на іони другого типу [5,7].

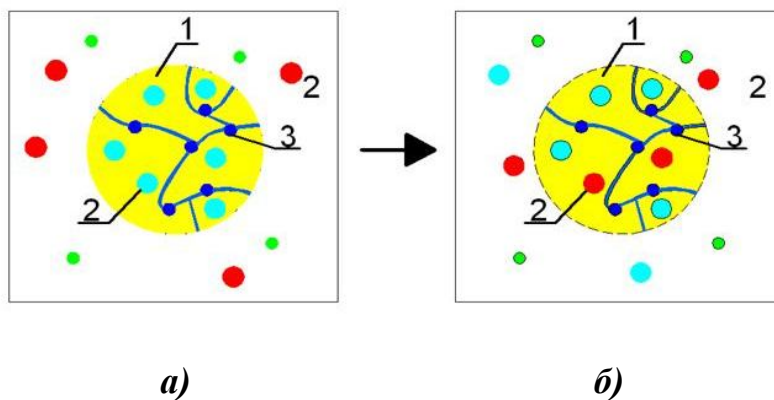


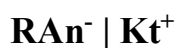
Рисунок 3.2 – схема іонного обміну між іонітом і розчином:

a) – початковий стан; *б)* – іонообмінна рівновага; 1 – матриця з фіксованими іонами; 2 – протиіони; 3 – коіони

Цей процес буде тривати так тих пір, поки не встановиться рівновага: іоніт і розчин будуть містити іони двох видів у певному співвідношенні. Такий стан прийнятий називати іонообмінною рівновагою. Крім протиіонів в іоніт надходить розчинник з розчиненими в ньому іонами – *коіонами*. Коіони – іони, що володіють тим же зарядом, що і матриця іоніту.

Катіоніти

Катіоніти являють собою високомолекулярні тверді нерозчинні полікислоти, що містять кислотні групи: сульфогрупи, карбоксильні та ін. Вони дисоціюють у воді на малорухливі макро аніони (матриця) і рухливі катіони:



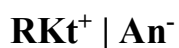
Катіоніти, у яких всі рухливі іони представлені іонами водню, позначаються як Н-катіоніти або Н-форма катіоніта. У тих випадках, коли замість водню рухливі іони представлені катіонами металів (Na^+ , Ca^{2+} і ін.), застосовується відповідне позначення сольової форми Na- або Ca-катіоніт або Na- або Ca-форма катіоніта.

Катіоніти можна розділити на *сильнокислотні* та *слабокислотні*. *Сильнокислотні* катіоніти здатні обмінювати протиіони на зовнішні іони в лужному, нейтральному та кислому середовищах. *Слабокислотні* катіоніти обмінюють протиіони на інші катіони тільки в лужному середовищі. До *сильнокислотних* відносять катіоніти із сильно дисоційованими кислотними

групами – сульфокислотними. До *слабокислотних* відносять катіоніти зі слабо дисоційованими кислотними групами – карбоксильними.

Аніоніти

Синтетичні аніоніти містять у макромолекулі функціональні групи основного характеру і являють собою тверді полімерні підстави. Аніоніти диссоціюють у воді на малорухомий макрокатион (матриця) і рухливі аніони:



Слабоосновні аніоніти мають у своєму складі первинні, вторинні, третинні і четвертинні аміногрупи, сильноосновні аніоніти містять четвертинні аміногрупи. Сильноосновні аніоніти обмінюють протиіони в лужному, нейтральному та кислому середовищах, а слабоосновні – тільки в кислому середовищі. Як ми вже відзначали, аніоніти можуть поставлятися в гідроксильній (OH⁻) або сольовий (Cl⁻) формі. При тривалому зберіганні аніонітів у гідроксильній формі їхня обмінна ємність може знижуватися, що, швидше за все, пов'язане з окислюванням цих полімерів. У результаті цього число вільних основних груп зменшується. Тому зберігати смоли рекомендується в сольовій формі та у зволоженому стані.

3.3.1 Фізико-хімічні властивості іонітів. Обмінна ємність

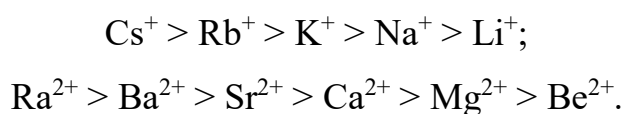
Обмінна ємність – один з найбільш важливих показників властивостей іонітів. Вона визначається числом функціональних груп, здатних до іонного обміну. Вимірюється в одиницях маси повітряно-сухого або в одиниці об'єму набряклого іоніту і відповідно виражається в *мг-екв/дм³* або *мг-екв/см³*. Як правило, російські та закордонні виробники смол частіше вказують обмінну ємність в одиниці об'єму набряклого іоніту (*мг-екв/см³*).

Розрізняють *повну* і *рівноважну* обмінну ємність. Повна обмінна ємність (ПОЄ) відповідає загальній кількості функціональних груп в одиниці об'єму вологого або одиниці маси сухого іоніту. ПОЄ величина постійна для даного зразка. Оскільки іонний процес – процес рівноважний, то вводиться поняття «рівноважна об'ємна ємність» (РОЄ). РОЄ залежить від ряду умов протікання процесу: рН середовища, температури, концентрації розчинів, технологічних

умов протікання процесу (швидкість подачі розчину, площа фільтрування, ін.). Таким чином, рівноважна обмінна ємність величина змінна, залежна від різних умов.

Селективність

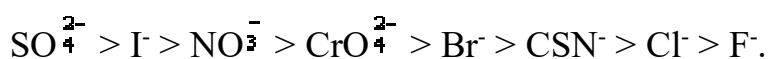
Селективністю називається здатність вибірково поглинати з розчину деякі іони або групи іонів. При катіонному обміні на слабозшитому (до 8–10 % ДВБ) сульфокатіоніти з розведених розчинів, у яких немає реакцій комплексоутворення, має місце наступний ряд селективності для лужних і лужноземельних металів:



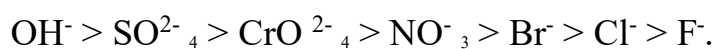
Спорідненість іонів лужних і лужноземельних металів до слабо зшитому сульфокатіоніту зменшується в ряді в повній відповідності зі зменшенням їхнього порядкового номера та розміру іона і зі збільшенням радіуса гідратованого іона.

Зі збільшенням кількості зшиваючих агентів у монофункціональних сульфокатионітах і зміни природи функціональних груп (наприклад, з –SO₃H на –COOH) приводить до повного оберту рядів селективності.

Для сильноосновних аніонітів характерний наступний ряд селективності:



Слабоосновні аніоніти проявляють підвищену вибірковість до гідроксиліону (OH⁻), інші іони легко їм витісняються. Ряд селективності має вигляд:



Осмотична стабільність

Іоніти здатні до набрякання у воді та органічних розчинниках, при цьому проявляється дія осмотичних сил на зерно іоніту. Ступінь набрякання іоніту у воді залежить від властивостей іоніту і складу розчину та значень рН розчину. При збільшенні ступеня набрякання зерен їхній розмір збільшується, при зменшенні ступеня набрякання – зерно зменшується. Цей процес називають

«подихом» іоніту. Циклічні процеси розтягування та стиску зерна приводять до розриву ланцюгів матриці і розтріскуванню гранул іоніту. Особливо гостро коштує питання про механічну міцність аніонітів, тому що їхня вартість вище, а термін служби менше, ніж у катіонітів. Повністю виключити вплив осмотичних сил на зерно іоніту неможливо, але, завдяки деяким мірам, можна знизити. Не можна допускати висихання іоніту, що поставляється у вологому стані (як правило, масова частка вологи становить 40–65 %). Сухі-повітряно-сухі іоніти щоб уникнути осмотичного удару попередньо замочується в концентрованому розчині хлориду натрію.

Механічна міцність

Осмотична стійкість і механічна міцність іоніту залежить від будови матриці іоніту, форми зерна, температури, властивостей середовища та інших факторів. Руйнування зерна іоніту відбувається в результаті недостатньої осмотичної стабільності, при терті гранул друг об друга, об стінки апаратури, а також при зіткненні з потоками, що рухаються, середовища. Перепад тиску в іонообмінних колонах також може стати причиною розтріскування або повного руйнування гранул іоніту. У вітчизняній літературі для оцінки механічної міцності іонообмінних матеріалів використовують два поняття: *стирання* – зношування матеріалу внаслідок тертя зерен один об другий при промиваннях (граничне значення – 0,5 %) і *подрібнення* – зношування в результаті розтріскування зерен (до 4 %). Смоли імпортного виробництва характеризуються показником «*cracked*» – процентне співвідношення цілих і тріснутих гранул, і показником «*broken*» – процентне співвідношення цілих і повністю зруйнованих гранул.

Гранулометричний склад

Швидкість усього іонообмінного процесу визначається стадією, що лімітує. Для процесів, що протікають у водному середовищі, це швидкість іонообміну між іонами води та омиваною часткою смоли. На зовнішній поверхні омиваної частки утвориться нерухлива водяна плівка, товщина якої залежить від швидкості потоку та розмірів зерна смоли. Іон, що прагне

потрапити усередину частки смоли, у функціональну групу, повинен дифундувати з води через плівку, пройти через граничну поверхню частки усередину смоли. У чистих смол дифузійні шляхи не забруднені сторонніми домішками і доступ до поверхні зерна не заблокований. Зі збільшенням швидкості потоку зменшується товщина водяної плівки, що полегшує проходження іонів до поверхні зерна. Підвищення температури води веде до зменшення її в'язкості, що сприяє збільшенню швидкості дифузії та збільшенню кінетики іонного обміну. Іншим важливим фактором є співвідношення між обсягу частки до її поверхні. Зі зменшенням діаметра зерна на кожен функціональну групу доводиться більша поверхня обміну.

Існує оптимальне співвідношення між розміром гранул і товщиною шару матеріалу, що засипається в іонообмінні фільтри. Дрібнозернистий іоніт, володіючи більше розвинутою поверхнею, має трохи більшу іонообмінну ємкість, чим велико-зернистий. Однак, зі зменшенням зерен катіоніту гідравлічний опір і витрата електроенергії на фільтрування води збільшуються. Виходячи з вищесказаного, найбільше поширення одержали смоли з розміром зерна 0,3–1,5 мм. У технологіях іонування із протилежними по напрямку потоками оброблюваної води та розчину, що регенерує, велике значення має однорідність гранул (монодисперсність). Ступінь однорідності розмірів зерен істотно впливає на процес іонного обміну. При промиванні винос дрібної фракції почнеться набагато раніше, ніж прийдуть у рух більші частки. Якщо знизити швидкість промивання для запобігання виносу дрібної фракції, великі частки будуть промиті недостатньо [5–7].

Основні параметри, що характеризують фракційний состав іонообмінного матеріалу, визначаються ситовим аналізом. Навіщення матеріалу просівається через ряд каліброваних сит, залишки на ситах зважуються, і визначається процентне співвідношення між різними фракціями. На основі отриманих результатів вираховується еквівалентний діаметр зерен d_e (ефективний розмір), мм.

3.4 Зм'якшення іонним обміном

Зм'якшення води по методу іонного обміну засновано на властивості катіонітів обмінювати катіони, якими попередньо «заряджені» його активні групи, на катіони, що містяться у воді, що зм'якшується, кальцію і магнію. У результаті реакції катіонів віддає у воду замість поглинених обмінні катіони. Залежно від того, яким обмінним іоном «заряджений» катіоніт: натрієм, воднем або амонієм – розрізняють процеси Na-, H- і NH₄ – катіонування.

Процес обміну іонів між катіонітами і розчином, що містить солі твердості, залежить від багатьох факторів. Головними з них є властивості катіонітів, состав вихідної води та умови процесу, що відбувається. Всі ці фактори тісно зв'язані між собою та насамперед визначають швидкість проходження іонообмінних реакцій. Реакція обміну між катіонітом і іонами вихідної води, що є розчином солей, обумовлюється дифузією іонів з розчину усередину катіоніта та з катіоніта у вихідну воду. Процес управляється законами дифузії і дії мас. При зм'якшенні води, що містить іони кальцію та магнію, Na-катіонуванням кальцій і магній будуть дифундувати в катіоніт; у свою чергу натрій з катіоніту дифундує у воду. У результаті обмінної реакції кальцій і магній займуть місце витиснутого натрію в катіоніті, а натрій займе місце магнію і кальцію в зм'якшеній воді. Обмін іонів між катіонітом і розчинами (водою) відбувається еквівалентно: з катіоніту іони Na⁺ витискаються в кількості, еквівалентній кількості іонів Ca²⁺ і Mg²⁺, що поглинаються з розчину. Обмін іонів є не тільки еквівалентним, але й оберненим процесом.

Оберненість обміну іонів полягає в тому, що швидкість обміну іона, витиснутого з катіоніта, і іона, поглиненого з розчину, за умови рівноваги практично дорівнює. Еквівалентність і оборотність обміну іонів порушуються в тому випадку, якщо поряд з обміном іонів у воді протікають інші реакції, наприклад окислювально-відновні, фізична сорбція молекул і ін. При веденні процесу Na-Катіонування (як і інших процесів) для практичних цілей

головним завданням є максимальне використання іонообмінної здатності (ємності) катіоніту, тому що від її й ступеня іонізації активних груп катіоніту залежить ефективність застосування іонообмінного процесу. Великий вплив на обмінну здатність катіоніту робить природа катіонів, що поглинаються. Будь-який катіон може поглинатися катіонітом повністю, однак величина робочої ємності поглинання при цьому буде залежати від того, який саме катіон поглинається. Інтенсивність поглинання підкоряється певної закономірності:



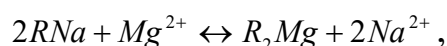
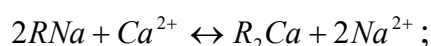
Тут кожний наступний катіон поглинається катіонітом більш інтенсивно, ніж попередній. У якості катіонітів у цей час застосовуються тільки штучно одержувані матеріали. Із числа практично використовуваних катіонітів у першу чергу варто вказати сульфовугілля – поліфункціональний катіоніт, що виходить сульфуванням (обробка концентрованою сірчаною кислотою при високій температурі) природних коксованих плавких кам'яних вугіль. По зовнішньому вигляді сульфовугілля – чорний зернистий матеріал, що складається із гранул неправильної форми розміром від 0,25 до 1,2 мм. Обмінна здатність сульфовугілля становить від 200 до 300 мг-екв/л залежно від умов застосування. Сульфовугілля застосовується для Na-, H- і NH₄ – катіонування. Завдяки доступності та дешевині сульфовуглю одержав широке поширення в теплоенергетиці для водопідготовки.

Крім сульфовугілля в цей час широко застосовують синтетичні іонообмінні смоли (іоніти, що представляють собою високомолекулярні з'єднання), які складаються з молекул-гігантів з величезною молекулярною масою. Іоніт – тверде, практично нерозчинне у воді речовина, механічно міцне та хімічно стійке. Іонообмінна здатність синтетичних іонітів, так само як і природних, обумовлюється активними групами, закріпленими на каркасі високомолекулярних з'єднань, розташованих в обсязі частки (зерна). Таким чином, усякий іоніт – це нерозчинний негативний або позитивний полівалентний іон, оточений рухливими іонами протилежного знака. Із синтетичних катіонітів найбільш широке поширення у водоочищенні одержали КБ-4, КУ-1, КУ-2-8. Вони володіють у кілька разів більшою обмінною здатністю, ніж сульфовугілля. Наприклад, обмінна здатність

КУ-2-8 при Na-Катіонуванні становить 800–900 мг-екв/дм³. Іонообмінні процеси, здійснювані на катіонітах, засновані на типових реакціях катіонного обміну.

Катіонітовий спосіб пом'якшення води полягає у фільтруванні твердої води через дрібнозернисте завантаження деяких речовин (сульфовугілля, штучні смоли). Ці речовини мають здатність обмінювати катіони натрію, що втримується в них, Na⁺ або водню H⁺ на катіони кальцію Ca²⁺ або Mg²⁺ солей твердості, розчинених у воді. Таким чином, розрізняють процес Na-катіонування та H-катіонування.

При фільтруванні твердої води через шар катіоніту в результаті іонного обміну Ca²⁺, Mg²⁺ і інші катіони, що знаходяться у воді, поглинаються катіонітом, а замість них у розчин переходять іони Na⁺, що раніше втримувалися у катіоніті. На поверхні зерен катіоніту протікає реакція обміну іонів:



де R-Матриця з фіксованими зарядами без обмінного іона, що вважається одновалентною [6].

Обробка води методом натрій-катіонування полягає у фільтруванні води через шар катіоніту, що містить як обмінні іони-катіони натрію. Катіоніти поглинають із води іони Ca²⁺ і Mg²⁺, що обумовлюють її твердість, а у воду переходять із катіоніту еквівалентна кількість катіонів натрію (Na⁺) по наступних реакціях:

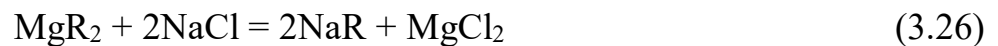


де R – складний комплекс катіоніту (або його «нерухливий аніон»), практично не розчинний у воді.

При натрій-катіонуванні величина лужності зм'якшеної води не змінюється, а сухий залишок води трохи зростає, що є недоліком цього

процесу. Не змінюється також і аніонний состав води, тобто зміст Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , SiO_3^{2-} і інші. Здійснюється лише переклад важко розчинних кальцієвих і магнієвих солей у легкокорозчинні натрієві, які нездатні до утворення накипу.

Реакції іонного обміну оборотні, тому при високій концентрації іонів Na^+ у розчині, при контакті з катіонітом, насиченим катіонами Ca^{2+} і Mg^{2+} реакція ланцюга відбувається у зворотному напрямку. Цей процес використовується для регенерації виснаженого катіоніту шляхом витиснення з нього раніше поглинених іонів кальцію та магнію концентрованим розчином повареної солі (NaCl) [5, 7–8].



Оптимальна концентрація розчину солі при регенерації катіоніту становить 6–8 %. Оптимальна швидкість фільтрування регенераційного розчину становить 4–6 м/год (при високому шарі катіоніта 1,5–2,0 м.).

3.4.1 Водень-катіонування води

Водень-катіонування застосовується або в схемах знесолення води, або в сполученні з натрій-катіонуванням. Принципова схема цього методу обробки води наведена на рисунку 3.3. Головна відмінність цього методу – наявність вільних кислот у фільтраті та кислотне (замість сольового) господарство для регенерації фільтра.

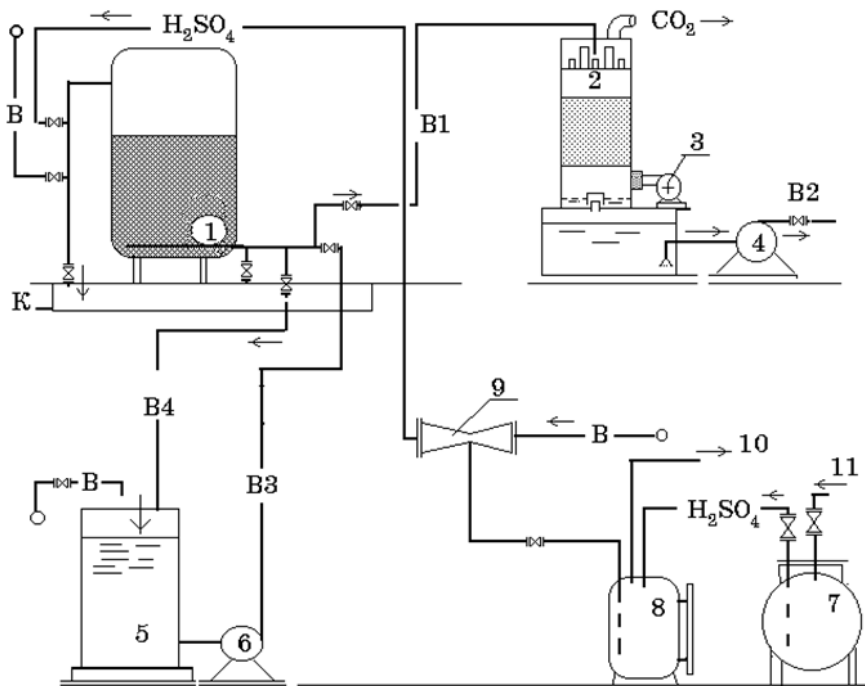


Рисунок 3.3 – Схема установки зм'якшення води водень-катионування:

1 – водень-катионітовий фільтр; 2 – дегазатор; 3 – вентилятор; 4 – насос перекачування очищеної води; 5 – бак води для розпушення; 6 – насос подачі води на розпушення фільтра; 7 – бак зберігання кислоти; 8 – бак-мірник кислоти; 9 – ежектор; 10 – лінія відкачки повітря вакуум-насосом; 11 – злив кислоти від транспортних засобів; В – водопровід; В1 – зм'якшена вода; В2 – хімічно очищена вода; В3 – вода на розпушення фільтра; В4 – збір води після промивання

При цьому способі катионування води утворюється вільна вуглекислота H_2CO_3 , що розпадається на газ CO_2 і воду. Для зниження кислотності двоокис вуглецю видаляють у дегазаторах, встановлюваних після фільтрів по ходу руху води. Вміст вільного двоокису вуглецю, мг/дм^3 , у подаваній на дегазатор воді визначається по формулі:

$$(\text{CO}_2)_{\text{св}} = (\text{CO}_2)_{\text{исх}} + 44 \text{Щ}_{\text{исх}}, \quad (3.27)$$

де $(\text{CO}_2)_{\text{исх}}$, $\text{Щ}_{\text{исх}}$ – вміст у вихідній воді вільного двоокису вуглецю, мг/л і лужності, мг-екв/дм^3 .

Іноді застосовують Н-катионування з «голодною» регенерацією, при якій витрачають кількість кислоти, що недостатня для повного витискання з

катіоніту кальцію та магнію. Такі фільтри видаляють із води тільки солі карбонатної жорсткості і доцільні до застосування при лужності води більше 3 мг-екв/дм³. Розрахунок водень-катіонітових фільтрів ведеться в тій же послідовності, що і натрій-катіонітових. Довідкові дані та формули для розрахунку фільтрів і дегазатора наведені в [6].

3.4.2 Водень-натрій-катіонування води

Послідовне водень-натрій-катіонування води застосовується для обробки сильно мінералізованих вод із солевмістом більш ніж 1 000 мг/дм³, схема знесолення води цим методом наведена на рисунку 3.4 [5,8].

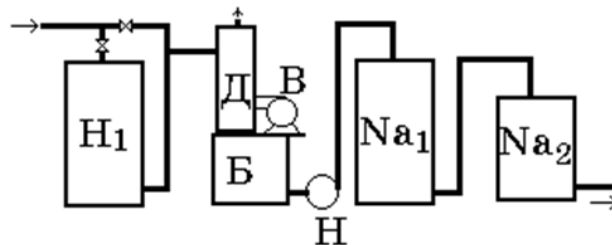


Рисунок 3.4 – Схема послідовного водень-натрій-катіонування води:

Н₁ – водень-катіонітовий фільтр; Na₁, Na₂ – натрій-катіонітові фільтри першого і другого ступеня; Д – дегазатор; Б – бак; Н – насос; В – вентилятор

У цій схемі частина води проходить через фільтр Н₁, а частина проходить повз нього. Суміш цих потоків води надходить на дегазатор для видалення діоксида вуглецю та далі на дві ступені натрій – катіонітових фільтрів. Основною перевагою цього процесу є глибоке видалення солей жорсткості (твердості) та гарне використання обмінної ємкості Н-фільтрів.

При паралельному Н-Na-катіонуванні, схема якого наведена на рисунку 2.7, також, як і в попередньому випадку частина води проходить через Н-Фільтр, а частина через – Na-Фільтр.

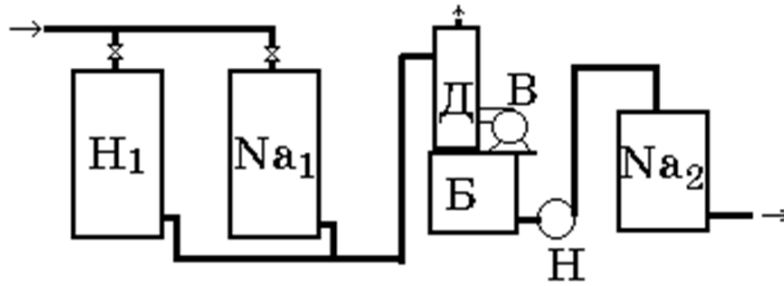


Рисунок 3.5 – Паралельне Н-Na-катіонування

Далі суміш потоків подається на дегазатор і при необхідності проходить обробку на Na-катіонітовому фільтрі другого ступеня. Основною перевагою даної схеми є одержання води з мінімальною лужністю, що необхідно при живленні казанів високого тиску.

До недоліків можна віднести зниження ефекту зм'якшення при більших концентраціях натрію у вихідній воді. Розрахунок фільтрів і дегазаторів у цих схемах не має істотних особливостей.

Запитання до розділу 3

1. Дайте визначення поняттю «катіонування».
2. На чому заснований процес Na-катіонування?
3. Як довго працює катіонітний фільтр?
4. На рисунку 3.4 зображено схему послідовного натрій-катіонування води.

Поясніть схему.

5. Які операції включає регенерація фільтру?
6. Яким чином проводиться операція «спушування», одна з операцій по регенерації катіонітних фільтрів?
7. Яким чином проводиться операція «регенерація», одна з операцій по регенерації катіонітних фільтрів?
8. Яким чином проводиться операція «відмивання», одна з операцій по регенерації катіонітних фільтрів?

4 ПРИНЦИПОВІ СХЕМИ ЗНЕСОЛЕННЯ ВОДИ ІОННИМ ОБМІНОМ

4.1 Апарати з нерухливим шаром іоніту

У виробничій практиці широко поширені іонообмінні установки періодичної дії з нерухливим шаром іоніту. Типовий іонообмінний фільтр (рис. 4.1) являє собою вертикальний циліндричний апарат, усередині якого на опорних ґратах розташований шар гранульованого іоніту. Для рівномірного розподілу розчину, що очищується, по перетині апарата служать спеціальні розподільні пристрої.

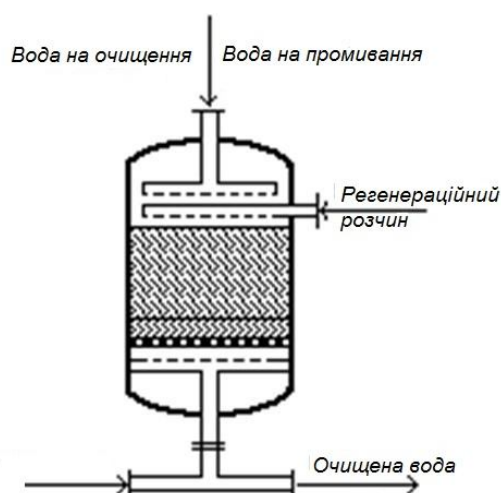


Рисунок 4.1 – Іонообмінний апарат з нерухливим шаром іоніту

Для запобігання віднесення часток смоли зверху неї закривають сіткою з нержавіючої сталі або полімерних матеріалів. Висота колони повинна бути значно більше висоти шару смоли, щоб дати можливість перейти шару в псевдозріджений стан при промиванні смоли висхідним потоком. Цикл роботи такої установки складається із чотирьох стадій: іонообмін; відмивання іоніту від стічних вод; регенерація іоніту; відмивання іоніту від розчину, що регенерує.

На першій стадії розчин, що очищується, подається у верхню частину апарата через розподільний пристрій. Розчин самопливом рухається долилиць і виводиться з нижньої частини апарата. На другій стадії в апарат подається промивна вода. Подача води здійснюється насосом знизу нагору. Шар іоніту при цьому переходить у псевдозріджений стан. При промиванні іоніту таким

способом відбувається не тільки його відмивання від вихідного розчину, але й видалення із шару іоніту механічних домішок, що нагромадилися в ньому. При роботі апарата в каскаді з іншими апаратами того ж призначення, у якості промивної води може бути використана вода, що очищується. У цьому випадку промивна вода після відділення з неї механічних домішок направляється в інший апарат для очищення. Після відмивання іоніту проводиться його регенерація. Розчин, що регенерує, подають в апарат зверху, так само як і вода, що очищується. У якості розчинів для регенерації залежно від типу іоніту використовують розчини кислот і лугів.

По закінченні стадії регенерації проводять ретельне відмивання іоніту від регенерату, знесоленою водою або конденсатом, подаючи його зверху до низу. Каскад апаратів періодичної дії може працювати за безперервною схемою з перемиканням потоків.

4.2 Динаміка іонного обміну

Більшість методів, у яких використовують іонообмінні смоли у промисловому масштабі, пов'язані із застосуванням колон (фільтрів), заповнених іонообмінним матеріалом. Ці процеси полягають у тому, що в колону подають розчин, наприклад, воду, з якої повинні бути видалені іони певного виду. Процес у колоні залежить від властивостей іоніту (стану насичення, ємності, розмірів зерен, ступеня зшивання тощо), складу вихідного розчину, розмірів колони й від виробничих умов – швидкості протікання розчину та температури. Протікаючи через колону зверху вниз, розчин буде весь час стикатися з новими шарами невикористаної іонообмінної смоли. Згодом верхні шари іоніту віддадуть усі іони А і втратять працездатність – виснажаться (рис. 4.1, а) [5,11]. Унаслідок цього перехідна зона, в якій відбувається іонний обмін, звана фронтом сорбції, буде все далі й далі переміщатися вниз по колоні. З колони буде витікати розчин АХ доти, доки перехідна зона не досягне нижнього кінця колони.

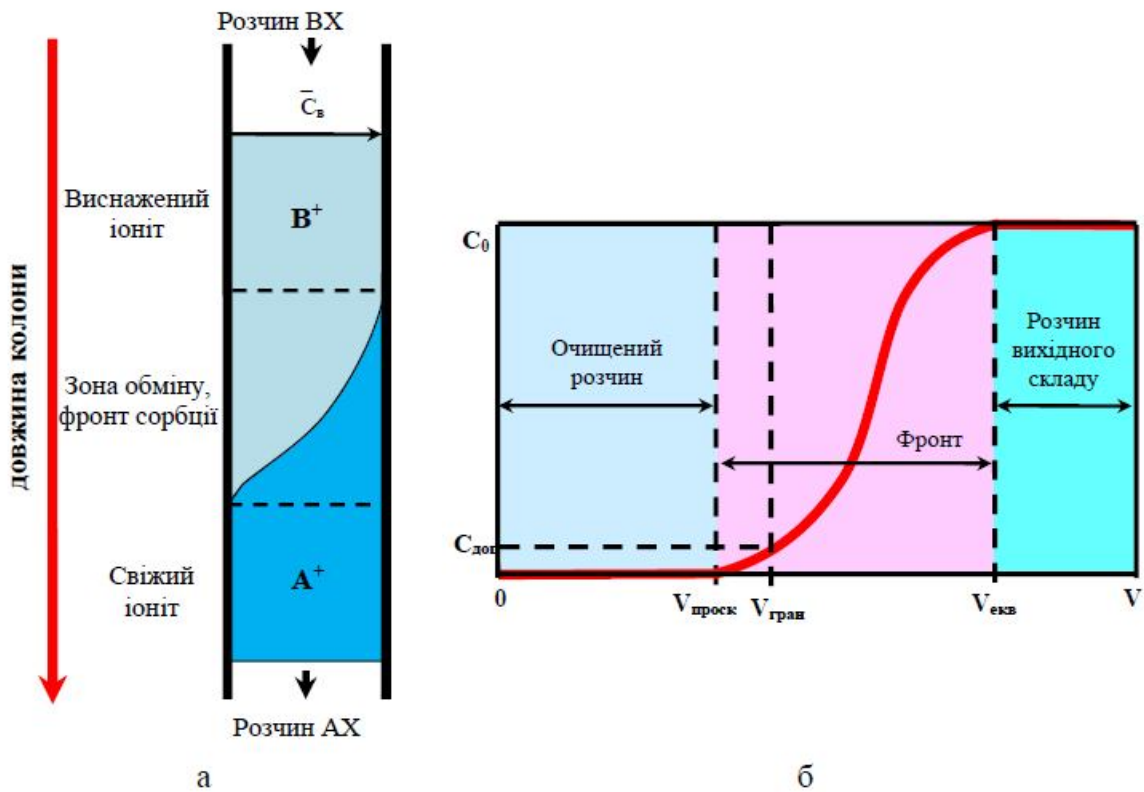


Рисунок 4.1 – Динаміка іонного обміну:

а – схема іонообмінного процесу в колоні; б – вихідна крива іонного обміну

Після цього настане проскакування іонів В й іоніт повинен бути відрегенований, тобто переведений у початкову форму. Якщо пропускання розчину продовжити, то іони В повністю витиснуть з розчину іони А. Унаслідок цього іоніт по всій довжині колони прийде в стан рівноваги з розчином ВХ, який буде проходити через колону без зміни складу. Поглинаючу здатність іоніту до проскакування іонів В називають ємністю до проскакування, яка завжди менше його повної обмінної ємності. Наближення ємності до проскакування до повної обмінної ємності свідчить про максимально повне використання іоніту й оцінюється за ступенем використання іоніту – відношенням ємності до проскакування до повної обмінної ємності. Ступінь використання іоніту залежить від розмірів колони та ширини перехідної зони, інакше кажучи, від гостроти фронту сорбції іонів В. На гостроту фронту найбільше впливає іонообмінна рівновага. Швидкість переміщення фронту переважно залежить від швидкості потоку й концентрації вихідного розчину.

Однак усі заходи, що вживаються для уповільнення переміщення фронту за однакового поперечного перерізу колони, пов'язані з великими витратами часу [8–11].

Іонообмінні процеси в динаміці прийнято наводити у вигляді вихідних кривих іонного обміну (див. рис. 4.1) що залежать від концентрацій обмінюваного іону від часу або об'єму вихідного розчину, пропущеного через фільтр.

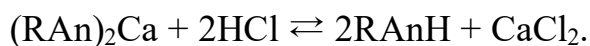
До певного об'єму ($V_{\text{проск}}$ – об'єм проскакування) іони В у фільтраті віддодні – спостерігається повне заміщення іонів В на іони А. Починаючи з $V_{\text{проск}}$ концентрація іонів В у фільтраті починає рости, досягаючи свого допустимого значення – $C_{\text{доп}}$. Об'єм розчину, який може бути очищений до цього моменту, відповідає $V_{\text{гран}}$, а площа, обмежена знизу ділянкою вихідної кривої, а праворуч прямий $C = f(V_{\text{пред}})$, відповідає величині робочої динамічної обмінної ємності (РДОЄ). Якщо пропускання розчину через колону продовжити, то концентрація іонів В у розчині перевищить бажану й поступово зрівняється з C_0 за величини еквівалентного об'єму. Площа, обмежена знизу вихідної кривої, а праворуч $C = f(V_{\text{екв}})$ відповідає величині повної динамічної обмінної ємності (ПДОЄ), яка завжди менше повної обмінної ємності іоніту.

ПДОЄ більша, ніж РДОЄ. ПДОЄ, яка виражається в ммоль еквівалента на 1 г сухої смоли, не залежить від природи іону, який насичує іонообмінні групи, розмірів колонки, а також від випадкових факторів. ПДОЄ сухої сульфованої катіонообмінної смоли, що знаходиться в H^+ -формі, дорівнює приблизно 5 ммоль екв/г, а ПДОЄ вологої смоли складає приблизно 1,8 ммоль екв./см³. ПДОЄ сухої аніонообмінної смоли четвертинного амонійного типу, що знаходиться в Cl^- -формі, дорівнює 3,0–3,5 ммоль екв/г, а ПДОЄ вологої смоли складає приблизно 1,2 ммоль екв./см³. Обмінна ємність, яка визначається в статичних умовах, може відрізнитися від величини обмінної ємності, яка отримана у динамічних умовах [5–7].

За величиною РДОЄ можна визначити максимальний об'єм води, який може очистити фільтр і після досягнення якого необхідно буде провести регенерацію. Цю величину називають тривалістю фільтроциклу.

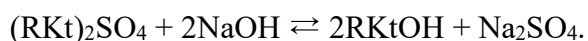
Важливою стадією роботи з іонообмінними фільтрами є регенерація їх після використання. Товарні іоніти досить часто є сумішами, в яких поряд з основною речовиною – високополімерною смолою – присутні різноманітні домішки, особливо катіони заліза (III). Тому іоніти необхідно попередньо очищати. Крім того, іоніт повинен бути доведений до набрякання, оскільки тільки в набряклому стані його можна завантажувати в колонку.

Регенерують катіоніт, пропускаючи крізь колонку 2 М розчин HCl або H₂SO₄. Наприклад, якщо катіоніт раніше поглинав іони кальцію, то регенерацію його можна зобразити за схемою:

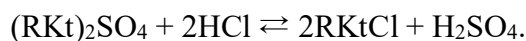


При регенерації відмивку катіоніту проводять від сорбованих раніше іонів, в нашому прикладі – від іонів кальцію (проба з амоній оксалатом).

Регенерацію відробленого аніоніту проводять 1М розчином лугу або кислоти. Наприклад, якщо аніоніт раніше поглинав SO₄²⁻-іони, то регенерацію його лугом можна представити схемою:



Регенерацію аніоніту кислотою можна представити схемою:



Промивання водою до рН 5–6 завершує регенерацію.

4.3 Основні іонообмінні процеси і технології

Усе різноманіття існуючих іонообмінних апаратів для зручності їх розгляду може бути розбите на окремі групи апаратів, близьких по конструкції, принципу дії та характеристиками. Запропоновано безліч різних варіантів класифікації іонообмінного обладнання [9, 8].

Згідно з представленою класифікацією іонообмінне обладнання підрозділяється на групи за двома основними ознаками: за режимом роботи й за гідродинамічним режимом. Відповідно до цих ознак апарати поділяються на такі групи: періодичної та безперервної дії; та з псевдозрідженим (завислим) шаром іоніту.

Більшість іонообмінних процесів включають чотири основних стадії [22, 23]:

1. Робочий цикл.

2. Зворотне промивання, яке необхідне для розпушування шару іоніту й видалення механічних домішок, затриманих у шарі; після цього іоніту дають самочинно осісти;

3. Регенерація – процес переведення іоніту у вихідну форму шляхом пропускання через його шар регенераційних розчинів.

4. Пряме промивання для видалення з колони залишку регенераційних розчинів.

На сьогодні існують дві основні технології – прямотечійна та протитечійна, що відрізняються напрямками руху води, яку очищають, і регенераційних розчинів.

Історично сталося так, що майже всі конструкції іонообмінних фільтрів – паралельно точні (прямоточні), тобто вода, що обробляється, і регенеруючий розчин рухаються у фільтрі в одному напрямку – зверху вниз.

У процесі просування регенераційного розчину зверху вниз через шар іоніту концентраційний напір – різниця концентрацій між раніше затриманими іонами (наприклад, кальцієм і магнієм) й іонами регенераційного розчину, які витісняють їх (наприклад, натрію), – становиться все менш та менш. Наприкінці «слабкий» регенераційний розчин зустрічається з шаром іоніту, який містить деяку, хоч і невелику, кількість іонів, які потрібно витіснити із іоніту. Витіснення не відбувається. Унаслідок цього наступний потік очищеної води не досягає необхідної якості.

Ця особливість технології іонного обміну, а також властивості іонів та регенераційних розчинів, визначають принципові недоліки іонообмінної технології очищення води: великі витрати реагентів, води для відмивання іоніту від залишків регенераційного розчину та велика кількість стічних вод, якість яких не відповідає вимогам нормативних документів.

Вихід із положення був знайдений технологами, які запропонували двоступеневе – для натрій-катіонування та триступеневе – для демінералізації – фільтрування через іонообмінну смолу.

У випадку сучасного та економічного протитечійного фільтрування (рис. 4.2) подача регенераційного розчину та води, що обробляється, відбувається у різних напрямках [11].

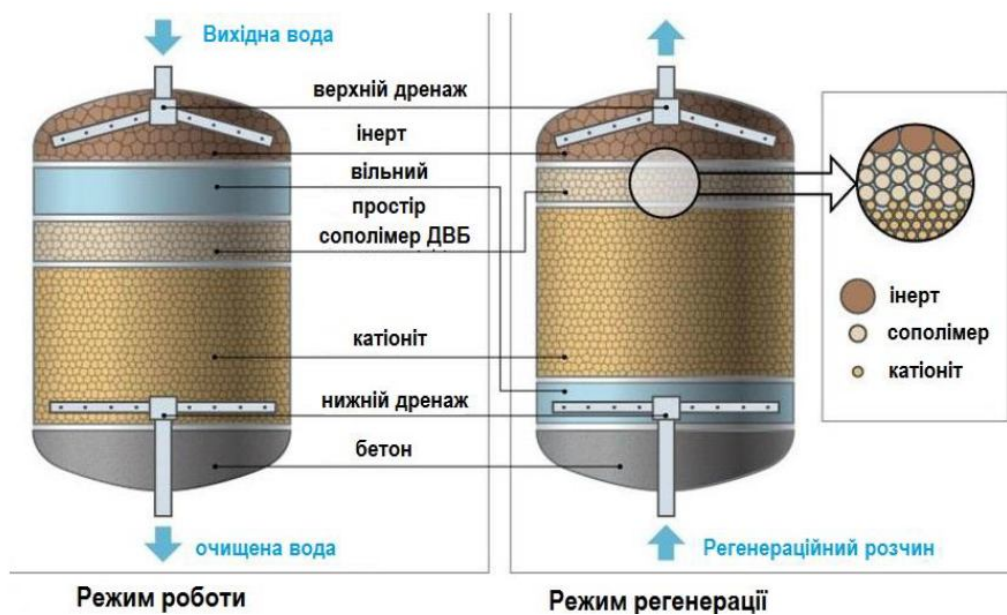


Рисунок 4.2 – Схема протитечійної технології регенерації

У наш час відомо декілька конструкцій протитечійного фільтрування, які принципово розрізняються за напрямками потоків: потік води – знизу вгору, регенерація – зверху вниз; потік води – зверху вниз, регенерація – знизу вгору.

Переваги протитечійного фільтрування були відомі давно, але промислове застосування воно знайшло лише з появою спеціальних

конструкцій фільтрів та розвинутого виробництва різноманітних високоефективних іонітів.

У процесі протитечійної технології іонування найкраще відрегенований катіоніт розташований у тому шарі, який знаходиться на виході з фільтра. Вода, що обробляється, проходить шари іоніту зі все більшою глибиною регенерації, тобто концентраційний напір зберігається по всьому шляху води.

Отже, забезпечується висока якість зм'якшення й демінералізації, найповніше використовується робоча обмінна ємність іоніту, зменшується витрата реагентів, води на власні потреби та стічних вод.

Конструкції іонообмінних апаратів безперервної та напівбезперервної дії. Класичні прямоточні установки іонного обміну, які широко застосовуються для пом'якшення та знесолення води з нерухомим шаром смоли, мають певні принципові недоліки. Працюють вони періодично, оскільки в процесі насичення смоли установку відключають для регенерації. При прямоточній регенерації реагенти використовуються недостатньо повно, тому витрати їх більше. Унаслідок неповного використання реагентів іонообмінне завантаження регенерується тільки частково, що призводить до підвищеного іонів і в такий спосіб до погіршення ступеня очищення води [6].

Використання апаратів, у яких іоніт, у процесі його насичення вилучаються з води іонами, видаляється з робочої зони в зону регенерації та в еквівалентній кількості замінюється раніше відрегенованою смолою, дає змогу усунути простої іонообмінних фільтрів і, отже, скоротити загальну кількість фільтрів і кількість смоли, завантаженої в апарати іонообмінної установки.

В установках безперервної дії іоніт застосовується в щільному, слабо розширеному або псевдозрідженому шарі. У першому випадку довжина зони масопереносу найменша і, відповідно, загальна висота шару іоніту (що не перевищує 3–5 м) порівняно невелика. У псевдозрідженому шарі довжина зони масопереносу в 8–10 разів перевищує довжину зони масопереносу в щільному шарі і, відповідно, загальна висота псевдозрідженим шаром іоніту в апараті повинна бути більше в кілька разів, ніж в апаратах із щільним шаром смоли.

В апаратах безперервної дії обидві фази подаються та рухаються всередині них безперервно. В апаратах напівбезперервної дії пересування іоніту відбувається періодично: при зупинках або реверсуванні руху розчину.

До складу установок **безперервного іонного обміну** входить допоміжне обладнання для вимірювання витрат використовуваних розчинів або пульпи, для дозування й транспортування іоніту, поділу смоли та транспортування розчину. Перевагою таких установок, порівняно з періодичними, є те, що вони дають змогу отримати насичений регенераційні розчини, скоротити витрати реагентів і смоли, промивних вод, виробничі площі тощо.

Зазвичай апарати безперервної дії працюють з протитечею фаз у самому апараті або в їхньому каскаді, що складається з апаратів змішування або прямоточних.

Протиточний рух фаз (смоли й розчину) в апараті забезпечує підвищення концентраційного напору, що дає змогу значно (в 2–5 разів) скоротити необхідний час контакту фаз і додатково зменшити кількість смоли в апараті, а також реалізувати в одному апараті необхідну кількість теоретичних ступенів контакту і, отже, глибину очищення. Протитечія і безперервний рух фаз дозволяють стабілізувати концентрації обробленого розчину й регенерату, краще використовувати ємність іоніту, а також кислоту (луг) для регенерації. Унаслідок цього досягається скорочення обсягу відходів, капітальних і експлуатаційних витрат [6, 9, 8].

Апарати безперервної дії з примусовим рухом іоніту. Для збільшення питомої продуктивності на шар смоли докладають зверху додаткове зусилля, яке перешкоджає його псевдозрідженню. Це зусилля створюється за допомогою напірного стовпа іоніту (рис. 4.3, б), циркуляцією розчину, що обробляється («гідротараном») (рис. 4.3, в), механічними пристроями [7].

Відомі конструкції апаратів із примусовим безперервним рухом іоніту вгору, назустріч потоку розчину [7, 9]. Такий рух створюється за допомогою похилих спіралей або порожнистих шнеків типу гвинта Архімеда. Іоніт (сорбент) знаходиться в нижніх частинах витків спіралі.

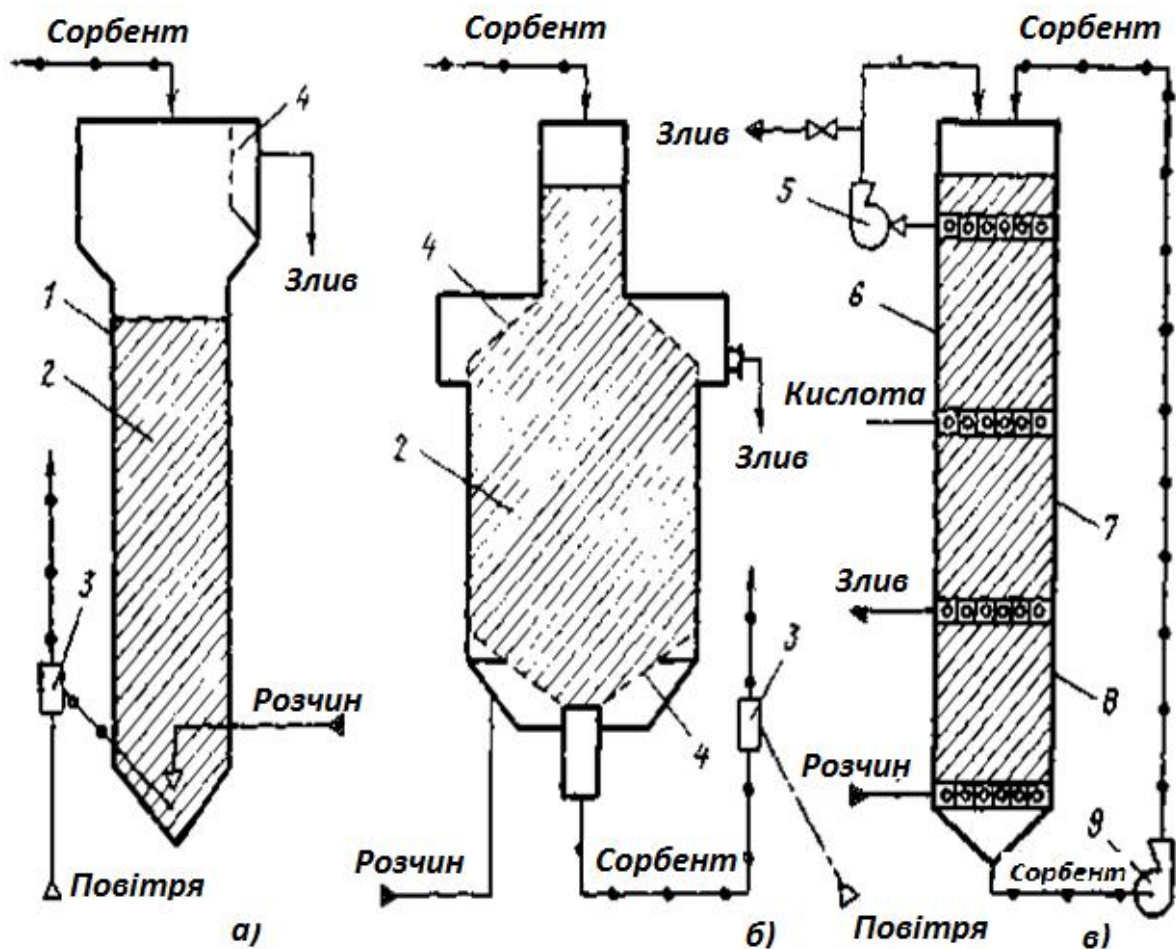


Рисунок 4.3 – Апарати з шаром іоніту безперервної дії:

а – із гравітаційним пересуванням іоніту; б – із напірним стовпом іоніту; в – із гідро тараном; 1 – корпус; 2 – шар іоніту (сорбенту); 3 – ерліфт; 4 – дренажні системи; 5 – циркуляційний насос; 6 – зона регенерації; 7 – зона промивання; 8 – зона сорбції; 9 – насос для іоніту

Його рух відбувається внаслідок обертання корпусу апарату, при якому порції іоніту перевалюються всередині витків спіралі і, постійно перемішуючись із розчином, повільно піднімаються вгору, назустріч стікає по виткам спіралі розчин. Однак такі апарати важкі у виготовленні, вимагають складного механічного приводу, займають велику площу, а їхній внутрішній об'єм використовується неефективно.

При очищенні стічних вод, забруднених зваженими речовинами, застосовують іонообмінні колони з псевдозрідженим шаром іоніту (рис. 4.4) [7]. Для визначення основних параметрів такої установки підраховують сумарну

площу перетину іонообмінних колон $S_{\text{заг}}$, м^2 , за витратою стічних вод Q , $\text{м}^3/\text{год}$, і оптимальною швидкістю фільтрування через псевдозріджений шар іоніту $v_{\text{опт}}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

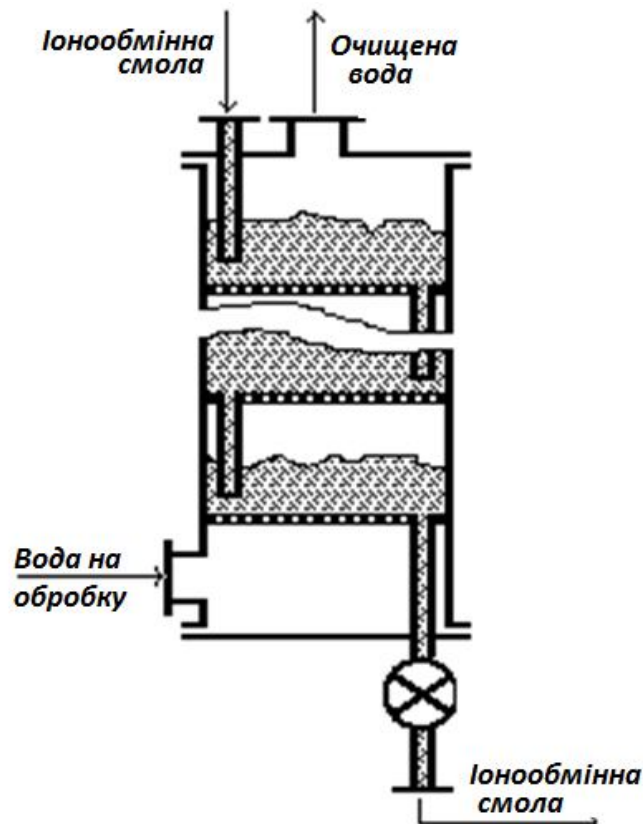


Рисунок 4.4 – Іонообмінна колона з псевдо зрідженим (киплячим) шаром іоніту

В апаратах, у яких рухається або кипить шар іоніту вдається досягти більшої швидкості процесу шляхом зняття зовні дифузійного гальмування та повніше використовувати ємність іоніту шляхом ліквідації застійних зон у шарі. Конструкції апаратів із шаром, що рухається, іоніту (рис. 4.4) становлять собою вертикальні колонні апарати із сітчастими тарілками та переливними пристроями.

Розчин, що очищається, рухається знизу нагору зі швидкістю, що забезпечує псевдозрідження шару іоніту на тарілці. Регенований іоніт безупинно подається на верхню тарілку, звідки через переливний пристрій «стікає» на нижчу тарілку й так далі. З останньої нижньої тарілки відпрацьований іоніт подається на регенерацію. Регенерацію та відмивання іоніту проводять в окремому апараті.

Запитання до розділу 4

1. Що таке іоніти, їхня будова? На яких властивостях полімерних матеріалів базується класифікація іонообмінних смол?
2. Що є кількісною характеристикою здатності іонітів до іонного обміну?
3. Назвіть види обмінної ємності.
4. Перелічіть головні властивості іонообмінних смол.
5. Від яких параметрів залежить положення іонообмінної рівноваги, яку рівновагу зображують графічно?
6. Якими стадіями описують кінетику іонного обміну?
7. Назвіть основні типи іонообмінних процесів і технологій.

5 ВИДАЛЕННЯ З ВОДИ РОЗЧИННИХ ГАЗІВ

Видалення з води розчинних у ній або утворених в процесі її обробки газів називають дегазацією. Звичайно з води доводиться видаляти вуглекислоту, сірководень, кисень і рідше метан. Перші три корозійно активних газів обумовлюють або каталізують процеси корозії металу, а діоксид вуглецю (IV) викликає корозію бетону. Метан, що виділяється з води в процесі її обробки, утворить із повітрям у приміщенні водоочисного комплексу вибухонебезпечну суміш, а сірководень надає воді неприємний захід. Крім того, при водень-катіонітовому зм'якшенні та знесоленні води, а також при знезалізованні та деманганізації підземних вод доводиться вирішувати завдання видалення вільної вуглекислоти. При підготовці живильної води, а також води теплоцентралей необхідно видаляти з її кисень із метою запобігання корозії металу. Звідси стає очевидною необхідність можливо повного видалення з води розчинених у ній газів. Існуючі методи дегазації води підрозділяють на фізичні та хімічні. Сутність фізичних методів дегазації полягає в наступному: вода, яка містить газ, що видаляється, приводиться в зіткнення з повітрям, якщо парціальний тиск цього газу в повітрі близько до нуля, створюються умови, при яких розчинність газу у воді стає мізерно малою.

Існуючі методи дегазації води підрозділяють на фізичні та хімічні. Сутність фізичних методів дегазації полягає в наступному: вода, що містить таз, що видаляється, приводиться в зіткнення з повітрям, якщо парціальний тиск цього газу в повітрі близько до нуля, створюються умови, при яких розчинність газу у воді стає мізерно малою.

За допомогою першого прийому, тобто аерації води, звичайно видаляють вільну вуглекислоту та сірководень, оскільки парціальний тиск цих газів в атмосферному повітрі близько до нуля. До другого прийому звичайно прибігають при знекиснюванні води. У цьому випадку через значний парціальний тиск кисню в атмосферному повітрі аерацією води кисень видалити не можна, тому воду доводять до кипіння, тоді розчинність всіх газів у ній падає до нуля. Для цього

застосовують або нагрівання води (у термічних деаераторах), або зниження тиску до величини, при якій вода кипить без додаткового підігріву у вакуумних дегазаторах. Для видалення з води розчинених газів застосовують кілька типів дегазаторів: плівкові з різного роду насадками, що працюють в умовах протитечії води та повітря, що подається вентилятором, барботажні, пінні, вакуумно-ежекційні, вакуумні.

5.1 Фізичні методи дегазації

У техніці водопідготовки для видалення газів (крім кисню) в основному застосовують плівкові дегазатори, а для знекиснювання води вакуумні дегазатори або термічні деаератори. Барботажні дегазатори використовують у виняткових випадках через їх порівняно високу експлуатаційну вартість (велика витрата електроенергії на компресію повітря) [5–9].

Самим поширеним типом дегазатора для глибокого видалення з води вільного діоксиду вуглецю (IV) застосовують плівковий дегазатор, завантажений кільцями Рашига. Він забезпечує найбільш стійкий ефект дегазації, довговічний, вимагає меншої площі та висоти, а також меншої витрати повітря, чим дегазатор з дерев'яною хордовою насадкою.

Схему деаератора наведено на рисунку 5.1. Вода, яку обробляють, потрапляє у верхню частину деаераційної колони (11) деаератора змішувального типу (рис. 5.1), розподіляється по площі, стікає тарілками (4), (5) донизу та при цьому розприскується. Пара подається знизу розподільником (10), проходить назустріч воді й видаляє гази. Оброблена вода збирається в баку-акумуляторі (1) із гідро-затвором (13), який підтримує постійний рівень води в баці, і подається споживачу [9].

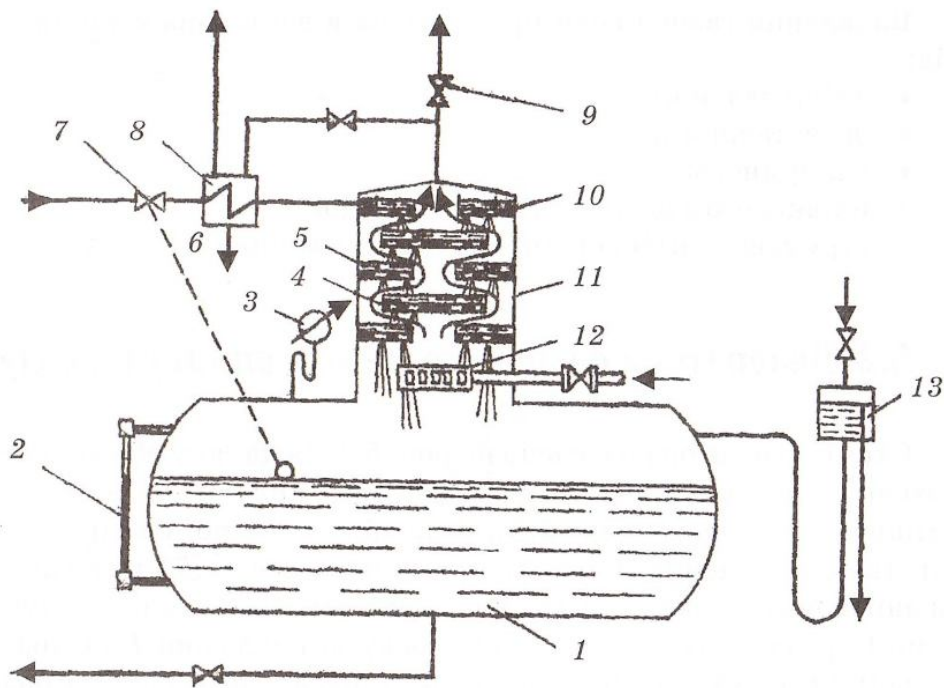


Рисунок 5.1 – Схема атмосферного деаератора змішувального типу:

1 – бак-акумулятор; 2 – мірне скло; 3 – манометр; 4,5 – тарілки; 6 – скид у дренажний бак; 7 – регулятор подавання води; 8 – охолоджувач; 9 – викид в атмосферу; 10 – розподільний пристрій; 11 – деаераційна колона; 12 – розподільник пари; 13 – гідравлічний затвор

Закордоном випускаються деаератори атмосферного тиску, передбачені для вилучення кисню й вільної вуглекислоти з живильної води парових котлів та підживлювальної води, рисунок 5.2 [9]. У деаераторі застосована двоступінчаста схема дегазації: два рівні розміщено в деаераційній колонці: 1-й рівень – струменева, 2-й – барботажна. У баку деаератора розміщений третій, додатковий, рівень у вигляді затопленого барботажного пристрою. Вода, що підлягає деаерації, подається в колонку. Тут вона послідовно проходить струменевий і барботажний рівні, де здійснюються її нагрівання та обробка паром. З колонки вода струменями стікає в бак, після витримки в якому відводиться з деаератора.



Рисунок 5.2 – Зовнішній вигляд деаeratorів марки ДА-5/2 і ДА 100/ теплоізоляцією та площадками для обслуговування

Основна пара подається в бак деаератора, вентилює паровий об'єм бака й надходить у колонку. Проходячи через отвори барботажної тарілки, пара забезпечує на ній інтенсивну обробку води (здійснюється підігрівання води до температури насичення й видалення газів). При збільшенні теплового навантаження спрацьовує гідрозатвор пароперепускного пристрою, через який пара перепускається в обвід барботажної тарілки. При зниженні теплового навантаження гідрозатвор заливається водою, припиняючи перепускання пари. З барботажного відсіку пара прямує у струминний відсік [9]. У струменях відбуваються нагрівання води до температури, близької до температури насичення, видалення основної маси газів і конденсація більшої частини пари.

Парогазова суміш (випар), що залишилася, відводиться з верхньої зони колонки в охолоджувач випару або безпосередньо в атмосферу. Процес дегазації завершується в баку деаератора, де відбувається виділення з води найдрібніших бульбашок газів шляхом відстоювання. Частина пари може подаватися через штуцер у розміщений у водяному об'ємі бака барботажний пристрій, призначений для забезпечення надійної деаерації (особливо в разі використання води з низькою бікарбонатною лужністю (0,2...0,4 ммоль/кг) та високим вмістом вільної вуглекислоти (більше 5 мг/кг) і при різких змінах навантаження деаератора).

Окремі струмені води можуть неповністю дегазуватись. Тому у двоступеневому барботажному дегазаторі (рис. 5.3) [9] додатково в нижній частині бака-акумулятора може встановлюватись дірчастий аркуш (13) із паровою коробкою (12), у яку подають барботажну пару. Ця пара додатково продуває (барботує), інтенсивно перемішує і в такий спосіб дегазує воду. Пару високого тиску подають у верхню частину бака-акумулятора (9), звідки вона проходить над водою у деаераційну колонку (6). Перегородки (2), (14) і вікно (16) забезпечують перетікання дегазованої води у зливний відсік та відведення трубою (15).

Випар в атмосферу дорівнює 2 кг/т дегазованої води. Оптимальними витратами пари на барботаж вважаються 20 кг/т води при залишковій концентрації кисню 0,01...0,02 мг/дм³.

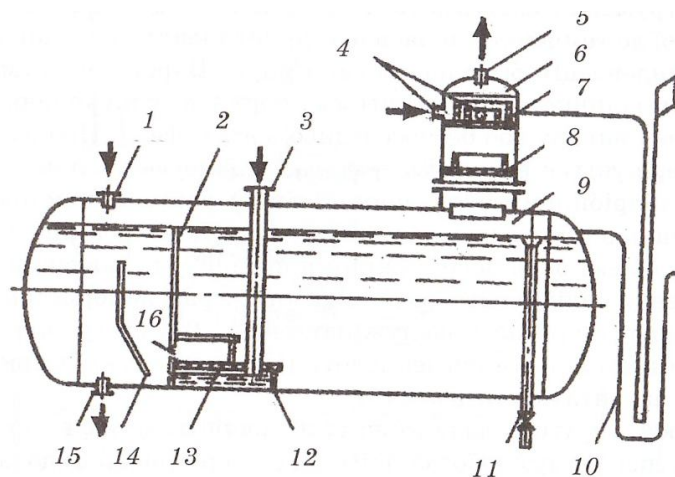


Рисунок 5.3 – Схема двоступеневого барботажного дегазатора:

1 – подавання пари під тиском; 2 –перегородка у вигляді секцій; 3 – подавання барботованої пари; 4 – подавання води; 5 – випар; 6 – деаераційна колонка; 7, 8 – верхня й нижня дірчасті тарілочки; 9 – бак-акумулятор; 10 – гідрозатвор; 11 – злив; 12 – парова коробка; 13 – дірчастий лист; 14 – перегородка; 15 – відведення води; 16 – вихідне вікно

Залежно від робочих умов, що створюються в мембранному контакторі, за допомогою цієї технології можна ефективно видаляти гази з рідин і, навпаки, насичувати рідини різними газами та їхніми сумішами або парами рідини

контактні гази. Позитивні властивості мембранної дегазації порівняно з іншими методами такі: відсутність прямого контакту фаз, низькі витрати енергоносіїв, мінімальні експлуатаційні затрати та площі, зайняті устаткуванням, універсальність процесу дегазації (видаляються всі розчинені гази), екологічна чистота виробництва, можливість глибокої дегазації води (менше ніж 5 мкг/дм³). Найперспективнішими сферами застосування контакторів є деаерація живильної води для котлів; виробництво надзвичайно чистої води для потреб мікроелектроніки; процеси дегазації при підготовці води для підживлення тепломереж. У медицині мембранні контактори застосовуються в процесах насичення крові киснем.

При живленні котлів низького тиску малої потужності, систем гарячого водопостачання можуть використовуватись вакуумні деаератори, в яких постійно підтримується вакуум. Значення вакууму залежить від температури води й збільшується зі зменшенням температури. Конструкція деаератора подібна до попередньої. Деаератори працюють при температурах, нижчих за 100 °С (від 40 °С до 70 °С), що дає змогу відмовитись від подачі пари, знизити температуру води. Проте випар в них у 2...3 рази більший за попередні, погано видаляється вуглекислота, потрібні висока герметичність, додаткове обладнання (вакуум-насоси, баки, ежектори).

Основним елементом плівкових і струменево-плівкових дегазаторів є насадка. Насадка може бути:

- шматкова (пемза, гравій, кокс, подрібнений кварц);
- шахова (цегла, поставлена на ребро);
- хордова (дерев'яні щити з дошок, які вкладаються плазом із зазором між ними);
- керамічна, зі складною геометричною формою;
- кільця Рашига (кільця з розміром 25 мм × 25 мм, 3 мм × 3 мм).

Насадка повинна мати за можливості найбільшу поверхню контакту й найбільшу поруватість, малу масу, повинна бути дешевою, затримувати

якнайбільше води, мати хімічну стійкість, механічну міцність та малий опір для проходу повітря.

Плівкові дегазатори працюють в умовах протитечії дегазованої води й повітря, яке подається вентилятором, або без примусової подачі повітря. На рисунку 5.4, *a* наведений плівковий дегазатор, завантажений кільцями Рашига [5, 9].

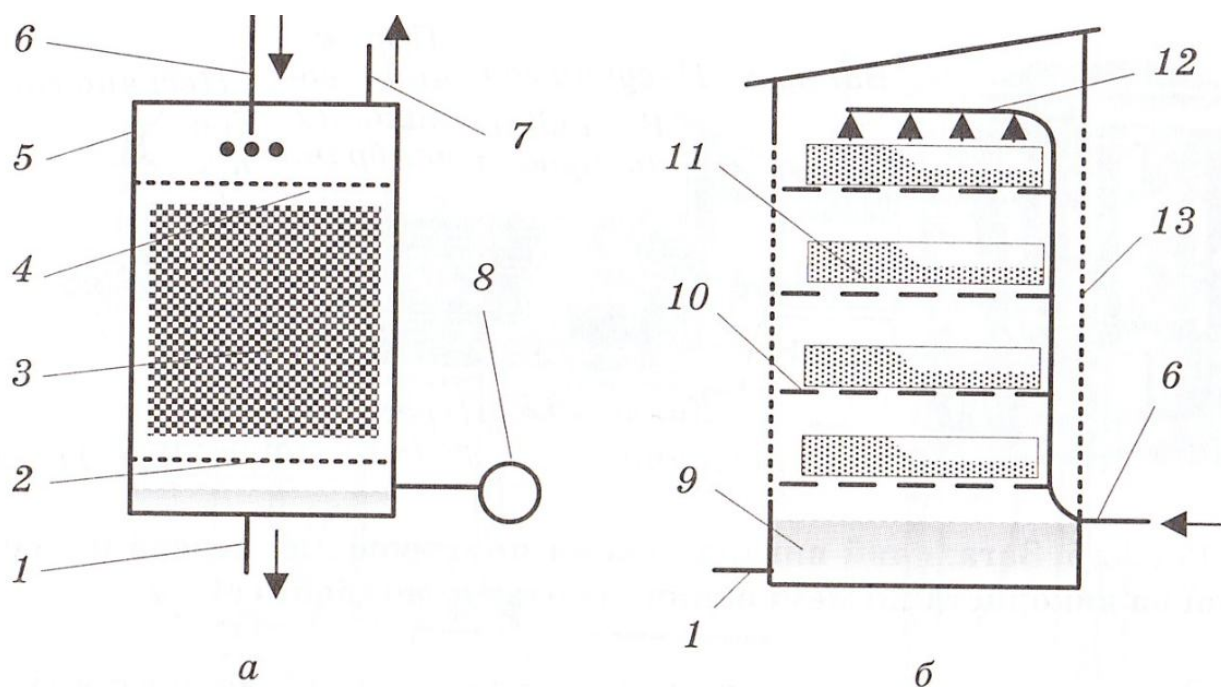


Рисунок 5.4 – Схема дегазаторів:

a – плівкового з примусовою подачею повітря; *б* – струменево-плівкового без примусової подачі повітря: 1 – відведення дегазованої води; 2 – дірчаста перегородка; 3 – насадка; 4 – плита з патрубками; 5 – корпус; 6 – подавання води на дегазацію; 7 – відведення повітря; 8 – вентилятор; 9 – резервуар; 10 – підтримувальні конструкції; 11 – короби з насадкою; 12 – трубчастий розподільник води; 13 – жалюзійна решітка

Вихідна вода трубопроводом (6) потрапляє у верхній відсік дегазатора, рівномірно розподіляється по площі плитою з короткими патрубками (4) зливу води на насадку (3), проходить її і зливається у піддон, із якого відводиться через гідрозатвор. Гідрозатвор не дає можливості виходити повітрю разом із водою. Повітря подається у піддон вентилятором (8). Над піддоном на висоті

600 мм знаходиться дірчаста перегородка, на якій і розташовані кільця Рашига. Повітря, після проходження насадки, проходить через вісім патрубків у плиті (4) і через трубу (7) виходить назовні. Патрубки для проходу повітря перекриваються зверху ковпачками, що запобігає винесенню водяних бризок. Такі дегазатори використовуються при будь-якій продуктивності для глибокого очищення від вільної вуглекислоти, сірководню, часткового видалення вільної вуглекислоти при знезалізненні води.

Замість кільця Рашига може використовуватись дерев'яна хордова насадка. Проте дегазатори з хордовою насадкою використовуються при продуктивності до 150 м³/год.

У струменево-плівкових дегазаторах (рис. 5.4, б) насадкою є гравій, кокс, шлак із розмірами шматків 30...50 мм, які вкладаються в ящики з дірчастим дном. Висота шару насадки в кожному ящику – 300...400 мм, проміжок між ними – 600 мм. Вода зверху розподіляється по площі розподільною дірчастою системою (12) і вільно стікає через насадку в резервуар. Одночасно вода продувається повітрям через жалюзійні стінки. Такі деаератори використовуються для часткового видалення вільної вуглекислоти при продуктивності установки до 50 м³/год.

У вакуумних деаераторах проходить відсмоктування газу вакуумним пристроєм з верхньої частини герметичного апарату, завантаженого кільцями Рашига. Їх використовують для видалення кисню або одночасно кисню й вільної вуглекислоти (рис. 5.5) [9].

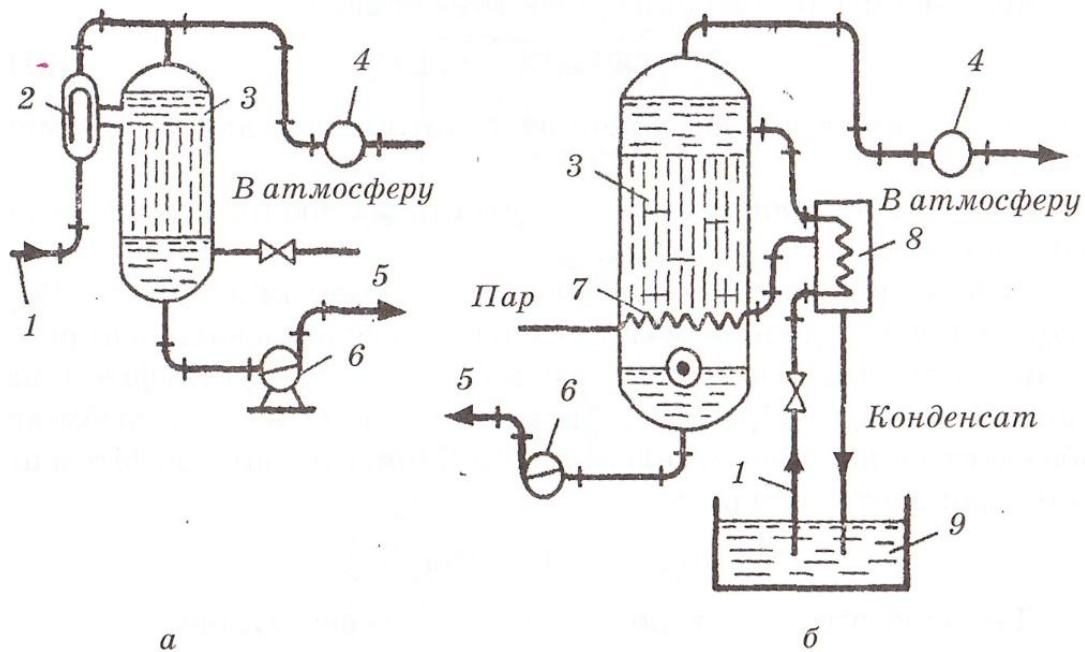


Рисунок. 5.5 – Пристрій дегазації води під вакуумом без підігріву (а) та з підігрівом (б):

1,5 – подавання й відведення дегазованої води; 2 – віддільник повітря; 3 – котел; 4 – вакуум-насос; 6 – насос; 7 – подавання пари; 8 – теплообмінник; 9 – збірний бак

Площу дегазатора визначають на основі допустимої щільності зрошення, яка залежно від глибини дегазації й типу насадки, коливається від 40 до 60 м³/(м² · год). Питомі витрати повітря становлять 15... 20 м³ повітря / м³ води.

Будівельна вартість його близька до вартості дегазаторів з дерев'яною насадкою, а експлуатаційна вартість нижче, особливо для установок великої продуктивності. Найбільше доцільно застосовувати ці дегазатори на великих установках і при великому змісті вільного діоксида вуглецю (IV) у воді, що надходить у дегазатор. На рис. 5.6, 5,7 а) наведена схема плівкового дегазатора з насадкою з кілець Рашигу, розташовуваної на проміжній дірчастій перегородці, що відстоїть від дна на відстані 600 мм [5, 9]. У піддон вентилятором подається повітря. Вода надходить у верхню частину дегазатора і рівномірно розподіляється по перетині плитою, що має 48 патрубків для зливу води в насадку та 8 патрубків з ковпаками для виходу повітря. Вода з піддонного простору проходить через

гідралічний затвор, висота якого $h = 1,2H$ (де H – максимальний напір, що розвивається вентилятором, Па).

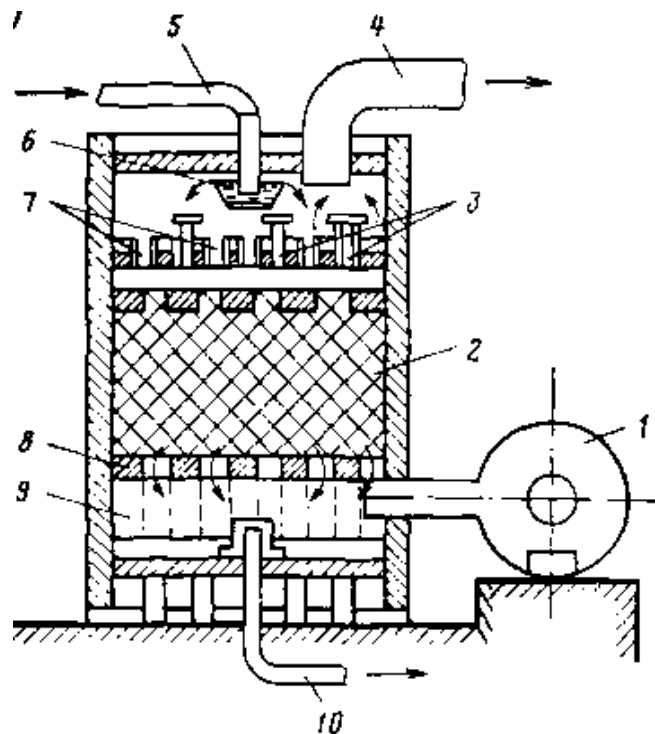


Рисунок 5.6 – Схема плівкового дегазатора з насадкою з кілець Рашигу

Після плівкового дегазатора з кільцями Рашигу та подачею повітря вентилятором вміст діоксиду вуглецю (IV) у воді становить не більше $3\text{--}5 \text{ мг/дм}^3$. При видаленні сірководню цим методом варто підкисляти воду (до $\text{pH} = 5$) з наступним підлужуванням її до необхідного значення pH , це дає значну економію витрати повітря.

Для видалення частини вільної вуглекислоти з води в процесі її деманганациї або знезалізнення (з метою підняття значення pH води до оптимального) також найбільше доцільно використовувати дегазатори, завантажені пластмасовими або керамічними кільцями Рашигу та працюючі при подачі в них повітря вентилятором або вакуумно-ежекційні апарати. Застосування вакуумних дегазаторів спеціально для видалення з води вільної вуглекислоти доцільно тільки у випадках H-Na -катіонного зм'якшення або знесолення підземних вод, коли в знесоленій або зм'якшеній воді лімітується концентрація кисню. Вакуумні дегазатори варто застосовувати при необхідності запобігання кисневої корозії труб і апаратури (при підготовці води для живлення казанів і при знекиснення води в системах гарячого

водопостачання) або коли наявність розчинених газів у воді, у тому числі й кисню, є шкідливим для технологічного процесу підприємства.

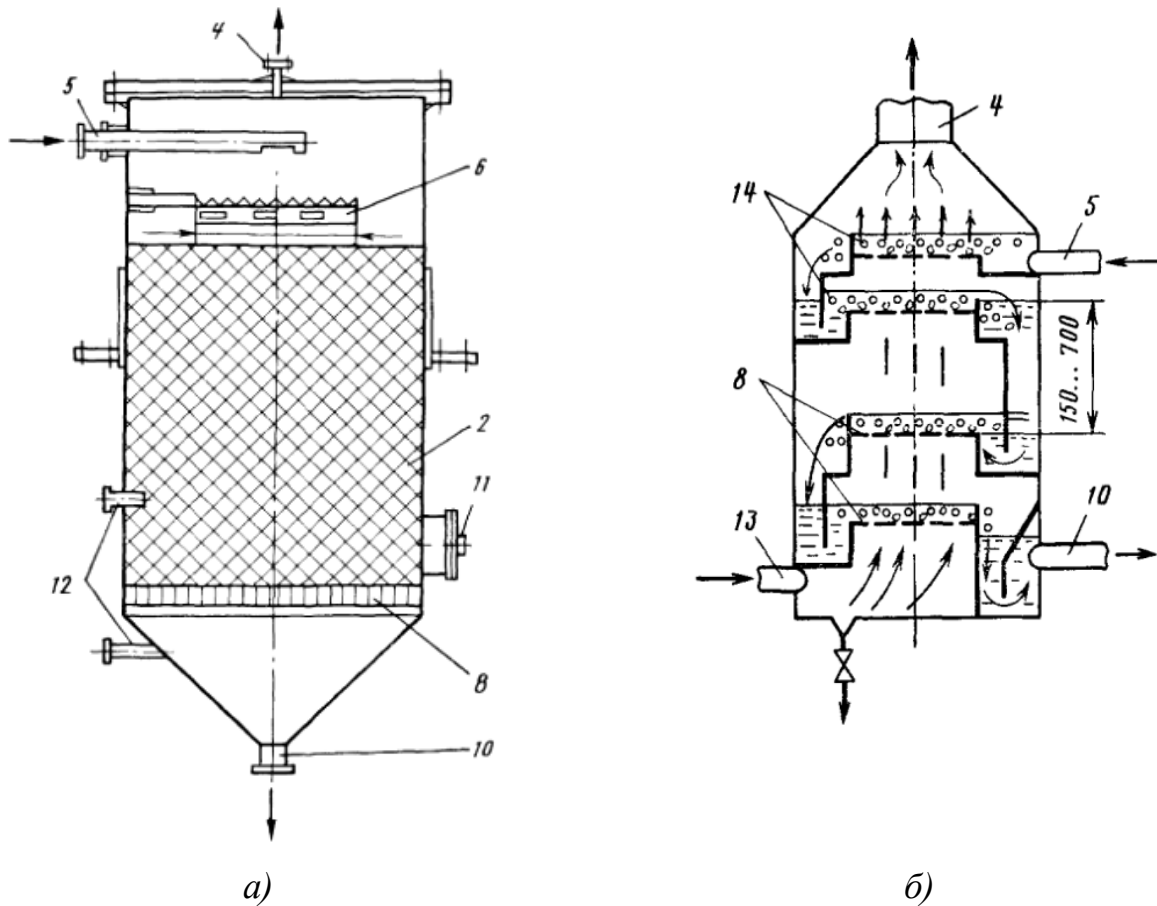


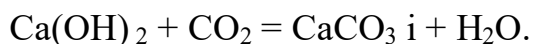
Рисунок 5.7 – Плівковий (а) вакуумний (б) і пінний (в) дегазатор:

1 – вентилятор; 2 – насадка з керамічних кілець Рашига; 3 – газовідвідний патрубок; 5, 10 – уведення вихідної й відвід дегазованої води; 7 – зрошувальні патрубки; 4 – видалення повітря; 9 – піддон; 8 – дірчасте днище; 6 – водорозподільна вирва; 11 – люк; 12 – патрубки для водомірного скла; 13 – уведення повітря; 14 – пінний шар

Для видалення з води метану або вільного сірководню також можна рекомендувати плівкові дегазатори, завантажені пластмасовими або керамічними кільцями. При водень-натрій катіонітовом зм'якшенні або аніонітовом знесоленні підземних вод для видалення вільної вуглекислоти варто застосовувати вакуумні дегазатори щоб уникнути насичення киснем.

5.2 Хімічні та біохімічні методи видалення газів

Хімічний метод передбачає зв'язування розчинених газів хімічними елементами. Так, для видалення вільної вуглекислоти можна використати вапно



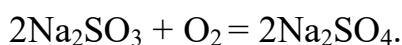
Дозу вапна (мг/дм^3) призначають за виразом

$$D_v = 2800 [\text{CO}_2] : 22 C_v, \quad (5.1)$$

де $[\text{CO}_2]$ – вміст у воді вільної вуглекислоти мг/дм^3 ; C_v – вміст CaO у вапні, %.

Прояснення проводиться у відстійниках або прояснювачах із завислим осадом та фільтрах.

Кисень видаляється обробкою води сульфідом натрію Na_2S , гідразинном N_2H_4 , фільтруванням через легко окислювальні речовини, наприклад, металеву стружку, оброблену сульфідом натрію, або оксидом сірки, фільтруванням через електронно обмінні або іонообмінні смоли. Так, при обробці сульфідом натрію проходить така реакція:



Доза сульфідату натрію розраховується за формулою

$$D = 1PR [\text{O}_2], \quad (5.2)$$

де $[\text{O}_2]$ – концентрація розчиненого кисню в воді, мг/дм^3 , P – теоретичні витрати реагенту на зв'язування 1 мг розчиненого кисню, мг .

Розчин сульфідату поглинає кисень і перетворюється в інертний сульфат. Тому при приготуванні розчину (рис. 5.8) сульфід натрію засипають на решітку в розчинник (1) через лійку (2), продувають парою для видалення повітря, заливають водою, в нижню частину подають пару для підігрівання та перемішування. Готовий розчин пропускають для очищення через фільтр і подають у дозатор [9].

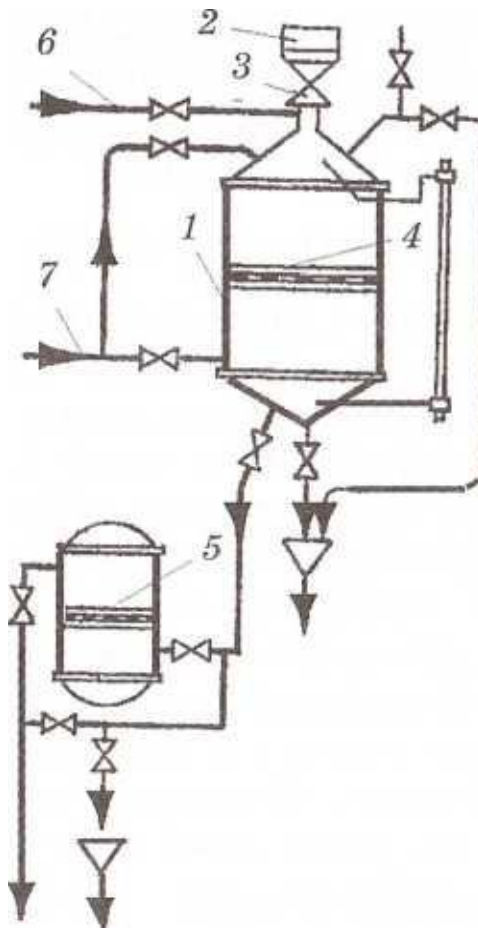


Рисунок 5.8 – Схема установки для приготування розчину сульфіту:

1 – розчинник; 2 – лійка; 3 – засувка; 4 – решітка; 5 – фільтр із тканини;
6 – подавання води; 7 – подавання пари

Додавання розчину сульфіту не потребує громіздкої апаратури, але на кожний 1 мг розчиненого кисню збільшується кількість натрію на 12 мг.

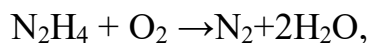
Гідразин N_2H_4 широко використовується для попередження корозії котлів високих і понад критичних параметрів.

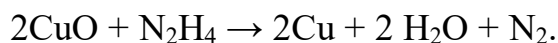
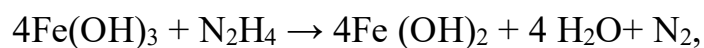
Є два типи реагентів:

1) гідразин-гідрат $N_2H_4 \cdot H_2O$, рідина без кольору, легко поглинає з повітря кисень, вологу та вільну вуглекислоту, має лужні властивості;

2) гідразин-сульфат $N_2H_4 \cdot H_2SO_4$, тверда речовина, має кислі властивості, погано розчиняється у воді.

Гідразин зв'язує кисень та відновлює оксиди металів:





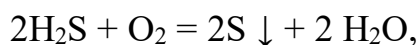
Витрати гідрозину визначаються за формулою:

$$q = 3C_1 + 0,3C_2 + 0,15C_3 \quad (5.3)$$

де C_1 , C_2 , C_3 – концентрація у воді відповідно O_2 , Fe_2O_3 , CuO .

При рН менше ніж 7 гідрозин не попереджає корозію, а при рН = 9...9,5 та температурі води близько 100 °С кисень зв'язується за 2...3 с. Гідрозин – сульфат використовується тільки для барабанних котлів, а гідрозин-гідрат – для прямооточних котлів, оскільки не збільшує сухий залишок. Реагенти дозують у воду безперервно. Розчин гідрозину отрутний, тому він повністю має розчинитися в котлі, щоб не потрапити до споживача.

Сірководень окислюється киснем повітря, хлором, озоном, перманганатом калію, оксидом хлору, зв'язують гідроксидом заліза. Під час аерації води проходить реакція



при цьому воду попередньо потрібно підкислити соляною або сірчаною кислотою до рН = 5,5, а після видалення сірководню необхідно стабілізувати воду шляхом підлогування.

Сірководень із води з рН = 6...8 можна видаляти біохімічним методом із використанням тіонових бактерій типу *Thiobacillus thioararus*. Вихідна вода подається в нижню частину реактора біохімічного окиснення, проходить знизу доверху шар гравію або щебеню крупністю 5...30 мм і завтовшки 1 м. Одночасно знизу подається повітрорудкою повітря в кількості 2...5 м³ на м³ води. Над засипкою має бути шар води в 1 м, з верхньої частини якого вода перетікає на швидкий фільтр. Вода в реакторі перебуває 0,5...1 год. Додатково у воду перед реакторами можна вводити до 3 мг/дм³ азоту й фосфору, а перед фільтрами 25...35 мг/дм³ сірчаноокислого алюмінію.

Видалення метану. Специфічні властивості метану (вибуховість) вимагають його видалення. Застосовуються фізичні й біохімічні методи

очищення води від метану. Набув поширення метод вакуумної дегазації з примусовим насиченням води повітрям або діоксидом вуглецю (CO_2) (рис. 5.9) [6, 9].

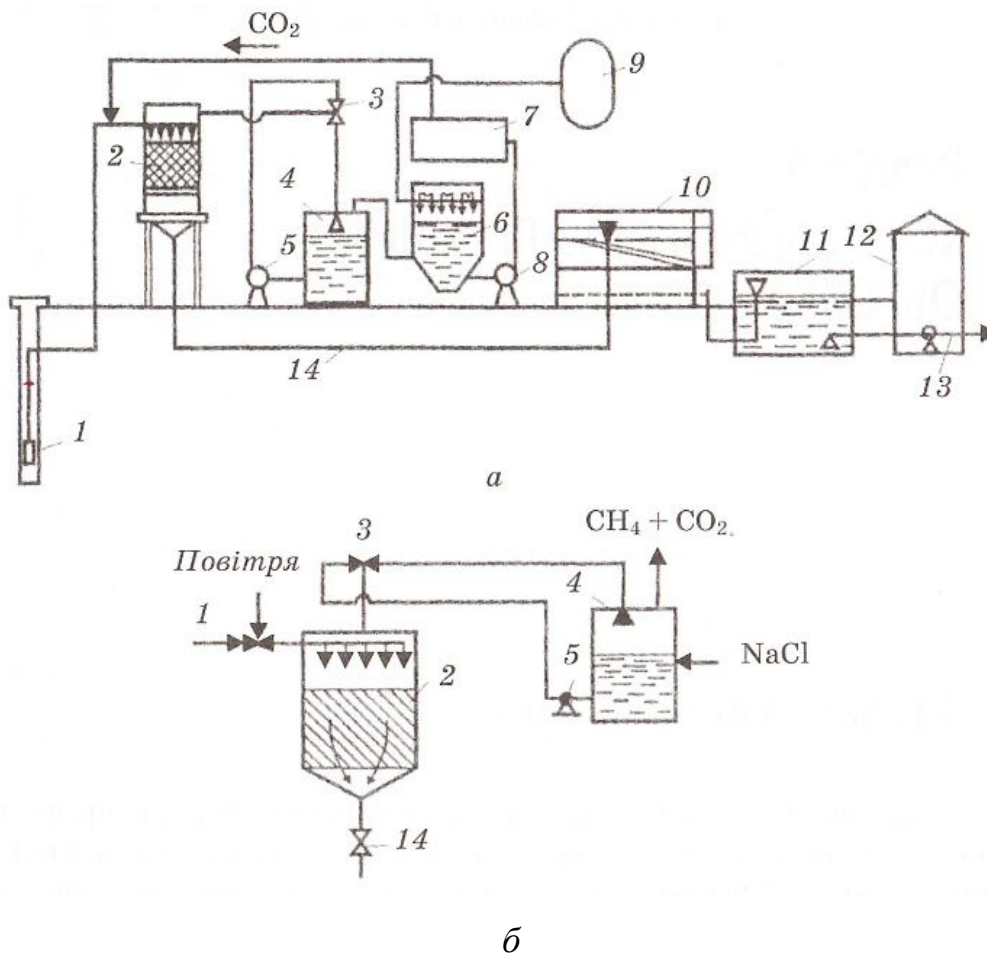


Рисунок 5.9 – Технологічна схема видалення метану з підземних вод вакуумним способом із попереднім насиченням вихідної води інертним газом (а) або повітрям (б):

1 – подавання вихідної води зі свердловини; 2 – вакуумний дегазатор; 3 – ежектор; 4 – проміжна місткість; 5 – циркуляційний насос; 6 – бак для розчинення вапна; 7 – електропіч; 8 – насос для перекачування пульпи CaCO_3 ; 9 – газгольдер для метану; 10 – фільтр; 11 – РЧВ; 12 – НС-2; 13 відведення споживачу; 14 – відведення дегазованої води

Найбільш повна дегазація досягається при розбризуванні в вакуумі і одночасному підігріві води.

Запитання до розділу 5

1. Що таке дегазація води?
2. Що означає знекиснення? Наведіть методи знекиснення.
3. Як класифікують методи дегазації води?
4. Розкрийте сутність фізичних методів дегазації.
5. Які пристрої використовують при фізичних методах дегазації?
6. У чому полягає сутність хімічних методів дегазації води?
7. Які типи дегазаторів використовують?
8. Яка насадка використовується в дегазаторах?
9. Які реагенти використовують для вилучення кисню?
10. Які реагенти використовують для вилучення вуглекислого газу?
11. Які реагенти використовують для вилучення сірководню?
12. Розкрийте сутність біохімічного методу дегазації.
13. Які методи використовують при вилученні метану з води?
14. Яких видів буває деаерація?
15. Які треба провести заходи для здійснення термічної деаерації?
16. На рисунку зображено схему деаератора атмосферного типу. Якою цифрою позначено проміжні тарілки?

6 ОПРІСНЕННЯ ВОДИ МЕТОДОМ ДИСТИЛЯЦІЇ.

ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ Й ВИЗНАЧЕННЯ

Дистиляційний метод ґрунтується на здатності води при нагріванні випаровуватися і розпадатися на прісну пару та солоний розсіл. Латинське «distillatio» означає переганяти з метою очищення або стікати краплями. Метод хронологічно є найбільш старим для опріснення води і широко застосовуваним. На сьогодні порядку 90 % існуючої сумарної продуктивності опріснювачів світу забезпечується дистиляційними установками.

Існуючі дистиляційні опріснювальні установки можна класифікувати за технологією одержання прісної води, по конструктивному оформленню, по роду застосовуваної допоміжної апаратури. Крім цього, є істотне розходження в джерелах енергії, що витрачається на роботу установки. Так, зараз уже розроблені дистиляційні установки, розраховані на використання палива копалин, сонячної, вітрової, електричної та атомної енергії. Існують і так звані утилізаційні установки, що використовують низькопотенційне непридатне тепло ТЕЦ, двигунів внутрішнього згоряння, тепло газів, що відходять, і інших видів установок.

Принцип дистиляції заснований на тому, що при нагріванні солоної води до температури більше високої, ніж температура кипіння (при даному солемісті й тиску), вода починає кипіти. Пара, що утворюється при тиску менш 50 кг/см^2 , практично не здатна розчиняти солі, тому при його конденсації виходить прісна вода. Для випару 1 кг води її необхідно нагріти до температури кипіння та потім повідомити додаткове тепло фазового переходу води в пару, так звану сховану теплоту паротворення, рівну при температурі 100°C $539,55 \text{ ккал/кг}$. Щоб отриману пару перетворити у воду, потрібно в пари відняти тепло фазового переходу ($539,55 \text{ ккал/кг}$). Значна частина цього тепла може бути повернута назад в установку, тобто рекуперована. Чим більше тепла рекуперовано, тим вище теплова економічність дистиляційної опріснювальної установки [2–6].

По характері використання тепла і ступеня його рекуперації дистиляційні опріснювальні установки підрозділяються на одноступінчасті та багаступінчасті.

Принцип роботи одноступінчастої дистиляційної опріснювальної установки полягає в наступному (рис. 6.1) [2–6].

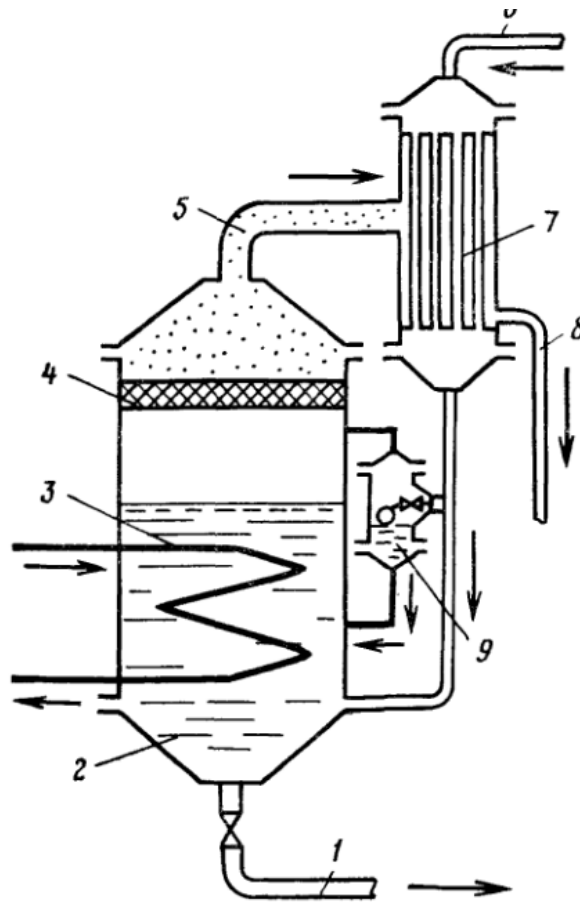


Рисунок 6.1 – Схема одноступінчастої дистиляційної опріснювальної установки:

1 – скидання розсолу; 2 – випарник; 3 – подача теплоносія; 4 – сепаратор; 5 – відвід пари; 6, 8 – подача вихідної та відвід дистильованої води; 7 – конденсатор; 9 – регулятор рівня

Вихідна солона вода подається через конденсатор – підігрівник у випарник, де за рахунок тепла пари або гарячої води, що циркулює по трубах змійовика, розташованого в шарі води, вона нагрівається та випаровується. Пар, що утворюється (який називається вторинним) надходить у конденсатор, де проохолоджується вихідною солоною водою і перетворюється в дистилат, що направляється споживачеві у вигляді прісної води. Тепло конденсації (539,55 ккал/кг) використовується для попереднього нагрівання підживлювальної солоної води випарника. Щоб виключити винос крапельок киплячої солоної води

разом з парою випарника, передбачено спеціальний пристрій, що сепарує. рівень води у випарнику підтримується за допомогою регулятора рівня. Звичайно у випарниках випарюється від 20 % до 50 % поданої солоної води. Розсіл, що залишився, періодично віддаляється з випарника. Обсяг випарника розділяють на водяний і паровий, кордон між ними називається дзеркалом випару. Відомі випарники із природною і штучною циркуляцією води, що випаровується, горизонтальні та вертикальні, працюючі під тиском пари нижче (вакуумні) і вище атмосферного.

Найбільше широко застосовують багатоступеневі випарні установки, більшою перевагою яких є те, що на одиницю первинної пари можна одержати значно більшу кількість знесоленої води.

Багатоступеневі дистиляційні опріснювальні установки (рис. 6.2) [5–7] являють собою послідовно працюючі одноступеневі дистиляційні опріснювальні установки.

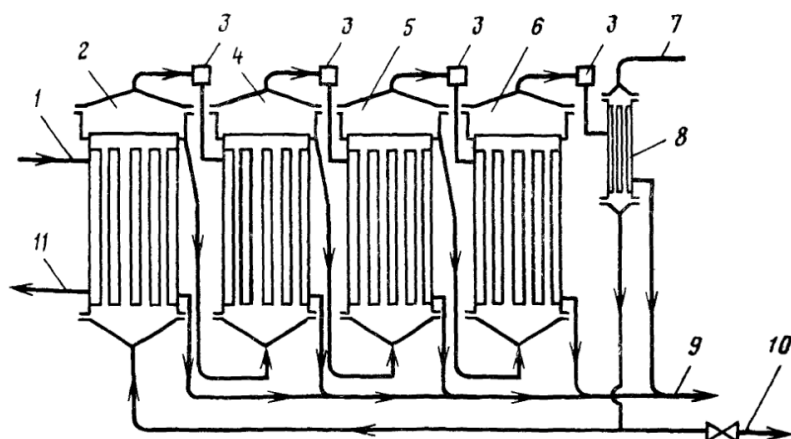


Рисунок 6.2 – Багатоступінчаста дистиляційна установка:

1 – теплоносій; 2, 4, 5, 6 – випарник I, II, III і IV ступені; 3 – сепаратор, 7, 9 вихідна й опріснена вода; 8 – конденсатор; 10 – скидання розсолу; 11 – відвід конденсату в парогенератор

За такою схемою вторинна пара попереднього ступеня використовується як гріюча пара для випару води в наступнім ступені. Солоня вода надходить у кінцевий конденсатор, де, прохолоджуючи пару останнього ступеня конденсує його, нагріваючись за рахунок тепла конденсації. Частина солоної води скидається в скид, а частина надходить на першу ступень випарника, де парою, що подається з

вихідного парогенератора, вона нагрівається до температури кипіння. Пара при цьому конденсується, і конденсат відводиться в парогенератор. Пара, що утворилася на першій ступені випарника, надходить через сепаратор у другий корпус випарника, де вона служить гріючою парою.

Солона вода, яка не випарилася в першому корпусі випарника, надходить у другий корпус, де нагрівається за рахунок тепла конденсації пари і знову частково випаровується при менших, чим у першому корпусі випарника, тиску та температурі. Якщо в першому корпусі температура кипіння становить 100 °С, то в наступних трьох щаблях відповідно 95 °С, 90 °С, 85 °С. Це досягається шляхом зниження тиску в наступних ступенях випарників. Відомо, що при зниженні тиску у випарнику нижче атмосферного температура кипіння солоної води знижується (наприклад вода закипає при температурі нижче 100 °С). Конденсат пари з кожного корпуса приділяється насосом у бак опрісненої води. Зі збільшенням числа щаблів багатоступінчасті опріснювальні установки стають більш економними. Однак, зі збільшенням числа ступенів випару зменшується температурний перепад по кожній з них, збільшується загальна поверхня нагріву апаратів і відповідно різко зростають капітальні витрати на опріснювальну установку. При роботі дистиляційних опріснювальних установок відбувається відкладення солей, які утворюють шар накипу на елементах, що гріють, випарників і конденсаторів. Накип зменшує температуру нагрівання води, погіршує теплопередачу та роботу всіх агрегатів опріснювальної установки, у зв'язку із цим повинні бути вжиті заходи по попередженню утворення накипу або її видаленню, а, отже, заздалегідь планується періодична зупинка опріснювальної установки для очищення її від накипу. Очищення робочих поверхонь від накипу здійснюється технічним, механічним і хімічним шляхом. Зниження інтенсивності накипоутворення досягають введенням в оброблювану воду дрібнозернистих присадок: вапняку, кварцового піску, крейди, гідроксиду магнію та інших речовин. Безнакипний режим роботи випарників досягається також створенням досить глибокого вакууму у випарниках, що дає можливість знизити температуру випаровується води, що, до 50 °С і нижче.

Запитання до розділу 6

1. Загальні відомості про процеси дистиляції та ректифікації.
2. Що таке дистиляція?
3. Принцип простої (одноразової) дистиляції.
4. Технологічна схема одноступінчастої дистиляційної опріснювальної установки?
5. Як утилізується розсіл випарних установок.
6. Дистиляційні методи розділення розчинів.
7. Ректифікація, фізична сутність і принцип процесу.
8. Принципова схема ректифікаційної установки.
9. Технологічний розрахунок багатоступінчаста дистиляційна установка.

7 НАКИПОУТВОРЕННЯ. ВИДИ НАКИПУ, ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ

Вода є найкращим, з відомих, універсальних розчинників. Отже, будь-яка вода, якщо тільки вона спеціальним образом не приготовлена і збережена, містить у собі різні солі. Як відомо, наявність розчинених солей у воді надає воді властивість, називана твердістю. Розрізняють твердість *тимчасову та постійну*. Тимчасова твердість – це твердість, обумовлена солями, що переходять за певних умов з розчинної – у нерозчинну форму. Зокрема, це солі кальцію Ca, магнію Mg і ін. Один зі способів усунення тимчасової твердості – нагрівання води до температури кипіння, при цьому солі тимчасової твердості переходять у нерозчинну форму і випадають в осад. Цей осад називають накипом або твердими відкладеннями.

При роботі теплообмінного устаткування (казанів, теплообмінників, випарників, охолоджувачів і т.п.) на поверхнях нагрівання утворюються відкладення накипу (CaCO_3 , MgCO_3 , CaSiO_3 , окисли заліза й ін.). Внаслідок цього погіршується теплопередача – теплопровідність накипу в десятки разів нижче, ніж у металу; знижується економічність і продуктивність устаткування – при шарі накипу в 1 мм перевитрату палива становить 2–2,5 %,

а при 5 мм – до 10–15 %. Через перегрів металу і корозії під шаром накипу скорочується термін служби металу труб, відбуваються аварії металоконструкцій теплообмінних агрегатів (свищі, розриви). Наявність кипіння на поверхні труб забезпечує надійне охолодження стінок поверхонь нагрівання казана, тому що температура металу труб з боку газів перевищує температуру кипіння води лише на 1–25 °С. Так, при розрахунковому тиску в жаротрубному казані 0,6 МПа температура насичення дорівнює 159 °С, а максимальна температура стінки металу з боку газу не перевищує 183 °С. У таких умовах строк роботи сталі – кілька десятків років [5–8].

Однак по вище викладених причинах, при погіршеній водопідготовці і одноконтурній схемі включення казанів, якщо у воді перебувають солі твердості, при кипінні води на поверхні утворюються щільні кальцієві відкладення, які істотно збільшують термічний опір стінки. Для казанів «ВК» один міліметр накипу при високих теплових потоках у жаровій трубі збільшує температуру стінки – на 100 °С – 120 °С. При товщині накипу 3 мм і більше температура металу досягає вже 500 °С і більше, при цьому вуглецева сталь втрачає свою міцність, на жарових трубах з'являються здуття, трубні ґрати поворотної камери жолобляться, а труби газотрубних пучків перегорять. Такої ж проблеми виникають при експлуатації імпортованих казанів. При типових порушеннях водопідготовки, при яких відбувається погіршення стану металу поверхонь нагрівання, утворюються тріщини в трубній дошці, перегорання труб газотрубних пучків і ін., у фіналі – повне руйнування казана. Також, по закінченні опалювального сезону доводиться виконувати трудомістку та дорогу процедуру видалення накипу з поверхні нагрівання казанів і теплообмінної апаратури. І також, накип зменшує перетин труб, збільшуючи їхній гідроопір, а це спричиняє додаткові втрати електроенергії в насосному встаткуванні на перекачування води.

Щоб виключити можливість аварій і продовжити термін служби встаткування між профілактиками, необхідно, яким-небудь образом виключити можливість утворення на теплообмінних поверхнях шару відкладень. Існують

фізичні й хімічні способи зм'якшення води. Для хімічного зм'якшення використовуваної води потрібні значні витрати на спорудження й обслуговування хімводопідготовки. Зм'якшення води за допомогою іонообмінних матеріалів або введення комплексонів у відкритих системах теплопостачання, а також при нагріванні води для гарячого водопостачання, як правило, не економічно та екологічно шкідливо. Крім того, у більшості випадків, хімічні реактиви самі сприяють руйнуванню металоконструкцій [5–8].

Ультразвуковий метод запобігання накипоутворення заснований на дослідженнях, що проводилися в Україні з кінця 50-х років. При впливі на воду ультразвукових коливань утворюється безліч постійних центрів кристалізації, що зміщуються, це ускладнює ріст і осадження кристалів накипу на теплообмінних поверхнях устаткування. Ультразвукові коливання сприяють інтенсивному утворенню нових центрів кристалізації в обсязі води й відбувається утворення шламу в масі рідини. У результаті впливу ультразвукових коливань спостерігається або припинення утворення відкладень, за рахунок порушення умов кристалізації, або розпушення накипу, що утвориться. У шарі накипу під впливом ультразвукових коливань утворюються мікротріщини, які, накопичуючись, приводять до руйнування відкладень, що були, і до очищення встаткування. Шлам видаляється зі струмом води або продувкою. Варто врахувати, що даний метод фізичний і діє на всі види солей і органічних відкладень незалежно від їхнього хімічного складу. Бажано, після теплообмінного агрегату, що захищений ультразвуковими установками, установити фільтруючий пристрій, що затримує завислий накип, щоб не засмічувати споживачів. Даний метод є найбільш ефективним і універсальним з безреагентних фізичних методів, економічний, екологічно чистий, безпечний для встаткування й персоналу.

Крім того, ультразвукові коливання роблять руйнуючу дію на накип, що утворилася раніше. Ультразвукові коливання, впливаючи на поверхню нагрівання, створюють знакозмінні механічні зусилля, під впливом яких міцність зв'язку усередині карбонатних відкладень, а також між карбонатним

відкладенням і металом порушується, і при цьому утворюються тріщини. Вода під дією капілярних сил проникає через тріщини-капіляри до поверхні нагрівання, де вона миттєво випаровується, викликаючи спучування та відшаровування карбонатних відкладень. Дрібні частки, що відшарувалися, і лусочки (чешуйки) карбонатних відкладень накопичуються у нижній частині теплообмінного встаткування та видаляються періодичною продувкою.

Дія ультразвуку не обмежується тільки запобіганням утворення карбонатних відкладень і збереженням за рахунок цього ефективності теплотехнічного встаткування. Ультразвукові коливання збільшують теплопередачу поверхні, що гріє, за рахунок мікропотоків, утворених коливаннями стінок труб і води в них, і підвищення швидкості потоку води через зниження гідродинамічного опору труб з коливними стінками. Під дією ультразвуку поліпшується відвід пухирців пари від поверхні нагрівання і дегазація води внаслідок кращого перемішування рідини на границі двох середовищ метал – рідина, що також сприяє збільшенню теплопередачі. Явище зниження гідродинамічного опору особливо ефективно проявляється у вузьких мікронних щілинах природних дефектів внутрішніх поверхонь труб, де у звичайних умовах (без ультразвуку) у теплообмінному встаткуванні зберігається кисень із повітря, а при впливі ультразвукових коливань він легко виходить із цих щілин.

У результаті цього виключається один з механізмів кисневої корозії металу труб. Тривалий вплив ультразвукових імпульсів на внутрішню поверхню труб, що має дефекти у вигляді мікротріщин, приводять до деформації найбільш податливих ділянок поверхні поблизу мікротріщин. Завдяки цим деформаціям відбувається наклеп країв тріщин, у результаті чого вони виявляються закритими й не здатними щодо проникненню в них кисню при зливі води з устаткування. Внутрішня поверхня труб стає гладкою, і повна площа її різко зменшується, що приводить до зменшення ймовірності корозії. Одержаний у такий спосіб ефект корозійного захисту в якомсь ступені заміняє пасивацію внутрішньої поверхні труб.

Запитання до розділу 7

1. Що являє собою жорсткість?
2. Чим обумовлена тимчасова жорсткість?
3. Чим обумовлена постійна жорсткість?
4. Види накипу?
5. Як позбутися накипу у технологічному процесі.
6. На що впливає накип?
7. Хімічні методи видалення накипу.
8. Фізичні методи видалення накипу.
9. Технологічний розрахунок багатоступінчаста дистиляційна установка.

8 МЕМБРАННІ ПРОЦЕСИ

8.1 Фізична сутність процесу

Мембранні процеси розподіляють на чотири групи залежно від рушійної сили процесу (рис. 8.1) [10–11]:

1. Градієнт тиску – баромембранні процеси (мікрофільтрація, ультрафільтрація, нанофільтрація, гіперфільтрація (зворотний осмос)).
2. Градієнт електричного потенціалу – електромембранні процеси (електродіаліз, електродеіонізація, мембранний електроліз).
3. Градієнт концентрації (різниця концентрацій розчиненої домішки) – дифузійномембранні процеси (мембранна дегазація, діаліз).
4. Градієнт температури – мембранна первапорація й мембранна дистиляція [2, 7, 11].

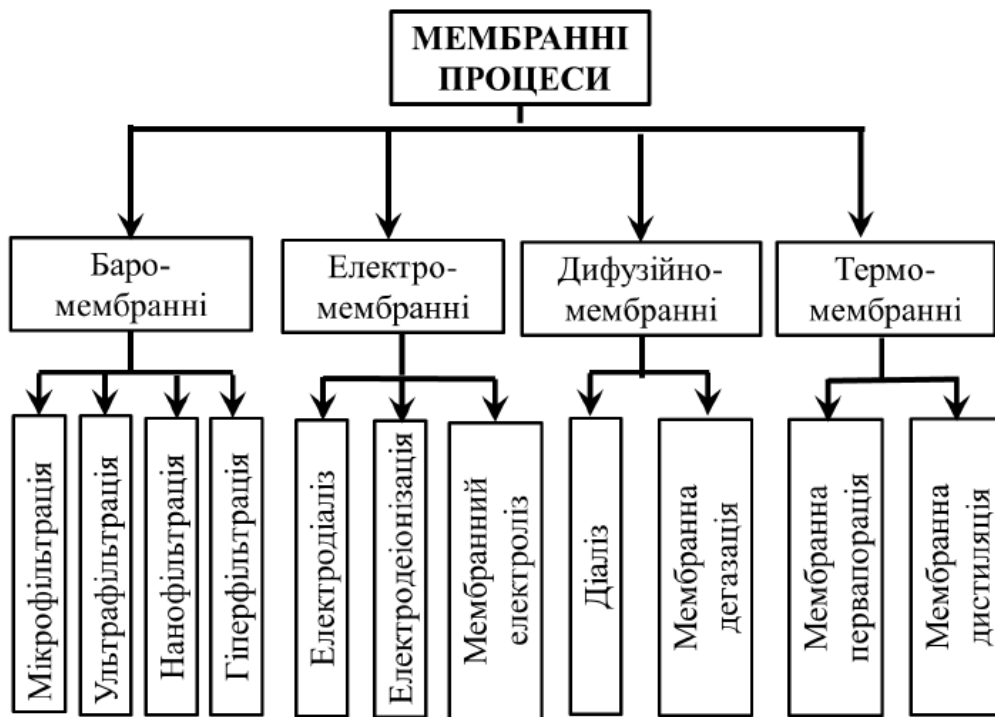


Рисунок 8.1 – Класифікація мембранних процесів

Процесами мембранного розподілу сумішей, або мембранними процесами називають поділ сумішей за допомогою напівнепроникних мембран.

Природа за мільйони років еволюції живих організмів виробила найдоцільніший метод поділу з використанням напівпроникних мембран. Учені довго прагнули пізнати й повернути на користь людини чудові властивості біологічних мембран – пропускати одні речовини й затримувати інші. Однак ідея застосування напівпроникних мембран для технологічних цілей стала реальною лише порівняно недавно у зв'язку з розвитком наших знань про походження та структуру речовин, а також новими досягненнями в різних галузях науки й, насамперед, у розробці й виробництві синтетичних матеріалів. У цей час мембранні методи інтенсивно розвиваються й використовуються у водопідготовці, в хімічній, нафтохімічній, харчовій, мікробіологічній й інших галузях промисловості. До основних мембранних методів поділу належать: *зворотний осмос, ультрафільтрація, мікрофільтрація, випаровування через напівпроникну мембрану, діаліз, електродіаліз, дифузійний поділ газів* (рис. 8.2) [11].

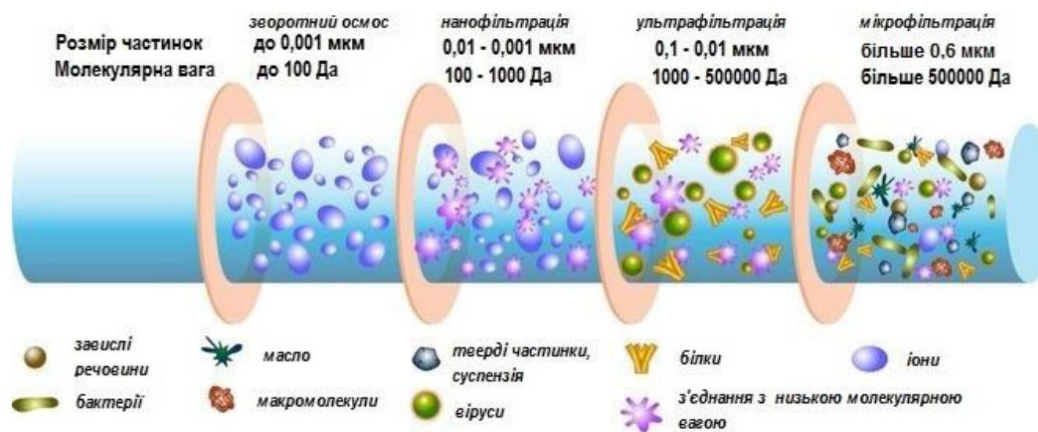


Рисунок 8.2 – Спектр фільтрування різноманітних мембранних процесів

Кожному із цих процесів властиві свої діапазони таких параметрів:

- розмір частинок, що затримуються мембраною;
- молекулярна маса частинок, що затримуються;
- розмір пор мембрани;
- величина робочого тиску;
- питома продуктивність мембран.

Основні сфери застосування мембранних процесів у сучасній водопідготовці такі:

- очищення води з поверхневих джерел, що може бути як попередньою підготовкою для подальшого доочищення, так і самостійною технологією;
- різноманітні технології очищення стічних вод;
- підготовка питної води з різних джерел.
- підготовлення води для харчових виробництв, виробництв безалкогольних та алкогольних напоїв;
- одержання глибокознесоленої води для потреб різних галузей промисловості – енергетики, мікроелектроніки, фармацевтичних виробництв.

Відмінною рисою всіх мембранних процесів є простота апаратного оформлення, можливість здійснювати процеси при температурі навколишнього середовища, безреагентність, економічність.

Процеси мембранного поділу характеризуються двома основними параметрами: проникністю G і селективністю ϕ .

Минулий через мембрану продукт прийнято називати *перміатом*, а розділену суміш, що залишився перед мембраною, – *ретантом* (або концентратом).

Проникність G (кг/м² с), або питома продуктивність характеризує кількість перміата W (кг/с), отриманого при конкретній рухомій силі в одиницю часу τ (с) з одиниці поверхні F мембрани, м²:

$$G = \frac{W}{F\tau}. \quad (8.1)$$

Селективність φ (%) характеризує ефективність процесу мембранного поділу

$$\varphi = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \cdot 100 \%, \text{ або } \varphi = \left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right) \cdot 100 \%, \quad (8.2)$$

де c_1 – концентрація компонента, що розподіляється, у вихідній суміші;

c_2 – концентрація компонента, що розподіляється, у перміаті.

8.2 Мембрани й мембранні елементи

Мембрана – розділювальна перегородка між фазами, для якої властива напівпроникність – здатність пропускати одні речовини й залишатися непроникною для інших.

Баромембранним методам властиві два механізми затримання домішок мембраною та перенесення через неї розчинника:

- ситовий (механізм виключення за розміром);
- дифузійний.

Перебіг процесу за тим чи іншим механізмом обумовлено будовою бар'єрного шару мембрани. У разі пористої мембрани спостерігається ситовий механізм, за якого мембрана затримує частинки домішок, які мають розміри більше діаметра найбільших пор мембрани; водночас усі частинки менших розмірів вільно проникають через мембрану. Ситовий механізм властивий мікрофільтрації та ультрафільтрації.

У випадку ситового механізму масоперенесення розчинника через мембрану можна розглядати як протікання рідини через отвори пор під дією

різниці тисків, яке описується рівнянням Хагена – Пуазейля для пористих мембран [11]:

$$J = \frac{N \cdot \pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \eta \cdot \delta}, \quad (8.3)$$

де J – об’ємний потік через мембрану;

N – число пор на одиницю площі мембрани;

R – радіус пори;

ΔP – різниця тисків по обидві сторони мембрани;

δ – товщина мембрани;

η – в’язкість розчинника.

Для процесів із використанням непористих мембран (нанофільтрація, зворотний осмос) запропоновано механізм розчинення-дифузії, що описує процес перенесення речовини як розчинення кожного компонента суміші в мембрані з подальшою дифузією розчиненої речовини через мембрану, того ж інтенсивність і напрямок перенесення залежить від різниці хімічних потенціалів даного компонента по обидві сторони мембрани. У випадку дифузійного механізму процес перебігає через такі стадії:

1. Адсорбція проникаючого компонента на поверхні мембрани.
2. Розчинення компонента в мембрані.
3. Дифузія компонента в матеріалі мембрани.
4. Виділення компонента на іншій стороні мембрани.
5. Десорбція компонента з поверхні мембрани в об’єм.

Загалом будь-яка стадія може бути лімітуючою, тобто визначати інтенсивність перенесення. Найчастіше це буває третя стадія – дифузія, але іноді варто брати до уваги й другу стадію – розчинення компонента в матеріалі мембрани.

Також баромембранні процеси відрізняють способом організації фільтрації через мембранну перегородку. Існують два типи фільтрації, що розрізняють за напрямом руху потоку води відносно мембрани (рис. 8.3):

– тупикова;

– тангенціальна.

У випадку тупикової фільтрації весь об'єм води, яку очищають, під впливом тиску проходить через мембрану, а домішки затримуються на мембрані й поступово накопичуються на ній в значних кількостях. Така фільтрація властива для мікрофільтрації та ультрафільтрації.

У разі тангенціальної фільтрації потік води, яку очищають, проходить над мембраною паралельно її поверхні. При цьому під дією прикладеного тиску частина води проходить через мембрану, створюючи потік очищеної води, – перміату, а залишок води з усім об'ємом затриманих домішок створює потік концентрату. Тангенціальна фільтрація характерна для нанофільтрації та зворотного осмосу [10–11].

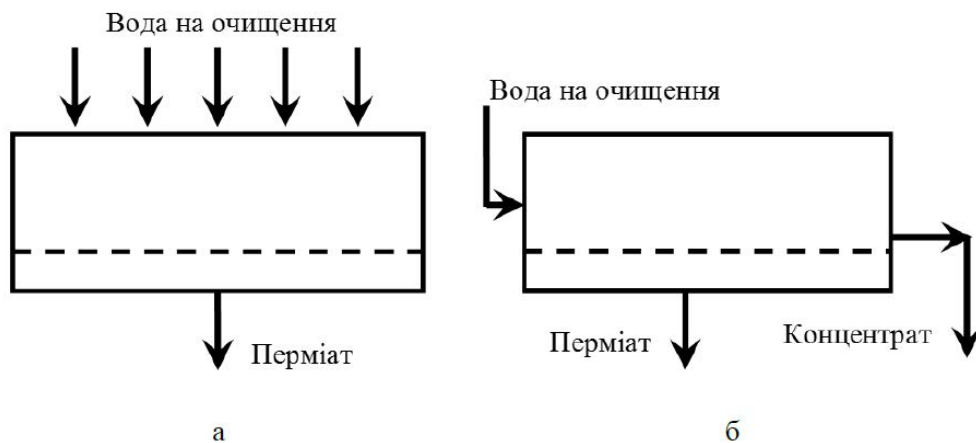


Рисунок 8.3 – Схеми напрямку руху потоку води відносно мембрани:

а – тупикова; б – тангенціальна

За будовою мембранного полотна існуючі мембрани поділяють на три типи (рис. 10.4) [8, 9, 11]:

- ізотропні (симетричні);
- анізотропні (асиметричні);
- композитні.

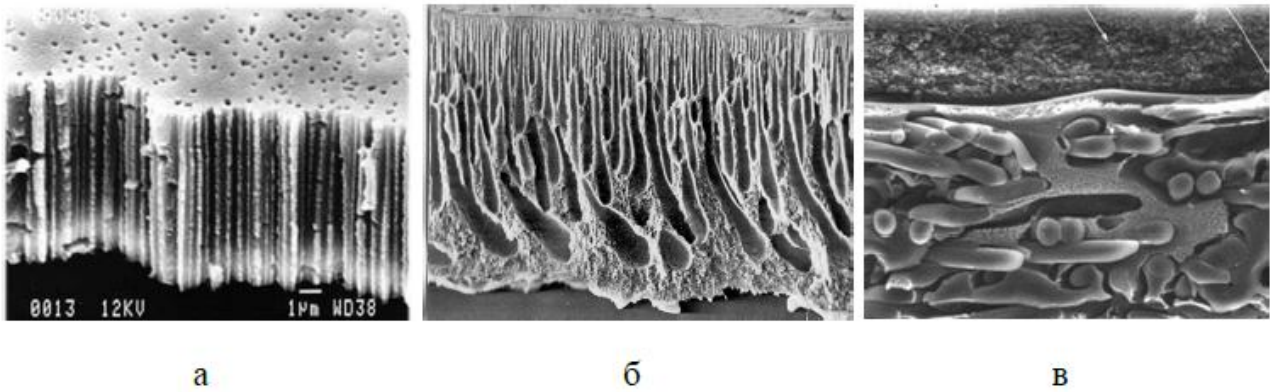


Рисунок 8.4 – Структура мембран
 а – ізотропна; б – анізотропна, в – композитна

Ізотропні характеризують сталим перетином пор по всій їхній глибині, до того ж пори утворені частинками або волокнами матеріалу мембрани й можуть мати циліндричну або невизначену форму.

Анізотропним мембранам властива поступова зміна діаметру пор – діаметр пор поступово зростає від тонкого робочого шару (5...10 % від загальної товщини) робочого шару до підтримуючого шару мембранного полотна, і саме робочий шар визначає властивості мембрани, а підтримувальний шар виконує лише функцію опори для робочого шару.

Ізотропні й анізотропні мембрани виготовлені з одного матеріалу.

Композитна мембрана складається з декількох шарів, виготовлених з різних матеріалів.

Композитна мембрана, як правило, є ультратонким шаром (УТШ) однієї речовини, розташованим на пористому шарі іншої речовини. Можна сказати, що сьогодні майбутнє мембранної технології пов'язують із розвитком композитних мембран, кількість яких вже зараз дуже велика.

Переваги композитних мембран такі:

- розділювальний шар і пориста підкладка одержані з різних матеріалів, звідси широкий вибір варіантів компонування мембрани;
- одержання шарів окремо полегшує формування оптимальної внутрішньої структури кожного шару;

– поєднання високих масообмінних характеристик розділювального шару з високими фізико-механічними властивостями підкладки різко підвищує технологічні параметри мембран і розширює сферу їх застосування;

– мала витрата дорогих і дефіцитних матеріалів на формування ультратонкого шару знижує вартість мембрани.

Серед полімерних матеріалів для виготовлення мембран найбільшого поширення набули:

– ацетати целюлози – для мембран зворотного осмосу;

– поліетилен і поліпропілен – для підкладки в композитних мембранах або для мембран мікрофільтрації;

– політетрафторетилен (ПТФЕ) – для мембран мікрофільтрації;

– полісульфон (ПС) і поліефірсульфон (ПЕС) – для мембран мікрофільтрації та ультрафільтрації;

– полівініліденфторид (ПВДФ) – для мембран ультрафільтрації;

– ароматичний або аліфатичний поліамід – для виготовлення бар'єрного шару мембран зворотного осмосу.

Як підкладки для композитних мембран використовують тканини, папери, неткані шари з природних і синтетичних волокон, пористі плівки й волокна з пластмас, пористі вироби з металів, скла, кераміки, вже готові різні мікрофільтраційні та ультрафільтраційні мембрани.

Методи формування ультратонкого шару можна розподілити на дві групи:

– фізичні (лакування, просочення, нашарування, поливання, напилення, осадження, різні види термооброблення тощо);

– хімічні (полімеризація, прищеплена сополімеризація, міжфазна поліконденсація, радіаційне зшивання, плазмова полімеризація тощо).

Для практичного застосування мембранне полотно оформлюють у вигляді мембранних елементів.

Переважно використовуються чотири основних типи модульних проєктів:

1. Трубчасті – тонкостінні трубки діаметром 5...20 мм із полімерів, пористої кераміки, металів (рис. 8.5) [10–11]. Переваги – можливість очищення розчинів із великою кількістю колоїдів, високомолекулярних речовин, суспензій; недолік – мала площа активної поверхні. Трубчасті модульні проєкти можуть бути тупикової та тангенціальної фільтрації. Використовують у процесах мікрофільтрації та ультрафільтрації.

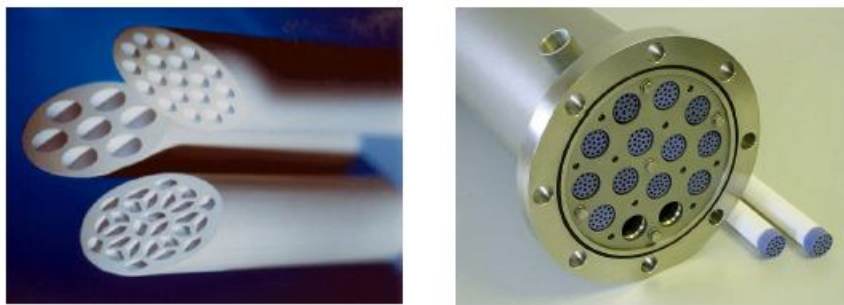


Рисунок 8.5 – Трубчасті модульні проєкти

2. Плівкові (пластинчасті) – пакет мембранних елементів, затиснутих між двома цільними плитами.

3. Порожнистоволоконні. Мембранний елемент є корпусом, у який покладено пучки з безлічі порожніх волокон (рис. 8.6). Використовують у процесах мікрофільтрації та ультрафільтрації.

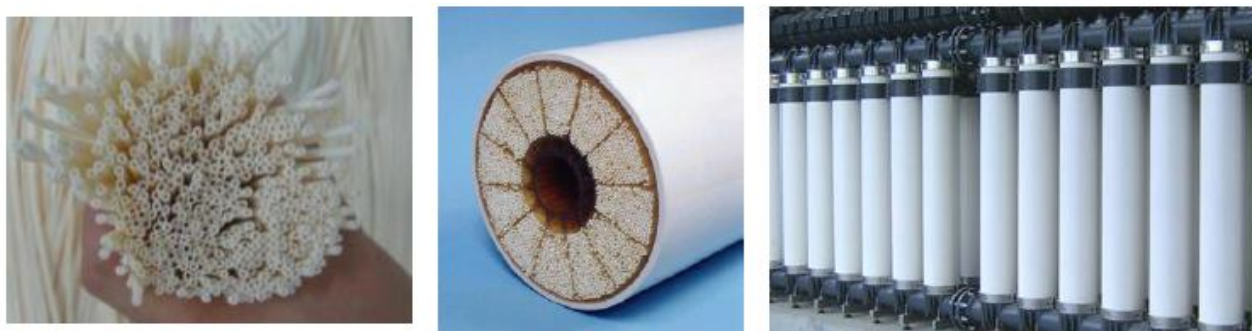


Рисунок 8.6 – Порожнистоволоконні модульні проєкти та їхні компонування

4. Рулонні (спіральні) – склеєні з трьох сторін прямокутники з композитних мембран (рис. 10.7). Незаклеєною стороною приєднані до перфорованої труби для збирання перміату та скручуються в спіраль. Між пакетами прокладена розділова сітка (спейсер), уздовж якої протікає вода, яку

очищують. Сітка турбулізує потік, сприяючи перемішуванню та покращуючи видалення домішок потоком. Усередині пакета також знаходиться спейсер перміату. Конверти мембрани разом зі спейсером згорнуто в тугий рулон і зафіксовано. Недолік – чутливість до наявності механічних домішок.

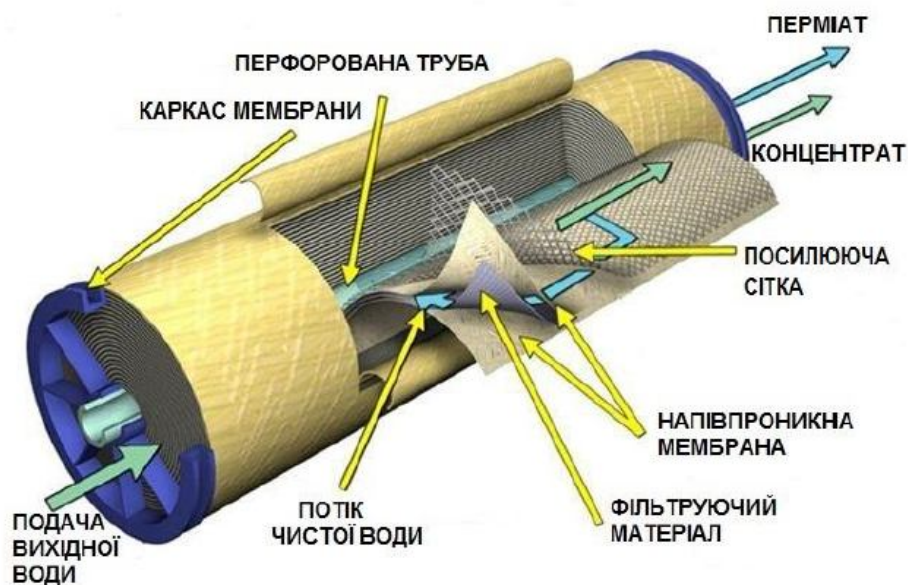


Рисунок 8.7 – Рулонний (спіральний) модульний проєкт

Трубчасту й пластинчасту моделі відносять до початкового періоду мембранної технології. Обидва ці проєкти знаходять застосування в харчовій промисловості (наприклад, концентрування молока для виробництва сиру, концентрування томатного соку) і в концентруванні під час оброблення стоків. Ці проєкти рідко конкурують зі спіральними і волокнистими моделями під час опріснення та є додатком для очищення води.

8.3 Мікрофільтрація та ультрафільтрація

Мікрофільтрація та ультрафільтрація – це процеси мембранного розділення, під час яких відбувається фільтрування рідини під дією різниці тисків до та після мембрани. Мембрани, які використовують у цих методах, є пористими перегородками з певними розмірами пор. Незважаючи на те, що ці технології належать до технологій видалення завислих та колоїднодисперсних

частинок, доцільно їх розглядати спільно з усіма мембранними процесами [8, 10–11].

Механізм розділення ґрунтується на «ситовому» ефекті – відбувається селективне видалення всіх частинок з розмірами більше розміру пор мембрани. Частинки, розмір яких перевищує розмір пор мембрани, затримуються мембраною. Більша частина води й частинки, розміри яких менші максимального розміру пор, проходять через мембрану, утворюючи перміат. Сольовий склад води при цьому зберігається незмінним.

Технології мікрофільтрації та ультрафільтрації ґрунтуються на використанні пористих мембран з діаметром пор від 0,1 мкм до 10 мкм у випадку мікрофільтрації та від 0,01 мкм до 0.1 мкм у разі ультрафільтрації. Діаметр пор мембран визначає домішки, які видаляються за допомогою цих технологій.

Так, мікрофільтраційні мембрани затримують завислі речовини, великі колоїдні частинки та бактерії. При цьому мембрана вільно пропускає віруси, органічні речовини, розчинені іони й гази.

Ультрафільтраційні мембрани затримують усі колоїди, протеїни, мікробіологічні елементи й великі органічні молекули. Усі розчинені солі й невеликі молекули проходять через мембрану.

Мікро- та ультрафільтрація як технології підготовки води мають низку переваг перед традиційною фільтрацією:

- ефективно видалення домішок колоїдного ступеня дисперсності;
- ефективно видалення мікробіологічних домішок;
- відсутність ймовірності проскакування домішок в очищену воду;
- значно менші площі, які займають установки;
- менші витрати води на власні потреби.

Основними типами мембран для мікрофільтрації та ультрафільтрації є неорганічні мембрани з керамічних матеріалів або металів, а також пористі полімерні мембрани з поліетилену та поліпропілену, політетрафторетилену

(ПТФЕ), полісульфону (ПС), поліефірсульфону (ПЕС) та полівініліденфториду (ПВДФ).

Найважливішими характеристиками таких мембран є механічна міцність, розміри пор, хімічна стійкість та ступінь змочуваності (показник гідрофобності або гідрофільності).

Механічна міцність, яку характеризують як міцність на розривання або як еластичність мембранного полотна або волокна, є важливим показником, який показує, наскільки легко матеріал мембрани здатний переносити вплив тиску води. Найповнішими на цей час є мембрани з ПВДФ.

Хімічна стійкість матеріалів мембран указує на те, який спектр вод можна оброблювати за допомогою цієї мембрани, а також – наскільки інтенсивно можна проводити хімічні промивання мембран.

Основними показниками хімічної стійкості є інтервал рН і стійкість до впливу активного хлору. Значення цих показників приводять в специфікаціях мембранних елементів.

Показник гідрофобності або гідрофільності матеріалу мембрани вказує на те, як інтенсивно мембрана пропускає воду. Гідрофільні мембрани легко змочуються та пропускають воду, але також легко можуть бути забруднені відкладеннями домішок вихідної води. Гідрофобні мембрани стійкіші до забруднення, але мають меншу питому продуктивність. Останнім часом для виробництва мембран використовують гідрофілізовані полімери, наприклад, гідрофілізований ПВДФ (H-PVDF) [8, 11].

Найрозповсюдженіші такі форми мембран для мікрофільтрації та ультра-фільтрації, як трубки та порожні волокна, описані вище.

Для таких форм мембран можливі два основних варіанта фільтрації:

1) якщо розділювальний шар знаходиться на внутрішній поверхні волокна, то оброблювана вода подається всередину волокна (трубки), а фільтрат відводиться назовні – так званий спосіб фільтрування «зсередини назовні»;

2) якщо розділювальний шар знаходиться на зовнішній поверхні волокна (трубки), то оброблювана вода подається назовні волокна, а фільтрат збирається у внутрішньому каналі – так званий спосіб фільтрування «ззовні всередину».

Переваги способу фільтрування «зсередини назовні»:

- можливість забезпечити високі значення витрати потоку фільтрату під час зворотного промивання, що сприяє ефективному очищенню поверхні від забруднень;

- можливість регулювання швидкості потоку в каналі волокон із метою оптимізації гідродинамічного режиму для зниження утворення осаду на поверхні;

- можливість режиму рециркуляції вод з високим вмістом завислих частинок.

Недоліки такого способу: менша площа фільтрування та знімання фільтрату з одного волокна порівняно зі способом фільтрування «ззовні всередину» і, відповідно, вищі витрати енергії.

Переваги способу фільтрування «ззовні всередину»:

- більша площа фільтрування і, відповідно, вище знімання фільтрату з одного волокна; як наслідок – необхідний менший тиск води, що знижує енергозатрати;

- компактність установок, оскільки мембранні елементи не завжди повинні знаходитися у корпусах (насамперед у випадку безнапірного фільтрування).

Недоліки цього способу фільтрування:

- порівняно низька витрата фільтрату в процесі зворотного промивання, що утруднює якісну регенерацію мембрани й може приводити до скорочення робочого циклу;

- неможливість забезпечити однорідний характер омивання мембран водою, яку очищують, що приводить до нерівномірного відкладення осаду на поверхні і, як наслідок, обмеження граничного вмісту завислих домішок у воді.

За способом організації процесу та забезпечення рушійної сили – різниці тисків – мікрофільтрацію та ультрафільтрацію підрозділяють на занурювальну (вакуумну) і напірну.

Рушійна сила вакуумної фільтрації виникає на мембрані в процесі створення розрядження на лінії фільтрату. Модулі, які для цього використовують, є безкорпусними касетами з блоків порожніх волокон, трубок або плоскорамних елементів, які занурюють у ємності з водою, яку очищують. В процесі фільтрування насос створює вакуум всередині волокон або трубок і відкачує перміат із модулю.

Недоліком цього методу є обмеженість робочого трансмембранного тиску і тому менші значення питомого знімання, але такий спосіб дає змогу обробляти води з високою каламутністю.

У процесі напірного фільтрування воду нагнітають насосом, і саме тиск води, яку очищують, забезпечує перебіг процесу розділення. Приклад принципової технологічної схеми напірної ультрафільтраційної установки наведено на рисунку 8.8 [11]. На рисунку 8.9 наведено приклад установок ультрафільтрації [11].

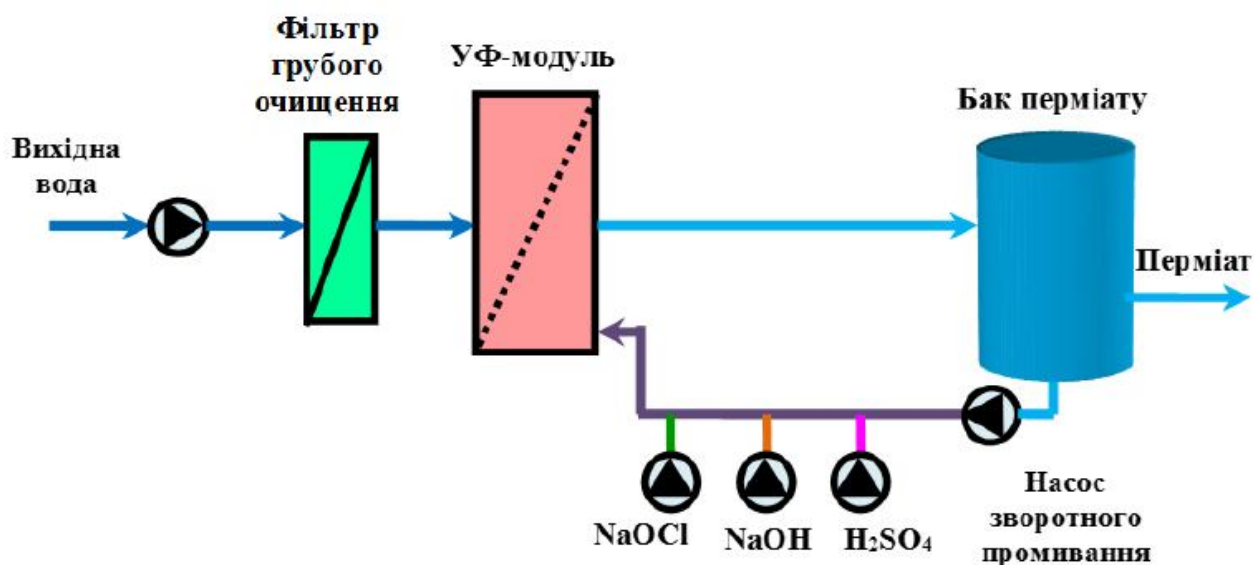


Рисунок 8.8 – Принципова технологічна схема ультрафільтрації, яка працює у режимі тупикового фільтрування зі зворотним промиванням фільтратом

У процесі фільтрації відкладення домішок, які утворюються, будуть приводити до зростання трансмембранного тиску. У разі досягнення певного значення цього показника відбувається промивання мембранного елемента зворотним потоком води.



Рисунок 8.9 – Установки для ультрафільтрації

Отже, відновлення властивостей порожнистоволоконних мембран у процесі експлуатації є необхідним етапом роботи установок мікрофільтрації та ультрафільтрації.

Для фізичного усунення домішок із поверхні мембрани використовують зворотне промивання. У випадках, коли зворотне промивання неефективно видаляє домішки, використовують промивання з застосуванням хімічних реагентів, які руйнують або розчинюють домішки, що нагромадилися. Як реагенти зазвичай використовують розчин натрію гідроксиду концентрацією 0,5...2,0 мг/дм³ та розчин хлоридної кислоти концентрацією до 2 мг/дм³.

Сфера застосування мікрофільтрації та ультрафільтрації достатньо широка й включає переважно такі напрямки:

- очищення вод поверхневих джерел;
- MBR – мембранний біореактор для очищення стічних вод;
- передпідготовки води перед зворотним осмосом та іонним обміном;
- кондиціонування мінеральних і питних вод;

– оброблення господарсько-побутових і промислових стоків.

Зворотний осмос. Зворотний осмос є одним із методів мембранного розділення, який застосовують найчастіше. Його широко використовують для знесолення (демінералізації) усіх типів вод в установках різної продуктивності.

Нанofільтрація є мембранним процесом, схожим зі зворотним осмосом. Відмінністю є селективність до багато- та однозарядних іонів, а також до органічних речовин. Так, якщо мембрани зворотного осмосу мають високу селективність відносно всіх іонів, то нанofільтраційні мембрани високоселективні відносно іонів кальцію, магнію, сульфат-іонів та інших багатозарядних іонів, однак порівняно проникні для однозарядних іонів – натрію, калію, хлоридів, нітратів тощо.

Отже, зворотний осмос – технологія знесолення води, а нанofільтрація – безреагентна технологія зм'якшення води й видалення органічних домішок.

Для зрозуміння перебігу процесу зворотного осмосу необхідно, насамперед, розглянути процес осмосу – довільного проникнення у розчин розчинника крізь напівпроникну мембрану.

Явище осмосу можна спостерігати, якщо чисту воду й розчин помістити в закриту посудину з різних боків від напівпроникної мембрани, яка пропускає тільки молекули води. За таких умов молекули води будуть проникати в розчин, зменшуючи його концентрацію (рис. 8.10, а). Завдяки замкненості посудини тиск у зоні розчину буде зростати, а в зоні чистої води – знижуватися. Так буде відбуватися доти, доки утворена різниця тисків не компенсує енергетичні вигоди від розведення розчину. Система прийде в стан рівноваги (рис. 8.10, б). Різницю тисків (висот стовпів рідини) в двох зонах називають осмотичним тиском розчину.

Осмотичний тиск розчину залежить від концентрації розчинених домішок відповідно до рівняння Вант-Гоффа [6, 10, 11]:

$$\pi = \phi \cdot R \cdot T \cdot C, \quad (8.4)$$

де π – осмотичний тиск розчину;

C – молярна концентрація розчинених домішок; φ – коефіцієнт осмотичного тиску;

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура.

Якщо надлишковий тиск із боку розчину перевищить величину осмотичного, молекули води почнуть переходити із зони розчину в зону чистої води, тобто потік води буде протилежним потоку в процесі осмосу (рис. 8.10, в) [11]. Таке явище отримало назву зворотного осмосу.

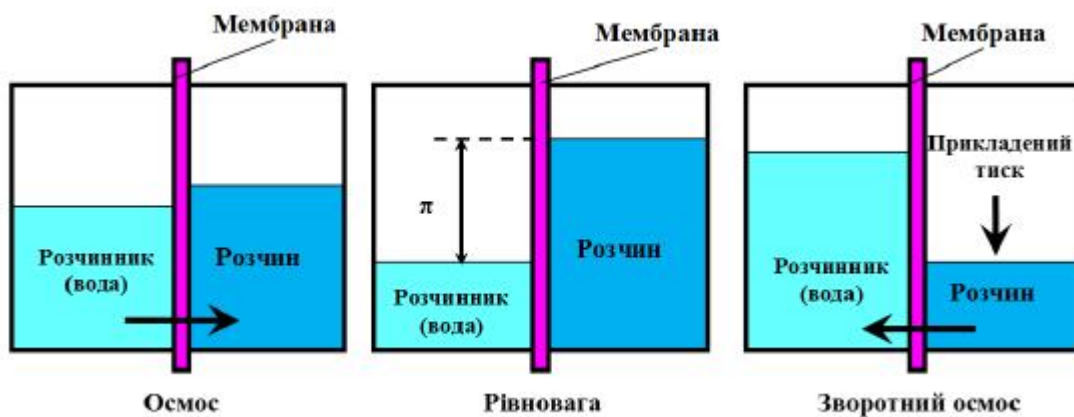


Рисунок 8.10 – Схема процесів осмосу та зворотного осмосу

Рушійною силою процесу зворотного осмосу є різниця прикладеного (робочого) тиску води й різниці осмотичних тисків вихідної води та перміату:

$$\Delta P = P - (\pi_1 - \pi_2) = P - \Delta \pi, \quad (8.5)$$

де P – робочий тиск води, яку очищують, Па;

π_1 – осмотичний тиск води, яку очищують, Па;

π_2 – осмотичний тиск фільтрату, Па.

Основними характеристиками мембран є продуктивність і селективність. Продуктивність (флакс) – питоме знімання перміату з одиниці поверхні мембрани [9, 11]:

$$J_w = \frac{\Delta q}{S \cdot \Delta \tau} = K_w \cdot \Delta P, \quad (8.6)$$

де J_w – потік води через мембрану;

Δq – осмотичний тиск води, яку очищують;

K_w – константа проникності, яка враховує всі фактори, що впливають на процес;

ΔP – різниця тисків відповідно рівнянню (8.5).

Селективність показує ступінь затримання мембраною розчинених домішок:

$$R = 1 - \frac{C_{perm}}{C_{in}} . \quad (8.7)$$

де R – потік води через мембрану;

C_{perm} – концентрація домішок у потоці перміату;

C_{in} – концентрація домішок у потоці води, що очищують.

Крім того важливим є вихід за перміатом (конверсія, гідравлічний ККД, відновлення системи):

$$a_{perm} = \frac{Q_{perm}}{Q_{in}} = \frac{Q_{perm}}{Q_{conc} - Q_{perm}} . \quad (8.8)$$

де a_{perm} – потік води через мембрану;

Q_{in} , Q_{perm} , Q_{conc} – об'ємні потоки води, що очищують, перміату та концентрату відповідно.

Продуктивність і селективність залежать не тільки від самої мембрани, але й від параметрів процесу розподілу:

- тиску;
- температури;
- відновлення;
- солемісту вихідної води.

У разі збільшення робочого тиску питома продуктивність мембран лінійно зростає відповідно до формули, а селективність зростає завдяки тому, що дифузійне перенесення іонів від тиску не залежить, тоді як через мембрану проходить більше розчинника.

З підвищенням температури підвищується рухливість іонів і молекул, що забезпечує зростання питомої продуктивності мембрани за одночасного зниження її селективності.

У випадку збільшення солемісту вихідної води зростає осмотичний тиск вихідного розчину та значно меншою мірою – осмотичний тиск перміату, що призводить до зниження питомої продуктивності мембрани. Також знижується селективність мембрани через зростання дифузійного потоку пропорційно вихідній концентрації.

Підвищення конверсії призводить до збільшення середньої концентрації розчинених речовин, підсилює виразність концентраційної поляризації, через що особливо підвищується концентрація солей над поверхнею мембрани. Усе призводить до падіння як селективності, так і питомої продуктивності.

Збільшення конверсії можливо лише до певної межі, поки значення осмотичного тиску концентрату через збільшення його солемісту не наблизиться до тиску живильної води. Тоді процес перенесення розчинника припиняється.

Крім того можливе досягнення концентрацій малорозчинних солей межі розчинення, що призведе до масового забруднення мембран відкладеннями.

Концентраційна поляризація – це зростання концентрацій розчинених речовин у тонкому примембранному шарі порівняно з концентрацією в об'ємі води, яку очищують, внаслідок інтенсивного масоперенесення розчинника через мембрану.

Негативний вплив концентраційної поляризації на ефективність баромембранних процесів такий:

1. Пропорційно зростанню концентрації розчинених домішок у тонкому примембранному шарі зростає та осмотичний тиск розчину, що знижує значення різниці тисків – рушійної сили процесу.

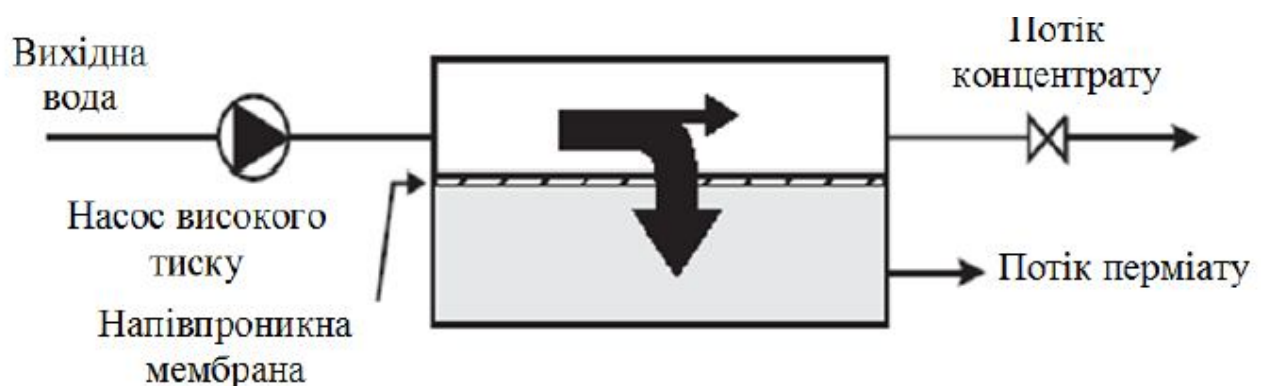
2. Зростання концентрації солей близько поверхні мембрани призводить до виникнення перенасиченого розчину, в якому й починається утворення нерозчинних відкладень.

Використання рулонних мембранних елементів нанофільтрації та зворотного осмосу, на відміну від мембранних елементів мікрофільтрації та ультрафільтрації, вимагає розміщення елементів у спеціальних корпусах –

мембранотримачах. Призначення мембранотримачів – забезпечення підведення вихідної води й відведення перміату та концентрату крізь відповідні штуцери, а також утворення тиску вихідної води, який забезпечує рушійну силу процесу.

Мембранотримачі розрізняють за типорозміром мембранних елементів, що використовуються, за кількістю мембранних елементів (від 1 до 7) за матеріалом (скловолокно, ПВХ, сталь) та за типом підключення.

Мембранний елемент у мембранотримачі є основною частиною системи зворотного осмосу або нанофільтрації. Схематичне зображення найпростішої системи наведено на рисунку 8.11 [10, 11].



Рисунку 8.11 – Принципова схема системи зворотного осмосу й нанофільтрації

Така схема організації процесу має невисокі значення виходу за перміатом. Так, виробниками допускається конверсія 15...19 % на мембранному елементі. Однак таку схему використовують у побутових системах очищення питної води, а також у деяких випадках для опріснення морських вод.

Значно раціональнішою є схема з рециклом концентрату, яка забезпечує значно вищі значення конверсії – в середньому 75 %. Таку схему наведено на рисунку 8.12.



Рисунок 8.12 – Принципова схема системи зворотного осмосу й нанофільтрації з рециклом концентрату

Крім того, поширені багатостадійні схеми, що працюють за концентратом і перміатом. У цьому випадку система зворотного осмосу умовно поділена на дві стадії. У разі схеми, що працює за концентратом, концентрат першої стадії подають на очищення на другу стадію, а потоки перміату двох стадій об'єднують і направляють споживачу. Таку схему використовують у разі порівняно високої якості води, яку очищують.

Багатостадійні схеми, які працюють за перміатом, використовують для одержання глибоко знесоленої води. У цьому випадку перша стадія працює за схемою з рециклом, перміат першої стадії подається на очищення на другу стадію, а потік концентрату другої стадії може подаватися як рецикл перед першою стадією зворотного осмосу (рис. 8.3) або зливатися в каналізацію.

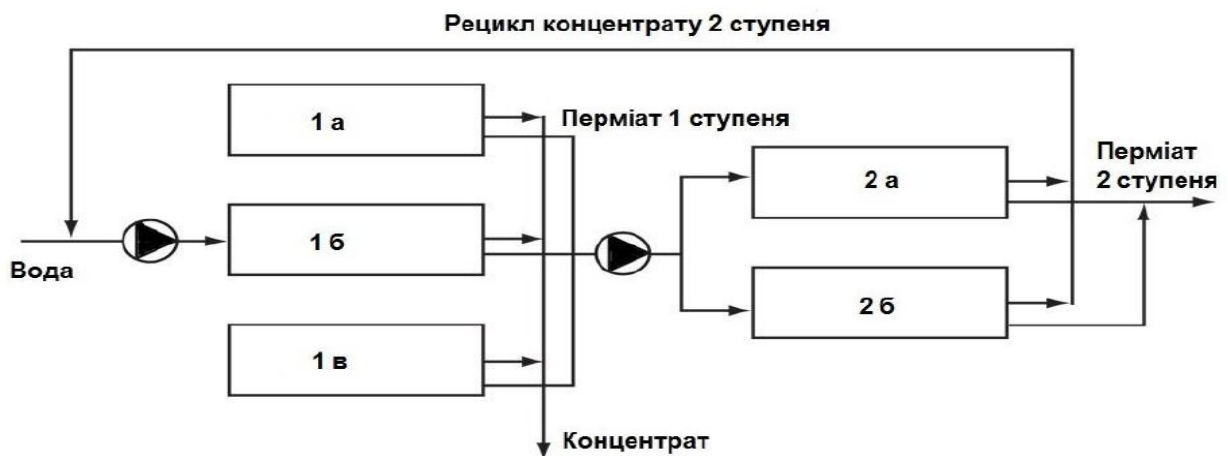


Рисунок 8.13 – Принципова схема установки зворотного осмосу з двома ступенями знесолення

1 – мембранні елементи 1 ступеня; 2 – мембранні елементи 2 ступеня

Сфера використання технологій зворотного осмосу й нанофільтрації надзвичайно широка та включає таке:

- підготовки питної води із води різного складу;
- доочищення питної води в побутових фільтрах;
- підготовки води для харчових виробництв, виробництв безалкогольних та алкогольних напоїв;
- підготовки води для парових котлів різної продуктивності;
- одержання глибокознесоленої води для потреб різних галузей промисловості – енергетики, мікроелектроніки; фармацевтичних виробництв;
- опріснення морської води для одержання питної води або води для технологічного використання.

8.4 Дифузійномембранні процеси. Діаліз

До дифузійномембранних процесів, рушійною силою яких є градієнт концентрацій розчинених речовин по обидві сторони мембрани, належать діаліз і мембранна дегазація.

Діаліз відбувається з використанням непористих (дифузійних) мембран і застосовується для розділення речовин, що значно відрізняються за молекулярною масою (наприклад, розчини полімерів очищають від низькомолекулярних електролітів та інших з'єднань).

Мембрана розділяє розчин певної речовини та розчинник (рис. 8.14) [11].

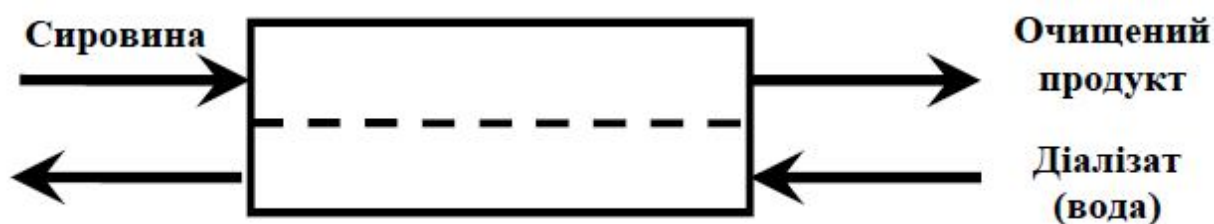


Рисунок 8.14 – Принципова схема діалізу

Обидва потоки прокачують уздовж мембрани зазвичай протитечією, хоча є спосіб здійснення діалізу, коли вихідний розчин залишається нерухомим (наприклад, мішечний діаліз).

Основне застосування діалізу – очищення крові від низькомолекулярних токсинів – сечовини, фосфатів, креатиніну тощо. Процес називається гемодіаліз, або штучна нирка. Зрозуміло, що найважливішою обставиною є сумісність крові та матеріалу мембрани. Крім того, необхідно загальмувати осмотичне перенесення, для чого в діалізат вводять ті самі солі, які знаходяться в крові, отримуючи так званий фізіологічний розчин.

Недолік методу – його низька продуктивність і великі об'єми розчинника, які багаторазово замінюються з одного боку мембрани. Діаліз раціонально використовувати в технологічних процесах після ультра- або мікрофільтраційного концентрування розчинів високомолекулярних сполук або колоїдів.

8.5 Електроємбранні процеси. Електродіаліз

Рушійною силою електроємбранних процесів є градієнт електричного потенціалу. Електроємбранні процеси поділяють на електродіаліз, електродеіонізацію та мембранний електроліз. Мембранний електроліз використовують для виробництва хлору та натрію гідроксиду, тому він тут розглядатися не буде.

Сутність методу полягає у використанні спрямованого руху іонів під дією електричного поля. Якщо до електродів прикласти напругу, то іони, які знаходяться у розчині, почнуть рухатися відповідно зі знаком їх заряду – негативно заряджені (аніони) до аноду, позитивні (катіони) – до катоду. Якщо розділити електролізер на три відділення, в двох крайніх розмістити електроди (відділення називають електродними камерами) і пропускати електричний струм, то концентрація солей в електродних камерах буде зростати, а в середньому відділенні – зменшуватися (рис. 8.15, 8.16).

Для розділення камер такого електролізера-діалізатора використовують іонообмінні мембрани, які мають здатність селективно пропускати іони одного знаку й перешкоджати руху протилежно заряджених іонів.

Перенесення струму в мембрані здійснюється незакріпленими в матриці іонами – протиіонами. Чим більша кількість рухомих іонів, тобто вище обмінна ємність, тим більше електропровідність мембрани [6, 10, 11].

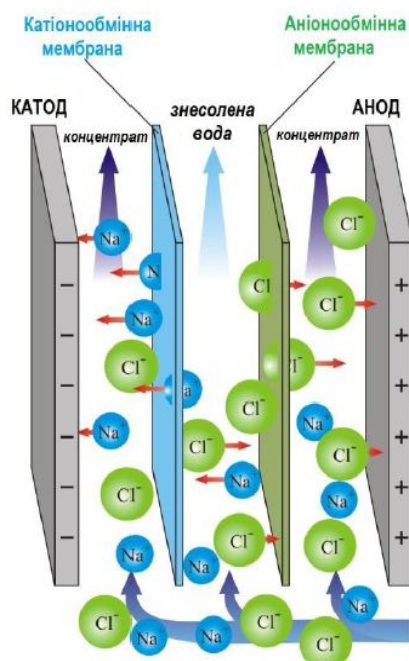


Рисунок 8.15 – Схема зміни концентрації розчинів у електродіалізаторі

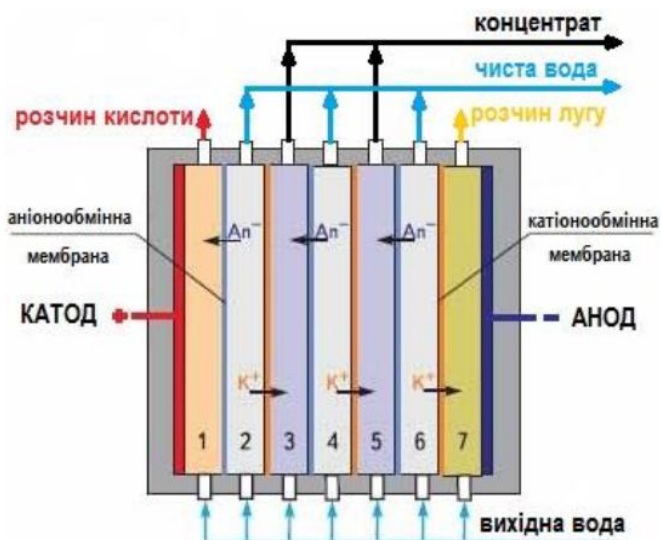
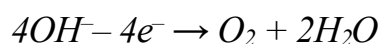
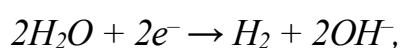


Рисунок 8.16 – Схема роботи електродіалізаційної установки

Основні електрохімічні характеристики мембран – селективна проникність і електропровідність, які визначаються кількістю іонообмінних груп у матриці та їхнім походженням.

Для підтримання електричного струму в ланцюзі на електродах повинні проходити електрохімічні реакції – на катоді переважно виділення водню, на аноді – виділення кисню [11]:



Відповідно до рівнянь реакцій розчин у анодній камері буде підкислюватися, в катодній камері буде утворюватися луг.

Сьогодні використовують багатокамерні електролізери з великою кількістю пар катіоно- й аніонообмінних мембран. Такі установки є електролізерами, що складаються з 100...200 гідравлічних камер, які можуть бути з'єднані послідовно або паралельно з горизонтальною або вертикальною

циркуляцією води. Селективність мембран створює умови, за яких із непарних камер ні катіони, ні аніони не можуть пройти в сусідні камери, внаслідок того, що знак їх заряду збігається зі знаком відповідно катіонообмінних і аніонообмінних мембран. Тому в парних камерах відбувається процес опріснення, а в непарних, навпаки, концентрація солей, унаслідок чого в камерах утворюється розсіл (концентрат). Знесолену воду й концентрований розчин відводять відповідними трубопроводами. Лужний розчин із катодної камери та кислий розчин з анодної камери можна відводити самостійно окремими лініями для подальшого використання або ж, якщо такої необхідності немає, приєднувати до лінії розсолу.

В електродіалізаторах застосовуються хімічно стійкі електроди з платинованого титану, ОРТА (оксидно-рутенієві титанові аноди), рідше – з неіржавної сталі або графіту.

Недоліком методу електродіалізу є необхідність попереднього очищення води від завислих і колоїдних частинок, які можуть засмічувати іонообмінні мембрани.

У реальних умовах мембрани не мають ідеальної селективності й частково переносять іони обох зарядів.

Крім селективності, іонообмінна мембрана повинна мати загальні властивості: високу електропровідність, хімічну та механічну стійкість в окисних середовищах, стабільність характеристик, великий термін служби.

Щільність струму в електродіалізаторі становить $0,2 \dots 1,0$ А/м². Чим більша щільність струму, тим більші витрати електроенергії. У разі різкого збільшення щільності струму може початися перегрівання й навіть пропалення мембран. Допускають максимальну температуру нагрівання не більше 60 °С.

Найдосконаліші мембрани виробляють сьогодні японські фірми «Асахі кемікал» та «Асахі глас» на основі перфторвуглецевих матеріалів із групою – COOH як іоногенною групою, а також фірма «Дюпон» (США).

Електродіаліз отримав дуже широкий розвиток як процес знесолення, опріснення морської води без витрат реагентів на регенерацію іонітів, а також

одержання концентратів солей, чистих лугів і кислот. До сих пір процес електродіалізу є конкурентом зворотного осмосу, хоча кожен з них може зайняти певну нішу.

Електродеіонізація. Електродеіонізація – процес безперервної демінералізації води з одночасним використанням іонообмінних смол, іонселективних мембран і постійного електричного поля. Основною рушійною силою процесу є різниця електричних потенціалів по обидві сторони міжмембранного каналу, заповненого іонообмінною смолою. Різниця електричних потенціалів забезпечує перенесення іонів через іонселективні мембрани та здійснює необхідну безперервну регенерацію іоніту.

Процес безперервної електродеіонізації включає три стадії, що відбуваються одночасно:

1) іонний обмін, у процесі якого іони солей, кислот і основ, розчинених у воді, проходять через шари іонообмінних смол та сорбуються на зернах катіоніту й аніоніту;

2) безперервне відведення іонів через шари іонітів і іонселективні мембрани в зону утворення концентрату;

3) безперервна регенерація іоніту іонами гідрогену й гідроксид-іонами, одержаними в процесі електролізу молекул води під впливом постійного електричного струму.

Для реалізації зазначених процесів використовують спеціальні модулі ЕДІ. У таких модулях є два типи проточних каналів: канал демінералізації (D-канал) – канал або камера фільтрату та канали або камери концентрату (C-канали).

Один D-канал, одна катіонітна мембрана, один C-канал і одна аніонітна мембрана разом утворюють ЕДІ-осередок.

ЕДІ-модуль є збіркою ЕДІ-осередків, які працюють паралельно (рис. 8.17) [11].

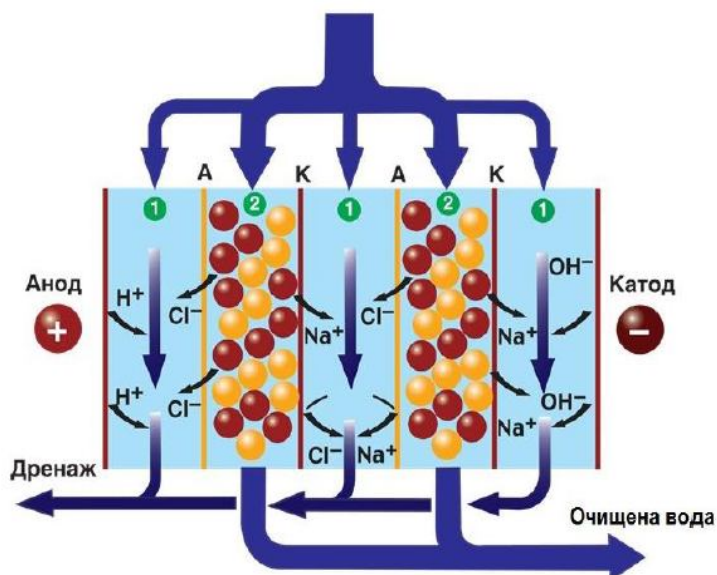


Рисунок 8.17 – Схема електродеіонізаційної установки

Вихідна вода надходить у D-канали, заповнені сумішшю катіоніту й аніоніту, які сорбують розчинені катіони й аніони та обмінюють їх на іони гідрогену та гідроксид-іони. На виході з D-каналу виходить глибоко демінералізована вода.

Під дією електричного струму катіони з катіонообмінної смоли й аніони з аніонообмінної смоли рухаються через частинки іонітів, що стикаються, в напрямку відповідних електродів. Іони, які пройшли крізь відповідні мембрани, потрапляють в С-канали, в яких організується постійний протік води, звідки вони у вигляді концентрату виводяться з модуля. На практиці найчастіше застосовують рулонні ЕДІ-елементи, но є також плоскорамні ЕДІ-елементи. Ступінь очищення залежить від солемісту вихідної води й може досягати 99,9 %. На відміну від іонообмінної технології демінералізації води електродеіонізація є безреагентною технологією, тому вважається найперспективнішою у виробництві ультрачистої води.

Запитання до розділу 8

1. Класифікація мембранних процесів залежно від рушійної сили.
2. Які процеси належать до баромембранних?
3. Вкажіть сфери застосування мембранних методів підготовки води.
4. Назвіть основні властивості та характеристики мембран.
5. У чому полягає відмінність механізму тупикової фільтрації від тангенціальної?
6. Назвіть основні матеріали, з яких виготовляють сучасні мембрани.
7. Сформулюйте переваги мікро- та ультрафільтрації як технології водопідготовки перед традиційною фільтрацією.
8. Вкажіть види мікро- та ультрафільтрації залежно від способу організації процесу та забезпечення рушійної сили процесу.
9. Поясніть схематично явище осмосу, зворотного осмосу.
10. Дайте характеристику таким показникам, як продуктивність та селективність мембран.
11. Що таке концентраційна поляризація?
12. Вкажіть основні схеми організації процесів зворотного осмосу та нанофільтрації.
13. Що прийнято називати фоулінгом мембран?
14. Що є рушійною силою дифузійномембранних процесів? Їх класифікація.
15. Сутність та область застосування мембранної дегазації та діалізу.
16. Що є рушійною силою термомембранних процесів?
17. Мембрана дистиляція: сутність та сфера застосування.
18. Класифікація та рушійна сила електромембранних процесів.
19. Електродіаліз та електродеіонізація: сутність, сфера застосування, апарати для здійснення.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Запольський А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води / А. К. Запольський. – Київ : Вища школа, 2005. – 671 с.
2. Фрог Б. Н. Водоподготовка / Б. Н. Фрог, А. П. Левченко. – М. : Изд-во МГУ, 1996. – 680 с.
3. Кравченко В. С. Водопостачання та каналізація / В. С. Кравченко. – Київ : Кондор, 2003. – 288 с.
4. Водоподготовка : справочник / Под ред. д.т.н. С. Е. Беликова. – М. : Аква-Терм, 2007. – 240 с.
5. Процессы и аппараты водоподготовки / А. А. Громогласов, А. С. Копылов, А. П. Пильщиков ; [под ред. О. И. Мартыновой]. – М : Энергоиздат, 1990. – 272 с.
6. Водопостачання : навч. посібник / А. Я. Найманов, С. Б. Никиша, Н. Г. Насонкина та ін. – Донецьк : Норд-комп'ютер, 2006. – 654 с.
7. Рябчиков Б. Е. Оборудование для ионного обмена / Б. Е. Рябчиков, Е. И. Захаров. – М. : ЦНИИТЕИ цветной металлургии, 1974. – 63 с.
8. Кишневський В. А. Сучасні методи обробки води в енергетиці : [навч. посібник для студентів спеціальностей «Теплоенергетика», «Атомна енергетика» та експлуатаційного персоналу ТЕС и АЕС] / В. А. Кишневський. – Одеса : ОГПУ, 1999. – 196 с.
9. Орлов В. О. Водопостачання промислових підприємств : навч. посібник / В. О. Орлов, Л. Л. Литвиненко, А. М. Орлова. – Київ : Знання, 2014. – 278 с.
10. Чуб І. М. Масообмінні процеси водопідготовки : навч. посібник / І. М. Чуб ; Харків. нац. ун-т міськ. гос-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 161 с.
11. Іванченко Л. В. Хімія і технологія води : навч. посібник / Л. В. Іванченко, В. Я. Кожухар, В. В. Брем. – Одеса : Екологія, 2017. – 208 с.

Навчальне видання

ЧУБ Ірина Миколаївна,
ТКАЧОВ В'ячеслав Олександрович

**ВОДОПІДГОТОВКА В СИСТЕМАХ ТЕПЛОГАЗОПОСТАЧАННЯ
І ВЕНТИЛЯЦІЇ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності
192 – Будівництво та цивільна інженерія усіх форм навчання)*

Відповідальний за випуск *Г. І. Благодарна*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. М. Чуб*

План 2020, поз. 44 Л

Підп. до друку 18.10.2021. Формат 60 × 84/16.
Електронне видання. Ум. друк. арк. 6,7.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.